

Metamateriales con índice de refracción negativo: una nueva frontera en Electromagnetismo

José Represa, Ana Grande, Ismael Barba y Ana López

Departamento de Electricidad y Electrónica. Universidad de Valladolid
Grupo de Electromagnetismo Computacional

Los metamateriales son una clase de medios estructurados artificiales que presentan propiedades electromagnéticas no encontradas en ningún medio natural. Su comportamiento es una propiedad “emergente” de la estructura en sí, más que de sus constituyentes elementales. El prefijo griego “meta” indica su característica de ir “más allá” de lo conocido hasta el presente. Aunque no hay un acuerdo general en qué tipo de materiales abarca el término, dada la variedad de los mismos, nosotros nos centraremos en una clase conocida como “materiales zurdos” (Left-Handed, LH), “doblemente negativos” (DNG) o, simplemente, de “índice de refracción negativo” (NRI). En ellos es posible la propagación de ondas electromagnéticas pero, a diferencia de los medios ordinarios, aparecen fenómenos inusuales tales como ondas regresivas, refracción negativa o efecto Doppler inverso. En el artículo presentaremos las ideas básicas de la propagación y la estructura de tales medios, así como las principales y más llamativas consecuencias.

Introducción

En 1968 Victor Veselago, un físico de la antigua Unión Soviética, examinó la posibilidad de propagación de ondas electromagnéticas en un medio material que tuviera, simultáneamente, permitividad eléctrica ϵ y permeabilidad magnética μ negativas [1]. Aunque era consciente de que tal tipo de medios no se había encontrado en la naturaleza, se planteó la posibilidad de realizarlos físicamente pues, como ya era sabido, el comportamiento de la permitividad y permeabilidad varía con la frecuencia (fenómeno llamado dispersión) pudiéndose alcanzar valores negativos en algunos márgenes de frecuencia. El inconveniente es que para ningún medio natural conocido se tienen esos valores negativos simultáneamente para ϵ y μ en los mismos intervalos de frecuencia. Su

trabajo deduce, entre otros resultados, una velocidad de fase negativa (de sentido contrario a la propagación de la energía, dado por el vector de Poynting, como exige el principio de causalidad), un índice de refracción negativo y una impedancia de onda positiva. De ahí derivan fenómenos sorprendentes y nuevas posibilidades de aplicación, unas “futuristas”, como las capas de invisibilidad, otras que ya son realidad en sistemas y circuitos de microondas (por ejemplo, antenas en teléfonos móviles).

Estructura de los metamateriales

Más de treinta años después, David Smith y sus colaboradores de la Universidad de California en San Diego, idearon una estructura periódica formada por “resonadores de anillo partido” (Split-Ring Resonators, SRR) y postes metálicos que presentaban las características exigidas en el trabajo de Veselago [2] (Figura 1). Para

ello se basaron en trabajos anteriores de Sir John Pendry, del Imperial College de Londres, a propósito de estructuras metálicas que tenían permitividades o permeabilidades negativas en algún intervalo de frecuencias [3, 4] (Figura 2). En el fondo, la idea subyacente era imitar a la propia naturaleza y la forma en que “construye” su estructura macroscópica a base de “celdas elementales” o moléculas, para conseguir determinadas propiedades (Figura 3).



Figura 1. Estructura periódica, a base de SRRs y postes metálicos, propuesta por Smith *et al.* que se comporta como un medio LH a 5 GHz.

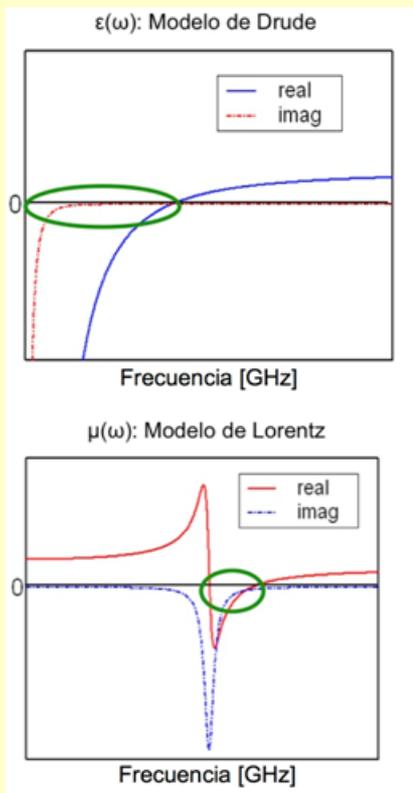


Figura 2. Los postes metálicos proporcionan la permitividad negativa, según el modelo de Drude (arriba). Los resonadores de anillo partido (SRR) la permeabilidad negativa, de acuerdo con el modelo de Lorentz (abajo).

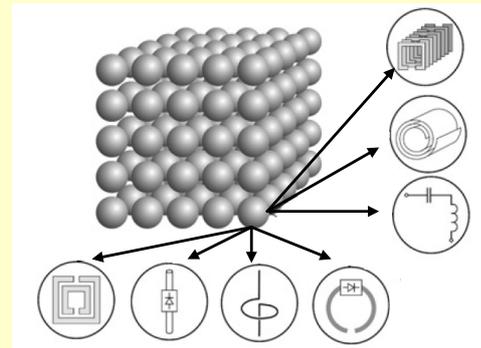


Figura 3. Concepto de metamaterial y “metapartícula”. Las metapartículas, cuyos tamaños son del orden de la longitud de onda, pueden contener elementos muy diversos que dotan a la estructura de sus propiedades macroscópicas: anillos, hilos e incluso semiconductores.

Fundamentos

La propagación de ondas electromagnéticas en un medio no conductor se rige por la conocida ecuación de ondas:

$$\nabla^2 \phi - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

en la que ϕ es cualquier componente del campo eléctrico \mathbf{E} o del campo magnético \mathbf{H} . Para que la solución sea una onda propagante se requiere que el producto $\epsilon\mu$ sea positivo. De no ser así, la solución a (1) es un campo atenuado exponencialmente, a medida que penetra en el medio. Es el caso de los plasmas o las ferritas magnetizadas, que tienen uno de los dos parámetros negativos (medios simplemente negativos, SNG). Los medios usuales, que tienen los dos parámetros positivos (medios diestros o Right-Handed, RH), son los que encontramos en la naturaleza y en ellos se produce la propagación de ondas que conocemos habitualmente. Nada impide, teóricamente, una combinación ϵ y μ negativos: su producto sigue siendo positivo y, por tanto, el medio sigue siendo transparente. Podemos ver todo ello resumido en un diagrama μ - ϵ (Figura 4).

Aparentemente, la solución para medios RH y LH sería la misma pero no olvidemos que (1) se deduce de las ecuaciones de Maxwell, especialmente las ecuaciones rotacionales que, en ausencia de fuentes, podemos escribir como:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

y que en régimen armónico estacionario son:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -j\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= j\omega\epsilon\vec{E} \end{aligned} \quad (3)$$

como consecuencia, para la constante de propagación $k = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$ ha de escogerse el signo negativo de la raíz cuadrada, lo que significa que el vector de onda es antiparalelo al vector de Poynting $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ que indica el avance de la energía (Figura 5). Por otra parte, la impedancia de onda $\eta = E/H = \sqrt{\mu/\epsilon}$ es positiva, como en el medio RH. El índice de refracción $n = \sqrt{\epsilon\mu}/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ es, igualmente, negativo.

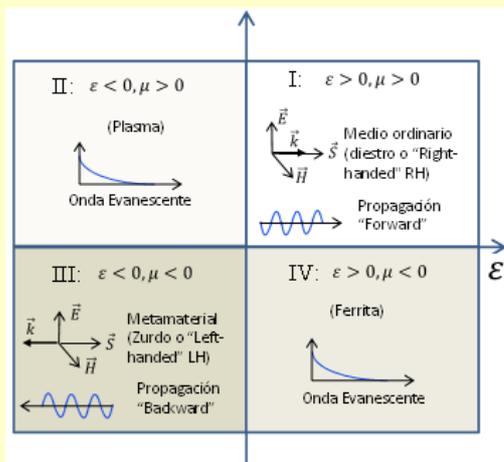


Figura 4. Diagrama μ - ϵ con distintas propiedades de propagación

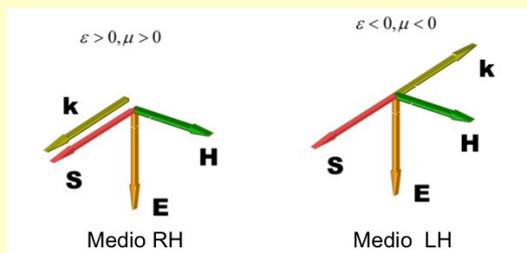


Figura 5. Vectores de campo, de onda y de Poynting en medios RH y LH.

Algunas consecuencias

De lo anteriormente visto surgen fenómenos no habituales:

1. La fase de la onda viaja "hacia atrás" (onda backward), al contrario que la energía. En la Figura 6 vemos dos instantáneas de una onda armónica que viaja desde el aire a un metamaterial. Se observa como la fase de la onda en el metamaterial se propaga hacia la izquierda a medida que transcurre el tiempo, al contrario de lo que sucede en el aire.

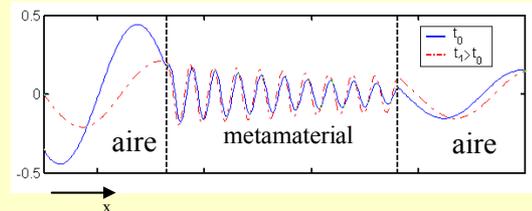


Figura 6. Propagación "backward": el flujo de potencia en la lámina de metamaterial es hacia adelante, mientras que el frente de onda viaja hacia atrás.

2. El efecto Doppler (desplazamiento al rojo de una fuente que se aleja del observador), la radiación de Cerenkov (onda de choque que emite una partícula cargada viajando con una velocidad superior a la de la luz en un medio material) y el desplazamiento Goos-Hänchen (desplazamiento producido en la reflexión total para ondas polarizadas linealmente) se producen al revés que en los medios ordinarios. En la Figura 7 vemos el desplazamiento producido para un haz gaussiano que incide en una interfaz, bajo condiciones de reflexión total, tanto para medios ordinarios como para medios con índice de refracción negativos.

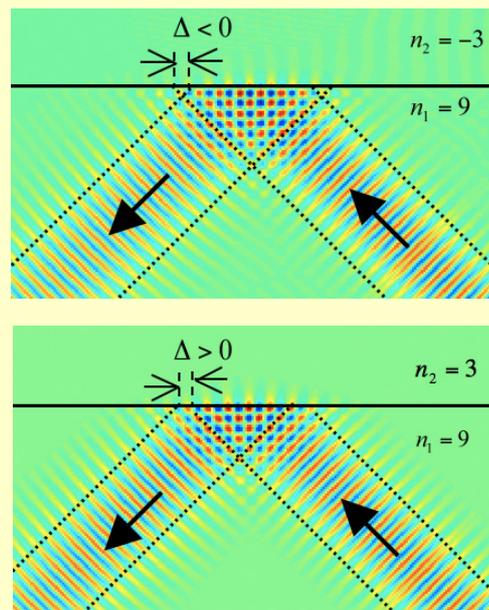


Figura 7. Efecto Goos-Hänchen en la reflexión total entre dos medios RH (abajo) y una interfaz RH/LH (arriba)

3. La ley de Snell de la refracción sigue siendo válida, pues no es más que una consecuencia de las condiciones de contorno sobre los campos eléctrico y magnético.

$$n_1 \sin \theta_{inc} = n_2 \sin \theta_{ref} \quad (4)$$

Si uno de los dos índices de refracción es negativo, el ángulo de refracción también lo es, lo que significa que el rayo transmitido está al otro lado de la normal, por comparación a la refracción en medios ordinarios. En la Figura 8 observamos la transmisión de un haz gaussiano a través de una lámina de metamaterial. Las dos refracciones (entrada y salida) se producen con ángulo negativo. Como consecuencia, una lente “divergente” hecha con un material LH haría converger la luz y una lente “convergente” separaría los rayos.

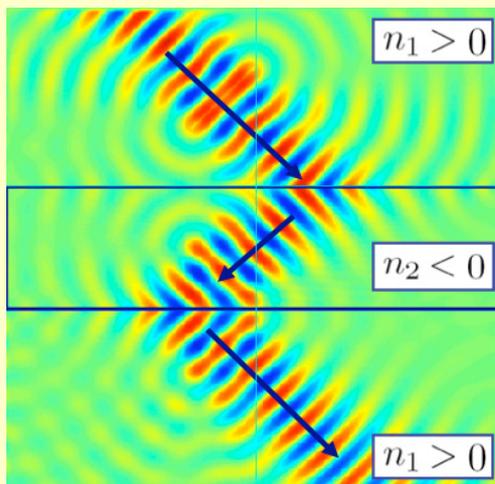


Figura 8. Refracción negativa en una lámina de metamaterial. En este caso se han tomado los índices de refracción iguales en valor absoluto. El ángulo de refracción es igual al de incidencia pero hacia el otro lado de la normal.

4. Sería posible construir una lente plana (lente de Pendry o lente perfecta [5]) que, teóricamente, supera el límite de resolución debido a la difracción (Figura 9).

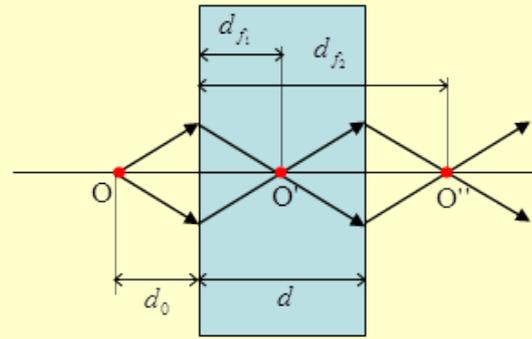


Figura 9. Lente plana: una lámina de metamaterial (en este caso con $n = -1$) enfoca los rayos de una fuente en dos puntos, uno interno y otro externo.

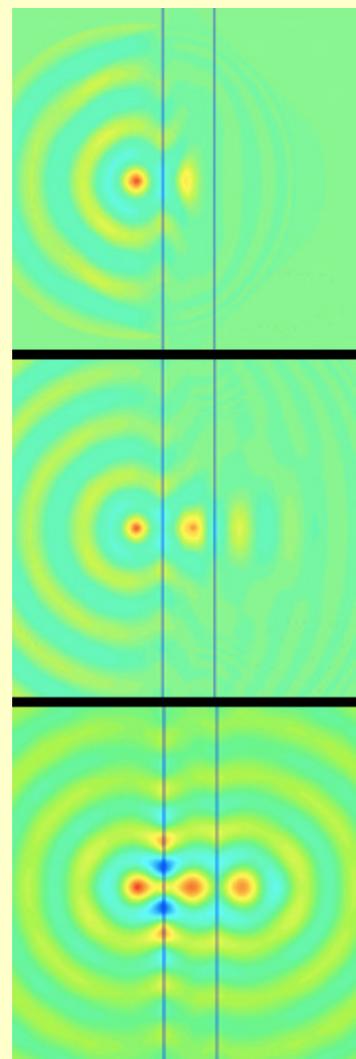


Figura 10. Lente plana (Pendry): Simulación del enfoque de una fuente puntual. Se recogen tres instantes sucesivos.

5. Otra sugestiva posibilidad es la construcción de “capas de invisibilidad” que desvían la luz en torno a un objeto

permitiendo ver lo que hay detrás de él [6]. De esta forma, un observador detrás de la capa de invisibilidad recibiría los rayos (o el frente de onda) tal como lo generó la fuente. Es decir, estaría viendo lo que hay del otro lado de la capa, apareciendo esta como “transparente”. En la figura 11 vemos, por un lado la marcha del frente de ondas a través de la capa y, por otro, una realización práctica, a frecuencias de microondas, con una estructura LH a base de resonadores de anillo partido.

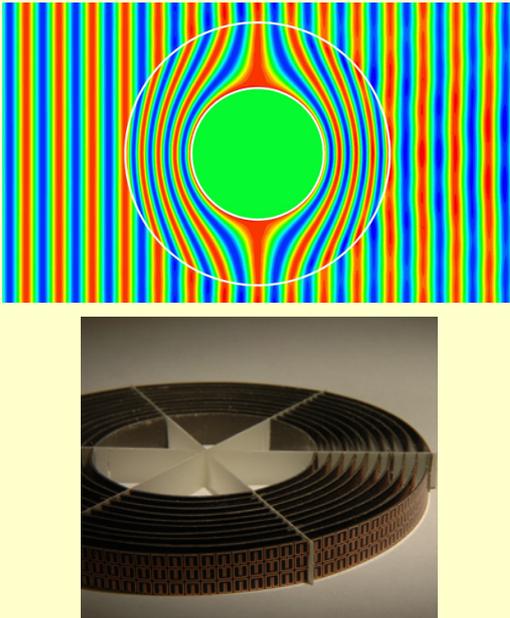


Figura 11. Capa de invisibilidad: Arriba, marcha del frente de ondas. Abajo, dispositivo propuesto en la Universidad de Duke.

No todo son buenas noticias: los metamateriales son intrínsecamente dispersivos, como requiere el principio de conservación de la energía. Eso significa que tienen asociadas pérdidas (en términos de las “metapartículas”, significa que tenemos pérdidas óhmicas en los conductores metálicos que forman los SRRs y los postes) lo que modifica más o menos significativamente las características ideales y su aplicabilidad. Por otro lado, las propiedades del medio artificial son fuertemente dependientes de la frecuencia y, por lo tanto, su comportamiento como medio LH está limitado a una banda de frecuencias más o menos estrecha. Resumiendo: nuestra capa de invisibilidad absorbería parte de la luz, produciendo una cierta cantidad de sombra y el objeto no sería invisible a todas las frecuencias (por ejemplo, pudiera ser invisible al radar pero no al infrarrojo)

Señalemos que todas las imágenes de los fenómenos que presentamos proceden de

simulaciones numéricas desarrolladas por nuestro grupo. Están basadas en una técnica numérica conocida como de “Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo” (FDTD por sus siglas en inglés) que hemos extendido para permitir el tratamiento de la propagación de ondas electromagnéticas en este tipo de medios (ver, por ejemplo, [7]). Las simulaciones, originalmente dinámicas, permiten visualizar en tiempo real la propagación.

Retos y perspectivas

Son muchos los desafíos y oportunidades de aplicación que ofrecen los metamateriales. Por mencionar algunos de ellos, citemos:

1. Sintonizabilidad: como se ha dicho, las propiedades de índice de refracción negativo están limitadas a una pequeña banda de frecuencias. Sería deseable poder controlar esas frecuencias para poder realizar metamateriales “ágiles”. Se han propuesto diseños que permiten variar la frecuencia de trabajo mediante modificaciones de la geometría de la estructura (por ejemplo, desplazando unas capas del material respecto a otras). Otras alternativas incluyen la posibilidad de control electrónico incluyendo varactores (cuya capacidad se puede variar mediante la aplicación de una diferencia de potencial) o elementos ferroeléctricos o ferrimagnéticos (cuya permeabilidad puede controlarse con un campo magnético)
2. Inclusión de componentes no lineales a fin de producir dispositivos tales como generadores de armónicos, moduladores, etc.
3. Reducción de pérdidas: bien utilizando otro tipo de materiales para fabricar las “metapartículas”, bien con un diseño más eficiente de la geometría de los componentes metálicos, a fin de minimizar las pérdidas óhmicas en los conductores.
4. Inclusión de dispositivos activos (transistores, etc.) que permitirían la construcción de circuitos integrados de alta frecuencia.
5. Aumento de la frecuencia de operación de los metamateriales: Las primeras realizaciones trabajaban en frecuencias del orden de los gigahercios. Para ello, las inclusiones metálicas debían tener tamaños del orden de la longitud de onda, lo que no planteaba excesivos problemas a la hora de su fabricación.

Subir en frecuencia supone reducir ese tamaño, lo que obliga a utilizar técnicas de fabricación nanométricas. En la actualidad ya se dispone de metamateriales que funcionan en el rango de los terahercios y la tendencia es hacia alcanzar frecuencias ópticas para poder combinarlos con dispositivos fotónicos.

6. Finalmente, ser capaces de diseñar y fabricar metamateriales completamente tridimensionales que, a la vez, sean homogéneos e isotrópos. En la actualidad, los materiales 3D se realizan por acumulación de estructuras planares, basadas en SRRs. Estas estructuras son fuertemente anisótropas, es decir su respuesta depende de la dirección en la que sean atacados por los campos electromagnéticos.

Referencias

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," Soviet Physics Uspekhi., vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [2] D. R. Smith et al., "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, May 2000.
- [3] J. B. Pendry et al., "Low frequency plasmons in thin wire structures," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 10, pp. 4785–4809, 1998.
- [4] J. B. Pendry et al., "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2081, Nov. 1999.
- [5] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, pp. 3966–3969, Oct. 2000.
- [6] D. Schuring et al., "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science*, vol. 314, no. 5801, pp. 977–980. Nov. 2006.
- [7] A. Grande et al., "Educational computer simulations for visualizing and understanding the interaction of electromagnetic waves with metamaterials", *IEEE EDUCON Educational Engineering*, Apr. 2009.