

LOS MATERIALES ARTIFICIALES FABRICADOS A LA MEDIDA Y SU INTERACCIÓN CON LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

*Alfonso Lombana, Ph. D.**

Universidad Politécnica de Madrid

Desde hace unas décadas se construyen materiales artificiales a la medida para satisfacer los requerimientos exigidos por los dispositivos y elementos de la tecnología del siglo XXI. Estos materiales ofrecen, por ejemplo, magnetismo artificial y/o refracción negativa. Dadas sus características es necesario establecer principios físicos adaptables a ellos, como si se necesitase de una nueva física.

[**Palabras claves:** índice de refracción negativa, interacción de la luz con la materia, leyes de Maxwell.]

Introducción

A los materiales podríamos considerarlos así:

- Materiales tradicionales: siguen las leyes de Newton; son observables directamente por el ojo humano; son lineales o linealizados.
- Micromateriales y nanomateriales: plantean conceptos cuánticos; son observables solamente a través de microscopios de altas prestaciones; no son lineales; poseen un índice de refracción negativo.

- Metamateriales.
- Cristales fotónicos.
- Materiales orgánicos.

Desde el punto de vista electromagnético, la longitud de onda (λ)¹ determina si una colección de átomos u otros objetos puede considerarse un material. *Cualquier colección de objetos* cuyo tamaño y espaciado sean muchos menores que λ se caracterizan por (ϵ^2, μ); estos, a su vez, están determinados por las propiedades de dispersión³ de los objetos estructurados. En una colección de objetos no homogénea, para establecer la idoneidad de dicho material, no basta con analizar su comportamiento ante el paso de una onda electromagnética a través de la estructura. Desde el punto de vista electromagnético podemos crear, en otras condiciones y con otras propiedades físicas, un material artificial.

La ciencia de los materiales ha progresado sustancialmente con las investigaciones en el dominio molecular de la nanotecnología. Los arreglos *tradicionales* tienen un rango de características limitado y con ello determinan unas propiedades electromagnéticas también limitadas. Pero los materiales fabricados a la medida en los laboratorios, presentan características muy diferentes a las utilizadas, hasta ahora, en los materiales tradicionales extraídos de las minas (cobre, aluminio, etc.). Las propiedades

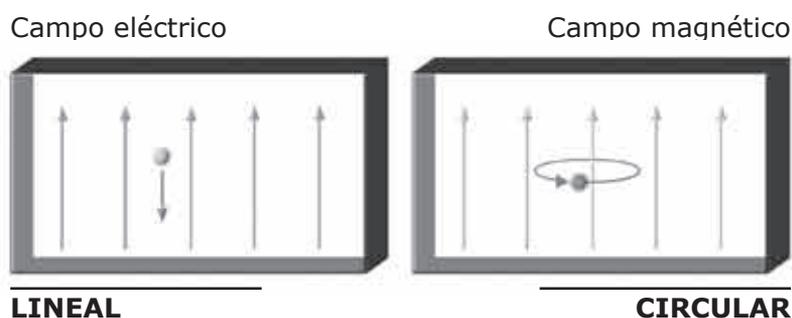
*Doctor en ciencias físicas de la Universidad de Toulouse, Francia. Miembro del comité de Electrónica de Colciencias, de la Sociedad Láser y Electro-óptica y de la Sociedad Internacional para la Ingeniería Óptica. Coordinador del proyecto de divulgación de la Nanotecnología y la Nanociencia para Iberoamérica (UPM-UD).

electromagnéticas dependen directamente de la constitución y arreglo particular de los átomos y moléculas que los constituyen. En los materiales fabricados a la medida, se diseñan estructuras muy delgadas y se forma con ellas un grupo o colectivo, con efectos muy diferentes a aquellos de las placas tradicionales de una sustancia.

Para clarificar lo anterior debemos analizar cómo interactúan los materiales y la luz; en otras palabras, qué ocurre cuando una onda electromagnética viaja o se desplaza a través de un material. Las moléculas y los átomos, dentro del material, experimentan una fuerza aplicada que hace mover los electrones. Este movimiento toma parte de la energía de la onda, con lo cual se determinan las propiedades de la misma y su manera de viajar. Los científicos pueden realizar un ajuste fino de las características de propagación de la onda, ajustando la composición del material para utilizarlo en una aplicación específica.

La nanoingeniería puede modificar la respuesta electromagnética diseñando estructuras muy delgadas; este diseño aprovecha que la longitud (λ) de una onda electromagnética típica y la distancia característica sobre la cual varía son varios órdenes de magnitud más grandes que los átomos o moléculas que constituyen el material. Así, puesto que la onda *no ve* una molécula individual sino la respuesta colectiva de los millones de moléculas, si diseñamos materiales cuyos elementos patrón son considerablemente más pequeños que la longitud de onda, dichos elementos serán invisibles para la onda electromagnética.

Figura 1. Materiales tradicionales

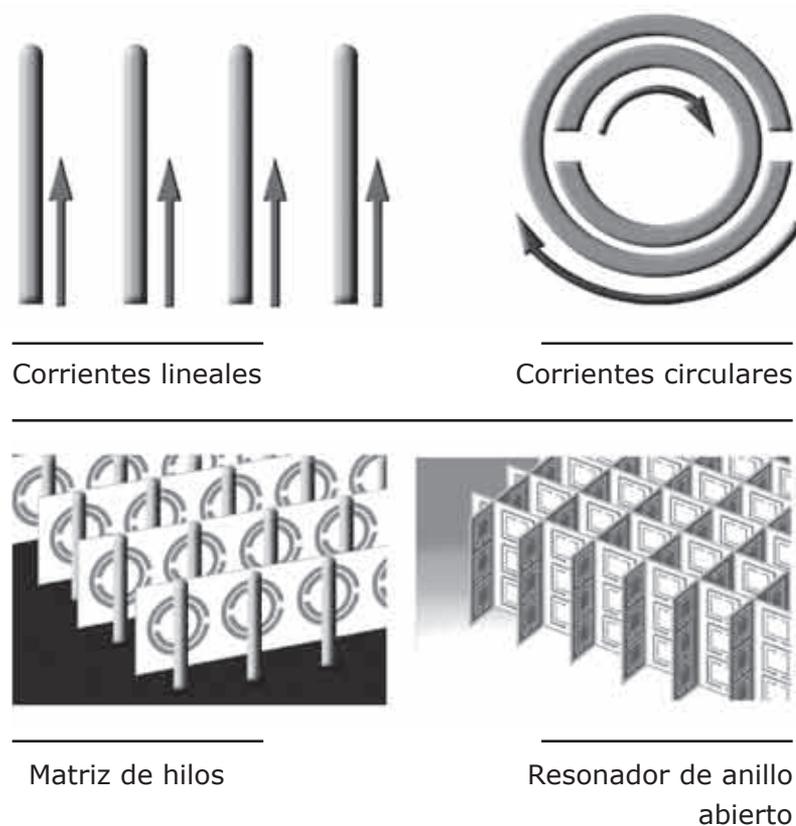


Nuestra onda electromagnética se describe con un campo eléctrico y un campo magnético, cada uno de los cuales induce un movimiento característico de los electrones en el material. Para el campo magnético en forma *circular*, y *lineal* para el campo eléctrico.

Para cuantificar las respuestas en el material utilizamos dos parámetros: la permitividad eléctrica (ϵ), que representa cuanto y cuál es la respuesta de los electrones

al campo eléctrico; mientras que para el campo magnético utilizamos la permeabilidad magnética (μ). Hasta ahora consideramos que los materiales utilizados tienen (ϵ) y (μ) positivos. Estos parámetros constituyen el índice de refracción (n) expresado por la raíz cuadrada de su producto (ϵ) (μ). Tradicionalmente, el índice de refracción se ha considerado positivo. El científico ruso Víctor Veselago estableció que si (ϵ), (μ) son simultáneamente negativos, el índice del material será también negativo. Un (ϵ) o (μ) negativo implica, *que en puntos cercanos a la resonancia* los electrones dentro del material se mueven en la dirección opuesta a la fuerza aplicada por los campos eléctrico y magnético.

Figura 2. Materiales artificiales



Este comportamiento parece paradójico, sin embargo, actualmente es posible diseñar materiales con índice de refracción negativo, en donde los electrones se desplazan fuera de fase y se oponen al empuje de los campos eléctrico y magnético. A los materiales con estas características se les denomina *metamateriales*. Esto se obtiene fabricando matrices de hilos y resonadores cuyas dimensiones son *menores que la longitud de onda (λ) de la señal con la cual interactúan*.

Respuesta negativa de los materiales artificiales

Es posible diseñar un material con un conjunto de cargas enlazadas armónicamente para que la **respuesta negativa a la resonancia se traslade directamente a una respuesta negativa del material**. En estas condiciones, una respuesta del material en la resonancia



nos lleva a valores negativos de (ϵ, μ) *alrededor de la frecuencia de resonancia*. Un material que tenga ya sea ϵ o μ negativo, cuando el otro es positivo es un material opaco a la radiación electromagnética. El nuevo concepto afirma que los materiales con permeabilidad y permitividad negativas son transparentes a la luz. Es necesario analizar el comportamiento de la propagación de las ondas electromagnéticas en los materiales cuando (ϵ, μ) son negativos.

Efecto sobre la velocidad de grupo

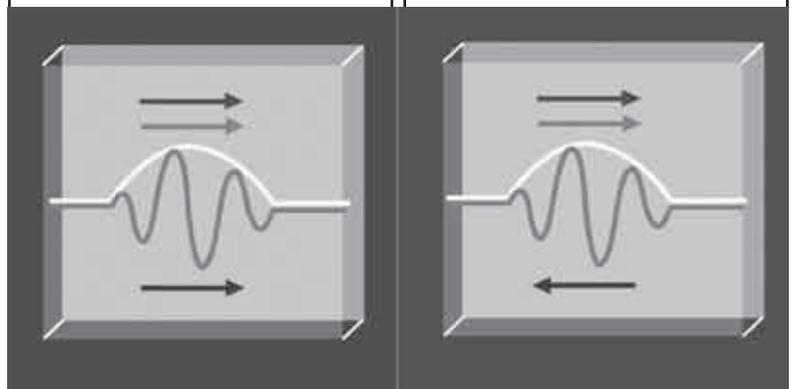
La *velocidad de grupo* caracteriza el flujo de energía, mientras que la *velocidad de fase* caracteriza el movimiento de los frentes de onda. En los materiales convencionales las velocidades de grupo y fase tienen el mismo sentido.

REFRINGENTE "POSITIVO"

La velocidad de grupo y la velocidad de fase tienen el mismo sentido al desplazarse. Equivale a que las crestas del impulso electromagnético viajan en la misma dirección que la envolvente del grupo y que la energía.

REFRINGENTE "NEGATIVO"

La velocidad de grupo y la velocidad de fase al desplazarse tienen sentido opuesto. Equivale a que las crestas del impulso electromagnético viajan en sentido opuesto con la envolvente del grupo y la energía.



En los materiales con permeabilidad y permitividad menores de cero, *las velocidades de grupo y fase toman direcciones opuestas*. Esta inversión en las velocidades de grupo y fase de un material dan origen a comportamientos muy diferentes a aquellos considerados en la propagación clásica de las ondas en los materiales.

Para comprender el comportamiento de la onda en estos materiales recordemos que la luz viaja en el vacío a su velocidad máxima de 300.000 km/seg. La velocidad de la luz en un material depende del índice de refracción de este último, entonces $V = c/n$. ¿Qué ocurre en los materiales artificiales cuando (n) es negativa?

Si consideramos que una onda tiene una velocidad de fase y una velocidad de grupo, por ejemplo, un pulso de luz que viaja a través de un medio puede presentar la forma del pulso y del rizado; la velocidad de fase es la velocidad de los rizados individuales, los cuales viajan en dirección opuesta a la forma del pulso y la energía. El riple individual del pulso viaja hacia atrás, aun cuando la forma del pulso viaja hacia adelante.

Como los detalles del pulso y el rizado son difíciles de definir, podríamos pensar en el caso de dos ondas, con diferentes longitudes de onda, que viajan y se suman; las ondas interfieren y dan como resultado un patrón que se mueve a la velocidad de grupo.

En la litografía óptica utilizada en la industria de los microcircuitos, la difracción también determina el elemento más pequeño que puede crearse. En un disco de video digital (DVD), los límites impuestos por la refracción definen la cantidad de información que puede almacenarse óptimamente. Los límites de trabajo de las lentes *con índice de refracción negativo no dependen de la difracción; esto modifica sustancialmente la capacidad de la tecnología óptica.* Como consecuencia, esta nueva tecnología nos permitiría utilizar la litografía óptica a escalas nanométricas y con ello son un soporte importante para la nanotecnología. Así mismo, el índice negativo aumentará la capacidad de almacenamiento de los discos ópticos en varios cientos de veces.

Cuando decimos que la difracción es determinante, nos estamos refiriendo implícitamente a la teoría de los campos electromagnéticos. Las fuentes de ondas electromagnéticas suministran radiación de átomos. Una antena de radio o un haz de luz presentan dos tipos diferentes de campos: el campo cercano y el campo lejano. El campo lejano es la parte de la radiación lejana desde un objeto y puede detectarse en una lente *tradicional* para formar una imagen, la cual solamente contiene una representación *imperfecta* del objeto, *en donde la difracción limita la resolución al tamaño de la longitud de onda.* El campo cercano contiene todos los detalles finos del objeto, pero su intensidad cae rápidamente con la distancia.

Las lentes con *índice positivo no tienen resolución* para detectar los detalles finos del campo cercano y presentarlos con la imagen. En las lentes con *índice negativo es posible detectar el campo cercano.* Así estas lentes podrían reenfocar tanto el campo cercano como el lejano.

Una lámina plana con índice negativo permite construir lentes de alta resolución. La resolución de estas lentes está determinada por la "calidad" del índice negativo del material. Para optimizar su funcionamiento se requiere que (ϵ) y (μ) sean simultáneamente iguales a menos uno. Esta restricción es difícil de obtener en la realidad. Sin embargo, los materiales artificiales nos permiten obtener esta condición. *A las frecuencias de radio podríamos definir objetos en una escala más pequeña que el límite de difracción.*

Nos preguntamos entonces si estas lentes podrían construirse a una escala más pequeña que la longitud de onda óptica. El reto para escalar materiales artificiales en las longitudes de onda ópticas está abierto. Primero, los elementos conductores metálicos de los microcircuitos, tales como los alambres y resonadores, deben reducirse a la escala nanométrica, tal que sus dimensiones sean menores que la longitud de onda de la luz visible. Segundo, las longitudes de onda pequeñas corresponden a frecuencias altas y los metales se comportan con menores cualidades conductoras a estas frecuencias; así aumenta el amortiguamiento fuera de la resonancia en la cual los materiales artificiales trabajan.

Aún no es posible fabricar materiales con $(\mu) = -1$ a la longitud de onda visible. Sin embargo, se puede utilizar otra condición: cuando la distancia entre el objeto y la imagen es mucho menor que la longitud de onda, se puede omitir la condición de (μ) guardando únicamente la condición $(\epsilon) = -1$, para obtener una resolución que permita detectar el campo cercano. Gracias a esta condición, una capa de metal muy delgada puede actuar como una lente magnífica a una longitud de onda donde $(\epsilon) = -1$.

Se ha obtenido con una capa de plata de 40 nanómetros de espesor una imagen de 365 nanómetros de longitud de onda, con luz obtenida a partir de una apertura más pequeña que la longitud de onda de la luz.

La perspectiva de diseñar y fabricar dispositivos con materiales artificiales de refracción negativa, propone a los físicos y a los ingenieros analizar y complementar la aplicación de las teorías electromagnéticas para estos materiales. ■

Referencias

1. Audretsch, J. (ed.) *Entangled World: The Fascination of Quantum Information and Computation*. Weinheim (Alemania): Wiley-VCH, 2002.
2. Fraser, Gordon. *The New Physics for the Twenty First Century*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
3. Lombana, J. A. *Fundamentos de fotónica*. s.d., 1998.
4. Noda, S. y Baba, T. (eds.) *Roadmap on Photonic Crystal (European Heritage in Economics and the Social Sciences)*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
5. Pendry, J.B. "Manipulating the near whit metamaterials". *Optics y Photonics News*, (septiembre, 2004).
6. Pendry, J. B. y Smith, David R. "Reversing light whit negative refraction". *Physics Today*, Vol. 57, (junio de 2004).
7. Wilson, M. et al. *Nanotechnology: Basic science and emerging technologies*. Boca Ratón (E.E.U.U.): Chapman & Hall/CRC, 2002.

Notas

- ¹ La longitud de onda es un parámetro físico que informa sobre el tamaño de una onda. Si es sinusoidal es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos.
- ² La permitividad o constante dieléctrica es una constante física que podría describir cómo un campo eléctrico interactúa con el medio (la materia); si el medio es isotrópico, se representa por un escalar.
- ³ La dispersión es la separación de un haz en sus diferentes componentes en cuanto a la longitud de onda o la frecuencia.

