

Metamateriales: actualidad y desarrollo

Metamaterials: current and development

Hector Torres-Silva
Universidad de Tarapacá (Chile)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8244>

1. INTRODUCCIÓN

En relación a los campos electromagnéticos, la propagación como ondas en diferentes medios y su topología ha sido una preocupación permanente del hombre desde los tiempos de J. Maxwell (1865), quién sentó las bases teóricas del electromagnetismo. A. Einstein en 1905 con su trabajo sobre la *Relatividad Especial* le otorgó el espaldarazo definitivo a la teoría de Maxwell. En los años 60, dos trabajos teóricos sobre electromagnetismo (V. Veselago sobre Metamateriales y D. Lipkin sobre *campos Zilch* y su *quiralidad*), permanecieron olvidados por cerca de 40 a 50 años en algunas bibliotecas, sin ningún interés en los círculos académicos y de investigación. Estos temas que aún no aparecen en los textos de electromagnetismo comienzan a adquirir vigencia entre los años 2005-2010. Actualmente, hay una gran actividad académica y tecnológica sobre la aplicación de dichas ondas en tecnologías de punta principalmente en el sector de las telecomunicaciones. Estos temas, a pesar de estar muy relacionados (metamateriales y campos zilch), por razones de espacio en esta oportunidad nos ocuparemos solamente de los metamateriales, su presente y futuro en cuanto a sus proyecciones y aplicaciones centrando nos en el tema de la invisibilidad de objetos.

Metamaterial es un material diseñado por el hombre, construido de unidades más grandes que los átomos o moléculas, a escala nanométrica cuyo estado y comportamiento está determinado por las características geométricas de las unidades y no por la composición química. Estos materiales artificiales electromagnéticos están desempeñando un papel fundamental en muchas aplicaciones como en la fabricación de capas de invisibilidad en microondas y óptica hasta mejoras sustanciales en la microscopía para el desarrollo de componentes electrónicos. En el futuro, la investigación de estos metamateriales planea crear estructuras cada vez más reducidas en tamaño, en un rango frecuencia cada vez mayor aplicando el principio de refracción negativa que

es el fundamento base para este tipo de materiales. El índice de refracción es un fenómeno electromagnético que se produce en la superficie (o interfaz) entre dos materiales. La *ley de Snell* establece que la relación entre el ángulo de incidencia radiada y el ángulo de transmisión refractado resultante se basa en el índice de refracción n de los materiales dado por $n = \pm \sqrt{\mu\epsilon}$. Por lo tanto, puede verse que el comportamiento del índice de refracción depende de los valores de los parámetros μ que es la *permeabilidad magnética* y ϵ la *permitividad eléctrica*, manipulando así a voluntad el índice de refracción.

La creación de estos de materiales artificiales genera muchas posibilidades de aplicaciones, desde microscopios hasta artefactos militares camuflados. Para que esas propiedades funcionen a frecuencias de microondas y de óptica, los componentes de un metamaterial deben ser más pequeños que la longitud de onda de la radiación electromagnética con la que interactúa. De esta manera el campo electromagnético considera al sistema como homogéneo. Los primeros pasos que se dieron en la fabricación de un metamaterial consistía en la formación de estructuras apiladas de capas en forma de circuitos de materiales conductores y no conductores en parejas alternadas.

2. ÍNDICE NEGATIVO DE REFRACCIÓN

El índice de refracción es una medida de cuánto se doblan las ondas electromagnéticas al pasar de un medio a otro. Una forma común de explicar este fenómeno de refracción negativa es considerando el caso que todos conocemos; cuando uno introduce por ejemplo un lápiz en un vaso de agua, se tiene la ilusión óptica de que el lápiz se quiebra pero en la misma dirección en que se introdujo. Esto se debe al índice positivo de la refracción



Figura 1: Refracción de metamaterial (De dominio público)

del agua, ($n=1,33$), por el contrario, en el caso de que fuera un metamaterial líquido, en el que el índice de refracción es negativo nos daría la impresión de que el lápiz se quiebra hacia el lado contrario. Este fenómeno a nivel óptico se rige por la conocida ley de Snell que funciona como sigue (Figura 1): Si n_1 es positivo y n_2 tuviese un valor positivo, es válida la ecuación $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, (la trayectoria del rayo es en café claro a la derecha del lector y el observador vería al lector). Si n_2 es negativo, la ley de Snell es $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin(-\theta_2)$, (trayectoria del rayo es en color más brillante y el lector ubicado a la derecha abajo no sería detectado por el observador ubicado a la izquierda, parte superior).

Esta posibilidad de invisibilidad a frecuencias ópticas, en 2015 ha sido demostrada por X. Zhang, del *Laboratorio de Ciencias de los Materiales de Berkeley*, utilizando nanoantenas de oro y construyendo un manto de apenas 80 nanómetros de espesor con el que se envuelve un objeto tridimensional del tamaño de unas pocas células biológicas que ha sido modelado de forma irregular. La superficie de la capa ha sido diseñada para desviar las ondas de luz reflejadas de manera que el objeto se vuelve invisible para la detección óptica. La matemática involucrada en este fenómeno escapa al contenido de este artículo, diciendo solamente que se basa en las transformaciones ópticas que son necesarias al pasar de tres a dos dimensiones. Esta técnica permite que la onda vea un metamaterial plano.

La capa ultradelgada es potencialmente escalable para ocultar objetos ma-

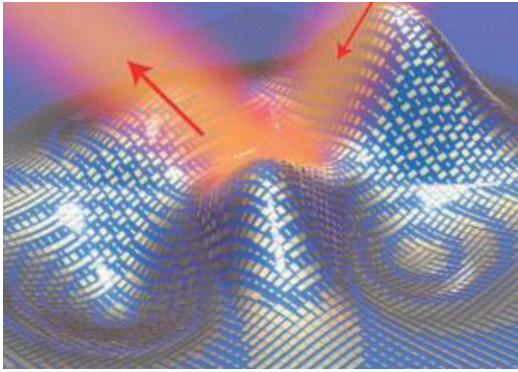


Figura 2a

Figura 2a: Crédito: Xiang Zhang group, Berkeley Lab. Figura 2b: Las antenas de la capa de oro 2015 compensan la distorsión, ocultando el objeto

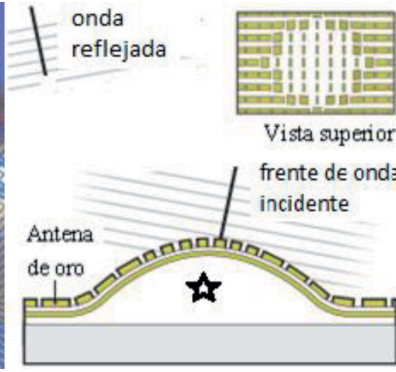


Figura 2b

croscópicos. La dispersión de la luz (ya sea visible, infrarroja, rayos X, etc.), a partir de su interacción con la materia, es la que permite detectar y observar los objetos. con propiedades ópticas que se derivan de su estructura física en vez de su composición química, Figura 2a. En la Figura 2b, se muestra esquemáticamente la compensación de fase de los frentes de onda. La vista superior de esta figura muestra el ocultamiento del objeto.

Sin embargo el desafío mayor de esta tecnología está en lograr un ancho de banda razonable para cubrir el espectro óptico, ya que de lo contrario la invisibilidad no sería completa.

La tecnología para la invisibilidad a frecuencias de microondas y de radar está actualmente más desarrollada y disponible. Este fenómeno se hace evidente en experimentos a frecuencia de microondas del orden de 10GHz, como se muestra en la Figura 3a y 3b. Basado en las ideas de J. Pendry y D. Smith, donde una multicapa hecha de pequeñas estructuras de metamaterial y de cobre, que en base a la ley de Snell descrita más arriba permite tornar invisible un cuerpo sólido. Estos metamateriales estructurados permiten un nuevo paradigma de diseño electromagnético, ahora denominado teoría de transforma-

ción óptica. En las Figuras 3a y 3b se aprecia como un cuerpo metálico no refleja las ondas y por lo tanto es indetectable.

Sin embargo se han encontrado limitaciones a la invisibilidad de objetos. La actual teoría confirma que es posible usar capas para ocultar perfectamente un objeto para una longitud de onda específica, pero ocultar un objeto de una iluminación que contiene diferentes longitudes de onda se vuelve más difícil a medida que aumenta el tamaño del objeto. No obstante, con nuevos conceptos y diseños, como metamateriales activos y no lineales, es posible avanzar en la búsqueda de la transparencia total y la invisibilidad de objetos macroscópicos. El ancho de banda y el tamaño del encubrimiento es importante para evaluar el potencial de disimular dispositivos para aplicaciones del mundo real, como antenas de comunicación, dispositivos biomédicos y radares militares.

3. ACTUALES APLICACIONES DE LOS METAMATERIALES

Las aplicaciones que son el resultado de las propiedades de los metamateriales pueden ser muy diversas. Aparte de lo discutido en este artículo que es el problema

de la invisibilidad, con los metamateriales como subsistemas se encuentran actualmente diversas aplicaciones: las lentes corrientes tiene un índice de refracción positivo por lo cual son curvas, como en el caso de los telescopios o de los microscopios. Los metamateriales brindan la posibilidad de que estas lentes sean planas y puedan mejorar en un grado importante su eficacia como super-lentes. A nivel de microondas, teniendo en cuenta que es más fácil manejar longitudes de onda grandes, una de las propiedad que más interés genera es su uso en asuntos de seguridad nacional, puesto que también se puede presentar como una capa de invisibilidad para emisión de radio y por tanto imperceptible para los radares. Los metamateriales también son usados en diferentes sectores, tales como la Óptica, la Nanotecnología y muy especialmente en las Telecomunicaciones, en la fabricación de diversas antenas y dispositivos asociados:

- Antenas pequeñas de móviles o de satélites en los que se quieren agrupar un gran número de antenas en un espacio mínimo.
- El uso en filtros de microondas confinando la señal mediante la utilización de líneas de transmisión.
- Diseño de líneas de transmisión, atenuadores, acopladores, desfases, sensores, guías de ondas curvadas y circuitos híbridos.
- Empleo de metamateriales como antenas "leaky-wave" en un determinado rango de frecuencias, donde proporcionan un barrido completo de haz, estructuras planas como son las antenas de microcinta con metamateriales que no solo aumentan la banda de trabajo sino que también logran polarización horizontal.
- Capa de invisibilidad para emisión de radio y por tanto imperceptible para los radares.

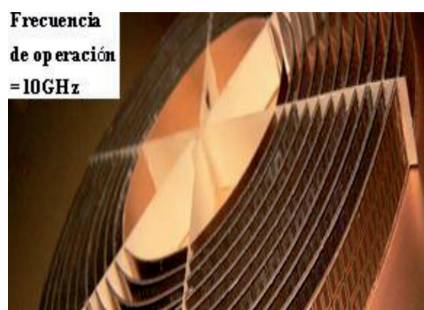


Figura 3a

Figura 3a: Metamaterial invisible en microondas. Figura 3b: Invisibilidad a frecuencia de microondas. Cortesía de D. Shuring y Adaptada de D. R. Smith

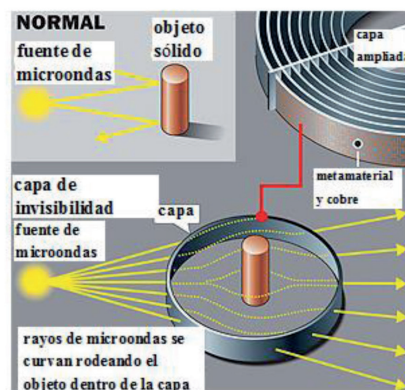


Figura 3b

4. APLICACIONES FUTURAS DE LOS METAMATERIALES

- Mediante la manipulación de sus microestructuras internas, pueden exhibir propiedades que de otro modo no se encuentran en un material de origen natural. Esto posibilita la elaboración de piezas o estructuras por impresión 3-D.
- Podrán mejorar la eficiencia de las células solares, en un avance que podría llevar a cabo nuevas células solares que utilicen mejor la luz so-

lar, se han diseñado unos materiales con la capacidad de doblar la luz visible en ángulos inusuales pero precisos. Estas nanoestructuras son capaces de conseguir una fuerte interacción con el campo magnético de la radiación de infrarrojos que le incide, y con ello generar una gran concentración de campo magnético entre las nano estructuras fabricadas, que no es posible con medios naturales.

- Permitirán lograr un mayor desarrollo de un tipo de superlentes planas que operen en la parte visible del espectro. Tales lentes ofrecerían una resolución superior a la que ofrecen las de tecnología convencional, capturando detalles mucho más pequeños que una longitud de onda de luz, y mejorarían inmensamente las aplicaciones en biomedicina. Permitirían ver el interior de una célula humana o diagnosticar una enfermedad en un feto dentro del útero materno.
- Nuevos metamateriales revolucionarán el campo de la óptica. Permitirán el desarrollo de microscopios ultrapotentes, además de importantes avances en computación cuántica y paneles solares.
- Desarrollo de sistema capaz de transferir con mucha eficiencia la energía eléctrica entre dos circuitos separados, mediante el uso de metamateriales, permitiendo la deseada carga inalámbrica a distancias mayores de móviles, tabletas, etc.
- Diseño de nuevos metamateriales ENZ (por sus siglas en inglés Epsilon Near Zero) en la banda de terahercios (THz), banda de frecuencias localizada entre la de altas microondas y la infrarroja con enormes potenciales de aplicación en biomedicina, radioastronomía o en seguridad, para detección de explosivos.
- Desarrollo de metamateriales quirales a nivel óptico para nanomotores moleculares
- Desarrollo de la Metatrónica, un campo en el que se estudia la interacción de la luz con metamateriales en la escala nanométrica, comprobándose que a frecuencias ópticas estos elementos presentan comportamientos que pueden emularse a los elementos en circuito tradicionales, (condensadores, inductores, resistencias), lo cual nos permite trasladar a los metamateriales y cir-

cuitos ópticos los conceptos conocidos de la teoría de circuitos.

- Los metamateriales tendrán una aplicación mucho más profunda debido a que hay una analogía formal entre la matemática de los espacios electromagnéticos, la de la relatividad general y el espacio-tiempo que ella describe. Esto significa que es posible reproducir y/o simular dentro de un metamaterial una copia exacta de muchas de las características del espacio-tiempo de un agujero negro y otros cuerpos estelares.
- Por analogía, en el rango acústico, el metamaterial tendrá un rol protagonista en el diseño de aviones menos ruidosos. Las aeronaves han sido construidas para ser ligeras y no para ser silenciosas. El material con que se construyen los aviones tiene una estructura en forma de panal de abejas, compuesto por decenas de pequeños hexágonos, que dan resistencia y flexibilidad a la estructura pero transmiten el sonido de los motores directamente a los oídos del pasajero. Esto aumentaría en teoría el peso en apenas un 5% mientras que podría reducir el ruido hasta 25 decibelios.
- Un metamaterial acústico es una estructura artificial realizada mediante el agregado de uno o varios materiales que han sido seleccionados por sus propiedades nuevas tales como la densidad de masa negativa o la compresibilidad negativa o ambas cosas a la vez, necesarias en amortiguar efectos de sismos y terremotos.
- Aprovechar materiales que tienen un índice negativo de refracción podría hacer posible tomar imágenes ópticas de objetos que son más pequeños que la longitud de onda de la luz visible, incluyendo moléculas tales como el ADN y tipos nuevos de componentes electrónicos que usen luz en lugar de corrientes eléctricas para transmitir señales y procesar información, dando por resultado comunicaciones más rápidas.

Un estudio más amplio y más profundo de diversos tipos de metamateriales se encuentra en la última referencia de este artículo.

CONCLUSIONES

El tema de la invisibilidad han sido uno de los mayores avances en el campo de

los metamateriales, y varias técnicas son actualmente disponibles para suprimir la dispersión electromagnética de diferentes objetos. Hasta el momento, sin embargo, los resultados experimentales han mostrado retos fundamentales en términos de ancho de banda y tamaño del objeto a ser ocultado. Resultados recientes sugieren que nuevas direcciones, que involucren no linealidades, metamateriales quirales y activos, se hacen necesarias para realizar el encubrimiento de objetos macroscópicos con un suficiente banda ancha, abriendo una nueva fase en la búsqueda de la invisibilidad con metamateriales.

PARA SABER MÁS

- [1] <http://www.plataformasinc.es/index.php/Noticias/Desarrollo-de-metamateriales-para-antenas-de-telecomunicacion>.
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Metamateriales>
- [3] <http://www.solociencia.com/ingenieria/06021119.htm>
- [4] <http://www.innovaticias.com/innovacion/34258/Crean-primer-metamaterial-cabe-chip-refraccion-cero>
- [5] <http://metamaterials.duke.edu/origins>. David Smith Research group.
- [6] <http://users.ece.utexas.edu/~aalu/>
- [7] D. M. Lipkin, J. Math. Phys. 5, 696 (1964).
- [8] V. G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ Sov.Phys.Usp. 1968, V. 10, P. 509-514.
- [9] J. B. Pendry and D. R. Smith. Reversing light with negative refraction. Physics Today. 2004, V. 57, P 37-43.
- [10] D. Schuring et al, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, Science, 314, (580), P 977-980.
- [11] H. Torres-Silva. Chiral waves in Metamaterial medium, International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology, 2, (2), P 54-65, 2011
- [12] H. Torres-Silva Negative Refraction in Chiral Plasma Media, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2013, 5, 175-181.
- [13] H. Torres-Silva, Diego Torres Cabezas Chiral Seismic Attenuation with Acoustic Metamaterials, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications Vol.5 No.1 (2013) P 10-15.
- [14] H. Torres-Silva, A Transmission Line Model with Metamaterial Effects in Gamma Ray Bursts, Journal of Electronics and Communication Engineering Research, Volume 3, Issue 5 (2016) P 12-17.
- [15] Xingjie Ni, Zi Jing Wong, Xiang Zhang et al. "An Ultra-Thin Invisibility Skin Cloak for Visible Light". Science Vol 349, Issue 6254, (17 de Septiembre, 2015).
- [16] F. Montinoque, A. Alù, Invisibility exposed: physical bounds on passive cloaking, Optica, vol 3, N° 7, (2016), P 718-724.
- [17] H. Torres-Silva. Una revisión sobre los metamateriales. DYNA New Technologies. Enero-Diciembre 2017, vol. 4, no. 1, p.[No Consta]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8331>