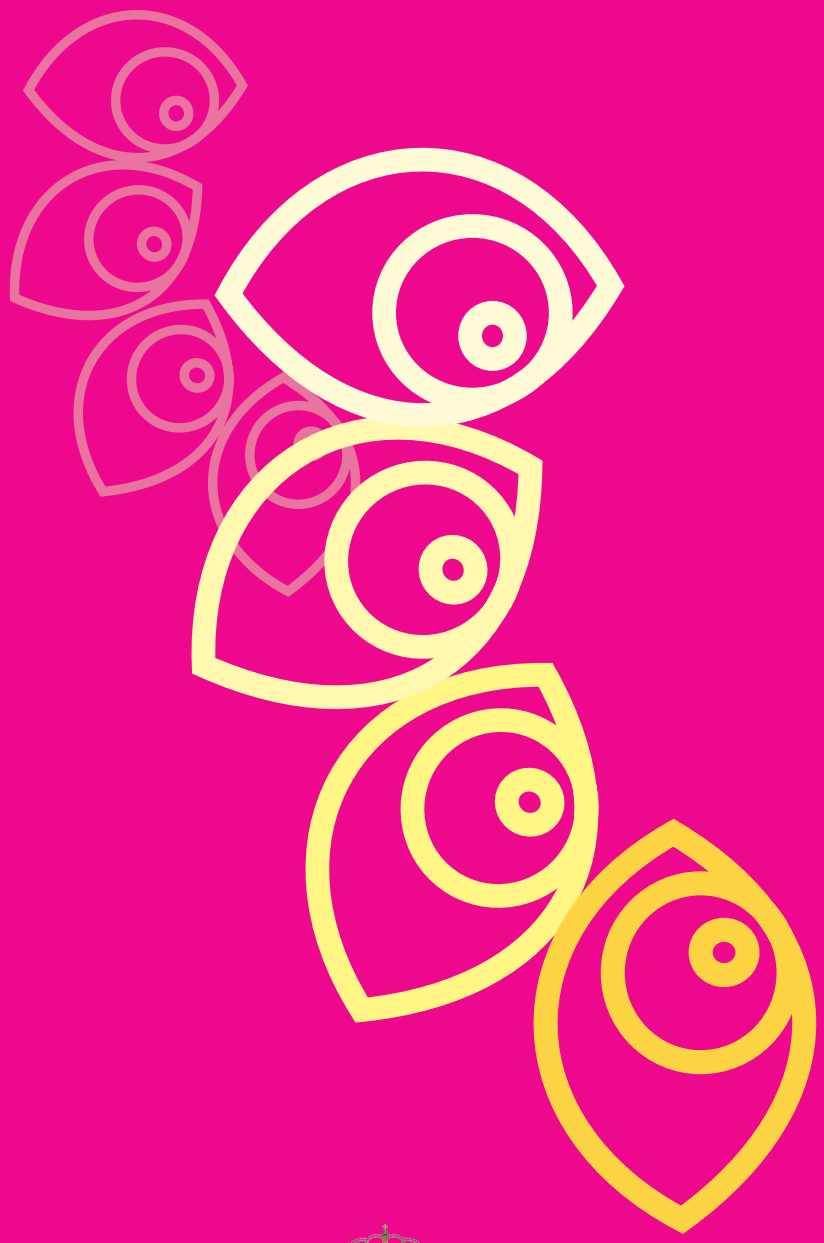
09

Monografías del SOPT

Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa



MINISTERIO DE DEFENSA

09 Monografías del SOPT

Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa

SOPT
SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

http://www.mde.es/areasTematicas/investigacionDesarrollo/sistemas/

MINISTERIO DE DEFENSA

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES
http://www.publicacionesoficiales.boe.es

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
DIRECCIÓN GENERAL DE RELACIONES INSTITUCIONALES

NIPO: 075-11-023-8 (edición en papel)
Depósito Legal: M-3384-2011
Imprime: Imprenta del Ministerio de Defensa
Tirada: 300 ejemplares
Fecha de edición: marzo, 2011

NIPO: 075-11-024-3 (edición en línea)

administración electrónica

En esta edición se ha utilizado papel libre de cloro obtenido a partir de bosques gestionados de forma sostenible certificada.

LOS METAMATERIALES Y SUS APLICACIONES EN DEFENSA

SUMARIO

PRÓLOGO 9

MOTIVACIÓN 11

1. INTRODUCCIÓN 13

1.1. Definición y descripción 15
1.2. Estado actual 17

2. APLICACIONES Y TENDENCIAS 21

2.1. Encubrimiento o invisibilidad 24

2.1.1. Invisibilidad electromagnética 26
2.1.2. Invisibilidad acústica 30
2.1.3. Reducción de firma 32

2.2. Superresolución: la lente perfecta 33

2.2.1. Concepto de lente perfecta 33
2.2.2. Aplicaciones de la superresolución de la lente electromagnética 36
2.2.3. Aplicaciones de la superresolución acústica 39

2.3. Mejora de las prestaciones de los dispositivos de radiofrecuencia 40

2.3.1. Miniaturización 41
2.3.2. Aumento del ancho de banda 42
2.3.3. Mejora de la ganancia de las antenas 43

2.4. Nuevos dispositivos en terahercios 44

3. PRIORIDADES Y ACTIVIDADES EN DEFENSA 47

3.1. Prioridades nacionales 49
3.2. Prioridades y actividades internacionales 50

3.2.1. Agencia Europea de Defensa (EDA) 50
3.2.2. Research & Technology Organization (RTO) 52

4. PRINCIPALES ACTORES NACIONALES E INTERNACIONALES 55

4.1. Análisis 57
4.2. Relación de entidades nacionales 59
4.3. Universidades, centros I+D, grupos y empresas nacionales 60
4.4. Relación de entidades internacionales 79
4.5. Universidades, centros I+D, grupos y empresas internacionales 81

5. PATENTES 101

5.1. Relación de solicitantes de las patentes 103
5.2. Descripción de las patentes 104

ANEXO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 113

A1.1. Propiedades de los metamateriales 115

A1.1.1. Inversión del efecto Doppler 115
A1.1.2. Inversión del efecto Cherenkov 116
A1.1.3. Refracción negativa: ley de Snell inversa 117
A1.1.4. Inversión del efecto Goos-Hänchen 118
A1.1.5. Difracción sub-longitud de onda 118

A1.2. Tipos de metamateriales 120

A1.2.1. Dieléctricos artificiales 120
A1.2.2. Materiales magnéticos artificiales 121
A1.2.3. Materiales de índice de refracción negativo 122
A1.2.4. Materiales con anisotropía artificial 125
A1.2.5. Materiales quirales 126
A1.2.6. Materiales para encubrimiento 126
A1.2.7. Metamateriales sintonizables y no lineales 128

A1.3. Superficies artificiales: EBG, PBG y HIS 132

A1.3.1. S uperficies selectivas en frecuencia (EBGs y FSSs) . 132
A1.3.2. Superficies de alta impedancia (HIS) 136

A1.4. Desafíos tecnológicos 138

A1.4.1. Homogeneización 138

A1.4.2. Nanotecnología y fabricación en dos y tres dimensiones..... 141

A1.4.3. Extensión del ancho de banda útil 146

ANEXO 2. BIBLIOGRAFíA 149

ANEXO 3. ACRÓNIMOS 155

PRÓLOGO

La presente monografía ha sido realizada por el Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT) de la Subdirección de Tecnología e Innovación (SDG TECIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM).

Quiero felicitar a todos los que han hecho posible esta Monografía, y en concreto al técnico del Observatorio Tecnológico de Óptica, Optrónica y Nanotecnología (OT OPTR), Pedro Carda Barrio, y a los técnicos del Observatorio de Electrónica (OT ELEC), Yolanda Benzi Rabazas y Fernando Iñigo Villacorta, por su dedicación y esfuerzo. También, extender este agradecimiento al resto de colaboradores de los Observatorios Tecnológicos de OPTR y ELEC, en especial a Carlos Rivera de Lucas además de al resto de miembros del SOPT, que han contribuido a que podamos tener hoy este trabajo en nuestras manos.

C.F. Ing. José María Riola Rodríguez
Jefe del SOPT
Subdirección General de Tecnología e Innovación
Dirección General de Armamento y Material

MOTIVACIÓN

Este documento pretende ser una guía de consulta sobre el estado actual de la tecnología de los metamateriales y sus potenciales aplicaciones, en especial las relacionadas con defensa. En primer lugar se describen los conceptos básicos teóricos de manera resumida, así como la terminología elemental para los lectores no familiarizados con la tecnología. No obstante, se ha incluido un anexo teórico para aquellos lectores que quieran profundizar más en la materia. De esta manera se pretende que el documento sea accesible y se adapte a los intereses de cada lector.

La monografía presta especial atención a las principales aplicaciones y tendencias futuras, ya que, actualmente, las principales actividades en los metamateriales se centran en I+D para futuros desarrollos, más que en la fabricación de componentes.

Respecto al interés para Defensa, se cita la relación de los metamateriales con los principales documentos públicos de planeamiento del I+D militar, y en qué metas y líneas estratégicas están contemplados, ya sea de manera directa o indirecta.

Con el objetivo de conocer a los actores más importantes se citan a las principales entidades nacionales e internacionales, describiendo brevemente sus actividades, así como algunas de las patentes más relevantes y con posibles aplicaciones relacionadas con Defensa.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Definición y descripción

Los metamateriales se definen en sentido amplio como estructuras artificiales, homogéneas desde el punto de vista electromagnético, que exhiben propiedades físicas insólitas no presentes en la naturaleza. Según el Instituto Europeo Virtual para Materiales Electromagnéticos Artificiales y Metamateriales son «una disposición artificial de elementos estructurales, diseñada para conseguir propiedades electromagnéticas ventajosas e inusuales». Sólo se pueden obtener artificialmente en laboratorios por medio de una serie de métodos de fabricación y se caracterizan por tener unas propiedades macroscópicas distintas a las de sus materiales constituyentes básicos, las cuales dependen de su estructura, normalmente ordenada, y no de su composición.

Los metamateriales poseen capacidades extraordinarias para curvar las ondas electromagnéticas. Mientras que todos los materiales encontrados en la naturaleza tienen un índice de refracción positivo (el índice de refracción es una medida de cuánto se desvían las ondas electromagnéticas al pasar de un medio a otro), los metamateriales presentan un índice de refracción negativo, lo que implica que las ondas incidentes se desvíen hacia el otro lado de la perpendicular a la superficie «normal» que separa los medios. Por este motivo, también se les denomina como materiales «zurdos». Esto se debe a que los metamateriales tienen simultáneamente una permitividad eléctrica (ε) y una permeabilidad magnética (μ) negativas, por lo que el índice de refracción, n, toma un valor negativo.

Para que un metamaterial se comporte como un material homogéneo con un índice de refracción negativo, es condición necesaria que la dimensión máxima de sus componentes sea menor que la longitud de onda incidente. En caso contrario no serían metamateriales sino «cristales fotónicos», con un índice de refracción positivo. Es decir, que el

signo del índice de refracción dependerá de la relación entre la dimensión máxima de los componentes del metamaterial y la longitud de onda incidente.

Para dar una idea más gráfica del comportamiento de un material «zurdo», se podría decir que si el agua tuviese un índice de refracción negativo, un pez que estuviese nadando, parecería estar haciéndolo en el aire por encima de la superficie del agua. En la figura 1.1 vemos otro ejemplo de cómo se vería un objeto al introducirlo en agua que tuviera un índice de refracción negativo.

Figura 1.1. En agua con índice de refracción negativo una paja se vería doblar en dirección contraria a la normal. Fuente: Hess. Nature, 455, 299-300 (2008).

Las propiedades electromagnéticas que presentan son sorprendentes:

– Dan lugar a medios de transmisión que presentan una velocidad de fase y una velocidad de grupo antiparalelas (se propagan en dirección opuesta) para sintetizar respuestas «pasa banda», es decir, dejan pasar un determinado rango de frecuencias de una señal y atenúan el paso del resto.
– Presentan efecto Doppler inverso, de modo que la frecuencia de las ondas disminuye en lugar de aumentar al acercarse la fuente.

Como se ha comentado anteriormente, la dimensión máxima de los componentes de un metamaterial tiene que ser menor que la longitud de onda incidente. Esto supone unos procesos de fabricación con una resolución de varios órdenes de magnitud por debajo de la longitud de onda a la que se espera trabajar, lo que en la actualidad presenta enormes dificultades, sobre todo en las frecuencias ópticas. Sólo por dar una idea de las dimensiones de las que se hablan, decir que el ser humano ve el mundo a través de una estrecha banda de radiación electromagnética (luz visible), con longitudes de onda comprendida entre los 400 y 700 nanómetros. Las longitudes de onda de luz infrarrojas son de unos 750 nanómetros a 1 milímetro. Por tanto, para poder fabricar metamateriales que trabajen en el visible y el infrarrojo, es necesario que sus componentes básicos tengan tamaños del orden de nanómetros a varios micrones, y es imprescindible disponer de los medios y técnicas necesarias.

Para obtener metamateriales estructurados con estas dimensiones, algunos se fabrican con técnicas de nanotecnología similares a las que se usan para las micromáquinas y los circuitos integrados, aunque hoy en día también se pueden fabricar usando microtecnología. Por este motivo, es fundamental tener en cuenta el interés que supone el desarrollo de nuevas técnicas de nanofabricación, que podrían dar lugar a nuevos metamateriales para diferentes longitudes de onda con propiedades totalmente inéditas.

1.2. Estado actual

La teoría física que describe el comportamiento de los metamateriales se puede considerar que está, a día de hoy, bien establecida. Esta teoría ha sido contrastada y verificada en numerosas ocasiones, tanto teórica como experimentalmente. Sin embargo, el principal obstáculo que se interpone en el desarrollo de los metamateriales no es de índole teórica, sino práctica: como se ha comentado anteriormente, en la actualidad no existen las técnicas de fabricación adecuadas para la síntesis de metamateriales con las características requeridas para determinadas aplicaciones en las que las longitudes de onda obligan a que la estructura del metamaterial sea del orden de nanómetros.

En la actualidad, ya se han podido crear metamateriales bidimensionales (monocapa de átomos) en frecuencias ópticas, pero los tridimensionales con refracción negativa sólo se han producido en las microondas. Como

ejemplo, la empresa norteamericana Rayspan Corporation (capítulo 4.5), ya dispone de soluciones que directamente reemplazan las antenas convencionales y los componentes de radiofrecuencia (RF) y hacen posibles terminales móviles de altas prestaciones. Dicha corporación ha desarrollado los *arrays* de antenas de metamaterial ultracompacto MIMO para aplicaciones WiMax.

También se ha conseguido fabricar por primera vez un metamaterial en el extremo rojo del espectro visible, la longitud de onda más pequeña obtenida hasta ahora con un índice de refracción de -0,6. En agosto de 2008, revistas de prestigio reconocido como *Nature y Science* publicaron artículos sobre la creación, por parte de un equipo de investigadores, de un material que no refleja la luz visible, lo que podría en un futuro hacer «desaparecer» objetos de cualquier tamaño. A pesar del optimismo que despiertan avances como los descritos, los ingenieros advierten que todavía están muy lejos aplicaciones tales como la invisibilidad, ya que quedan por mejorar muchas de sus características, como por ejemplo su fragilidad.

La posibilidad de sintetizar materiales con valores arbitrarios de sus parámetros constitutivos (ξ y μ) abre la posibilidad de fabricar dispositivos con propiedades extraordinarias, como las aplicaciones que veremos en el capítulo 2 «Aplicaciones y tendencias», como los recubrimientos para hacer invisible un objeto o las «superlentes» con una altísima resolución óptica. Estas aplicaciones están cada vez más cerca de convertirse en una realidad y pueden suponer una más que notable mejora tecnológica de los sistemas de defensa.

Algunos de los más recientes informes en metamateriales indican que el mercado global para estas aplicaciones podría alcanzar la cifra de unos 2.115 M€ para el año 2013. El mayor segmento del mercado sería claramente para los metamateriales electromagnéticos y se estima que alcanzó unos 83,3M€ en 2007. De manera genérica, el mercado se puede segmentar en metamateriales electromagnéticos, acústicos, sísmicos y de terahercios. La comunidad científica considera que las aplicaciones potenciales de los metamateriales se deben principalmente a las constantes necesidades de las funcionalidades de los dispositivos de banda ancha y multibanda. Gracias a las nuevas necesidades, se espera que la demanda de nuevos componentes y subsistemas sea creciente, y requiera que gran parte de ellos sean dinámicos y reconfigurables. Es ahí donde encaja potencialmente la tecnología de los metamateriales, por la

posibilidad de superar las limitaciones de las tecnologías convencionales al ser capaces de guiar y controlar de manera eficiente las ondas electromagnéticas, entre otras propiedades.

En definitiva, el desarrollo de los metamateriales es una línea de investigación disruptiva, no evolutiva, que podría suponer avances revolucionarios y dejar obsoletas a otras líneas de investigación convencionales. Lo cierto es que en poco tiempo se ha pasado de imaginar ciertas propiedades a disponer de la capacidad de fabricar materiales que las hacen realidad.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

2. APLICACIONES Y TENDENCIAS

2. APLICACIONES Y TENDENCIAS

Los metamateriales prometen no sólo mejorar las prestaciones de un gran número de dispositivos y sistemas en los campos de la electrónica y de la optrónica, sino introducir cambios verdaderamente revolucionarios en un gran número de sectores relacionados con dichas tecnologías. Así, la capacidad teórica de los metamateriales para controlar el camino de propagación de todo tipo de ondas (principalmente electromagnéticas, pero también acústicas, sísmicas, etc.) harán posible aplicaciones que a día de hoy resultan difíciles de imaginar.

Los metamateriales ya se están utilizando con éxito en teléfonos móviles como el representado en la figura 2.1. Otras aplicaciones como la invisibilidad se encuentran todavía lejos del alcance de la tecnología actual, siendo necesarios grandes avances en el área de la nanotecnología para conseguir fabricar metamateriales con las características requeridas (figura 2.2). En la actualidad, la actividad investigadora en el campo de la invisibilidad u ocultamiento con metamateriales es extraordinariamente intensa.

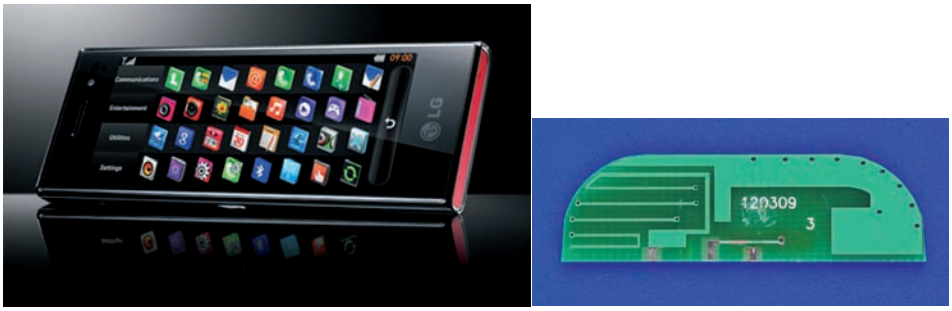


Figura 2.1. El teléfono móvil de la figura (a) (modelo BL40 de la marca LG) fue el primer dispositivo de este tipo en integrar una antena basada en metamateriales (modelo MTM-C de la empresa norteamericana Rayspan) (b). Esta tecnología permite reducir a una quinta parte el tamaño de antena que sería necesario en caso de utilizar tecnología convencional de antenas impresas. (Fuente: (a) LG, (b) Rayspan.)

Figura 2.2. La capacidad de volver completamente invisible una plataforma militar (como el caza de combate que sugiere la imagen) utilizando tecnología de metamateriales es, a día de hoy, una posibilidad todavía remota. (Fuente: Kevin Robertson/Lockheed Martin.)

A pesar de la relativa juventud de esta disciplina científica (se puede considerar que la ingeniería de metamateriales comenzó en el año 2000 con la síntesis del primer metamaterial zurdo), el elevado número de trabajos de investigación que se están realizando a nivel mundial está logrando rápidos avances, tanto a nivel teórico como a nivel tecnológico. En este apartado se describen las aplicaciones de los metamateriales que se pueden considerar, hoy por hoy, más prometedoras, aunque se espera que en los próximos años surja un abanico aún mayor de aplicaciones. En todos los casos, se pondrá especial énfasis en la aplicación de estos metamateriales a los sistemas de defensa.

2.1. Encubrimiento o invisibilidad

En la actualidad, las Fuerzas Armadas de distintos países dedican importantes esfuerzos de investigación y recursos económicos para conseguir reducir la detectabilidad de sus plataformas frente a los sensores

utilizados por el oponente, con el objetivo de aumentar sus probabilidades de supervivencia en los escenarios de operaciones. Esta reducción de detectabilidad se plasma en distintas estrategias de **reducción de firma**, en todas sus variantes: radar, infrarroja, visible, acústica, etc.

En este contexto, la **invisibilidad** sería el objetivo último de toda técnica de reducción de firma: así, una plataforma invisible sería completamente indetectable por parte de los sensores del enemigo. Aunque el término «invisibilidad» hace referencia propiamente al espectro de frecuencias ópticas del rango visible, también se puede extender a otros rangos del espectro, y hablar de «invisibilidad radar», «invisibilidad acústica», etc.

Resulta indudable que la invisibilidad, de ser tecnológicamente viable, tendría una importancia vital en el ámbito de defensa. Así, el ejército que dispusiera de esta tecnología tendría una ventaja operativa decisiva frente a sus oponentes.

A pesar que la posibilidad real de la invisibilidad ha venido debatiéndose en diversos artículos científicos aparecidos a lo largo de las últimas décadas, no fue hasta el año 2005 cuando dicho concepto irrumpió con fuerza en el ámbito de las investigaciones científicas de vanguardia, debido a la aparición de una serie de artículos que situaban a los metamateriales como los elementos clave para desarrollar dispositivos capaces de proporcionar invisibilidad. Esta invisibilidad sería teóricamente posible tanto en el rango de frecuencias ópticas como en otras zonas del espectro electromagnético (infrarrojo, milimétricas, microondas, UHF, etc.)

Desde dicho año 2005, el interés por la aplicación de los metamateriales a ocultamiento e invisibilidad ha experimentado un incesante crecimiento, siendo en la actualidad una de las áreas de investigación en metamateriales con mayor actividad científica. La revista *Science*, en su lista de los descubrimientos clave del año 2006, situó al ocultamiento o invisibilidad con metamateriales en el puesto número 5.

Por otro lado, las teorías y técnicas de metamateriales desarrolladas para ocultamiento e invisibilidad podrían resultar también de gran utilidad en el sector civil. Entre las aplicaciones más revolucionarias y futuristas podrían señalarse la protección de las ciudades contra los efectos de los terremotos, utilizando estructuras basadas en el concepto de metamaterial para desviar las ondas mecánicas sísmicas causadas por el movimiento de tierras.

2.1.1. Invisibilidad electromagnética

En general, la detección de objetos por medio de ondas electromagnéticas se produce por dos tipos de efectos: **reflexión** de las ondas por parte del objeto y **sombra** que produce el objeto sobre las ondas electromagnéticas del fondo. Un objeto sería perfectamente invisible en un determinado rango del espectro electromagnético si no reflejase ni dispersase las ondas incidentes en otras direcciones y tampoco crease ninguna sombra, de tal manera que el objeto se comportase como si fuera transparente a dichas ondas[1].

Una manera de conseguir dicha transparencia sería recubriendo al objeto con una estructura que permita a las ondas electromagnéticas «rodear» a dicho objeto, emergiendo en el lado contrario como si hubieran atravesado un espacio vacío (ver figura 2.3). Con esta estrategia, el objeto junto con la estructura que lo recubre serían efectivamente invisibles.

El camino de la onda electromagnética en cualquier material viene determinado por el índice de refracción del material en cada punto del espacio. Para conseguir curvar la onda de manera precisa alrededor del objeto, resulta imprescindible sintetizar estructuras con valores adecuados del índice de refracción en cada punto del espacio, tarea que no resulta posible utilizando materiales convencionales. Es en este aspecto donde los metamateriales revelan todo su potencial para las aplicaciones de invisibilidad: debido a que dichos metamateriales permiten la síntesis teórica de estructuras con valores de ξ y de μ arbitrarios (y, por tanto, con valores del índice de refracción n arbitrarios), sería posible utilizarlos para construir recubrimientos que curvasen de manera controlada la trayectoria de las ondas electromagnéticas alrededor de un objeto y, por lo tanto, hiciesen invisible dicho objeto[2].

---

[1] En determinados casos, es suficiente con eliminar sólo uno de los efectos (reflexión o sombra). Así, en el rango de frecuencias radar, basta con reducir la reflexión de la radiación electromagnética en la dirección del sensor radar, ya que la radiación de fondo a frecuencias radar es, en la mayoría de los casos, muy tenue, por lo que no se podría detectar un objeto por su sombra sobre dicho fondo.

[2] Este recubrimiento o capa de invisibilidad consistiría en una estructura anisótropa cuyos valores de los tensores de permitividad eléctrica (ξ) y permeabilidad magnética (μ) se pueden obtener por medio de las ecuaciones de transformación óptica (*J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith. «Controlling Electromagnetic Fields». Sciencexpress, 25 May 2006.).*

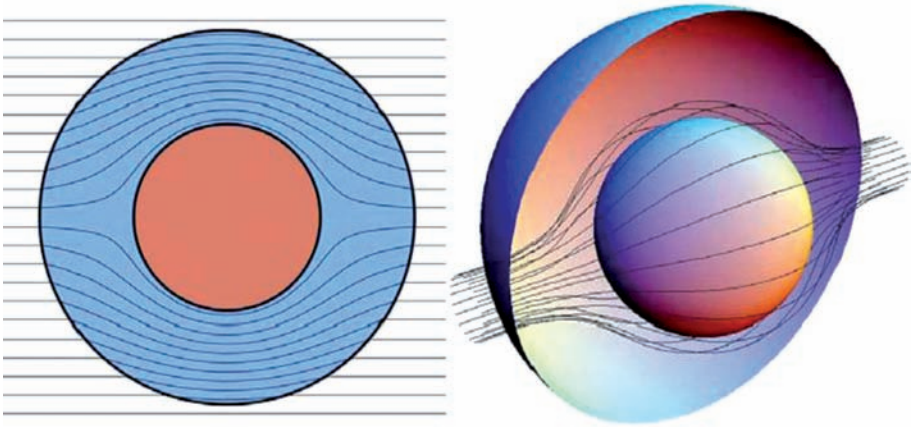


Figura 2.3. Concepto de invisibilidad: los rayos de luz (líneas negras) «rodean» el objeto a ocultar (esfera interior) gracias al metamaterial que lo recubre (esfera exterior). La figura de la izquierda es una representación de este concepto en dos dimensiones. La figura de la derecha lo representa en tres dimensiones (Fuente: J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith. «Controlling Electromagnetic Fields». Sciencexpress, 25 May 2006.)

En la figura 2.4 se muestra la primera realización práctica de una «capa de invisibilidad», diseñada para ocultar un cilindro metálico en la banda de microondas. Es una simplificación en dos dimensiones del caso general en tres dimensiones (por eso adopta una forma cilíndrica y no esférica), y sólo funciona con una de las polarizaciones del campo eléctrico incidente (la componente paralela al eje del cilindro). En la figura 2.5 se representan los resultados experimentales obtenidos, en los que se observa que la capa de metamaterial consigue reducir la radiación reflejada y la intensidad de la sombra producida por el cilindro metálico.

A pesar de estos resultados prometedores, existen todavía importantes dificultades tecnológicas a superar para poder implementar una «capa de invisibilidad» realmente efectiva. Así, el prototipo de la figura 2.4 es muy dispersivo y provoca grandes pérdidas en la señal que lo atraviesa, lo que facilita la detección del objeto que se pretende ocultar, además de tener una banda de frecuencias de operación muy pequeña (para que la invisibilidad sea efectiva debe poder realizarse en una amplia banda de frecuencias). Otro de los grandes inconvenientes está relacionado con limitaciones físicas fundamentales: las ondas que viajan por el interior de la capa de invisibilidad deben ir más deprisa que las ondas que viajan fuera de la misma, lo que resulta imposible en el caso de que éstas

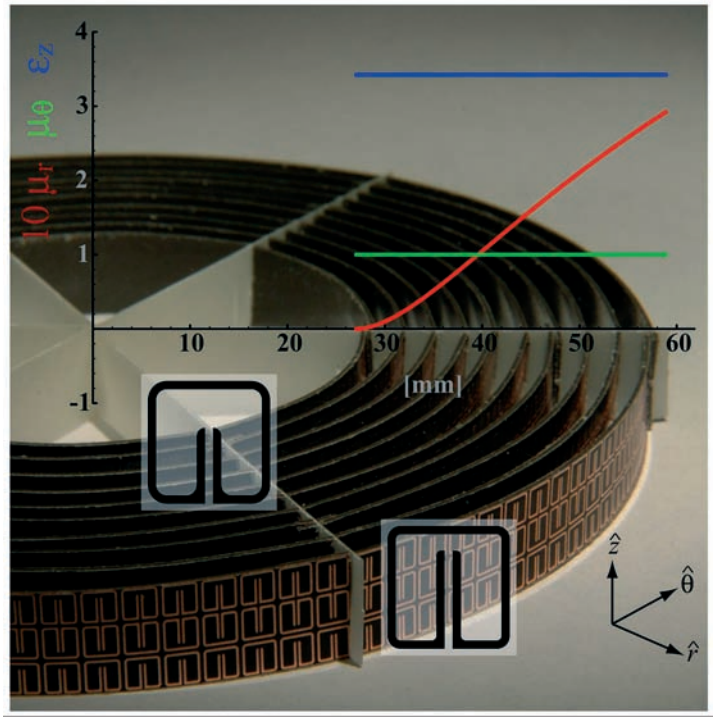


Figura 2.4. Metamaterial para la ocultación de un cilindro metálico a 8.5 GHz, realizado por D. Schurig et al. (Duke University). (Fuente: D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith. «Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies». Sciencexpress, 19 Oct. 2006.)

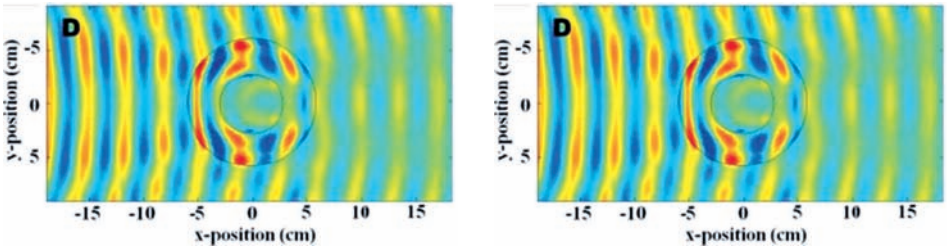


Figura 2.5. Medida experimental de la intensidad del campo eléctrico a 8.5 GHz: c) Cilindro metálico sin recubrimiento; d) Cilindro metálico recubierto del metamaterial de la figura 2.4. (Fuente: D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith. «Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies». Sciencexpress, 19 Oct. 2006.)

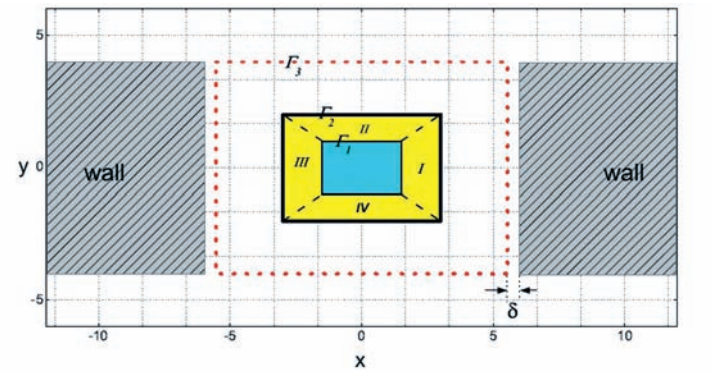


Figura 2.6. Esquema de una estructura superdispersora basada en metamateriales para ocultar la entrada a un recinto. (Fuente: Xudong Luo, Tao Yang, Yongwei Gu, and Hongru Ma. «Concealan entrance by means of superscatterer». http://arXiv.org, 10 Sep 2008.)

últimas viajen a la velocidad de la luz. Las soluciones propuestas para superar este problema complican extraordinariamente el diseño del metamateriales y arrojan dudas sobre su viabilidad práctica.

Otros tipos de ocultamiento electromagnético pueden conseguirse mediante la utilización de metamateriales con características especiales. Una de las posibles aplicaciones es la ocultación de la entrada a un recinto por medio de una estructura denominada «superdispersor»[3] y basada en

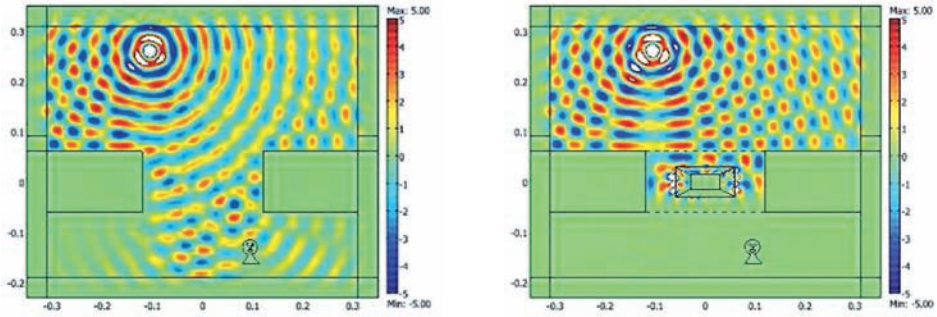


Figura 2.7. Funcionamiento de la estructura superdispersora: a) Los campos electromagnéticos atraviesan la entrada, por lo que ésta es detectada. b) La estructura superdispersora situada en la entrada cancela los campos electromagnéticos, haciendo dicha entrada indetectable. (Fuente: Xudong Luo, Tao Yang, Yongwei Gu, and Hongru Ma. «Conceal an entrance by means of superscatterer». http://arXiv.org, 10 Sep 2008.)

[3] El superdispersor (*superscatterer*) se puede definir como una estructura que parece, a determinadas longitudes de onda, mayor que su tamaño real.

metamateriales. El funcionamiento es el siguiente (ver figura 2.6.): el pilar rectangular central situado en la entrada del recinto (Γ_1) y formado por un material conductor perfecto se recubre con un metamaterial de índice de refracción negativo (Γ_2), que provoca que dicho pilar central parezca mayor que lo que es, cubriendo completamente la entrada (Γ_3) e impidiendo detectar la existencia de dicha entrada (ver figura 2.7).

2.1.2. Invisibilidad acústica

El concepto de invisibilidad descrito en el apartado 2.1.1 para las ondas electromagnéticas puede trasladarse al ámbito de las ondas mecánicas en general y acústicas en particular. Así, se podrían diseñar metamateriales acústicos con capacidad de absorber y desviar las ondas acústicas y proporcionar encubrimiento o «invisibilidad» frente al sónar a los submarinos (ver figura 2.8). Estos metamateriales también podrían utilizarse en aplicaciones de reducción de la firma acústica de buques de superficie.

Figura 2.8. En el futuro, el casco de los submarinos podría ir recubierto de metamateriales acústicos que lo harían indetectable frente a los sónares. (Fuente: Navantia.)

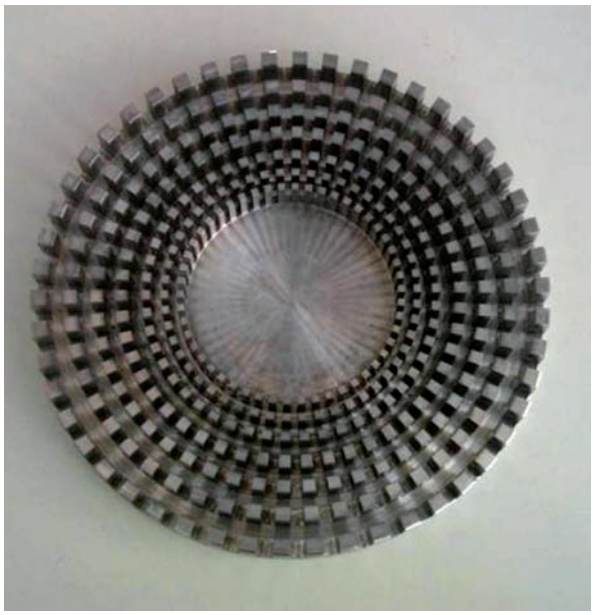


Figura 2.9. Prototipo de capa de invisibilidad acústica desarrollada por el Instituto Fresnel y la Universidad de Liverpool. Este dispositivo cilíndrico puede desviar las ondas superficiales de determinadas frecuencias, ocultando el objeto situado en su interior (Fuente: M. Farhat, S. Enoch, S. Guenneau, and A. B. Movchan. «Broadband Cylindrical Acoustic Cloak for Linear Surface Waves in a Fluid». Physical Review Letters,26 Sept. 2008.)

En comparación con la invisibilidad electromagnética, la teoría de encubrimiento o invisibilidad acústica está en un estado más preliminar de desarrollo. Grupos de investigación como el de Fenómenos Ondulatorios de la Universidad Politécnica de Valencia (profesores José Sánchez-Dehesa y Daniel Torrent) o el de la Universidad de Duke en Durham, Carolina del Norte (profesores S. Cummer y D. Schurig) han propuesto diferentes soluciones teóricas para el desarrollo de una hipotética capa de invisibilidad acústica[4], mientras que el consorcio formado por el Instituto Fresnel de la Universidad de Aix-Marseille y el Departamento de Ciencias Matemáticas de la Universidad de Liverpool han desarrollado la primera capa de invisibilidad acústica para ondas de superficie en un fluido (ver figura 2.9).

[4] (Daniel Torrent and José Sánchez-Dehesa. «*Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach*», New Journal of Physics, 13 June 2008, Steven A. Cummer and David Schurig. «*One path to acoustic cloaking*», *New Journal of Phys*ics, 2 March 2007)

Las tecnologías desarrolladas para conseguir la invisibilidad o encubrimiento acústico podrían resultar de gran utilidad también en el ámbito civil. Las aplicaciones comprenden desde la construcción de paneles para la atenuación del ruido (de aplicación a las zonas cerca de los aeropuertos, autopistas, etc.) hasta el desarrollo de sistemas a la entrada de los puertos que desvíen o atenúen las olas de gran tamaño que se producen durante los temporales o incluso catástrofes como los tsunamis. A pesar de su potencial interés, esta última aplicación está todavía muy lejos del alcance de la tecnología actual de metamateriales acústicos.

2.1.3. Reducción de firma

A pesar de estos primeros avances en la utilización de los metamateriales para aplicaciones de invisibilidad, existen todavía importantes dificultades tecnológicas a superar antes de poder disponer de esta capacidad. Así, los prototipos realizados hasta la fecha funcionan en general en un rango muy limitado de frecuencias y existen serias dudas acerca de que sea viable o práctico en el futuro la aplicación de estas «capas de invisibilidad» en estructuras de un tamaño de un vehículo terrestre, aéreo o naval.

Figura 2.10. Los metamateriales podrían utilizarse para sintetizar materiales absorbentes al radar como los que recubren la superficie del bombardero B-2 de la imagen. (Fuente: USAF.)

Sin embargo, los metamateriales podrían encontrar una aplicación más inmediata y realista como materiales absorbentes para reducción de firma, fundamentalmente radar (donde para conseguir la indetectabilidad basta con evitar la reflexión o dispersión de las ondas) e infrarroja.

La posibilidad que ofrecen los metamateriales de sintetizar estructuras con valores arbitrarios de ξ y de μ puede utilizarse para desarrollar materiales con propiedades específicas de absorción en determinadas bandas de frecuencia. Así, estos metamateriales podrían utilizarse para fabricar materiales absorbentes al radar (RAM *Radar Absorbing Material*) con los que recubrir la superficie de las plataformas militares de interés (figura 2.10).

2.2. Superresolución: la lente perfecta

Sin lugar a dudas, una de las potenciales aplicaciones de metamateriales que despierta mayor interés en la comunidad científica es la posibilidad de construir sistemas ópticos cuya resolución no estuviera limitada por la longitud de onda utilizada (lo que podríamos denominar superresolución). De ser viables en la práctica, este tipo de sistemas provocaría una revolución tecnológica sin precedentes en sectores como el de la microelectrónica y nanoelectrónica, como se explica en detalle en los siguientes párrafos.

Es interesante destacar que, de hecho, se puede situar el arranque de la disciplina moderna de los metamateriales en un artículo del profesor Sir John B. Pendry (Imperial College de Londres) en el que sugiere que dichos metamateriales podrían utilizarse para construir una **lente perfecta** que, teóricamente, no estaría limitada por la longitud de onda utilizada[5]. Desde la aparición de dicho artículo, el interés de la comunidad científica por la disciplina de metamateriales ha ido creciendo de manera constante, con la aparición de nuevas líneas de investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones. En la actualidad, la implementación de lentes perfectas (tanto en el dominio óptico como en otros dominios como el acústico) es, junto con la invisibilidad, una de las áreas de investigación más activas a nivel mundial en el campo de metamateriales.

[5] «*Negative Refraction Makes a Perfect Lens*», aparecido en octubre del año 2000 en la revista Physical Review Letters (J. B. Pendry *«Negative Refraction Makes a Perfect Lens», Physical Review Letters, vol. 85, nº18, Oct. 2000*)

2.2.1. Concepto de lente perfecta

Debido a los fenómenos de difracción de la luz, existe un límite fundamental a la resolución que se puede obtener con los sistemas ópticos convencionales. Este **límite de difracción** se puede formular de la siguiente manera: en un sistema óptico, no es posible discriminar objetos cuyo tamaño sea inferior a la longitud de onda de la radiación que ilumina dichos objetos.

La explicación física de este principio reside en el hecho de que los detalles de menor tamaño de la imagen iluminada «viajan» en unas ondas que se atenúan muy rápidamente con la distancia (ondas evanescentes), por lo que dicha información no llega al sistema óptico que reconstruye la imagen iluminada.

Sin embargo, J.B. Pendry y otros autores sostienen que la estructura que aparece en la figura 2.11 (formada al insertar, en un medio de índice de refracción n=1, una pieza plana de metamaterial zurdo de índice de refracción n=-1) actuaría como una lente perfecta o «superlente», en el sentido de que sería capaz de discriminar detalles de la imagen de tamaño inferior al límite de difracción. Esto sería posible debido a que los metamateriales zurdos exhiben una propiedad verdaderamente extraor-

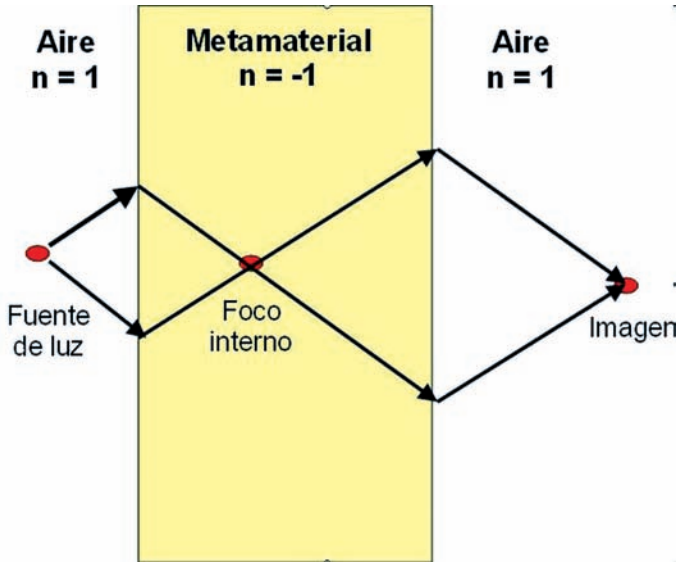


Figura 2.11. Esquema de la lente perfecta de Pendry.
(Fuente: Ministerio de Defensa.)

dinaria: son capaces de amplificar las ondas evanescentes presentes en el sistema óptico. 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.

Una de las primeras demostraciones sobre el funcionamiento real de una superlente a frecuencias ópticas la realizó en el año 2005 el grupo de Xiang Zhang de la Universidad de California en Berkeley. Para ello, utilizaron una lámina de plata de 35 nm de espesor, con la que consiguieron una permitividad eléctrica negativa (ξ=-1) (figura 2.12). Al utilizar esta lámina de plata como superlente, consiguieron reconstruir una imagen con detalles más finos que la longitud de onda de la luz incidente (365 nm) (figura 2.13).

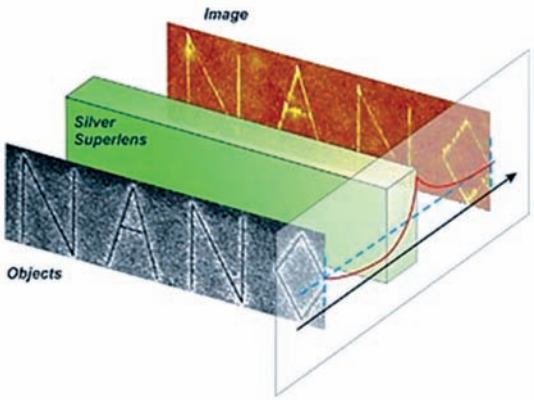


Figura 2.12. Sistema óptico que utiliza una superlente de plata para conseguir una resolución superior al límite de difracción. La línea roja indica la amplificación de las ondas evanescentes al pasar por la superlente. (Fuente: Cheng Sun, UC Berkeley.)

Figura 2.13. Resultado obtenido con el sistema óptico de la figura 2.12: la resolución obtenida con la superlente (A) es mayor que la que proporciona el sistema óptico convencional (B). (Fuente: Cheng Sun, UC Berkeley.)

El concepto de superlente también puede extenderse al ámbito de las ondas acústicas, de tal manera que también resulta teóricamente posible obtener imágenes acústicas con una resolución superior a la longitud de onda utilizada. Una demostración de este concepto la ha realizado recientemente el grupo de Zhang de la Universidad de California en Berkeley, cuyos miembros han construido una superlente acústica con capacidad de resolver detalles del objeto de un tamaño tan reducido como la séptima parte de la longitud de onda acústica utilizada. El prototipo de esta lente se muestra en la figura 2.14.

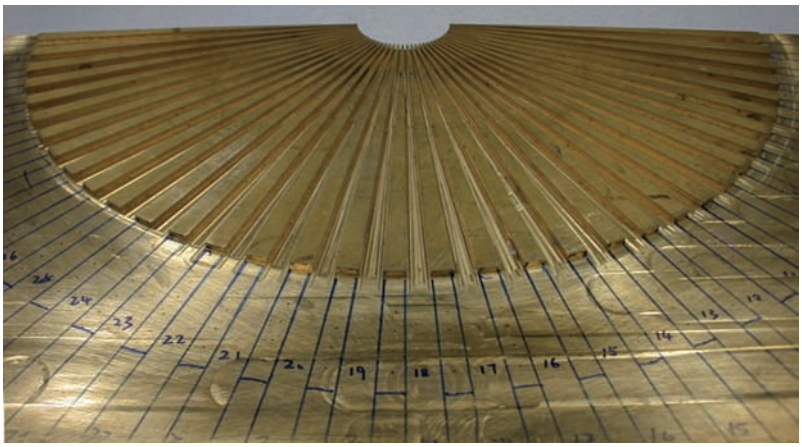


Figura 2.14. Prototipo de la superlente acústica construida por el grupo de Zhang de la Universidad de California – Berkeley. (Fuente: Zhang Laboratory/UC Berkeley.)

A pesar de los avances teóricos y experimentales obtenidos en el campo de la superresolución con metamateriales, es importante señalar que todavía existe controversia en la comunidad científica acerca de la interpretación y significado real de estos resultados, así como su futura aplicación práctica. Así, desde la publicación del artículo pionero de J.B. Pendry, muchos científicos han cuestionado la supuesta ruptura del límite de difracción, aduciendo que dicha ruptura conllevaría la violación de principios físicos firmemente establecidos como el de incertidumbre de Heisenberg. Para resolver esta paradoja, algunos científicos argumentan que sistemas como el de la figura 2.12 no constituyen realmente una lente (en el sentido de que no cumplen con las reglas de la óptica geométrica), sino que son «dispositivos adaptadores» que enfocan la energía a puntos más pequeños que la longitud de onda. Por otro lado, este enfoque de energía se produce a distancias muy reducidas en comparación con la longitud de onda, lo que podría limitar severamente su utilidad práctica.

2.2.2. Aplicaciones de la superresolución de la lente electromagnética

Uno de los sectores donde la superresolución podría provocar una auténtica revolución es el de la fabricación de circuitos integrados con muy alta densidad de integración, como son los microprocesadores que constituyen el «cerebro» de cualquier tipo de sistema informático actual, desde los ordenadores personales hasta los supercomputadores con miles de microprocesadores trabajando en paralelo.

La potencia de cálculo de los microprocesadores está directamente relacionada con el número de transistores integrados que contiene[6]. A medida que se van perfeccionando los procesos de fabricación de los microprocesadores, aumenta el número de transistores que se pueden integrar en una misma unidad de superficie del microprocesador. La evolución de los procesos de fabricación ha seguido hasta la fecha la tendencia pronosticada por la conocida Ley de Moore, que afirma que el número de transistores por unidad de superficie de oblea semiconductora se dobla aproximadamente cada dos años. Esta ley empírica se ha venido verificando con sorprendente precisión durante los últimos 40 años.

La mayoría de los procesos de fabricación de microprocesadores están basados en técnicas de fotolitografía o litografía óptica, mediante las cuales se «graba» en la oblea de material semiconductor el diseño del circuito integrado, (transistores, interconexiones, etc.). El detalle más fino que se puede grabar (es decir, el mínimo tamaño de transistor posible) está limitado por la longitud de la onda de la luz utilizada en el proceso, debido al límite de difracción.

Sin embargo, si fuera tecnológicamente viable utilizar superlentes en los procesos de fotolitografía, sería posible grabar detalles mucho más finos que la longitud de onda utilizada, lo que permitiría incrementar drásticamente el número de transistores por microprocesador y con ello la capacidad de procesado de estos dispositivos. Este incremento de prestaciones podría llegar a ser verdaderamente disruptivo, superando la tendencia pronosticada por Moore y provocando una revolución tecnológica sin precedentes desde los inicios de la microelectrónica.

Esta capacidad de «superresolución» también podría utilizarse para multiplicar en un factor superior a los dos órdenes de magnitud (es decir, más de cien veces) el volumen de información que se puede almacenar en discos ópticos como el DVD, lo que tendría también importantes consecuencias en el sector de la informática y de la electrónica de consumo.

Otras disciplinas científicas que podrían sufrir una auténtica revolución gracias a las superlentes de metamateriales son la microbiología y la medicina. Así, se podrían utilizar superlentes para fabricar microsco-

[6] Como ejemplo, se puede señalar que el número de transistores que contiene cada microprocesador de la nueva generación Core 2 de Intel (tecnología de 45 nm) es superior a los 820 millones.

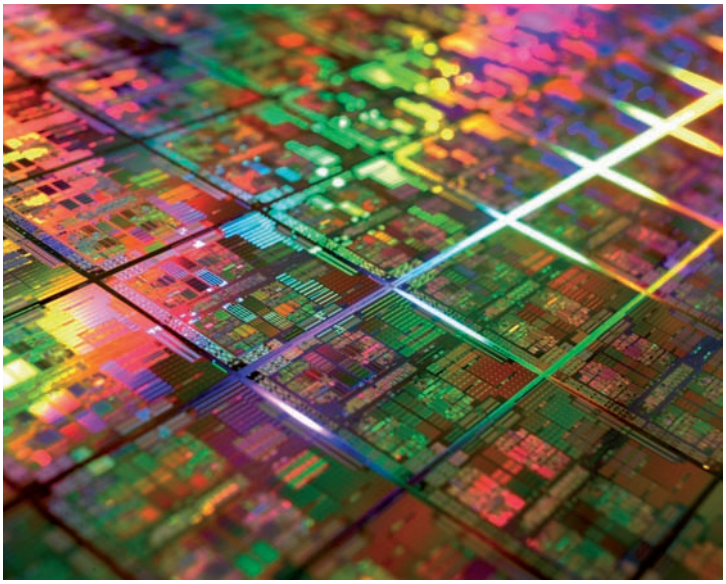


Figura 2.15. La aplicación de superlentes de metamateriales a la fabricación de circuitos impresos podría revolucionar los sectores de micro y nanoelectrónica, incrementando radicalmente la capacidad de procesado de los microprocesadores actuales. (Fuente: AMD.)

pios ópticos con una resolución tan elevada que serían capaces de distinguir hasta el movimiento de virus individuales o moléculas de ADN dentro de una célula humana. Este tipo de instrumental científico permitiría grandes avances en la investigación y el diagnóstico de diversas enfermedades.

Desde el punto de vista de defensa, los sistemas electrónicos militares se beneficiarían directamente de la revolución de la microelectrónica provocada por las superlentes. La capacidad de procesar grandes volúmenes de información en tiempo real será cada vez más determinante en los escenarios de operación futuros, caracterizados por un nivel de tecnificación cada vez mayor. Así, el aumento de la velocidad y capacidad de cálculo de los microprocesadores permitirá diseñar vehículos no tripulados con mayor autonomía e inteligencia, incrementar la conciencia situacional mediante el procesado en tiempo real de un gran número de datos procedentes de múltiples sensores, incrementar la efectividad de los sistemas de armas, etc.

Las superlentes también podrían formar parte de los sistemas ópticos de vigilancia embarcados en plataformas aéreas o espaciales (ver figura 2.16). Estos componentes permitirían aumentar la capacidad de resolución de estos equipos respecto a los sistemas ópticos convencionales.

Figura 2.16. Las superlentes podrían utilizarse para mejorar la resolución de los sistemas ópticos de vigilancia embarcados en plataformas aéreas, como el sensor EO del UAV MQ-9 Predator (es la torreta situada debajo de la parte delantera de la aeronave). (Fuente: IHS Jane's/Patrick Allen.)

2.2.3. Aplicaciones de la superresolución acústica

Las superlentes acústicas basadas en metamateriales podrían tener importantes aplicaciones en el sector de defensa. Al igual que en el caso óptico, las superlentes acústicas podrían utilizarse para mejorar la resolución de las imágenes acústicas obtenidas mediante sónar, como la representada en la figura 2.17.

Otra posible aplicación sería la utilización de estas superlentes en dispositivos de enfoque y amplificación de las ondas acústicas para generar pulsos acústicos compactos de gran energía («balas de sonido»). Estas «balas» podrían utilizarse tanto en aplicaciones de medicina de ultrasonidos (ver siguiente párrafo) como formando parte de futuros sistemas de armas (en el caso de guerra antisubmarina, podrían resultar un eficaz sustituto de los torpedos convencionales).

Figura 2.17. Imagen de un avión sumergido obtenida mediante sónar de apertura sintética. (Fuente: Real Marina Noruega.)

En el sector civil, las superlentes acústicas podrían utilizarse también en diversas aplicaciones, entre las que destaca la mejora de los sistemas médicos de ultrasonidos. En el caso de los escáneres de ultrasonidos, las superlentes permitirían aumentar la resolución de las imágenes sin necesidad de utilizar longitudes de onda cortas, cuya elevada energía puede llegar a dañar los tejidos sanos del organismo. En el caso de cirugía de ultrasonidos (FUS *Focused Ultrasound Surgery*), las superlentes podrían incrementar la efectividad de los tratamientos contra células cancerígenas o contra los cálculos renales, facilitando la concentración de la energía en el tejido a tratar y evitando los daños a los tejidos circundantes.

Por otro lado, las superlentes acústicas podrían formar parte de sistemas de detección de pequeños defectos o grietas en infraestructuras civiles como puentes, edificios, etc.

2.3. Mejora de las prestaciones de los dispositivos de radiofrecuencia

Uno de los primeros ámbitos donde se empezó a aplicar con éxito las tecnologías de metamateriales fue el de los dispositivos y componentes que forman parte de los sistemas de RF: antenas, filtros, amplificado-

res, etc. La introducción de las técnicas de metamateriales en el diseño de estos componentes ha permitido obtener importantes mejoras en las prestaciones de dichos dispositivos, así como desarrollar nuevos tipos de componentes.

Los sistemas de radiofrecuencia constituyen, hoy por hoy, una parte esencial de los equipos y plataformas militares, proporcionando capacidades militares consideradas críticas: comunicaciones tácticas inalámbricas, detección a larga distancia de objetivos y vigilancia 24h[7] mediante radar, guiado de proyectiles, obtención de inteligencia, etc. En los próximos años se espera que los sistemas de RF sigan desempeñando un papel de primer orden en los distintos escenarios operativos, mejorando las capacidades actuales y proporcionando nuevas capacidades (como, por ejemplo, las armas de energía dirigida de radiofrecuencia).

Los principales avances conseguidos, así como su potencial aplicación para defensa, se describen en detalle en los siguientes subapartados.

2.3.1. Miniaturización

Un gran número de dispositivos de RF (antenas, filtros, redes de adaptación, etc.) están basados en elementos resonantes, cuya longitud física (necesaria para que funcionen –resuenen- a una determinada frecuencia) condiciona el tamaño del dispositivo completo. En los últimos años, se ha demostrado que es posible superar esta importante limitación por medio de la utilización de metamateriales zurdos.

Así, la combinación de una sección de material convencional (índice de refracción positivo) con un metamaterial zurdo (de índice de refracción negativo) permite construir resonadores cuya frecuencia de resonancia es independiente de la longitud del resonador[8]. Esta importante característica permitirá obtener niveles de miniaturización extraordinariamente elevados en un gran número de dispositivos de RF, como la antena de la figura 2.1(a) o la representada en la figura 2.18.

La miniaturización de los componentes de RF proporcionará importantes mejoras operativas a un gran número de sistemas de defensa, entre los que se puede mencionar:

[7] Es decir, tanto de día como de noche y bajo condiciones meteorológicas adversas

[8] Este tipo de componentes se denominan también «resonadores de orden cero».

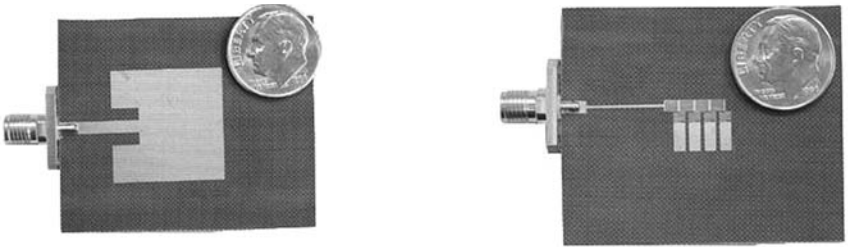


Figura 2.18. Ejemplo de miniaturización de una antena por medio de metamateriales. a) Antena impresa convencional sintonizada a 4.9 GHz. b) antena impresa basada en metamateriales y sintonizada también a 4.9 GHz. La reducción de tamaño obtenida es del 75%, pudiéndose obtener tasas de miniaturización aún mayores. (Fuente: Caloz and Tatsuo Itoh. «Electromagnetic Metamaterials. Transmission Line Theory and Microwave Applications». John Wiley & Sons Inc, 2006.)

- Sensores radar embarcados en plataformas aéreas de pequeño tamaño, como los mini y micro UAV (ver figura 2.19).
- Equipos de comunicaciones radio de reducido tamaño.
- Dispositivos de pequeño tamaño desechables para el despliegue de redes inalámbricas de sensores
- Sensores radar y ESM portátiles para operaciones en entorno urbano
- Etc.

Figura 2.19. Dispositivos de RF miniaturizados basados en metamateriales podrían formar parte de los sensores embarcados en plataformas aéreas de pequeño tamaño (por ejemplo, el mini-UAV Raven de la imagen), reduciendo el impacto de dichos sensores en la aerodinámica de la plataforma. (Fuente: AVinc.)

2.3.2. Aumento del ancho de banda

La combinación adecuada de materiales convencionales y metamateriales zurdos en la síntesis de los dispositivos de RF permite aumentar el ancho de banda de funcionamiento de dichos dispositivos. Esta característica se ha utilizado con éxito en el desarrollo de varios dispositivos bi-banda como antenas, acopladores, desfasadores, etc.

Este aumento del ancho de banda puede resultar de gran interés para los futuros sistemas de RF de defensa, cuyos requisitos de multifuncionalidad[9] hará necesario disponer de dispositivos de RF de elevado ancho de banda.

2.3.3. Mejora de la ganancia de las antenas

Además de para miniaturización y para aumentar el ancho de banda, los metamateriales se pueden aplicar a distintos tipos de antenas para conseguir optimizar sus características de radiación, entre las que destaca la mejora de la directividad y, por tanto, de la ganancia de las antenas. Este aumento de la direccionalidad se puede conseguir mediante la utilización de metamateriales con índices de refracción cercanos a cero, con los que se obtiene un efecto de concentración o enfoque de la radiación de la antena y, en consecuencia, un aumento de su ganancia.

Este aumento de la ganancia se traduce en un mayor alcance de operación de los sistemas de RF que utilicen dichas antenas (radar, comunicaciones, etc.), como se refleja en la figura 2.20.

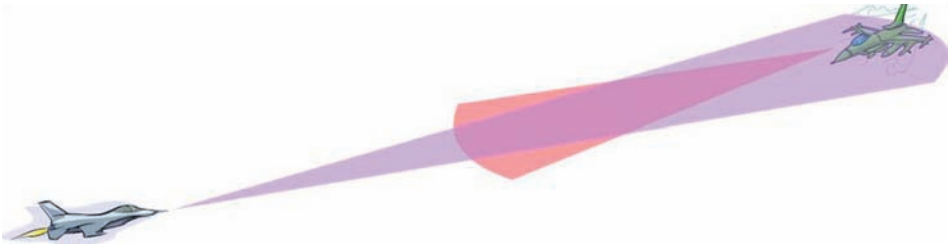


Figura 2.20. El alcance del radar del avión de la derecha (haz rosado) es menor que el del radar del avión de la izquierda (haz violeta), lo que permite que este último pueda detectar al primero con antelación (proporcionándole así una importante ventaja táctica). Los metamateriales podrían utilizarse para aumentar la ganancia de las antenas (y, por lo tanto, el alcance) de sistemas radar como el representado en la imagen. (Fuente: Ministerio de Defensa.)

[9] Los sistemas de RF multifunción son aquellos que pueden realizar las distintas funciones electromagnéticas de la plataforma (radar, comunicaciones, guerra electrónica, etc.) utilizando un *hardware* común de RF.

Por otro lado, la capacidad de los metamateriales para sintetizar estructuras con valores arbitrarios de los parámetros constitutivos (ξ y μ) abre la posibilidad de diseñar superficies selectivas en frecuencia (FSS *Frequency Selective Surface*) con prestaciones extraordinarias, las cuáles podrían utilizarse para obtener mejoras notables en las características de radiación de las antenas.

2.4. Nuevos dispositivos en terahercios

El rango de frecuencias de terahercios, comprendido aproximadamente entre los 300 GHz y los 3 THz, ofrece un elevado potencial para diversas aplicaciones, tanto en el ámbito civil como en el militar. Desde el punto de vista de defensa, las ondas de terahercios tendrían un papel central para poder proporcionar las siguientes capacidades militares clave:

Figura 2.21. Detección de amenazas escondidas mediante un escáner de terahercios. (Fuente: Qinetiq.)

- **Detección e identificación a distancia de explosivos (IED, terroristas suicidas, etc.) y de amenazas bioquímicas:** es probablemente la aplicación militar más importante de los terahercios, debido al elevado número de bajas causadas por los terroristas suicidas y los IED. La espectroscopía de terahercios es probablemente la tecnología con mayor potencial para la identificación de este tipo de sustancias, y no existen en la actualidad muchas otras alternativas (la firma espectral de la mayoría de amenazas bioquímicas está situada en esta banda de terahercios).
- **Detección de amenazas ocultas (bajo la ropa, dentro de otros objetos, etc.) por medio de escáneres de terahercios**: al igual que las ondas milimétricas, los terahercios pueden atravesar diversos materiales, proporcionando además una mayor resolución para la identificación de las amenazas (ver figura 2.21).

A pesar de estas aplicaciones, el desarrollo de dispositivos de terahercios (fuentes de potencia, detectores, etc.) sigue siendo complejo desde el punto de vista tecnológico, debido fundamentalmente a que la tecnología de estado sólido convencional no puede aplicarse directamente a estas frecuencias[10]. Esta limitación tecnológica ha provocado que el número de dispositivos funcionando en terahercios sea relativamente escaso, lo que se ha acabado por denominar la «brecha de terahercios» (ver figura 2.22). Por esta razón, en la actualidad se investigan diversas tecnologías para la generación, amplificación y detección de señales de terahercios (microelectrónica de tubos de vacío, láser QCL, mezcladores fotónicos, etc.).

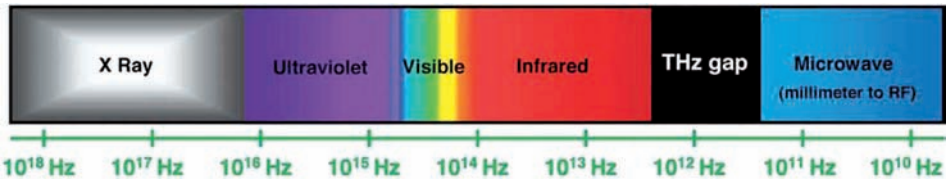


Figura 2.22. Representación de la «Brecha de terahercios» (THz gap) entre las microondas y el infrarrojo. Los metamateriales podrían contribuir a desarrollar nuevos dispositivos en esta banda de terahercios. (Fuente: Dwight L. Woolard et al., «Terahertz Frequency Sensing and Imaging: A Time of Reckoning Future Applications?», Proceedings of the IEEE, Vol. 93, nº. 10, Oct. 200.)

[10] La razón principar para esta limitación tecnológica es el tiempo de tránsito de los electrones en el dispositivo, que provoca que la potencia de salida disminuya rápidamente con la frecuencia, especialmente a partir de los 100 GHz.

A este respecto, algunos investigadores consideran que los metamateriales podrían tener un papel de gran relevancia en el desarrollo de dispositivos en terahercios. Una de las aplicaciones más interesantes consiste en la síntesis de materiales magnéticos en terahercios, los cuáles podrían utilizarse para desarrollar nuevos dispositivos para sensado biológico, huella biomolecular, etc. El interés por los materiales magnéticos en terahercios proviene del hecho de que son prácticamente inexistentes en la naturaleza.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

3. PRIORIDADES Y ACTIVIDADES EN DEFENSA

3. PRIORIDADES Y ACTIVIDADES EN DEFENSA

3.1. Prioridades nacionales

Como se ha podido observar en el capítulo anterior, los metamateriales tienen múltiples aplicaciones relacionadas con defensa. En este capítulo se destacan los vínculos entre el desarrollo de la tecnología de los metamateriales y los diferentes documentos de planeamiento, capacidades, objetivos, etc, del Ministerio de Defensa.

El desarrollo de los metamateriales podría contribuir al objetivo militar de «Incrementar la protección de la fuerza desplegada en operaciones mediante la dotación de medios portátiles, de enmascaramiento de instalaciones y plataformas para las fuerzas terrestres, navales y aéreas», recogido en el documento público Nuevo Sistema de Planeamiento de la Defensa (Ciclo 2005-2008).

Desde el punto de vista tecnológico, dentro del marco de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID)[1], los metamateriales contribuirían en el Área de Actuación de Plataformas, en la Línea de Actuación Funcional Trasversal de Materiales. La meta tecnológica que incluiría el desarrollo de este nuevo tipo de materiales sería:

– MT3.6.1 Desarrollar nuevos materiales y estructuras más eficaces para la reducción de firma (radar, IR, visible, acústica, etc.), que actúen en un amplio espectro de frecuencias.

El desarrollo de sistemas de detección cada vez más avanzados conlleva la necesidad paralela de mejorar los sistemas para la reducción de firma. Una de las vías es la obtención de nuevos materiales con mejores propiedades y capaces de absorber radiaciones en un mayor rango de frecuencias.

[1] Se puede descargar el documento en: www.mde.es/Galerias/politica/armamento-material/ficheros/DGM_ETID_v5d.pdf

En su aplicación en el Área de Actuación de Plataformas, trazaría con las siguientes metas tecnológicas:

– MT3.3.2 Desarrollar tecnologías para la integración de sistemas de protección activos y pasivos de plataformas aéreas.
– MT3.4.1 Mantener y desarrollar tecnologías para el diseño estructural de plataformas terrestres. Suspensiones, solicitaciones de movilidad y transporte, baja observabilidad.
– MT3.4.2 Desarrollar tecnologías que mejoren la supervivencia de las plataformas terrestres en escenarios de combate próximo. Blindajes, sistemas de protección activa, identificación en combate, etc.

3.2. Prioridades y actividades internacionales

3.2.1. Agencia Europea de Defensa (EDA)

Estrategia de Investigación y Tecnología de Defensa Europea (EDRTS *European Defence Research and Technology Strategy*)[2]

La EDRTS es un documento que pertenece a la Agencia Europea de Defensa (EDA *European Defence Agency*) y que refleja su estrategia de I+T. Tiene como principales fines identificar las tecnologías a desarrollar para alcanzar capacidades, trasladar las carencias en capacidades a las necesidades de I+T, reforzar la base tecnológica industrial para aumentar la autonomía y permitir una cooperación eficaz entre las naciones participantes.

Los metamateriales podrían contribuir al cumplimiento del requisito operativo de reducción y control de firma, por lo que se puede considerar que están contemplados en algunas de las áreas tecnológicas prioritarias de I+T. Se relaciona a los metamateriales con las siguientes áreas prioritarias:

[2] Se puede descargar el documento en: http://www.eda.europa.eu/rtreferencedocuments.aspx

– R&T/MS-08-04: «*Structural Modelling Design & Through Life Support*» (Desarrollo del propio material).
– R&T/GS-08-13: «*Ground platforms technologies and mounted platform systems*» (Aplicación en plataformas terrestres).
– R&T/SA-08-28: «*Aerial platform technologies including Helicopters and UAVs*» (Aplicación en plataformas aéreas no tripuladas).

En general, se considera que la tecnología aplicaría a la reducción de la detectabilidad de todas las plataformas terrestres, aéreas o navales tanto tripuladas como no tripuladas.

Actividades

Se recogen a continuación las principales actividades relacionadas con los metamateriales identificadas en el marco de la EDA:

– A propuesta del CapTech (*Capability Technology*) ESM01 (*Environment, Systems and Modelling- Naval Systems and their Environment*) la EDA contrató en 2009 un estudio a cargo de su presupuesto operativo titulado «*Study on Electro-Magnetic Signature Reduction*». Dicho estudio, adjudicado a BAE SYSTEMS y finalizado y distribuido en septiembre del mismo año, contiene el anexo titulado «*Metamaterials & Cloaking Annex*» realizado por el profesor John Pendry del Imperial College. Este anexo proporciona un estudio en profundidad sobre metamateriales así como una revisión del encubrimiento (*cloaking*).
– Por otra parte, en el CapTech GEM01 (*Guidance, Energy and Materials, Materials and Structures*) se firmó en marzo de 2010 el acuerdo técnico (*Technical Arrangement TA*) del proyecto de categoría B «*Metamaterial Inspired Miniaturised Conformal Radar Antennas* (*MIMiCRA*)» entre el Reino Unido y Francia con una duración de 36 meses. Este proyecto tiene como objetivo contribuir a mejorar la capacidad de los sensores radar en las plataformas aeronáuticas, para ello se estudiarán las propiedades de nuevas superficies de alta impedancia basadas en metamateriales que reduzcan el peso y la firma de las antenas de baja frecuencia para comunicaciones y antenas de banda ancha para aplicaciones de vigilancia. La reducción de tamaño y perfil en dichas antenas contribuirá de manera importante a la reducción de la sección transversal radar (RCS *Radar Cross Section*) y a la resistencia aerodinámica de dichas plataformas.
– En el programa JIP ICET (*Joint Investment Programme on Innovative Concepts and Emerging Technologies*) de la EDA, se incluyó, dentro del objetivo de I+T «ICET-C3/2 : Radar Technologies / Components», el

desarrollo de metamateriales para aplicaciones radar. Este objetivo de I+T se incluyó tanto en la 2ª convocatoria como en la 3ª, donde se contrataron dos proyectos sobre este tema, aunque con diferentes objetivos, y ambos liderados por la empresa española Tafco Metawireless. El proyecto contratado en la 2ª convocatoria, METALESA (*Metamaterials for active Electronically Scanned Arrays*), tiene con una duración de 2 años (finalizará en 2012) y como objetivo el uso de nuevos conceptos sobre metamateriales para mejorar las limitaciones de las antenas de tipo *array* activo de apuntamiento electrónico. El segundo proyecto, METAFORE (*Forecasts in Metamaterials with Extreme Parameters for Disruptive Antennas, Radomes and Cloaking in Radar Applications*), es un estudio prospectivo sobre este tema a 10 y 20 años. Este estudio se realizará en un año y se entregará a finales de 2011.

3.2.2. Research & Technology Organization (RTO)

La RTO es la organización perteneciente a la OTAN (Organización del Tratado del Atlántico Norte) encargada de promover y desarrollar programas de I+D e intercambiar información tecnológica entre los países miembros. Dentro de las actividades de los paneles de la RTO, el más relacionado con las aplicaciones de los metamateriales es el SET (*Sensors and Electronics Technology*). En dicho panel se han realizado las siguientes actividades:

– El grupo SET-084/RTG048 «*Emerging technologies for sensor front ends*», activo entre 2004 y 2008, trató de identificar laboratorios, centros de investigación, y empresas activas en el campo de los metamateriales, principalmente enfocados a frecuencias de radar, pero sin descartar las frecuencias ópticas.
– El grupo SET123/RTG 067 «*Nanomaterials for Sensors, Sources, and Electromagnetic Manipulation*» (2006-2009), como parte de las actividades del PoW (Program of Work), se planificó la actividad SET-139, que consistió en el workshop «Photonic Metamaterials for Defense and Security Applications», celebrado en Estrasburgo (Francia) los días 10 y 11 de abril de 2008. El objetivo de esta actividad fue reunir a los principales expertos en el campo de los metamateriales fotóni-

cos (metamateriales en el régimen óptico, es decir, infrarrojo, visible y longitudes de onda ultravioleta) para determinar el estado del arte en este campo, determinar las capacidades y la madurez tecnológica actuales y orientar futuras aplicaciones militares ópticas o fotónicos para la OTAN. Entre las recomendaciones finales del grupo, se sugirió la posibilidad de abrir un nuevo grupo exploratorio (ET *Exploratory Team*) con los metamateriales como tema principal.

– En septiembre de 2010, se inició el grupo exploratorio SET-ET-060 «*Metamaterials for Defense and Security applications*», en el cual han confluido varios miembros de los grupos anteriores (SET0-84 y SET-123). De este grupo se ha creado el grupo de trabajo (RTG), SET-181 RTG-100, que iniciará su actividad en 2011, y se centrará en tres temas principales definidos por el grupo exploratorio:

  - Metamateriales para aplicaciones radar: antenas (multifuncionalidad, control de interferencias, antenas conformables, metasuperficies), reducción de sección eficaz (RCS *Radar Cross Section*), etc.
  - Metamateriales fotónicos: control de firma infrarroja (IR)/térmica (transporte térmico, encubrimiento y transformación óptica), nanoantenas, biosensores, materiales para aplicaciones en terahercios, guías de onda, fuentes de luz, etc.
  - Metamateriales acústicos: control y mitigación de vibraciones y de ondas de choque, lentes acústicas, etc.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

4. PRINCIPALES ACTORES NACIONALES E INTERNACIONALES

4. PRINCIPALES ACTORES NACIONALES E INTERNACIONALES

4.1. Análisis

Los principales polos de I+D en metamateriales se encuentran en Europa, Estados Unidos y Canadá (ver figura 4.1). De todos los centros inicialmente seleccionados a continuación se destacan como principales actores, y se citan a los investigadores más representativos:

- Birck Nanotechnology Center, Purdue University
- Duke University (Profesor David R. Smith)
- École Polytechnique de Montréal (Profesor Christophe Caloz)
- Imperial College of London (Profesor John Pendry)
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- University of California, Berkeley (Profesor Xiang Zhang)
- University of California, UCLA, (Profesor Tatsuo Itoh)

Todos estos centros dedican recursos económicos muy importantes a la investigación en metamateriales, que les permiten tener instalaciones y equipos muy avanzados de nanotecnología, gracias a los cuales tienen la posibilidad de trabajar en el rango de las frecuencias ópticas y realizar caracterizaciones experimentales en dicho rango. Como pionero y autoridad reconocida en la materia destacamos al profesor *John Pendry*, que además es el pionero en la descripción de la lente perfecta o «superlente» y por su contribución para las aplicaciones de encubrimiento e invisibilidad.

En España, sólo el Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid, perteneciente al CSIC, tiene recursos y equipos de nanotecnología avanzados como para poder competir en el rango de las frecuencias ópticas. El resto de los centros, en general, trabajan los metamateriales de manera experimental en el rango de las microondas, para lo cual no es necesario realizar inversiones excesivamente altas en equipos. Por este motivo hay una actividad destacable en la aplicación a circuitos activos y pasivos de microondas.

También se han identificado a dos empresas norteamericanas pioneras en la fabricación y comercialización de antenas en serie que contienen metamateriales, que trabajan principalmente en el rango de las microondas:

– Fractal Antenna Systems
– Rayspan Corporation

Además la empresa Rayspan dispone de la propiedad intelectual de numerosas patentes internacionales, y está pendiente de otras adjudicaciones, principalmente relacionada con aplicaciones avanzadas de la tecnología inalámbrica aplicando metamateriales. También otorga licencias relacionadas con sus patentes de metamateriales, especialmente para aplicaciones de radiofrecuencia a los principales fabricantes de dispositivos inalámbricos a nivel mundial.

Analizando las patentes, se observa un número notablemente mayor de patentes relacionadas con aplicaciones avanzadas en Estados Unidos que en Europa (no sólo en las resumidas en este documento dado que hay miles). Al estar todavía los metamateriales en fase de I+D y no en productos comerciales, la propiedad y la explotación de las patentes sí que podrían implicar en el futuro un salto tecnológico entre Estados Unidos y Europa.

Figura 4.1. Principales centros de I+D de metamateriales.

En Europa no se han detectado empresas que comercialicen este tipo de antenas, porque ya se fabrican antenas que hoy por hoy tienen las mismas prestaciones, aunque no contengan metamateriales. Se considera, por tanto, en la fabricación y desarrollo de producto hay una diferencia muy pequeña y no relevante entre Estados Unidos y Europa.

Con estos datos se concluye que actualmente no existe un gran salto o brecha tecnológica entre Estados Unidos y Europa en el campo de los metamateriales. Pero este salto se dará cuando se consiga llevar a la práctica las aplicaciones (ya muy avanzadas de manera teórica) de encubrimiento, superlentes, etc, en el rango visible, infrarrojo o terahercios, no sólo en las microondas.

4.2. Relación de entidades nacionales

A continuación se destacan las principales empresas, centros I+D, grupos de universidades y asociaciones más activos en el campo de los metamateriales en España.

• CIMITEC
• CSIC - Instituto de Ciencias de Materiales
• CSIC - Instituto de Óptica
• DAS Photonics
• ICFO
• Tafco Metawireless S.L.
• Universidad Autónoma de Barcelona
• Universidad Carlos III de Madrid
• Universidad de Granada
• Universidad de Málaga
• Universidad Miguel Hernández
• Universidad Politécnica de Cataluña
• Universidad Politécnica de Valencia - Grupo de Aplicaciones de Microondas
• Universidad Politécnica de Valencia - Grupo de Fenomenos de Onda
• Universidad Pública de Navarra - Grupo de Antenas
• Universidad Pública de Navarra - Grupo de Grupo de Comunicaciones Señales y Microondas
• Universidad de Sevilla
• Universidad de Valencia
• Red Española de Metamateriales (REME)

4.3. Universidades, centros I+D, grupos y empresas nacionales

Grup d'Enginyeria de Microones i milimètriques - GEMMA Centre d'Investigació en Metamaterials per a la Innovació en Tecnologies Electrònica i de Comunicacions (CIMITEC) **Universitat Autònoma de Barcelona**	
Contacto	Grup d'Enginyeria de Microones i mililimètriques - GEMMA Centre d'Investigació en Metamaterials per a la Innovació en Tecnologies Electrònica i de Comunicacions (CIMITEC) Departament d´Enginyeria Electrònica (3ª planta) Escola Tècnica Superior d´Enginyeria Universitat Autònoma de Barcelona Campus de la UAB 08193 Bellaterra, Barcelona Tel.: 935 814 803/3183 Fax. 935 812 600 Email: cimitec@uab.es http://cimitec.uab.es
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	CIMITEC aplica las propiedades de los metamateriales al desarrollo de diferentes componentes de radiofrecuencia y microondas como filtros, antenas, acopladores, divisores, etc, miniaturizados, para obtener mejores prestaciones y nuevas funcionalidades, como pueden ser componentes con ancho de banda mejorado, multibanda, reconfigurables, etc. En el campo de los metamateriales CIMITEC combina investigación básica e investigación aplicada como la reducción de las dimensiones de los cabezales de radiofrecuencia, encargados de la recepción, transmisión y procesado de las diferentes señales. También, desarrolla dispositivos en los que incorpora metamateriales para identificación por radiofrecuencia (RFID), comunicaciones inalámbricas, sistemas radar o la industria aeronáutica, entre otros.

Grupo de Cristales Fotónicos **Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid**	
Contacto	Grupo de Cristales Fotónicos Departamento de Propiedades Ópticas, Magnéticas y de Transporte (CSIC) Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid C/ Sor Juana Inés de la Cruz 3 28049 Madrid Tel.: 913 349 019 Email: cefe@icmm.csic.es www.icmm.csic.es
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El grupo está desarrollando nanoestructuras fotónicas y metamateriales para aplicaciones en fotónica y acústica. Analizan la influencia de la absorción y dispersión propia de los metamateriales sobre la refracción y la formación de imagen. También se han analizado las distintas propuestas para superar el problema de las pérdidas. En primer lugar los cristales fotónicos con refracción negativa, en los que se llegó a la conclusión de que a pesar de que éstos forman una imagen isoplanática, no poseen la capacidad de superresolución. Dentro de la refracción anómala en cristales fotónicos, se han estudiado aquellos con autoguiado y se han propuesto diferentes aplicaciones. En segundo lugar, se ha propuesto un modelo teórico que estudia la resonancia de un metamaterial (sistema bosónico) acoplado por medio de las interacciones de los campos locales a una resonancia de un medio de ganancia por un sistema de dos niveles (sistema fermiónico). A partir del modelo se calcula la respuesta lineal, el estado estacionario del sistema de ganancia y el valor estacionario para la ocupación, así como la dinámica del sistema. Finalmente, se realiza una analogía entre la refracción anómala en cristales fotónicos y la refracción anómala de electrones en un sistema mesoscópico bidimensional, el grafeno.

Grupo de Nanofotónica **Instituto de Óptica del CSIC**	
Contacto	Grupo de Nanofotónica Instituto de Óptica del CSIC C/ Serrano 121 28006 Madrid Tel.: 915 616 800 Email: j.g.deabajo@csic.es http://nanophotonics.csic
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Las principales actividades que ha desarrollado el Grupo de Nanofotónica en los últimos años en el campo de metamateriales se pueden resumir en tres líneas: 1) Absorción total omnidireccional de luz: este fenómeno se basa en resonancias de plasmón localizadas en huecos de metales porosos. La luz que llega a dichos materiales queda atrapada en dichos huecos y, bajo las condiciones adecuadas (geometría de los huecos), se absorbe totalmente en el metal en lugar de ser radiada de nuevo. Se da para cualquier ángulo de incidencia. 2) Guías plasmónicas ultracompactas: se describe el guiado de señales ópticas a través de plasmones en una configuración de hilos paralelos que posibilitaría un grado de integración óptico con un mínimo de *crosstalk* (diafonía entre dos circuitos) entre guías. 3) Estudios de modos de red en superficies, con aplicación a nuevos materiales capaces de soportar excitaciones de superficie de características extraordinarias: se estudia el efecto de la asimetría en estos modos; los modos plasmónicos de simetría TE, en contraposición a los modos TM de superficies ordinarias; la difracción de plasmones en superficies nanoestructuradas; y las trampas ultra-pequeñas de plasmones.

DAS Photonics	
Contacto	DAS Photonics Ciudad Politécnica de la Innovación Camino de Vera s/n Edificio 8F 46022 Valencia Tel.: 963 556 150 Fax.: 963 562 581 Email: das@dasphotonics.com www.dasphotonics.com
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	DAS Photonics diseña dispositivos basados en metamateriales fotónicos. Dentro de esta amplia gama de tecnologías, realiza actividades de desarrollo relacionadas con resonancias de plasmones superficiales (SPR). La empresa estudia la posibilidad de aplicar esta tecnología utilizando el fenómeno de transmisión extraordinaria para realizar filtrado en el infrarrojo. Sus objetivos principales son implementar estructuras de *arrays* de agujeros sub-lambda realizadas sobre láminas metálicas, que dan lugar al fenómeno de transmisión óptica extraordinaria (EOT) y disponer de técnicas eficientes de diseño de dichas estructuras para su implementación como filtros ultracompactos en el infrarrojo que permitan integrarlos en distintos circuitos integrados. Las estructuras pueden emplearse en multitud de aplicaciones como sensores biológicos, componentes ópticos, filtros, etc. Estos desarrollos permitirían su aplicación en telecomunicaciones o en sistemas de seguridad y defensa para la detección de agentes potencialmente nocivos.

Grupo de NanoÓptica Plasmónica **ICFO (Instituto de Ciencias Fotónicas)**	ICFO Institut de Ciències Fotòniques
Contacto	Grupo de NanoÓptica Plasmónica ICFO Parque Tecnológico del Mediterráneo Avenida del Canal Olímpic s/n 08860 Castelldefels, Barcelona Tel.: 935 534 001 Fax.: 935 534 000 Email: silvia.carrasco@icfo.es www.icfo.es
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de NanoÓptica Plasmónica dispone de una tecnología de transformación óptica aplicada a los plasmones superficiales para el desarrollo de metamateriales. El grupo también trabaja en diferentes demostraciones teóricas. Como ejemplo, tratan de demostrar que cuando los metamateriales son interpuestos en el camino de la propagación de la luz pueden volver invisibles objetos sobre una superficie a frecuencias ópticas.

Tafco Metawireless S.L.	
Contacto	Tafco Metawireless S.L. Polígono Mocholi, 5 31110, Noain, Navarra Tel.: 948 312 418 Fax.: 948 169 720 Email: jmarcotegui@tafcomw.com www.tafcomw.com
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La línea de negocio de metamateriales está enfocada a su aplicación en el diseño de antenas y filtros para comunicaciones inalámbricas y aeroespaciales, minimización de la firma radar en sector civil y de defensa, y diseño de biochips para sensores biológicos. Tafco Metawireless posee diseños de antenas de perfil plano basadas en metamateriales que pueden operar en ambientes muy exigentes, filtros en guía para muy alta potencia ultracompactos, filtros miniaturizados en tecnología plana y superficies selectivas en frecuencia para radomos y apantallamientos.

Grupo de Antenas y Sistemas de Microondas **Universitat Autònoma de Barcelona**	Universitat Autònoma de Barcelona
Contacto	Grupo de Antenas y Sistemas de Microondas Universitat Autònoma de Barcelona Campus de la UAB Edificio Q 08193 Cerdanyola del Vallès, Barcelona Tel.: 935 814 035 Fax.: 935 814 031 Email: josep.parron@uab.es http://tes.uab.es/TSC/research/communications/antenna.htm
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de Antenas y Sistemas de Microondas estudia principalmente las potenciales aplicaciones de los metamateriales en sistemas emisores de radiación y desarrolla herramientas informáticas para analizar la eficiencia de las estructuras. Ha trabajado en la caracterización y modelado de metamateriales para establecer relaciones entre observables constitutivos y prestaciones a nivel eléctrico que puedan utilizarsse en el diseño de nuevas antenas y circuitos. Para ello, desarrollan herramientas de simulación electromagnética en el dominio del tiempo y de la frecuencia que permiten analizar, con un coste computacional reducido, estructuras finitas con un elevado número de elementos y/o pequeños detalles. El grupo dispone de códigos propios, lo que permite optimizar los rendimientos en función del problema a resolver. A partir de los comportamientos especiales que se pueden obtener haciendo uso del concepto de metamaterial proponen y desarrollan dispositivos con nuevas funcionalidades. Algunos ejemplos de aplicaciones en las que han trabajado son: conductores artificiales magnéticos para reflectores de perfil reducido, superficies selectivas en frecuencia, antenas multibanda basadas en trampas en frecuencia para WiFi y WiMAX y mezclador dual basado en un híbrido de 90º con las bandas de funcionamiento separadas un factor de 2.5.

Grupo de Radiofrecuencia **Universidad Carlos III de Madrid**	
Contacto	Grupo de Radiofrecuencia Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones Escuela Politécnica Superior Universidad Carlos III de Madrid Avenida de la Universidad, 30 28911 Leganés, Madrid Tel.: 916 248 748 Fax.: 916 248 749 dani@tsc.uc3m.es www.tsc.uc3m.es/index.html
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de Radiofrecuencia principalmente trabaja en la realización de antenas impresas multifunción y multifrecuencia basadas en metamateriales. Una de sus líneas de trabajo es la aplicación de metamateriales en antenas y dispositivos de microondas (filtros, etc.): – Desarrollos usando estructuras CRLH (*Composite Right/Left Handed*) para aplicaciones en antenas y en filtros. – Nuevas tecnologías en la construcción de antenas: *Electronic Band Gap Materials* (EBGs), *Frequency Selective Surfaces* (FSS) y metamateriales.

Grupo de Electromagnetismo **Universidad de Granada**	
Contacto	Grupo de Electromagnetismo Departamento de Electromagnetismo Facultad de Ciencias Universidad de Granada 8071 Granada Tel.: 958 240 507 Fax.: 958 242 353 Email: salva@ugr.es http://maxwell.ugr.es
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de Electromagnetismo de la Universidad de Granada centra su actividad en el diseño y análisis de sistemas electromagnéticos mediante herramientas computacionales en aplicaciones tanto civiles como militares. En particular han desarrollado un software de simulación paralelo basado en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo, capaz de tratar con total generalidad cualquier problema electromagnético complejo (con materiales arbitrariamente dispersivos, cables, metamateriales, etc.). El software se emplea, junto a herramientas de optimización heurística, en el diseño de antenas en la banda milimétrica y terahercios. También, se utiliza en proyectos de detección de objetos enterrados mediante radares de subsuelo (GPR), junto con *hardware* comercial. También se utiliza en la simulación de metamateriales quirales y bianisótropos y sirve para tratar problemas que incluyan metamateriales: antenas, dispositivos de RF, etc.

Grupo de Ingeniería de Comunicaciones **Universidad de Málaga**	UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
Contacto	Grupo de Ingeniería de Comunicaciones ETSI Telecomunicaciones Universidad de Málaga Campus Universitario de Teatinos s/n 29071 Málaga Tel.: 952 131 440 Email: dic@ic.uma.es www.ic.uma.es
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de Ingeniería de Comunicaciones investiga en circuitos activos y pasivos de microondas y milimétricas inspirados en metamateriales. La idea fundamental de esta línea de investigación consiste en utilizar conceptos derivados de los fenómenos de propagación electromagnética en metamateriales para concebir circuitos activos y pasivos de microondas y milimétricas con nuevas prestaciones y funcionalidades. Se basa en el denominado «enfoque de ingeniería» en el ámbito de los metamateriales, esto quiere decir que se pueden sintetizar los fenómenos de propagación *backward* en sistemas de transmisión sin necesidad de disponer de un verdadero metamaterial, utilizando para ello el concepto de línea o sistema de transmisión artificial. La aplicación de este enfoque ha sugerido al grupo nuevos diseños en el ámbito de las antenas y de los circuitos distribuidos activos. En concreto, se han propuesto, diseñado y construido antenas de ranura sobre guía de onda compuesta diestra-zurda que presentan interesantes prestaciones. También, se han propuesto nuevos diseños de amplificadores distribuidos que presentan novedosas funcionalidades, tales como respuesta multibanda, comportamiento diplexor o combinación óptima de potencia. Estas ideas también se han utilizado en el diseño de mezcladores distribuidos con respuesta doble-banda y comportamiento diplexor, incorporando al mismo tiempo rechazo a la frecuencia imagen. Algunos de estos diseños se encuentran en fase de fabricación en tecnología monolítica.

	El grupo también investiga las posibilidades que ofrece la combinación de estos nuevos diseños de amplificadores y mezcladores distribuidos con elementos radiantes en tecnología planar, para obtener antenas activas con novedosas prestaciones. Además, se está trabajando en el diseño de superficies artificiales inspiradas en metamateriales, para su aplicación en el ámbito de las antenas y de los sistemas de transmisión, y en el análisis de nuevas topologías de líneas de transmisión artificiales con propagación backward, que serían de interés en el diseño de circuitos pasivos tales filtros, acopladores, etc. El Grupo de Ingeniería de Comunicaciones colabora con el con el Departamento de Electromagnetismo y Teoría de Circuitos de la Universidad Politécnica de Madrid en las actividades relacionadas con metamateriales.

Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Miguel Hernández	
Contacto	Universidad Miguel Hernández Avenida de la Universidad, s/n 03202 Elche, Alicante Tel.: 966 658 600 Fax.: 966 658 903 Email: angela.coves@umh.es www.tsc.umh.es
Descripción de sus actividades relacionadas con metamariales	Investigación en la aplicación de metamariales para filtros compactos de altas prestaciones.

Grupo de AntennaLab **Universidad Politécnica de Cataluña**	
Contacto	Grupo de AntennaLab Departamento Teoría de las Señales y Comunicaciones Universidad Politécnica de Cataluña C/ Jordi Girona, 1-3, Módulo D3, Campus Norte 08034 Barcelona Tel.: 934 016 785 Fax.: 934 017 232 Email: jmgonzalez@tsc.upc.edu www.tsc.upc.edu
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo AntennaLab de la Universidad Politécnica de Cataluña centra su actividad investigadora en el campo de los metamateriales en el desarrollo de pantallas magnéticas y pantallas transpolarizadoras aplicadas, respectivamente, a sistemas radiantes o sistemas de detección remota. Las pantallas magnéticas artificiales suelen fabricarse con materiales metalodieléctricos de bajas pérdidas siendo su principal característica la reflexión en fase de los campos eléctricos manteniendo su polarización. Estas pantallas permiten el diseño de sistemas de antenas más compactos y planos que los convencionales, o bien el diseño de elementos de aislamiento en sistemas constituidos por más de una antena que no perjudican a la radiación de las mismas como ocurre en los sistemas convencionales. Las pantallas transpolarizadoras, también fabricadas con materiales metalodieléctricos, provocan cambios de polarización de 90º en los campos eléctricos que se reflejan en ellas. Estas pantallas están siendo integradas en los triedros que se emplean como elementos de calibración de sistemas polarimétricos de detección remota por satélite y permiten la obtención de una matriz de calibración completa al incluir componentes de polarización cruzada conocidas.

Grupo de Aplicaciones de Microondas **Universidad Politécnica de Valencia**	
Contacto	Grupo de Aplicaciones de Microondas Departamento de Comunicaciones Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia ETSI Telecomunicaciones Universidad Politécnica de Valencia Camino de Vera s/n 46022 Valencia Tel.: 963 879 718 (Ext. 9718) Fax.: 963 877 309 (Ext. 7309) Email: vboria@dcom.upv.es http://personales.upv.es/vboria www.gam.upv.es/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de Aplicaciones de Microondas de la Universidad Politécnica de Valencia ha desarrollado una importante actividad en el ámbito del análisis, diseño y verificación experimental de componentes pasivos de microondas, en particular filtros basados en metamateriales con anillos resonantes e implementados tanto en tecnología guiada como planar. En el ámbito del modelado de dichas estructuras, se ha contribuido con modelos circuitales equivalentes, así como con las técnicas de análisis más avanzadas, para abordar el análisis riguroso de estas complejas estructuras. También están desarrollando nuevos métodos eficientes que faciliten el diseño de los citados componentes pasivos (filtros) de microondas basados en metamateriales. En algunas de las mencionadas líneas de investigación trabajan en colaboración con una empresa de base tecnológica que surge del propio grupo, denominada Aurora Software and Testing.

Grupo de Fenomenos de Onda (GFO) **Universidad Politécnica de Valencia**	
Contacto	Grupo de Fenómenos de Onda (GFO) Departamento de Ingeniería Electrónica ETSI Telecomunicaciones Universidad Politécnica de Valencia Camino de Vera s/n 46022 Valencia Tel.: 963 879 607 Fax.: 963 877 309 Email : jsdehesa@upvnet.upv.es www.upv.es/entidades/DIEO
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de Investigación de Fenómenos Ondulatorios (GFO), del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia, está trabajando en el estudio de metamateriales dirigidos a la consecución de la «indetectabilidad» acústica. Para ello, están desarrollando diferentes estructuras cilíndricas fabricadas con materiales elásticos que den lugar a un «manto de invisibilidad» para el sonido (*acoustic cloak*). Este equipo de trabajo está coliderando un proyecto de investigación básica para la US Navy en el que se estudiarán teórica y experimentalmente cómo conseguir estos nuevos materiales. El proyecto cuenta además con la participación del Departamento de Ingeniería Mecánica y Nuclear de la Universidad de Kansas y con la División Acústica del Naval Research Laboratory de Estados Unidos.

Grupo de Antenas **Universidad Pública de Navarra**	
Contacto	Grupo de Antenas Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad Pública de Navarra Campus de Arrosadia 31006 Pamplona, Navarra Tel.: 948 169 023 Fax.: 948 169 720 Email: ramon@unavarra.es www.iee.unavarra.es/Personal/ramongonzaloficha.htm
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Grupo de Antenas trabaja desarrollando metamateriales para su aplicación en el campo de las antenas y dispositivos relacionados con la radiación electromagnética en el rango de las microondas, las milimétricas y los terahercios. En particular, ha realizado desarrollos en antenas para mejorar las características de radiación, reducir el acoplo entre elementos, reducir sus dimensiones, facilitar las posibilidades de barridos electrónicos y reducir el coste en comparación con diseños basados en tecnología convencional. Se han diseñado antenas basadas en metamateriales para diferentes aplicaciones espaciales y estructuras planas metamateriales de espesor muy reducido que permiten disminuir de forma inteligente la sección recta radar de un objeto. El grupo también diseña cámaras de imagen en el rango de los terahercios basadas en tecnología de metamateriales y, en los últimos años, ha incluido entre sus líneas de investigación el desarrollo de superficies absorbentes siguiendo principios de estructuras metamateriales.

Grupo de Comunicaciones, Señales y Microondas **Universidad Pública de Navarra**	
Contacto	Grupo de Comunicaciones, Señales y Microondas Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Laboratorio de Ondas Milimétricas y Terahercios Universidad Pública de Navarra 31006 Pamplona, Navarra Tel.: 948 169 324 Fax.: 948 169 720 Email: mario@unavarra.es www.csm.unavarra.es
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Laboratorio de Ondas Milimétricas y Terahercios del grupo, trabaja en actividades de investigación y desarrollo relacionadas con las microondas, las ondas milimétricas y submilimétricas o terahercios. Aplican metamateriales para el diseño de antenas y filtros para comunicaciones inalámbricas y aeroespaciales, minimización de la firma radar y diseño de biochips para sensores biológicos. El grupo realizó el primer medio zurdo en tecnología impresa, la introducción del anillo de Pendry complementario, la demostración de las ondas electroinductivas, la demostración experimental en milimétricas de transmisión extraordinaria y sus apilamientos, que llevan a refracción negativa en placas apiladas, prismas, lentes plano-cóncavas y bicóncavas, y la transmisión extraordinaria anómala medida a 2.5 THz. Del Grupo de Comunicaciones, Señales y Microondas se creó el spin-off Tafco Metawireless S.L.

Grupo de Microondas **Universidad de Sevilla**	
Contacto	Grupo de Microondas Departamento de Electrónica y Electromagnetismo Universidad de Sevilla Avda. Reina Mercedes s/n 41012 Sevilla Tel.: +34 954 553891. Fax.: +34 954 239434 Email: marques@us.es http://personal.us.es/marques/ http://grupo.us.es/gmicronda
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Las principales líneas de investigación del Grupo de Microondas relacionadas con metamateriales son: – Modelado y diseño de metamateriales (desde las microondas a las frecuencias ópticas). – Aplicación de las estructuras de metamateriales basadas en filtros de microondas y superficies selectivas en frecuencias. – Ondas electroinductivas y magnetoinductivas. – RF y lentes perfectas en microondas basadas en ondas magnetoinductivas acopladas en superficie.

Grupo de Fibras Ópticas **Universidad de Valencia**	
Contacto	Grupo de Fibras Ópticas Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo Universidad de Valencia C/ Dr. Moliner 50 46100 Burjassot, Valencia Tel.: 963 543 338 Fax.: 963 543 146 Email: miguel.andres@uv.es www.uv.es/~semicon/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La actividad investigadora desarrollada por el Grupo de Fibras Ópticas de la Universidad de Valencia en metamateriales es teórica y se fundamenta en el desarrollo de técnicas numéricas propias para la modelización de estructuras multicapa que incluyen metamateriales. Los estudios se realizan principalmente en frecuencias ópticas, pero en muchos casos hay una escalabilidad directa de los resultados a otras longitudes de onda. Los trabajos realizados se centran en la identificación de nuevos tipos de bandas prohibidas no interferométricas: – Bandas de índice de refracción promedio nulo. – Bandas de permeabilidad magnética nula. – Bandas de permitividad dieléctrica nula. El grupo ha estudiado las propiedades de estas bandas prohibidas en estructuras periódicas y cuasiperiódicas y el caso de cristales fotónicos y sistemas aperiódicos tipo Fractal de Cantor, secuencias de Fibonacci, m-bonacci y Thue–Morse.

También se destaca la principal asociación española de metamateriales, a la que pertenecen casi todos los grupos seleccionados anteriormente.

Red Española de Metamateriales (REME)	REME Red Española de Metamateriales
Contacto	Red Española de Metamateriales Tel.: 954 553 891 medina@us.es http://grupo.us.es/gmicronda/REME/REME.htm
Descripción de sus actividades	Las principales actividades de la Red Española de Metamateriales son: – Potenciar la coordinación entre los grupos de investigación y entre éstos y las empresas del sector. – Potenciar el intercambio de información entre los grupos y la formación al más alto nivel de sus investigadores jóvenes. – Fomentar la presencia española en el espacio europeo y otros foros internacionales. – Fomentar la difusión de los resultados de investigación en el entramado Universidad - Investigación - Empresa.

4.4. Relación de entidades internacionales

A continuación se destacan las principales empresas, centros I+D, grupos de universidades y asociaciones más activos en el campo de los metamateriales a nivel internacional en Europa, Estados Unidos y Canadá.

• Birck Nanotechnology Center Purdue University
• Boeing International Corporation
• Boston University
• Duke University
• École Polytechnique de Montréal
• Fractal Antenna Systems
• Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques (FHR)
• Imperial College London – Centre for Plasmonics and Metamaterials
• Rayspan Corporation
• Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
• Rice University
• Toyota
• University of California - Berkeley
• University of California - UCLA
• University of Illinois
• University of Liverpool
• University of Pennsylvania
• Vector Fields Cobham
• Virtual Institute for Artificial Electromagnetic Materials and Metamaterials (Metamorphose VI)

4.5. Universidades, centros I+D, grupos y empresas internacionales

Birck Nanotechnology Center **Purdue University**	PURDUE UNIVERSITY Discovery Park Birck Nanotechnology Center
Contacto	Birck Nanotechnology Center 1205 W State Street West Lafayette Purdue University, EE.UU. Tel.: +1 765.494.7053 www.purdue.edu/discoverypark/nanotechnology/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Birck Nanotechnology Center incluye entre sus investigaciones la aplicación de los metamateriales para avances en las tecnologías ópticas, incluyendo nuevos microscopios, equipos informáticos y capas invisibles. Destaca el desarrollo de un metamaterial tipo red, con agujeros de unos 100nm de diámetro y capas de plata y aluminio, que podría utilizarse en múltiples aplicaciones que están ensayando a nivel de laboratorio.

Boeing International Corporation	
Contacto	100 North Riverside Chicago Illinois 60606, EE.UU. Tel.: +1 312 544 2000 www.boeing.com
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Esencialmente desarrollan metamateriales destinados a la futura fabricación de sistemas de escaneo con antenas y dispositivos electromagnéticos. Tienen como objetivo la mejora de sus actuales antenas, sobre todo con una importante reducción de su tamaño y coste. Boeing también investiga la creación de superlentes y su futura integración en sistemas comerciales En sus laboratorios, se testean los comportamientos electromagnéticos y se aplican herramientas de modelado y simulación en los nuevos materiales, para conocer sus propiedades. En el campo de defensa, Boeing ha trabajado en proyectos relacionados con metamateriales en colaboración con las Universidad de California y San Diego para la Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA).

Boston University	
Contacto	One Silber Way Boston MA 02215, EE.UU. Tel.: +1 617 353 2000 www.bu.edu/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La Universidad de Boston ha desarrollado textiles flexibles con multicapas utilizando metamateriales. Ha creado un detector fabricado con diversos metamateriales capaz de absorber múltiples longitudes de onda simultáneamente. Otro campo en el que investigan es en dispositivos de metamateriales en el rango de los terahercios. Trabajan en ingeniería de metamateriales y en su función como dispositivos en el rango de los terahercios del espectro electromagnético. También ha fabricado metamateriales flexibles, similares a un plástico y amplias estructuras bio-compatibles con substratos de seda.

Meta Group **Duke University**	
Contacto	Duke University 102 Allen Building F Durham, NC 27708-0001, EE.UU. Tel.: +1 (919) 684-8111 www.duke.edu
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Los ingenieros de la Universidad de Duke han creado una nueva generación de lentes utilizando metamateriales que podrían mejorar enormemente las capacidades actuales de las telecomunicaciones y sistemas de radares. Principalmente estudian la alteración de materiales entre superficies para el control de la dirección de los rayos de luz, en lugar de los métodos tradicionales de la modificación y pulidos superficiales. También están especializados en compuestos multifuncionales, óptica de transformación y refracción negativa, y han sido financiados por el Army Research Office (ARO).

École Polytechnique de Montréal	ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
Contacto	Electromagnetics Theory and Applications Research Group École Polytechnique de Montréal Pavillon Lassonde, Office M-6025 Poly-Grames Research Center 2500, ch. de Polytechnique Montreal, H3T 1J4, Quebec, Canada Tel.: +1 (514) 340 4711, ext. 3326 Fax.: +1 (514) 340 5892 Email: christophe.caloz@polymtl.ca www.calozgroup.org/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La Escuela Politécnica de Montreal trabaja con metamateriales a nivel teórico, de modelado y tecnológico creando modelos matemáticos e informáticos. Su principal objetivo y actividad se centra en el diseño y fabricación de componentes electrónicos de alta frecuencia, para diversas aplicaciones: – Sistemas de redes. – Antenas permeables a ciertas longitudes de onda. – Componentes de superficie plasmónica. – Tecnologías de ondas milimétricas. – Comunicaciones *wireless.* – Sensores.

Fractal Antenna Systems, Inc.	
Contacto	130 Third Avenue Waltham MA 02451, USA Tel.: +1 781 275 2300 ext. 09 Fax.: +1 781 240 8199 jwinter@fractenna.com www.fractenna.com
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Fractal Antenna Systems diseña y fabrica antenas compactas de alta fiabilidad utilizando metamateriales. También realiza actividades de I+D en diseños geométricos específicos y en creación de metodologías informáticas para la optimización y la aplicación de metamateriales en antenas. Fractal Antenna Systems trabaja en algunos casos en diseños «a medida» para sus clientes, que incluyen el diseño, la producción, la realización de tests y la implementación de los dispositivos. Sus antenas y productos se comercializan esencialmente para las siguientes aplicaciones relacionadas con Defensa: – Guerra electrónica – Señales de inteligencia – Comunicaciones tácticas También comercializa sus productos en aplicaciones civiles: – Redes wireless – Telemática – RFID – Integración en sistemas portátiles – Automatización de procesos (monitorización de electricidad, gas,...)

Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques (FHR)	Fraunhofer
Contacto	Fraunhofer Institute for High Frequency Research Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques Neuenahrer Street 20 53343 Wachtberg Germany Tel. +49 228 9435-561 Fax. +49 228 9435-521 Email: bertuch@fgan.de www.fhr.fgan.de/fhr/fhr_c1_f4_en.html
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Instituto Fraunhofer de Física de Alta Frecuencia y Técnicas Radar investiga conceptos, métodos y sistemas de sensores electromagnéticos, particularmente en los campos de radar y radiometría. Dentro de las ocho áreas de investigación del FHR, existen una serie de proyectos entre los cuales destaca el de Materiales Electromagnéticos. Este proyecto tiene por objeto aplicación de la nueva tecnología de metamateriales para la mejora de componentes clave. Para este fin, por una parte, se realiza se realiza la investigación básica y por otra parte se trata de identificar áreas de aplicación y realización de soluciones tecnológicas. Entre las actividades desarrolladas en el proyecto destacan la aplicación de superficies EBG de bajo coste para la mejora del aislamiento en antenas o la integración de la antena de GPS en dichas superficies para la reducción de interferencias en el sistema.

Imperial College London Centre for Plasmonics and Metamaterials	Centre for Plasmonics & Metamaterials — Imperial College London
Contacto	Centre for Plasmonics and Metamaterials Imperial College London South Kensington Campus, London SW7 2AZ Tel.: +44 (0)20 7589 5111202 www.imperial.ac.uk/plasmonmeta
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El Centre for Plasmonics & Metamaterials es una institución transversal del Imperial College London, que cubre una amplia gama de investigaciones en plasmónica y metamateriales. Trabaja tanto en desarrollos teóricos fundamentales como en investigación experimental aplicada, y busca obtener sistemas disruptivos principalmente en comunicaciones, energía, informática y medicina. El profesor John Pendry es uno de los máximos responsables del Centre for Plasmonics & Metamaterials.

Karlsruhe Institute of Technology (KIT).	
Contacto	Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Southern Campus Institute of Applied Physics AG Prof. Dr. Martin Wegener Wolfgang-Gaede-Straße 1 76131 Karlsruhe Germany Tel.: +49 0721 608-3401 Fax.: +49 0721 608-8480 www.kit.edu/english/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La investigación más avanzada en el campo de los metamateriales del Karlsruhe Institute of Technology se centra en su caracterización experimental, principalmente en el rango visible e infrarrojo cercano. Para la fabricación de estructuras planas utilizan principalmente litografía con haces de electrones, mediante microscopía electrónica. Con esta técnica han producido varios tipos de «átomos magnéticos» diseñados específicamente para frecuencias ópticas. En diferentes experimentos, han obtenido metamateriales pioneros con una respuesta magnética en el rango de entre 100 y 300 terahercios (longitud de onda de 1 a 3 mm).

Rayspan Corporation	RAYSPAN® Pioneering Metamaterials
Contacto	11975 El Camino Real, Suite 301 San Diego, CA 92130-2543, EE.UU. Tel.: 858 259 9596 Fax.: 858 259 9568 info@rayspan.com www.rayspan.com/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Rayspan es una empresa innovadora en soluciones de interfaces para redes de comunicaciones *wireless* de altas prestaciones utilizando metamateriales. Sus soluciones proporcionan mejoras en el rendimiento de las antenas y permiten la miniaturización de componentes de RF, así como la reducción de costes de fabricación. Rayspan trabaja principalmente redes WAN inalámbricas fija y móvil y aplicaciones de LAN, incluyendo WiFi, todos los teléfonos 2/3/4G, Bluetooth y GPS. Los metamateriales hacen que se puedan desarrollar componentes ultracompactos, de varias bandas y modos de funcionamiento, dispositivos MIMO WLAN y teléfonos móviles con una alta velocidad de comunicación, autonomía y movilidad. Los principales dispositivos que fabrica Rayspan son: – Antenas. – Amplificadores de potencia. – Filtros. – Diplexores. – Acopladores Direccionales. – Combinadores de potencia. – Divisores de haz. – Otros Componentes de RF. Rayspan dispone de la propiedad intelectual de numerosas patentes nacionales e internacionales y está pendiente de otras adjudicaciones, principalmente relacionadas con aplicaciones avanzadas de la tecnología inalámbrica aplicando metamateriales. Rayspan también otorga licencias relacionadas con sus patentes de metamateriales, especialmente para aplicaciones de RF a los principales fabricantes de dispositivos inalámbricos a nivel mundial.

Rice University	RICE
Contacto	Fondren Library Rice University 6100 Main Street Houston Texas 77005, EE.UU. Tel.: +1 713 348 7423 www.rice.edu/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La Universidad de Rice desarrolla nuevos materiales aplicando nanotecnología, crea nuevas nanopartículas con metamateriales y aísla varias nanocapas contiguas. Especialmente están trabajando en el desarrollo de nanocélulas, de 2 y 3 dimensiones que se activan con la radiación electromagnética en el rango del visible. Las principales aplicaciones para las que consideran que servirán los nuevos materiales y las nanocélulas son muy variadas, en los campos civiles y militares: – Ópticas de altas prestaciones, en diferentes longitudes de onda. – Células solares ultraeficientes. – Capas invisibles. – Aplicaciones en biología y medicina, como establecer diagnósticos, y procedimientos no invasivos para el tratamiento del cáncer.

Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc.	TOYOTA
Contacto	19001 South Western Avenue Dept. WC11 Torrance, CA 90501, USA Tel.: +1 800 331 4331 www.toyota.com
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Toyota está trabajando en la implementación de antenas basadas en metamateriales como sensores de control de navegación y sistemas de seguridad en automóviles, así como en métodos numéricos para potenciales aplicaciones de antenas móviles. Toyota ya dispone de complejos métodos de optimización basados en el diseño de metamateriales y su aplicación en dispositivos ópticos, dispositivos de microondas, radares y antenas. Las técnicas desarrolladas por Toyota podrían servir en un futuro para la implantación de los dispositivos basados en metamateriales en la industria de la automoción e incluso para su fabricación.

University of California	
Contacto	The Zhang Group University of California Gayley Rd & Stadium Rim Way 211 Sproul Hall Berkeley, CA 94720, EE.UU. Tel.: +1 (510) 642 6442 http://students.berkeley.edu/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La Universidad de California estudia de manera teórica lo que denominan «Mecánica Celeste» utilizando simulaciones de metamateriales. Trabajan en el estudio de relaciones entre los materiales de las ópticas y la «Mecánica Celeste», en general con la curvatura espacio-tiempo estudiada teóricamente y las observaciones astronómicas. Por otro lado, un grupo de investigadores de la universidad ha diseñado y fabricado un dispositivo que captura ondas evanescentes en tres dimensiones, cuya estructura interna está formada por metamateriales. Este dispositivo puede acoplarse en receptores de ultrasonidos, con lo que mejora enormemente la resolución de las imágenes obtenidas. También trabajan en otras líneas de investigación relacionadas con metamateriales: – Nanofotónica. – Metamateriales acústicos. – Guiado de ondas de terahercios. – Hiperlentes y superlentes. – Respuesta eléctrica en terahercios. – Capas invisibles.

University of California	UCLA
Contacto	UCLA Microwave Electronics Laboratory Department of Electrical Engineering University of California 405 Hilgard Avenue, Los Angeles, CA 90095, EE.UU. Te:l 310.206.4821 Fax.: 310.206.4819 E-Mail: itoh@ee.ucla.edu www.mwlab.ee.ucla.edu
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	El grupo UCLA Microwave Electronics Laboratory de la University of California liderado por el professor Tatsuo Itoh es pionero en metamateriales de transimisión lineal y en varias estructuras CRLH (*Composite Rigth/Left Handed*). Sus estructuras se utilizan para múltiples aplicaciones como la miniaturización de antenas, filtros, diplexores componentes de frecuencia dual, osciladores, etc.

University of Illinois	
Contacto	University of Illinois 202 Coble Hall 801 South Wright Street Champaign, Illinois 61820, EE.UU. Tel. : +1 217 333 0035 http://illinois.edu/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La Universidad de Illinois investiga esencialmente en el rango de ultrasonidos y desarrolla metamateriales acústicos. Principalmente trabaja en el enfoque de ondas de ultrasonidos mediante lentes planas de metamateriales acústicos compuestas por una red de resonadores de Helmholtz de sub-longitudes de onda. Un grupo de investigadores de la Universidad de Illinois ha sido capaz de crear la primera «superlente» en el rango de las frecuencias acústicas, lo que supone una gran innovación y podría tener futuras implicaciones para aplicaciones en imágenes de alta resolución mediante ultrasonidos, tests no destructivos en edificación y nuevas tecnologías de comunicaciones submarinas.

The University of Liverpool	THE UNIVERSITY of LIVERPOOL
Contacto	Liverpool, L69 3BX, Inglaterra, Reino Unido. Tel.: +44 (0) 151 794 2000 www.liv.ac.uk/
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La Universidad de Liverpool desarrolla modelos de *software* con los que sería posible crear metamateriales capaces de ocultar objetos como aeronaves o submarinos en ciertas longitudes de onda. Los investigadores han creado una «capa invisible» fabricada con metamateriales que puede captar la radiación electromagnética en las longitudes de onda visible, radar o microondas, y en un espacio esférico, hacer que los objetos en estas regiones sean invisibles. También, desarrollan capas invisibles para la protección de costas, y hacen tests sobre su eficiencia para reducir los riesgos de grandes olas capaces de superar las protecciones actuales de las costas.

University of Pennsylvania	
Contacto	Engheta Group Department of Electrical and Systems Engineering School of Engineering and Applied Science University of Pennsylvania 200 South 33rd Street, Room 215, Moore Building Philadelphia, Pennsylvania 19104-6314, EE.UU. Tel.: +1 215 898 9777 Fax.: +1 215 573 2068 Email: engheta@ee.upenn.edu
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	La Universidad de Pensilvania ha desarrollado nuevos conceptos de circuitos ópticos formados por estructuras de metamateriales a escala nanométrica. Uno de sus principales objetivos es la posibilidad de procesar información óptica a escala nanométrica y explotar sus propiedades para una futura fabricación de nanocomponentes de circuitos. Los principales son: – Nanoinductores. – Nanocapacitores. – Nanoresistores. – Nanofiltros. – Nanoaisladores. – Nanoconectores. – Líneas ópticas nanotransmisoras. – Nanoantenas ópticas. – Nanofiltros. – Etc. Estos componentes serían similares a los ya existentes a escala nanométrica. También, aplican los metamateriales desarrollados para futuros desarrollos de capas invisibles a diferentes longitudes de onda.

Vector Fields Cobham	COBHAM
Contacto	Cobham Technical Services 24 Bankside Kidlington, Oxford OX5 1JE, Reino Unido Tel.: +44 (0)1865 370 151 Fax.: +44 (0)1865 370 277 www.vectorfields.com
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Vector Fields participa en el proyecto AMULET «*Advanced Materials for Ubiquitous Leading-edge Electromagnetic Technologies*» junto a la Queen Mary University of London, y el National Physical Laboratory. En el AMULET, se han desarrollado herramientas de *software* para diseñar antenas y equipos RF en las que se incluyen metamateriales. El objetivo es fabricar antenas multifuncionales (capaces de operar en varias bandas de frecuencias) y filtros. Vector Fields, además de participar en la producción, será el encargado de la comercialización de todos los equipos.

También se destaca la principal asociación internacional de metamateriales:

Virtual Institute for Artificial Electromagnetic Materials and Metamaterials (Metamorphose VI)	
Contacto	No hay una dirección física, sino un portal virtual: webmaster@metamorphose-eu.org www.metamorphose-eu.org/ Los socios de la asociación son: – Helsinki University of Technology – Université Catholique de Louvain – Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne – University of Southampton – Bilkent University – Universidad Pública de Navarra – University of Glasgow – Siegen University – St. Petersburg Electrotechnical University – FORTH, Institute of Electronic Structure and Laser – Warsaw University – University of Roma – Loughborough University – University of Siena – Universidad Autónoma de Barcelona – Institute of Electronic Materials Technology
Descripción de sus actividades relacionadas con metamateriales	Las actividades de la asociación se centran en el campo de los metamateriales y de los materiales magnéticos. Las principales labores que realiza son: – Integración, dirección y coordinación de proyectos de I+D. – Organización de conferencias científicas. – Creación y difusión de boletines. – Creación y dirección de programas de I+D. – Creación y dirección de programas de formación que involucran a universidades e industrias simultáneamente. – Gestión de la información y transferencia tecnológica a la industria europea. – Apoyo y servicio a la los fabricantes, distribuidores y potenciales usuarios. – Difusión de la excelencia y de los nuevos descubrimientos y actividades destacadas.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

5. PATENTES

5. PATENTES

5.1. Relación de solicitantes de las patentes

A nivel mundial, se han publicado cientos de patentes relacionadas con los metamateriales. En esta monografía sólo se destacan algunas de ellas, seleccionadas por haber sido concedidas a empresas relacionadas con el sector de defensa, así como por sus potenciales aplicaciones en este sector. La lista de los solicitantes seleccionados es:

• Boeing International Corporation
• Duke University
• Hewlett Packard
• Lockheed Martin
• Los Alamos National Security Laboratory
• Lucent Technologies
• Rayspan Corporation
• Raytheon

5.2. Descripción de las patentes

Título	Lentes para mejorar el ángulo de escaneo de un array de antenas en fase. (*Lens for Scanning Angle Enhancement of Phased Array Antennas*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Boeing International Corporation**
Nº publicación	US2010079354 (A1)
Fecha publicación	01/04/2010
Resumen	Método y aparato para fabricar una lente metamaterial de índice de refracción negativo para su uso en un array de antenas en fase. El diseño tiene una forma de bucky-esfera para obtener el valor negativo del índice, y es capaz de doblar un haz generado por la antena alrededor de 90º de forma vertical. El diseño inicial se modifica para incluir componentes, a partir de los cuales se seleccionan materiales. Se diseñan celdas unitarias de un metamaterial de índice de refracción negativo, a partir de las cuales se forma una lente, también de índice de refracción negativo.

Título	Metamateriales para superficies y guías de onda. (*Metamaterial for surfaces and waveguides*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Duke University**
Nº publicación	WO2010021736 (A2)
Fecha publicación	25/02/2010
Resumen	Diversos elementos complementarios con una estructura de metamateriales que proporcionan una permitividad eficiente para estructuras de superficie y de guía de ondas. Los metamateriales están integrados en las superficies de delimitación, por ejemplo, para implementar guías de onda basadas en lentes con índice de refracción variable y, de esta manera, poder enfocar a dispositivos, estructuras de *arrays* de antenas, etc.

Título	Estructuras de metamateriales para el procesamiento de la luz y métodos de procesamiento de la luz. (*Metamaterial structures for light processing and methods of processing light*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Hewlett Packard**
Nº publicación	CN101595609 (A)
Fecha publicación	02/12/2009
Resumen	Estructura de tipo metamaterial para el procesado de la luz, incluyendo una guía de luz y un compuesto electromagnético, con una frecuencia de resonancia. El compuesto está fabricado para interaccionar con la luz propagada y convertir su frecuencia de propagación en frecuencia resonante, que genera un segundo y posteriores armónicos. También, se incluyen diversos métodos para el procesado de la luz.

Título	Antenas de bocina, guías de onda o aparatos con materiales de baja permitividad dieléctrica. (*Horn antenna, waveguide or apparatus including index dielectric material*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Lockheed Martin**
Nº publicación	WO2010039340 (A1)
Fecha publicación	08/04/2010
Resumen	Antenas de bocina que incluyen una bocina conductora con una pared interior recubierta por una primera capa dieléctrica que contiene un metamaterial de constante dieléctrica entre 0 y 1. Además puede disponer de un núcleo dieléctrico en contacto con dicha primera capa dieléctrica. El núcleo dieléctrico puede incluir un fluido. También se divulga una guía de onda que incluye dicho metamaterial.

Título	Sintonización de frecuencias dinámicas de respuestas de metamateriales eléctricas y magnéticas. (*Dynamical frequency tuning of electric and magnetic metamaterial response*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Los Alamos National Security Laboratory**
Nº publicación	WO2009048616 (A2)
Fecha publicación	16/04/2010
Resumen	Resonador colocado sobre un soporte que dispone de un medio para modificar su geometría. Los resonadores geométricamente modificables pueden lograr un control electrónico y/o óptico de la respuesta en frecuencia en los metamateriales y/o frecuencias de superficie selectivas, con tiempos de respuesta potencialmente menores a pico segundos. El método, con una ligera modificación en su geometría, podría aplicarse en componentes de circuitos, como inductores o condensadores, siendo válido en cualquier rango de frecuencias en el que los metamateriales estén diseñados para trabajar.

Título	Metamateriales polímeros conductores. (*Conductive polymer metamaterials*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Lucent Technologies**
Nº publicación	US2010086750 (A1)
Fecha publicación	08/04/2010
Resumen	Aparato que dispone de un componente óptico con una pila de 182 capas de polímeros flexibles conductores eléctricos. La pila está formada por un metamaterial.

Título	Metamateriales en dispositivos de antenas. (*Metamaterial loaded antenna devices*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Rayspan Corporation**
Nº publicación	WO2010033865 (A2)
Fecha publicación	25/03/2010
Resumen	Conjunto de técnicas y dispositivos basados en estructuras de antenas fabricados con metamateriales.

Título	Osciladores de baja potencia térmica de escala nanométrica, acoplados en las cavidades defectuosas de un cristal fotónico resonante a escala micrométrica para generar terahercios o radiación infrarroja. (*Thermally powered low dimensional nano-scale oscillators in coupled micro-scale photonic crystal resonante defect cavities for generation of Terahertz infrared radiation*).
Solicitante (en su defecto inventor)	**Raytheon**
Nº publicación	US2010108916 (A1)
Fecha publicación	06/05/2010
Resumen	Fuente térmica de radiación infrarroja o de terahercios que combina osciladores nanométricos, como nanotubos, con las cavidades de cristales fotónicos resonantes, para generar radiación eficiente. La energía de los múltiples pares oscilador/cavidad puede ser recogida y transmitida por espejos y lentes externas hacia sitios específicos. Para mejorar la efectividad de los acoplamientos, es preferible que los osciladores y las cavidades sean simétricos. La integración de los emisores crea un nuevo tipo de metamaterial más eficiente en cuanto a la emisión de radiación.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

ANEXO 1.
FUNDAMENTOS TEÓRICOS

ANEXO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A1.1. Propiedades de los metamateriales

Tal y como se ha descrito en los primeros capítulos los metamateriales se caracterizan por sus propiedades inusuales, lo que ha suscitado gran interés por parte tanto de la comunidad científica como de potenciales usuarios. Estas propiedades permiten expandir el horizonte de aplicaciones, eliminando algunos límites establecidos tradicionalmente, basados en los recursos naturales disponibles. A continuación, se explica el efecto de los metamateriales sobre algunos fenómenos físicos destacados.

A1.1.1. Inversión del efecto Doppler

El efecto Doppler es el cambio aparente en la frecuencia de una onda que percibe un observador que se encuentra en movimiento relativo con respecto a la fuente de dicha onda. El observador distingue los cambios de frecuencia fijando una referencia de fase definida. La frecuencia percibida por el observador se puede expresar como $\boldsymbol{w} = \boldsymbol{w}_0 + \boldsymbol{kv}$, siendo $\boldsymbol{w_0}$ la frecuencia real, $\boldsymbol{k}$ el vector de onda y $\boldsymbol{v}$ la velocidad de la fuente con respecto al detector. El signo de la velocidad es positivo cuando la fuente se aproxima al observador. En este caso, dado que el vector de onda posee la misma dirección y sentido, la frecuencia percibida es más alta. Lo contrario sucede cuando la fuente se aleja del observador.

Fenómenos parecidos se observan en ondas de distinta naturaleza, elásticas y electromagnéticas, con la salvedad de que en el segundo caso es necesario considerar el efecto de la teoría especial de la relatividad a través de un término de corrección.

Los resultados anteriores aplican a un medio convencional. Sin embargo, cuando las ondas se propagan a través de un medio que posee un índice negativo (por ejemplo, índice de refracción en el caso de la luz visible), el vector de onda cambia su signo con respecto a la situación considerada

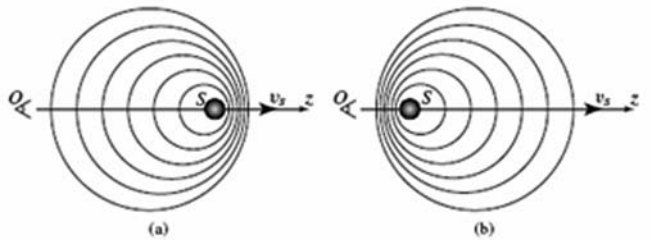


Figura A1.1. Efecto Doppler en (a) un material convencional y (b) un material zurdo. (Fuente: C. Caloz and T. Itoh, Electromagnetic Metamaterials, Transmission Line Theory and Microwave Applications (John Wiley & Sons and IEEE Press, Hoboken, NJ, 2005).)

normal, alterando el resultado percibido por parte del observador. Es decir, los vectores de onda y velocidad son antiparalelos cuando la fuente se aproxima al observador. La figura A1.1 ilustra la diferencia existente entre ambos casos.

Los metamateriales exhiben esta propiedad de invertir el efecto Doppler como consecuencia del cambio de signo relativo que se produce entre el vector de propagación y el vector de onda.

A1.1.2. Inversión del efecto Cherenkov

La radiación Cherenkov es la radiación proveniente de la energía electromagnética radiada por una partícula cargada que cruza un aislante a una velocidad más grande que la correspondiente a la velocidad de la luz en el medio. Esta radiación electromagnética se emite dentro de un cono, con ángulos de salida originados en la partícula cargada. El ángulo del cono φ se corresponde a la condición de fotones emitidos que interfieren constructivamente, y puede determinarse mediante la relación $\cos\varphi = 1/n\beta$, donde β es la velocidad de la partícula normalizada por la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción. Dado que el ángulo de salida depende del signo del índice de refracción, el uso de metamateriales puede invertir el resultado. Concretamente, la radiación Cherenkov viaja hacia atrás (en sentido contrario a la dirección de propagación) en un medio o material de índice negativo. En la figura A1.2 se comparan los casos del comportamiento de la radiación Cherenkov en un medio convencional y otro zurdo.

El fenómeno de radiación Cherenkov es similar al fenómeno de fugas de radiación presente en algunos tipos de antenas.

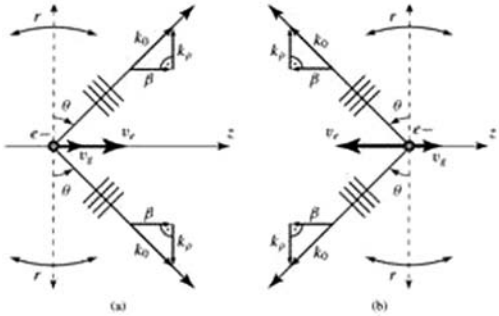


Figura A1.2. Radiación Cherenkov en (a) un medio convencional y (b) un medio zurdo. La velocidad de grupo se indica como vg.
(Fuente: C. Caloz and T. Itoh, Electromagnetic Metamaterials, Transmission Line Theory and Microwave Applications (John Wiley & Sons and IEEE Press, Hoboken, NJ, 2005).)

A1.1.3. Refracción negativa: ley de Snell inversa

La respuesta electromagnética de un material se caracteriza por los parámetros macroscópicos de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética. Valores negativos en ambos parámetros producen un índice de refracción negativo, aunque esta condición sólo es suficiente, ya que es posible demostrar que se puede llegar al mismo resultado cumpliendo otras relaciones con los valores de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética.

El cambio en el índice de refracción afecta de manera directa a la ley de Snell. Este fenómeno, a diferencia de los presentados en los dos apartados anteriores, supone la intervención de dos medios distintos. El ángulo de refracción (ley de Snell de refracción) se invierte con respecto a la situación convencional cuando una onda electromagnética cruza la interfase entre dos medios que poseen signos opuestos en sus índices de refracción. El ángulo de reflexión (ley de Snell de reflexión), por otra parte, permanece inalterado, ya que sólo afecta la propagación dentro de un medio.

Una expresión general de la ley de Snell teniendo en cuenta la existencia de medios con índices negativos se puede escribir como:

$$s_1 \mid n_1 \mid \cos \theta_1 = s_2 \mid n_2 \mid \cos \theta_2 ,$$

en la que los subíndices numéricos hacen referencia a cada uno de los distintos medios, *s* representa el signo del tipo de medio, y θ los ángulos de incidencia y refracción (los índices numéricos se asignan dependiendo de la relación del medio con el sentido de propagación de la onda).

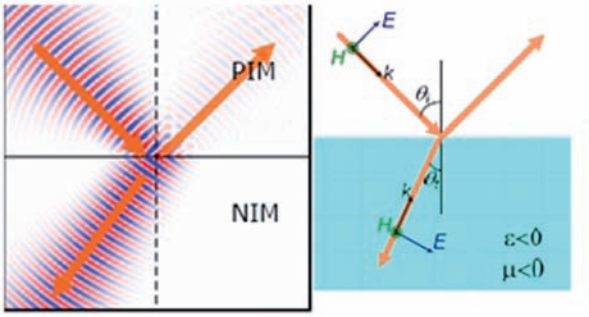


Figura A1.3. Modificación de la ley de Snell debido a la propagación de una onda electromagnética entre dos medios con signos opuestos en su índice de refracción. (Fuente: Vladimir M. Shalaev, Universidad de Purdue.)

A1.1.4. Inversión del efecto Goos-Hänchen

El efecto Goos-Hänchen hace referencia al desplazamiento de una onda electromagnética incidiendo en una interfase plana bajo un ángulo en el cual ocurre reflexión total. En este efecto, el medio de incidencia posee una magnitud más pequeña del índice de refracción que el medio con el que forma la interfase, y el ángulo de incidencia es más grande que el ángulo crítico. Un análisis de los coeficientes de reflexión para incidencia oblicua revela la existencia de un desplazamiento que depende entre otros parámetros de las permitividades eléctricas y permeabilidades magnéticas de ambos materiales. Si el índice de refracción es negativo, el desplazamiento al que da lugar el efecto Goos-Hänchen está invertido

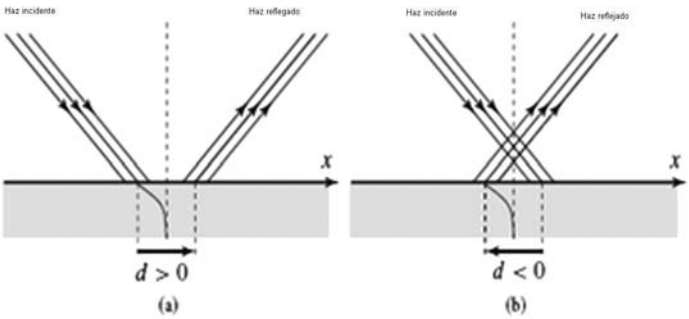


Figura A1.4. Efecto Goos-Hänchen (a) en el caso convencional y (b) en la interfase entre un medio normal y otro con índice de refracción negativo. (Fuente: C. Caloz and T. Itoh, Electromagnetic Metamaterials, Transmission Line Theory and Microwave Applications (John Wiley & Sons and IEEE Press, Hoboken, NJ, 2005).)

(véase la figura A1.4 para una mejor visualización del fenómeno). Conviene notar que las condiciones derivadas para los componentes del campo eléctrico en las diferentes polarizaciones afectan a distintos parámetros. Este efecto también se puede dar en estructuras formadas por capas estratificadas con refracción negativa.

A1.1.5. Difracción sub-longitud de onda

El límite de difracción de Abbe impone una restricción al mínimo tamaño de los objetos que puede resolver una lente convencional basada en materiales de índice positivo con superficies curvadas. Este límite depende del valor del índice de refracción en el cual está inmerso el sistema formador de la imagen. La información contenida en los tamaños más pequeños (por debajo de la longitud de onda o sub-longitud de onda) se transporta mediante ondas evanescentes. Estas ondas no contribuyen a la formación de la imagen, ya que se ven fuertemente atenuadas con la distancia, quedando así confinadas a la vecindad del objeto. Existen algunas técnicas que tratan de recuperar las ondas evanescentes, como las de campo cercano, sin embargo, los metamateriales ofrecen una posibilidad mucho más atractiva.

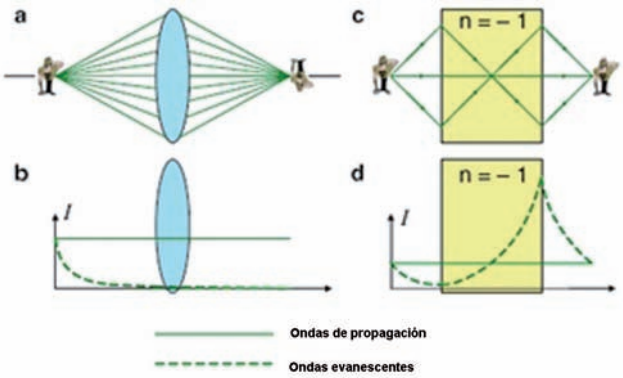


Figura A1.5. (a) Funcionamiento de una lente convencional. (c) Comportamiento de los distintos modos (propagación y evanescentes) para un sistema formado por una lente convencional. (b) Funcionamiento de una lente de índice negativo. (d) Comportamiento de los distintos modos (propagación y evanescentes) para un sistema formado por una lente de índice negativo. Nótese que el concepto de lente en el caso del material de índice negativo se refiere sólo a un trozo de material de suficiente espesor. (Fuente: W. Cai and V. M. Shalaev (1st ed), Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications (Springer, New York, 2009).)

Un material de índice negativo con el suficiente espesor es capaz de amplificar las ondas evanescentes. Debido a las condiciones que afectan al vector de onda de propagación, los componentes que pertenecen a las ondas evanescentes crecen exponencialmente dentro del material de índice negativo. Si el crecimiento es suficiente para compensar las pérdidas en el resto del camino óptico, es posible formar imágenes de mayor resolución que las permitidas por el límite de Abbe. En la figura A1.5 se muestra una comparación entre un sistema formado por una lente convencional y otro por una lente de índice negativo.

Las consideraciones prácticas demuestran, no obstante, que todavía no es posible (ni siquiera en el plano teórico) conseguir las condiciones ideales para fabricar una lente perfecta.

A1.2. Tipos de metamateriales

A1.2.1. Dieléctricos artificiales

Los dieléctricos artificiales son estructuras heterogéneas construidas a una escala de cierta longitud de onda de tal manera que se pueda controlar la permitividad efectiva de la macroestructura. A pesar de que los dieléctricos artificiales habitualmente no se clasifican como metamateriales, el nacimiento de los metamateriales está relacionado con los trabajos en radar de los ingenieros durante la Segunda Guerra Mundial. *Winston E. Kock* demostró experimentalmente que un *array* de placas metálicas planas, con periodicidad espacial $p \geq \lambda/2$, podría formar el patrón del haz de una antena en el mismo sentido que una lente dieléctrica homogénea cuyo índice de refracción n sea menor que la unidad:

$$\sqrt{1-(\lambda/2p)^2} \quad 0 \leq n < 1$$

Este resultado lo obtenemos teniendo en cuenta que cuando un campo eléctrico *E* es paralelo a las placas, el modo fundamental de la guía de ondas paralela a las placas tiene una velocidad de fase mayor a la de la luz en el vacío. Desde que se trabaja con dispositivos en el rango de longitudes de onda milimétricas y centimétricas, la investigación de dieléctricos artificiales en las microondas y frecuencias de radio ha aumentado. De este modo, debido a ideas innovadoras, durante el siglo XX se realizaron numerosos experimentos y surgieron nuevos dispositivos partiendo de las antenas. Más adelante, podremos comprobar como di-

versos diseños de dieléctricos artificiales en microondas, como una lente esférica tipo *array* se han llevado con éxito a rangos de longitudes de onda muy inferiores como frecuencias ópticas, infrarrojos o terahercios.

Además, se han desarrollado métodos computacionales diseñados para dieléctricos artificiales en frecuencias de microondas, como el método de transmisión lineal, explicado en el libro «*Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*» de Caloz y Itoh, la teoría media efectiva o los diagramas de banda de estado sólido. La aplicación de estos métodos computacionales se utiliza para la caracterización de metamateriales.

A1.2.2. Materiales magnéticos artificiales

La permitividad eléctrica ε de un dispositivo se puede controlar mediante la elección del material en función de la frecuencia de excitación ω. Por ejemplo, los cristales de silicio exhiben permitividades positivas a frecuencias ópticas y se utilizan en una amplia variedad de dispositivos, como microscopios ópticos, telescopios o simplemente lentes de gafas comerciales. Los metales nobles, que se comportan como gases de electrones libres, tienen una permitividad negativa a frecuencias de excitación debajo de su frecuencia intrínseca eléctrica de plasma ω_{pe}. Para obtener permitividad negativa sin tener pérdidas de transmisión de potencia elevadas a través de metales opacos, varios grupos de investigación utilizan *arrays* de hilos finos.

Mientras que los compuestos eléctricamente sensibles son relativamente fáciles de encontrar, los materiales magnéticos con permeabilidad magnética μ que se encuentran en la naturaleza son mucho más raros y consisten esencialmente en ferritas (materiales ferromagnéticos) excitados a una frecuencia de plasma magnética ω_{pm}. Además, no se conocen materiales con propiedades magnéticas en frecuencias de terahercios o mayores. Por este motivo, jugar con la permeabilidad magnética a altas frecuencias es muy complicado y requiere meta-átomos diseñados específicamente para generar una respuesta magnética. En el libro «*Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*» de John Pendry se sugirió el uso de resonadores de anillos abiertos (*Split Rings Resonators SRRs*), básicamente de tamaño de sub-longitudes de onda electomagnéticas, para generar una permeabilidad magnética. En estas estructuras, cuando el campo electromagnético incidente tiene una polarización perpendicular al plano del *array* de anillos, se inducen corrientes resonantes en lazo que emulan a un dipolo magnético.

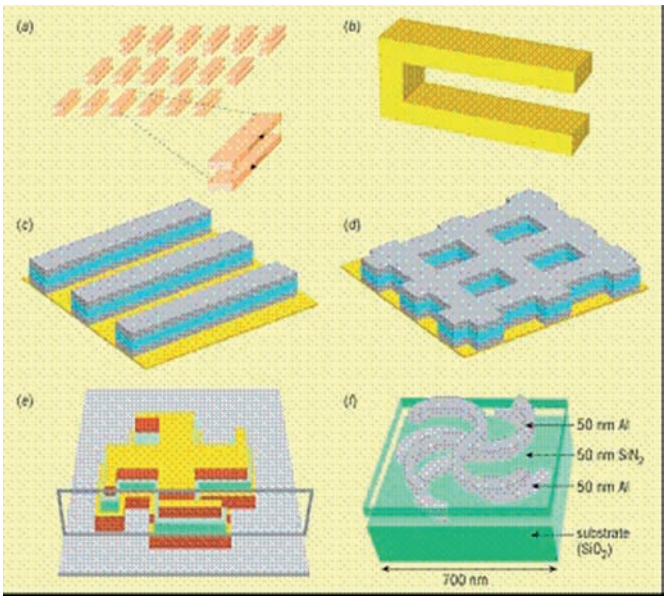


Figura A1.6. Diferentes tipos de meta-átomos: (a) nanorods, (b) estructura con forma de U, (c) nanostrips, (d) estructura tipo fish-net, (e) y (f) estructuras quirales. (Fuente: N. M. Litchinitser and V. M. Shalaev, «Metamaterials move beyond nature's limits», Opt. Lasers Eur. 14– 16 (2008).)

Los SRRs pueden tener diferentes formas: circular, en forma de U y otras variantes con forma de lazo. La efectividad de las estructuras de los SRRs se ha demostrado para las frecuencias de radio, microondas, terahercios e infrarrojos. Sin embargo la escala lineal de los SRRs no se puede extrapolar al rango visible porque se satura. Las estructuras del tipo *nanostrip* (figura A1.6 (c)) metálicas podrían extender el magnetismo al rango visibles, aunque a día de hoy solo se han conseguido respuestas magnéticas muy pequeñas.

A1.2.3. Materiales de índice de refracción negativo

La capacidad de crear una permeabilidad negativa, proporciona a los metamateriales un grado más de libertad para generar sus propiedades especiales. El índice de refracción *n* de un material sensible a un campo electromagnético depende de la permitividad ε y de la permeabilidad relativa μ:

$$n = \pm \sqrt{\varepsilon \mu}$$

Si uno de los parámetros, ε o μ es negativo, el índice de refracción es imaginario puro, lo que implica una propagación de ondas evanescentes con pérdidas según la figura A1.7. (2) y A1.7. (4). Cuando ambos componentes tienen el mismo signo, positivo o negativo, la propagación de las ondas es libre (figura A1.7. (1) y 53 (3)). El caso «doble positivo» se refiere a la propagación habitual hacia adelante en dieléctricos comunes con un índice de refracción positivo. El caso «doble negativo» es el que define a los denominados «materiales zurdos» o materiales de índice de refracción negativo (*NRI Negative Refractive Index*) caracterizados por una propagación con una velocidad de fase opuesta a la dirección del flujo de energía, dado por el vector de Poynting. Los materiales NRI y zurdos se definieron teóricamente por primera vez en 1968 por Victor Veselago. En posteriores publicaciones, se crearon estructuras globales de metamateriales NRI, alternando capas de finos hilos de ε_r negativo con capas de SRRs de μ_r negativo.

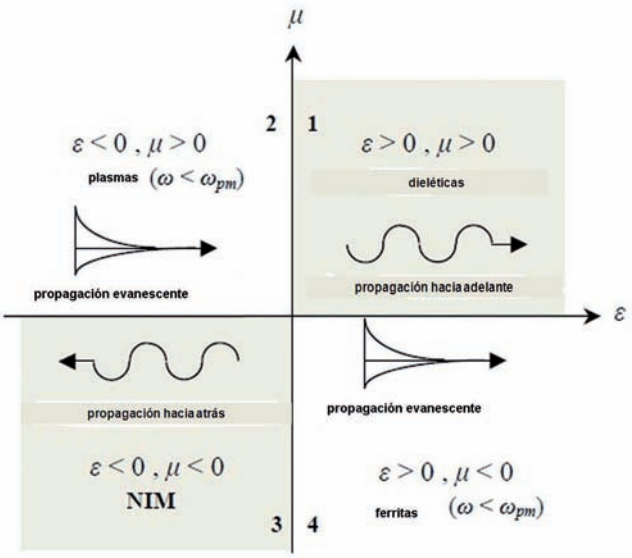


Fig.A1.7. Diagrama de permitividad ε y permeabilidad μ. (Fuente: adaptado de Metamaterials: a metareview. École Politechnique de Montréal, Canada, Bora Ung.)

Cuando las capas metálicas alternativas de *nanorods,* que generan un ε_r negativo, y *nanostrips*, que producen un μ_r negativo, se sitúan en el mismo plano, los meta-átomos crean una estructura similar a una red. Las estructuras de red de celda unitaria de tamaño *p* menores a una mi-

cra son difíciles de fabricar. Solamente se han producido unas decenas hasta la fecha y se espera que lleven a futuros metamateriales ópticos tridimensionales. Hay que destacar que los correspondientes metamateriales actuarán como componentes difractivos de $p \approx \lambda/2$ y que la longitud de onda más pequeña en la que se logra un NRI se encuentra en 1500nm, en el rango del infrarrojo cercano del espectro.

La resolución de las imágenes está limitada en las lentes convencionales por la difracción. El motivo principal es la incapacidad de los dispositivos para reenfocar las ondas evanescentes que llevan la información espacial. Los primeros intentos de construir las «superlentes» y superar el límite de difracción se basaron en estas observaciones y trataron de capturar la información de las ondas evanescentes. Con el tiempo y gracias a los metamateriales quizás se puedan fabricar gran cantidad de «lentes perfectas», que superen el límite de difracción según se muestra en la figura A1.8 La propiedad NIM de las lente perfectas fue pronosticada originalmente por John Pendry en 2000, que fue también el primero en defender el uso de capas de SRR y hilos finos para lograr un NRI.

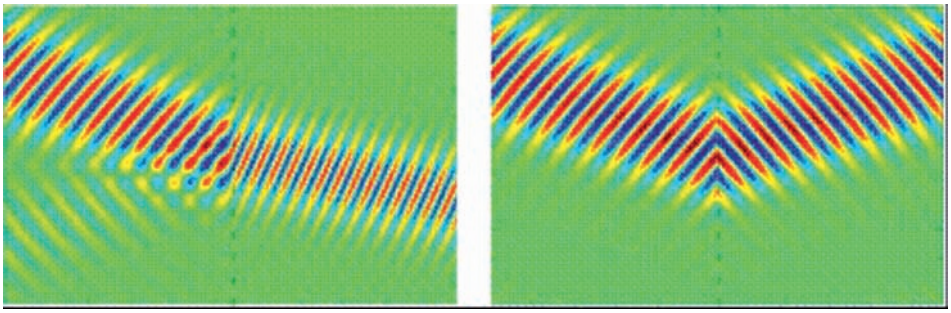


Figura A1.8. a) Refracción positiva estándar en el ángulo límite de un dieléctrico. b) Haz de luz incidente en una superficie de permitividad y permeabilidad negativas, que implica una refracción negativa. (Fuente: Nature Publishing Group.)

Según se indicó previamente, la eficiencia de los SRRs en el espectro visible es limitada. Los componentes metálicos que constituyen la mayoría de los diseños de metamateriales no se pueden modelar en el espectro visible como conductores perfectos de la misma manera que se hace a frecuencias más bajas (infrarrojo lejano, terahercios y microondas). En este caso, la respuesta plasmónica de superficie del metal debe tenerse en cuenta en el diseño. En la mayoría de las implementaciones de NIMs en el espectro visible se utilizan *arrays* de nanohilos metálicos, como

nanorods, con dimensiones mucho menores que la longitud de onda incidente. Estas estructuras, unidimensionales y bidimensionales, son mucho más simples de diseñar y fabricar en comparación a los patrones asociados a los SRRs.

A1.2.4. Materiales con anisotropía artificial

La anisotropía artificial también se puede considerar como un concepto «metamaterialistico» emergente. De la mezcla de dos componentes completamente dieléctricos isotrópicos puede resultar un medio efectivo anisotrópico si uno de ellos está formado por elementos no simétricos, como agujas no alineadas. Lógicamente, la respuesta macroscópica es diferente en función de la dirección del campo.

La bianisotropía es una generalización y es un concepto muy útil para analizar la respuesta electromagnética de materiales complejos. Si un medio es bianisotrópico puede tener comportamientos anisotrópicos y magnetoeléctricos, como por ejemplo la quiralidad. Para hélices mezcladas al azar el medio macroscópico es bi-isotrópico, pero si las hélices están alineadas, evidentemente, el medio es bianisotrópico y la respuesta depende de la dirección del campo.

Las relaciones constitutivas en los medios de comunicación bianisotrópicos requieren una matriz para relacionar el eléctrico (E) y magnético (H) y las densidades de flujo eléctrico (D) y magnético (B):

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\bar{\epsilon}} & \bar{\bar{\xi}} \\ \bar{\bar{\zeta}} & \bar{\bar{\mu}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix}$$

Los coeficientes permitividad, permeabilidad, y magnetoeléctrico son diádicos $\bar{\bar{\epsilon}}, \bar{\bar{\xi}}, \bar{\bar{\zeta}}, \bar{\bar{\mu}}$, y contienen nueve parámetros cada uno. La tabla siguiente tabla muestra las dimensiones de los parámetros espaciales en de sus diferentes clases.

	Dirección independiente	Dirección dependiente
Sin acoplamiento magnetoeléctrico	2 (ε,μ) (isotrópico)	18 ($\bar{\bar{\epsilon}}$, $\bar{\bar{\mu}}$) (anisotrópico)
Con acoplamiento magnetoeléctrico	4 ($\varepsilon,\mu,\xi,\zeta$) (bi-isotrópico)	36 ($\bar{\bar{\epsilon}}$, $\bar{\bar{\mu}}$, $\bar{\bar{\xi}}$, $\bar{\bar{\zeta}}$) (bianisotrópico)

Materiales magnetoeléctricos y los números correspondientes a sus parámetros.

A1.2.5. Materiales quirales

En los materiales quirales la geometría de las estructura interna produce una respuesta macroscópica y se observa la rotación de la polarización del vector de propagación. Los materiales con una importante capacidad de rotación o dicroísmo circular se utilizan para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, como polarizadores circulares en aplicaciones como la fotografía. Las estructuras giroscópicas en los materiales quirales se están investigando como otra alternativa para obtener materiales NRI. La quiralidad se obtiene mediante estructuras helicoidales y geometrías retorcidas. Se han demostrado pequeños valores NRI en las microondas mediante materiales quirales basados en estructuras helicoidales. También, se ha realizado el mismo experimento con estructuras más pequeñas en el visible y el infrarrojo, y en estas longitudes de onda se ha demostrado una significativa polarización circular pero no se ha obtenido refracción negativa. Aún queda mucho por avanzar en los materiales quirales para conseguir NIMs.

A1.2.6. Materiales para encubrimiento

Los materiales para encubrimiento se investigaron en las décadas de los 80 y de los 90 y se concluyó teóricamente que los objetos invisibles no pueden existir. No se consideraron otras opciones hasta que aparecieron dos artículos en la revista *Science* en 2006, de manera casi simultánea, lo que implicó que se reabrieran las investigaciones. Ambos artículos explicaban de una manera similar cómo hacer un objeto invisible a la luz incidente: el objeto debe tener un índice de refracción con un gradiente

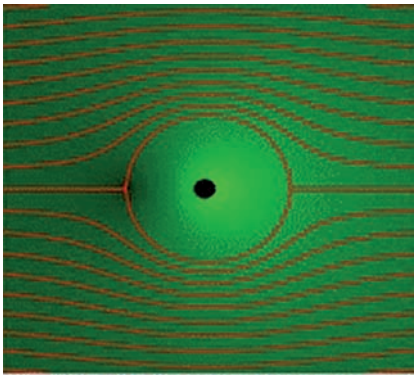


Figura A1.9. Rayos de luz atravesando objetos invisibles. Fuente: AAAS Science. (Fuente: Nature Publishing Group.)

de distribución de tal manera que todos los rayos incidentes sean guiados alrededor de su superficie y recuperen su trazado original en el otro extremo.

Los ingenieros aplican las técnicas matemáticas denominadas *coordinate transformations* para diseñar los perfiles de los gradientes de los índices de refracción. Se han diseñado recubrimientos bidimensionales invisibles en el rango de las microondas. Sin embargo, según se mencionó anteriormente, los SRRs en el rango visible deberían ser más sencillos de fabricar teóricamente, pero en la práctica resulta mucho más difícil. Para solventar este problema, algunos investigadores han sugerido el uso de una *coordinate transformation* para crear una estructura no magnética en forma de concha, y de esta manera superar la problemática de fabricar pequeños elementos magnéticos.

El consiguiente metamaterial (figura A1.10.) es un medio invisible para las ondas electromagnéticas incidentes de luz polarizada en un muy pequeño rango del espectro y podría serlo de manera similar en los rangos del infrarrojo y terahercios. Los mismos investigadores también alertan a los usuarios que los diseños no son perfectamente antireflejantes debido a la mala relación de la impedancia entre el metamaterial y su entorno. Además, estos recubrimientos formados por metamateriales son capaces de proyectar una sombra visible debido a la absorción parcial de los elementos metálicos utilizados.

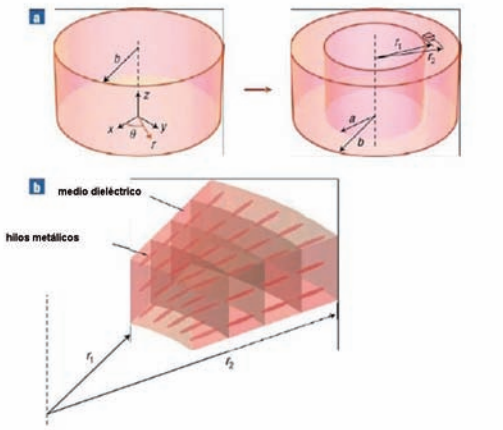


Figura A1.10. Transformación coordinada y estructura del encubrimiento óptico no magnético. (a) Transformación coordinada que comprime una región cilíndrica r < b (b) en una porción cilíndrica concéntrica a < r < b. (Fuente: adaptado de Metamaterials: a metareview. École Politechnique de Montréal, Canada, Bora Ung.)

A1.2.7. Metamateriales sintonizables y no lineales

Los materiales tradicionales de banda prohibida (*Electromagnetic Band-Gap EBG*) se han diseñado siempre de manera que tengan siempre una respuesta de frecuencia fija. Los elementos conductores grabados en substratos mantienen patrones geométricos fijos, y este tipo de superficies están limitadas en frecuencia. Para los dispositivos que funcionan a una frecuencia fija, sería provechoso tener una capacidad de adaptación, y que les fuera posible operar a diferentes frecuencias sin tener que reemplazar el *hardware*, especialmente en las aplicaciones espaciales o en las que el coste de modificar o sustituir constantemente el dispositivo sea muy alto. En estos casos, tener la posibilidad de reconfigurar remotamente las características operativas es una ventaja evidente.

Con los avances en la electrónica y la creación continua de nuevas aplicaciones, las superficies sintonizables se han convertido en una realidad. En un principio, las superficies sintonizables o selectivas en frecuencia (*FSS Frequency Selective Surfaces*) proporcionaron un método para controlar dinámicamente la transmisión y la reflexión de las ondas incidentes. Ha sido posible reducir el tamaño de la celda unidad, mejorar el ancho de banda y el cambio de la frecuencia de operación en tiempo real.

A corto plazo, las superficies sintonizables podrían jugar un papel clave en las antenas reflectoras multibanda, filtros sintonizables y *arrays* en fase. Otras aplicaciones son antenas de bajo perfil y antenas de haz direccional. Cuando la superficie sintonizable se utiliza en combinación con una antena reconfigurable, la posibilidad de ajustar la superficie hace posible que la frecuencia de funcionamiento de la antena pueda ser seguida. Esto permite el control dinámico de las ondas superficiales de diferentes frecuencias y que una antena de bajo perfil pueda mantener un desfase nulo en las HIS para diferentes frecuencias. Estos diseños novedosos revelan la versatilidad de las superficies sintonizables y esto, sin duda, da lugar a mejoras en las aplicaciones actuales y a un posible incremento de futuros desarrollos.

Las superficies sintonizables se basan en el principio de cambiar la impedancia de la superficie de un *array* mediante nuevos métodos de control. Durante las últimas décadas, grupos de investigación de todo el mundo han desarrollado nuevas técnicas, cada uno con sus propias características únicas y ventajas y desventajas, para cambiar las características de las superficies sintonizables. En el caso de los EBGs, el ajuste puede implicar la adición o eliminación de una banda de paso o supresión de

respuesta a una frecuencia determinada o incluso el desplazamiento de la banda de una frecuencia a otra. Para los HISs, se puede controlar la fase de la onda reflejada o se puede sintonizar la frecuencia en la que la onda reflejada tiene fase nula.

Se puede lograr el control de las superficies sintonizables a través de una serie de «estímulos». Los primeros métodos fueron cambiar las propiedades dieléctricas del sustrato a través de control ferroeléctrico y modificando la posición y dimensiones de los elementos unitarios manipulándolos físicamente. Más adelante se incorporaron en las superficies dispositivos activos tales como diodos PIN, diodos *Varactor*, y *Micro-Electro-Mechanical-Systems* (MEMs). También se ha demostrado la utilidad de nuevas técnicas utilizando la fotoconductividad. Otras técnicas de interés incluyen el uso de un líquido intercambiable como substrato, generando los elementos en un *array* que utiliza una matriz de plasma o el uso de cristales líquidos como sustrato.

Gracias al rápido progreso en el campo de los metamateriales en el transcurso de los últimos años, no es de extrañar que nos encontremos con la idea de metamateriales no lineales tan pronto como las bases para la descripción macroscópica se hayan desarrollado y tengan importante analogía con cristales ópticos. Las primeras publicaciones, hablan de dos enfoques similares, pero con diferentes tecnologías de análisis, para continuar con los efectos no lineales en metamateriales.

Está claro que la óptica no lineal y la ingeniería de microondas con componentes no lineales han resultado fructíferas durante más de medio siglo. Los metamateriales permiten una síntesis eficaz de los conocimientos adquiridos en ambas áreas de investigación.

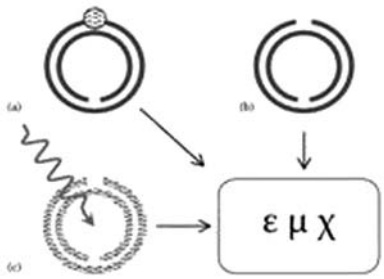


Figura A1.11. Esquema de las respuestas no lineales de los metamateriales. (Fuente: F. Capolino Ed. Theory and phenomena of metamaterials (CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, 2009).)

La gran variedad de métodos para proporcionar metamateriales con respuesta no lineal se puede dividir, conceptualmente en tres enfoques, que se presentan de forma esquemática en la figura A1.11. El primer enfoque es estructuralmente muy sencillo, con una gran analogía con los cristales ópticos. En los cristales, se dan diferentes tipos de no linearidades intrínsecas (sobre todo a nivel atómico), que proporcionan una respuesta no lineal a intensidades moderadas. En los metamateriales con las estructuras unitarias ensambladas artificialmente, la respuesta hasta amplitudes de los campos y corrientes muy altas, es esencialmente lineal, con la condición de que el contorno efectivo esté formado por componentes lineales: básicamente la inductancia, capacitancia y resistencia. Una manera muy natural para lograr la no linealidad, es, por lo tanto, agregar un componente no lineal (como un diodo) al contorno lineal, es decir, insertarlo en el elemento estructural, lo que actualmente se denomina un método de inserción.

Anteriormente a los metamateriales, Kalinin y Shtykov consideraron un medio amorfo construido con dipolos cargados orientados al azar. Su objetivo era conseguir la conjugación de fase en el rango de frecuencias de las microondas, y sin embargo descubrieron que la susceptibilidad no lineal emergente de tercer orden se elimina debido a la disipación, lo que provocó dudas sobre el diseño.

El segundo enfoque tiene como objetivo complementar la respuesta lineal de elementos metamateriales con propiedades no lineales del medio principal, en los que los campos, con una resonancia mejorada desde el interior de los metamateriales, se convierten en no lineales acoplados, lo que se denomina actualmente un método de inmersión. Esta alternativa estimuló la investigación enormemente. La idea de este enfoque se remonta mucho tiempo atrás y, en esencia, se sugiere aprovechar las propiedades ventajosas de los metamateriales: los elementos individuales pueden ser diseñados específicamente y es posible lograr una distribución muy poco homogénea de los campos electromagnéticos con la unidad estructural, por lo que los campos mejoran notablemente. Por tanto, si se coloca un medio no lineal externo dentro de las áreas en las que los campos mejoran, se obtiene una respuesta no lineal general. Puede parecer que los dos enfoques son muy diferentes pero tienen mucho en común. En efecto, cuando el metamaterial se integra en el medio principal, la respuesta no lineal de este último se produce en la mayoría de las áreas en las que los campos han mejorado.

Por ejemplo, para un resonador con forma de anillo, el campo eléctrico es superior en varios órdenes de magnitud en el *gap*, con lo que la no linealidad es, esencialmente, la misma que si hubiera sido proporcionada por un dispositivo colocado en su contorno. Esto es válido en los casos en los que la longitud de onda es mucho mayor que la longitud del objeto, es decir, cuando se comporta como un metamaterial. Por tanto, la descripción fenomenológica de base puede ser la misma para los dos métodos, pero se deben tener en cuenta los detalles para un análisis más específico de las implementaciones en cada caso, para los distintos fenómenos no lineales.

La diferencia entre la inserción o la inmersión se encuentra principalmente en el ámbito de aplicación. La inserción permite un diseño muy detallado con cualquier dispositivo colocado en cualquier punto de la estructura unitaria, en función de necesidades específicas, por lo que es algo más preciso, sin embargo, su dificultad se incrementa al incrementar la frecuencia, ya que los elementos deben ser más pequeños.

Para los elementos pequeños, es más factible el uso de cualquier variedad de integración, por ejemplo, mediante la impresión de nanoestructuras sobre un sustrato no lineal. En términos generales, la inserción es más apropiada para el rango de microondas, pero la integración es más eficaz en el infrarrojo y a frecuencias ópticas.

Respecto del tercer enfoque, (figura A1.11.), está mucho menos desarrollado. En este caso, es lógico que si las amplitudes y frecuencias de las ondas incidentes son suficientemente altas, la no linealidad intrínseca de las superficies metálicas, los fenómenos de dispersión en los bordes e incluso los efectos cuánticos se puedan añadir a los mecanismos descritos anteriormente. La importancia del diseño específico disminuye.

En la práctica, esta situación también implica a menudo que el tamaño de los elementos unitarios no sean mucho menores que la longitud de onda incidente, como suele ocurrir en el rango óptico. En consecuencia, es muy difícil proponer una teoría general y, de momento, se investiga de manera empírica, simplemente mediante ensayo y error. Esta dirección es hasta ahora experimental en su mayor parte.

Desde el punto de vista teórico, el objetivo principal de todos los enfoques es proporcionar una descripción universal de los posibles procesos no lineales en términos de parámetros de eficacia media, ε lineal y μ, incluidas las susceptibilidades no lineales de orden deseado. Por lo tan-

to, el trabajo teórico se divide en dos direcciones, una de ellas es una derivación rigurosa de análisis de las propiedades no lineales a partir de una estructura interna muy detallada de un metamaterial (es una teoría metamacroscópica), mientras que la otra se centra en la descripción de fenómenos particulares con origen en parámetros fenomenológicos predefinidos.

Una manera práctica de realizar la implementación consiste en emplear dispositivos no lineales dentro de las líneas de transmisión de los metamateriales.

A1.3. Superficies artificiales: EBG, PBG y HIS

Las superficies artificiales incluyen dos tipos de estructuras fundamentales de gran aplicación, las superficies selectivas en frecuencia (FSS *Frequency Selective Surface*) y las superficies de alta impedancia (HIS *High Impedance Surface*).

A1.3.1. Superficies selectivas en frecuencia (EBGs y FSSs)

Desde que se sugirió que la creación de una periodicidad en los materiales dieléctricos podría prevenir la propagación de las ondas electromagnéticas en las frecuencias determinadas en 1987, en el campo de los cristales fotónicos se ha trabajado mucho tanto teórica como experimentalmente, con el objetivo de crear una banda prohibida para fotones (PBG *Photonic BandGap*) que generalmente se denomina banda prohibida electromagnética (EBG *Electromagnetic BandGap*). Un cristal fotónico es una estructura con un orden periódico de las cavidades de alta constante dieléctrica embebida dentro de una región poco dieléctrica, las cuales introducen saltos o *gaps* en la estructura de bandas de energía en los estados de los fotones en los planos de Bragg, provocando una serie de energías prohibidas para dichos fotones.

En ciertas frecuencias, el cristal fotónico impide la propagación de una onda electromagnética con cualquier ángulo de incidencia, dirección y polarización, lo que se denomina banda prohibida absoluta para fotones (*Absolute Photonic Bandgap*).

En la actualidad, se están investigando intensamente los cristales fotónicos de dos y tres dimensiones. Los cristales fotónicos de tres dimensiones tendrán periodicidad de red a su vez tridimensional a cier-

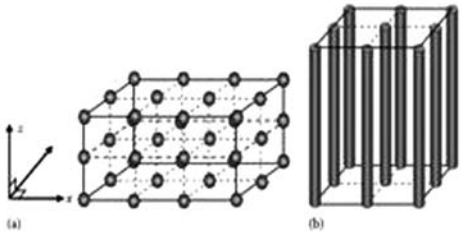


Figura A1.12. Redes cristalinas tridimensionales. (Fuente: F. Capolino Ed. Theory and phenomena of metamaterials (CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, 2009).)

tas frecuencias en la banda prohibida absoluta para fotones. La figura A1.12 muestra un ejemplo de una red cristalina tridimensional de cubos fotónicos rodeados de aire. En algunos casos, también podría estar rodeada por un material poco dieléctrico, lo que sigue siendo un reto en la actualidad.

Un cristal fotónico bidimensional es más fácil de fabricar, tiene periodicidad simplemente en un plano x-y, y es finito en la dirección z. La figura A1.13 muestra un ejemplo de una red cristalina bidimensional de cuadrados fotónicos rodeados de aire. No es posible que haya propagación a ninguna frecuencia en la banda prohibida absoluta para fotones, para ninguna propagación ni dirección a lo largo del plano x-y. A lo largo del eje z no hay no variación del dieléctrico por lo que no hay ninguna banda prohibida.

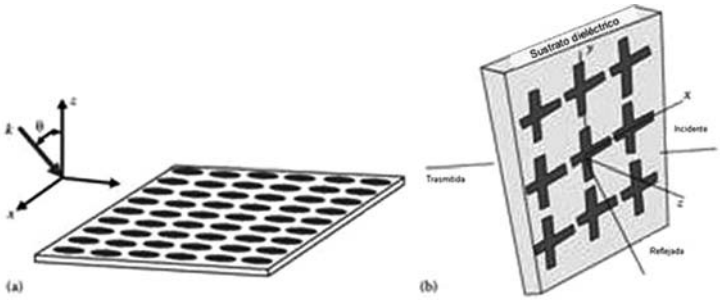


Figura A1.13. Red cristalina bidimensional. (Fuente: F. Capolino Ed. Theory and phenomena of metamaterials (CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, 2009).)

En los últimos años también se han estudiado posibles aplicaciones para los cristales fotónicos, principalmente en la región de las microondas, una de ellas es la de las antenas tipo dipolo optimizadas en un cristal fotónico de banda prohibida.

En la fabricación de la antena en el material con EBG con la frecuencia de propagación en la banda prohibida, no se podría le transmitir ninguna potencia, por lo que la mayor parte del poder se irradiaría en la dirección deseada. Otra aplicación utiliza la PBG como una banda de rechazo como filtro dentro de una guía de onda. También, se han investigado aplicaciones de materiales con EBG para de circuitos *microstrip* y han mostrado una atenuación muy alta en la banda prohibida. Además, se ha demostrado que las estructuras EBG pueden suprimir las ondas de superficie de las antenas *microstrip* y mejorar su direccionalidad.

Las primeras investigaciones se llevaron a cabo en el rango visible del espectro electromagnético, pero las propiedades EBG son escalables y aplicables a una amplia gama de frecuencias. En los últimos años, ha habido un creciente interés para las estructuras con EBG en el rango de las microondas y las ondas milimétricas y se conserva la terminología de las «bandas fotónicas», lo que causa una cierta controversia en la comunidad. Un artículo científico de *Olinerhas* trató de aclarar que esta terminología es inadecuada y estas estructuras deben clasificarse en la estructura de las microondas periódicas (*microwave periodic structure*).

En la actualidad, la investigación se ha extendido también a las EBG metalodieléctricas, que están sustituyendo a las cavidades periódicas altamente dieléctricas de los cristales fotónicos con elementos metálicos periódicos. Estas estructuras, tienen una banda de rechazo mucho mayor que la PBG. La versión bidimensional del cristal fotónico metalodieléctrico es un tipo de superficie selectiva en frecuencia.

Las FSS son *arrays* bidimensionales periódicos de elementos metálicos o aberturas que presentan características de banda de rechazo y paso de banda cuando son excitados por una onda electromagnética con un ángulo arbitrario plano con respecto al de la matriz. Por ejemplo, un *array* periódico de conductores refleja las ondas incidentes polarizadas a ciertas frecuencias y es transparente a las ondas incidentes en otras frecuencias.

Si el ángulo de incidencia θ es mayor a 90º respecto a la normal, la incidencia será a lo largo del plano del array de FSS. Al explorar el modo de

propagación a lo largo del plano del *array* de FSS, esta estructura puede ser considerada como una versión plana de una estructura metalodieléctrica EBG bidimensional y tendrá propiedades de banda prohibida en el plano del *array*. Si la banda prohibida se extiende por toda la zona irreducible de *Brillouin*, se logra una banda prohibida absoluta para fotones.

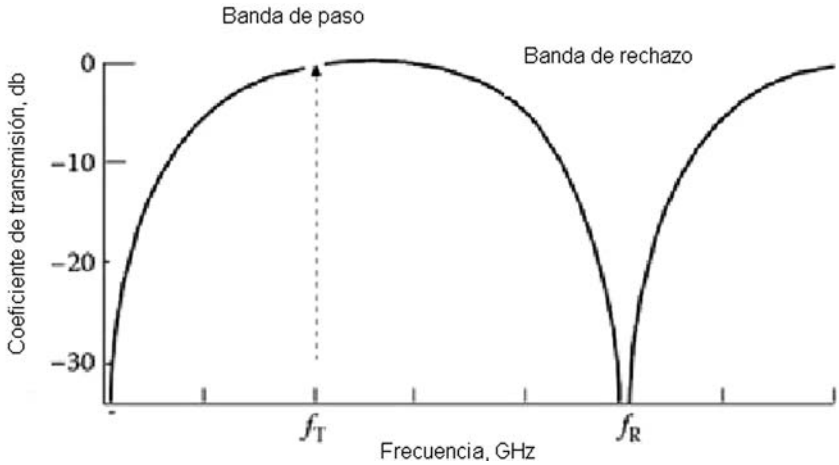


Figura A1.14. Transmisión de una superficie selectiva en frecuencia. (Fuente: F. Capolino Ed. Theory and phenomena of metamaterials (CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, 2009).)

Las FSSs tienen una gran cantidad de aplicaciones debido a sus propiedades únicas, lo que hace que se utilicen enormemente tanto en el sector industrial como en el académico. Históricamente, el comportamiento esencial de estas superficies se deriva de los conceptos de malla y tira de rejilla de explotación en el rango visible. En las microondas, las principales aplicaciones de las FSS son para los sistemas de antenas fijos y móviles. Los informes publicados de las propiedades básicas de estructuras simples en la región de ondas centimétricas se remontan a 1946, aunque el nombre FSS no se utilizó hasta mucho más adelante. La precisión en el modelado de sus propiedades electromagnéticas comenzó a tomar forma durante la década de 1960, etapa en la que se adquirió una gran experiencia en los *arrays* de fase.

Gracias a la aparición de los equipos informáticos digitales y debido al análisis de eficiencia y a las técnicas de medición de banda ancha, el diseño, la sofisticación y la fabricación de las FSS ha mejorado enormemente. La tecnología de las FSS se ha utilizado con éxito en varias misiones espaciales y en antenas de satélites.

Las FSS son esencialmente estructuras tipo *array* que consisten en distintos elementos conductores, a menudo impresos en un substrato dieléctrico de apoyo. La figura A1.13 muestra parte de un *array* de dipolos formando un conjunto de cruces, también conocido como dipolo cruzado. Con frecuencia, estos *arrays* periódicos forman aberturas en un plano conductor, y en un principio se denominaba como el complemento de Babinet.

Lógicamente, las FSSs se comportan como filtros electromagnéticos pasivos. La figura A1.14 muestra una respuesta típica de coeficiente de transmisión de un *array* de conductores, a través del cual las ondas polarizadas incidentes se reflejan en la superficie en algunas frecuencias (banda de rechazo), mientras que la superficie es transparente a las ondas en otras frecuencias (banda de paso). La frecuencia de resonancia se denomina como f_R y el centro de la banda de rechazo, y f_T como el comienzo de la banda de paso. Los anchos de banda se definen normalmente por el nivel de -10dB en la reflexión y de -0,5dB en el nivel de transmisión. En el caso de un *array* conductor la resonancia se debe a las altas corrientes inducidas, pero que son pequeñas cerca de la banda de paso. La superficie actúa como una hoja metálica en la resonancia. Si se fuera a utilizar un *array* de aberturas, el punto de la figura A1.14 sería la respuesta de su coeficiente de reflexión. Esta pantalla perforada es mayormente reflexiva y presenta una banda de paso en resonancia que resulta de los fuertes campos en las aberturas. Los elementos se ordenan periódicamente en una geometría de red determinada, que puede ser un simple cuadrado o una red fuera del eje triangular con lados desiguales.

A1.3.2. Superficies de alta impedancia (HIS)

El concepto de impedancia fue introducido inicialmente por Heaviside en 1886 en el contexto de las corrientes y voltajes, con el fin de describir la relación Voltaje/Intensidad en los circuitos de corriente alterna. En la década de 1930, el concepto de impedancia fue generalizado por Schelkunoff, quien reconoció que puede ser usado para describir la relación entre el campo eléctrico transversal a través del campo magnético transversal, ya que para cada modo electromagnético esto depende únicamente del medio de propagación. A su vez, el concepto de impedancia de superficie es un modelo para describir la interacción de las ondas electromagnéticas con los interfaces entre materiales o lá-

minas delgadas. En el contexto de superficies complejas, que normalmente tienen un orden periódico (o cuasiperiódico) con un perfil bajo en comparación con la longitud de onda, el uso del término impedancia implica homogeneización, la superficie compleja se modela mediante una superficie uniforme equivalente, que se caracteriza por un valor efectivo de la impedancia.

El término superficie de alta impedancia (*HIS High Impedance Surface*) se introdujo para describir superficies complejas denominadas 2.5D, por ejemplo, superficies planas con conectores a tierra. En este contexto el término HIS implica las dos propiedades siguientes:

1. Reflexión total en fase de ondas planas incidentes.

2. Supresión de todas las ondas de la superficie

Es fácil apreciar que una superficie ideal, con muy alta impedancia de superficie ($Z_s \rightarrow \infty$) refleja totalmente las ondas incidentes en fase independientemente del ángulo de incidencia y no habrá ninguna propagación de ondas superficiales. En la práctica, la impedancia de la superficie equivalente es una función de la frecuencia y del número de onda transversal y por lo tanto del ángulo de incidencia. Esto implica que las dos principales propiedades de las HISs antes mencionadas, en general, no coinciden para diferentes frecuencias y ni para todos los ángulos de incidencia. Las superficies que presentan reflexión total en fase de ondas planas incidentes se denominan conductores magnéticos artificiales (AMC *Artificial Magnetic Conductor*). Esta propiedad es muy similar a las de los conductores eléctricos perfectos (PEC *Perfect Electric Conductor*). Las superficies que suprimen la propagación de las ondas de la superficie también se denominan estructuras EBG, de acuerdo con el término PBG, introducido para describir las estructuras moduladas periódicamente que no son compatibles con soluciones reales a las ecuaciones de Maxwell.

Desde la introducción de las HIS, varios autores han investigado estructuras complejas que cumplen una o ambas propiedades mencionadas anteriormente. El término HIS se ha empleado para describir una amplia variedad de posibles geometrías. A menudo, estos consisten en una abertura doble periódica o en un *array* metálico sobre un medio dieléctrico con conexión a tierra, aunque con el fin de simplificar la fabricación, varios autores han omitido las vías de conexión a tierra. Las estructuras se asemejan a las FSS impresas substratos dieléctricos basados en tie-

rra y arrays planos reflexivos. Otros diseños incluyen topologías volumétricas que no requieren planos de tierra metálicos, ni *arrays* de múltiples capas, ni otro tipo de complejas geometrías para diseños miniaturizados.

Las antenas de bajo perfil tipo dipolo fueron algunas de las primeras aplicaciones propuestas para estas superficies. La fase de reflexión nula garantiza una mejora de 3 dB de ganancia para una fuente horizontal situada en las proximidades de la HIS, más que la interferencia de distracción de la teoría de la imagen perfecta de los PEC. Otras aplicaciones son guías de onda electromagnéticas transversales (TEM *Transverse Electromagnetic*), mejora del perfil de antenas con cavidades resonantes, diseño de teléfonos móviles y otros.

A1.4. Desafíos tecnológicos

A1.4.1. Homogeneización

La teoría física que describe el comportamiento de la mayoría de los metamateriales actuales y, en particular, la de los metamateriales zurdos (LH, *Left-Handed*), es bien conocida a nivel teórico, numérico y experimental, como se describió anteriormente. Muchos efectos nuevos de refracción, como por ejemplo el enfoque negativo, se encuentran ampliamente demostrados. Sin embargo, la constante de red promediada p en los metamateriales continua siendo muy elevada desde el punto de vista electromagnético como para poder conseguir una refracción de alta calidad.

Los metamateriales actuales se caracterizan típicamente por tener una relación de p/λ_g = 1/5….1/15, de modo que, a pesar de que la refracción es dominante, los efectos de difracción/dispersión tienden a alterar la pureza de los efectos de la refracción y a aumentar las pérdidas de transmisión. Para obtener los fenómenos de refracción muy puros es necesario homogeneizar el metamaterial, es decir, disminuir la característica estructural p/λ_g en un orden de magnitud o más. Si se lograra superar este problema, el metamaterial se comportaría como un material «real artificial» lo cual significa que su celda unidad sería tan pequeña que actuaría como átomos en materiales convencionales, produciendo una respuesta macroscópica perfectamente homogénea. En los medios naturales, como el aire o teflón, la constante de red atómica es del orden del angstom ($p \approx 10^{-10}$ m), por lo que en el rango de microondas p/λ_g = 10^{-9} lo que garantiza una respuesta perfectamente homogénea a los on-

das electromagnéticas. No sería necesario un margen tan elevado entre λ_g y p para obtener una buena refracción sino que para el caso de los metamateriales con una disminución en la relación de p/λ_g del orden de 1/10 a 1/100 sería suficiente, ya que la dispersión sería prácticamente insignificante.

Para abordar la cuestión de si es o no posible esta reducción e identificar los posibles problemas relacionados, vamos a considerar los metamateriales CRLH *Composite Right/Left Handed*.

La relación de dispersión de un metamaterial CRLH está bien establecida y viene dada por la ecuación siguiente:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{p}\left(\omega\sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\sqrt{L_L C_L}}\right) \quad (1)$$

de la que el índice de refracción se obtiene como:

$$n(\omega) = \frac{\beta(\omega)}{k_0}$$

donde $k_0 = \omega/c$ es el número de onda en el espacio libre, que se relaciona con la longitud de onda guiada en la expresión:

$$\lambda_g(\omega) = \frac{2\pi}{|\beta(\omega)|}$$

Consideremos ahora un metamaterial con un índice de refracción n_{op} a una frecuencia de operación dada ω_{op}, $n_{op} = n(\omega_{op})$ (típicamente negativo). Para homogeneizar el metamaterial, deberíamos reducir la constante de red promedio p a un valor significativamente menor $p_h = p/\varsigma$ (ς >>1, al menos $\varsigma > 10$), sin cambiar $n_{op} = n(\omega_{op})$ y sin cambiar el tamaño total del metamaterial.

El objetivo de la homogeneización es mejorar la calidad del enfoque, sin cambiar ni su ubicación, ni la frecuencia de operación ni el tamaño global de la estructura. Para lograr esta homogeneización de p_h sin afectar a $n_{op} = n(\omega_{op})$, es necesario ajustar los valores de las reactancias inductivas y capacitivas en la relación de dispersión a nuevos valores de L_{Rh}, C_{Rh}, L_{Lh}, y C_{Lh}, de modo que $\beta(\omega)$ permanezca invariable:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{p_h}\left(\omega\sqrt{L_{Rh}C_{Rh}} - \frac{1}{\sqrt{L_{Lh}C_{Rh}}}\right)$$

$$\beta(\omega) = \frac{\zeta}{p}\left(\omega\sqrt{L_{Rh}C_{Rh}} - \frac{1}{\sqrt{L_{Lh}C_{Rh}}}\right)$$

$$\beta(\omega) = \frac{1}{p}\left(\omega\sqrt{\zeta^2 L_{Rh}C_{Rh}} - \frac{1}{\omega\sqrt{L_{Lh}C_{Rh}/\zeta^2}}\right) \quad (2)$$

La condición más sencilla para que las ecuaciones (1) y (2) sean iguales es se cumplan las siguientes igualdades:

$$L_{Rh} = L_{Rh}/\varsigma$$

$$C_{Rh} = C_{Rh}/\varsigma$$

$$L_{Lh} = L_{Lh}\,\varsigma$$

$$C_{Lh} = C_{Ch}\,\varsigma$$

Por lo tanto, los parámetros RH (*Right-Handed*) han de ser reducidos en factor ς, lo que no parece representar un problema importante ya que la inductancia y la capacitancia de una estructura normalmente disminuye, cuando el tamaño de la estructura disminuye (por $\varsigma > 0$), más o menos en el mismo orden ($\varsigma > 0$). Sin embargo, los parámetros de LH tienen que ser aumentados por el factor ς. Esto representa un verdadero desafío dado que implica mucha más energía eléctrica y magnética en un volumen más pequeño. Este desafío requiere de nuevas arquitecturas y tecnologías. De este modo, tendrán que desarrollarse nuevas configuraciones en dos dimensiones, incluyendo condensadores cerámicos de alta permitividad y ferroeléctricos MIM (*Metal-Insulator-Metal*), así como inductores de alta permeabilidad ferromagnética.

Debido a la ausencia de cargas magnéticas, los inductores son mucho más difíciles de realizar que los condensadores, sólo requieren distancias muy pequeñas o muy alta permitividad en configuraciones MIM. Una solución para sintetizar una alta inductancia en un volumen muy pequeño podría ser integrando los hilos inductores dentro de los materiales nanoestructurados, construidos con partículas de nano-ferrita, consiguiendo

alta permeabilidad y bajas pérdidas debido a la supresión de las corrientes de Foucault. Esto daría lugar a una nueva clase de metamateriales que podrían denominarse metamateriales multiescala con tres o más niveles estructurales separados por uno o más órdenes de magnitud.

A1.4.2. Nanotecnología y fabricación en dos y tres dimensiones

En el caso de las frecuencias de microondas, el tamaño de los elementos de la celda o retícula del metamaterial es del orden de décimas de milímetro, por lo que no resulta difícil sintetizarlo con las técnicas de fabricación actuales. Sin embargo, en el caso de frecuencias ópticas, dichos elementos tendrían un tamaño de orden nanométrico, por lo que sería necesario emplear la nanotecnología para poder fabricarlos. A día de hoy, las técnicas de nanotecnología no están muy desarrolladas y son caras, lo que no permite una producción a gran escala.

Para conseguir superar este reto tecnológico, es necesario el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación, pero especialmente el desarrollo de la nanotecnología, que será una pieza esencial para conseguir la síntesis de metamateriales a frecuencias ópticas. Además de su homogeneización, la nanotecnología facilitará la fabricación de estructuras en tres dimensiones (3D).

Por lo tanto, la creación de un metamaterial óptico implica la construcción de meta-átomos a una escala de sub-longitud de onda así como complicadas técnicas de fabricación tales como la litografía por haz de electrones, la litografía por nano-impresión, la litografía de interferencia óptica, la escritura directa láser, etc.

Aunque la mayoría de los materiales ópticos en los dispositivos de la vida real tienen que ser tridimensionales, la fabricación plasmónica de metamateriales en 3D crea enormes desafíos tecnológicos. Por otra parte, muchas de las técnicas para la evolución en 3D de metamateriales ópticos están estrechamente relacionadas con los métodos estándar de fabricación en dos dimensiones (2D). A pesar de que la fotolitografía es el proceso más utilizado para la microfabricación en la industria de circuitos integrados, las constantes de red y periodicidades son tan pequeñas en la mayoría de los metamateriales ópticos que siguen siendo superiores a la capacidad de esta técnica y, como resultado, la mayoría de los metamateriales plasmónicos de 2D han sido fabricados utilizando el método de litografía por haz de electrones (EBL *Electron Beam Lithography*).

Fabricación en 2D

A diferencia de la fotolitografía, la técnica EBL emplea un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar el patrón deseado sobre una superficie cubierta con una película para exposición. La longitud de onda de *De Broglie* de los electrones de alta energía es mucho menor que la de la luz y, por lo tanto, puede superar el límite de difracción de la luz de los sistemas típicos de la fotolitografía. El tamaño del *spot* del haz de electrones puede ser del orden de unos pocos nanómetros, lo que permite patrones muy finos, hasta una escala nanométrica. La EBL es la herramienta más común para la fabricación de nano-estructuras planares, ya que cuenta con una gran flexibilidad en patrones, así como en geometrías 2D. Por otra parte, EBL es un proceso que no necesita máscara antes de que se proceda a la fabricación, a diferencia de la fotolitografía tradicional. El principal inconveniente de este método es la baja eficiencia en términos de tiempo y dinero. El haz de electrones debe explorar toda la zona patrón, píxel por píxel, lo cual da lugar a periodos de tiempo muy largos para modelar el área total. En cuanto a coste, las instalaciones del sistema EBL son muy complejas y requieren un mantenimiento importante. A pesar de dichas desventajas EBL sigue siendo la herramienta elegida en la fabricación de metamateriales ópticos cuasi-2D con celda unidad metalo-dieléctrica (figura A1.12(a)).

Otra técnica de fabricación es mediante el mecanizado por haz de iones focalizado (FIB *Focused Ion Beam milling*). El sistema FIB utiliza un haz de iones de galio para modificar o modelar un diseño. Mientras que el haz de electrones en EBL sólo modifica la resina, los iones acelerados en la FIB tienen energías de decenas de keV y pueden arrancar átomos de la superficie de la muestra. La FIB se utiliza principalmente como una herramienta de micro-mecanizado para fines tales como la modificación de circuitos y el recorte de cabezas de lectura/escritura. El tamaño del punto focal del haz de iones es de alrededor de 10 nm, lo que hace FIB una técnica alternativa para la fabricación de metamateriales fotónicos. A diferencia de la fabricación por EBL, donde el haz de electrones escribe un patrón en una capa de resina y después se depositan capas metalo-dieléctricas, en el fresado FIB el haz de iones directamente talla, depositado previamente nano-estructuras en las capas deseadas. Con esta técnica, los SRRs que operan en torno a ~ 1.5 μm se han obtenido con una dimensión de 100 nm en un área de más de 300 μm^2 (figura A1.15

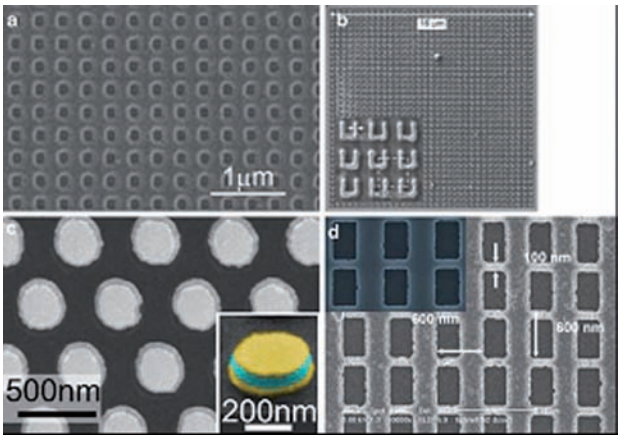


Figura A1.15. Ejemplos de metamateriales ópticos en 2D usando diversas técnicas de fabricación. (a) Material con índice negativo en la frecuencia de trabajo del rojo fabricado con el método EBL. Fuente Boletín MRS (b) Array planar de SRRs fabricado con el método de fresado FIB. Fuente: Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Egaa. (c) Matriz hexagonal de nano-burgers fabricada con la técnica IL. (Fuente: Copyright (2007) OSA Optical Society of America (d) Estructura de rejilla generada con la técnica NIL.)

(b)). El fresado FIB no implica ninguna medida post-procesamiento, y el procedimiento de optimización en la operación es menos complicada que con el método EBL.

Aunque el método de fresado FIB es eficiente en cuanto al tiempo, no es una buena opción en cuanto a la calidad que presentan las muestras. Más importante aún, el FIB es de por sí un proceso destructivo y contaminante. En algunos diseños específicos, el método FIB puede servir como una buena opción para la creación rápida de prototipos, pero por lo general no se considera como un instrumento para la fabricación metamateriales ópticos en 2D.

Afortunadamente, hay otras técnicas que se han desarrollado y adaptado para la fabricación de metamateriales fotónicos 2D con una eficiencia mucho mayor que las referidas anteriormente. Estas técnicas son la litografía por interferencia (IL *Interference Litography*) y la litografía por nano-impresión.

La litografía por interferencia, también conocida como litografía holográfica, es una variación de la fotolitografía que cuenta con el uso de un patrón periódico sin fotomáscaras. En el proceso de IL, dos o más

haces de luz coherentes interfieren para generar una onda estacionaria, que se pueden grabar en una fotoresina. En este sentido, la ventaja más importante de la técnica de IL en es su capacidad de producir patrones de gran superficie. De hecho, IL hace posible fabricar películas de metamaterial y revestimientos en una amplia zona, comparable a la de la óptica comercial, de unos 2 o 3 cm de tamaño). Al igual que la litografía óptica estándar, IL utiliza una exposición de un solo paso en lugar de una trama de barrido lento para modificar la resina. Esta área de modelado puede ser del orden de centímetros. Por otra parte, la naturaleza periódica de los patrones de interferencia encaja perfectamente con la disposición de los de meta-átomos, lo que requiere un cierto orden en la mayoría de los casos. Varios metamateriales con magnetismo artificial o un índice de refracción negativo en los rangos del IR cercano y medio han sido obtenidos basados en el método IL.

Sin embargo, la técnica de IL tiene limitaciones intrínsecas que le impiden servir como un instrumento para la fabricación en serie de metamateriales ópticos. El método IL pertenece a la categoría de de la fotolitografía, por lo que sufre el problema del límite de difracción. Esta es la razón principal que la mayoría de las demostraciones experimentales de este método en metamateriales se han realizado en la banda de frecuencias del IR en lugar del visible. Otro inconveniente es la flexibilidad del patrón. A diferencia del EBL o fotolitografía estándar que puede producir casi cualquier forma arbitraria en un patrón, en el proceso de IL la geometría de la celda unidad y su periodicidad están bastante limitadas. A pesar de los recientes avances en las técnicas de IL, tales como la inmersión y múltiples exposiciones que han ampliado en cierta medida las capacidades este método, y su relación coste-eficacia en el manejo de la producción en masa, tan sólo se considera de interés par fabricación de algunos patrones de metamateriales especiales. En general, la técnica IL no se considera como un candidato idóneo para la fabricación en serie de metamateriales ópticos.

Otro de los métodos desarrollados más recientemente es la litografía por nanoimpresión (NIL *NanoImprint Litography*) que ofrece prometedores resultados en cuanto a un alto volumen de producción de nano estructuras con un coste relativamente bajo. Este método se basa en la transferencia de patrón por la deformación mecánica directa de la resistencia usando un molde rígido o sello. La resolución de la fabricación NIL no está limitada por la difracción o efectos de la dispersión sino por las características más pequeñas definidas por la fabricación

del molde, que pueden ser del orden de 10 nm. En la figura A1.15 (d) se puede apreciar una imagen de una estructura de red fabricada con el método NIL.

Fabricación en 3D

Aunque todavía es poco usual encontrar datos a cerca de la creación de metamateriales con espesor suficiente como para considerar una tercera dimensión, sí que se han propuesto una serie de enfoques que podrían acercarse hacia la resolución de este problema. Para los materiales tipo NIM con geometría de red, se ha demostrado mediante simulaciones que apilar múltiples capas funcionales no deteriora el rendimiento global del NIM lo cual da ciertas esperanzas a la posibilidad de apilamiento de capas planas de estructuras 2D. En la figura A1.16 (a) se muestra un NIM en el IR cercano con tres capas funcionales realizadas con el método EBL aunque el espesor es inferior a 200nm (mucho más pequeño que la longitud de onda de su índice de refracción en la banda).

Esta aproximación de apilamiento de capas tiene sus restricciones dado que para una cierta resolución, el espesor de la capa de resina no puede ser arbitrariamente grande (limitaciones en el procedimiento de despegue) y además, el método EBL da lugar a pareces laterales no verticales, es decir, con cierta inclinación. Con el fin de superar estos inconvenientes, se ha tratado de buscar alternativas como la que se muestra en la figura A1.16 (b), basadas en el método EBL mediante un proceso denominado *patterning-and flattening approach* (se trata de un proceso de transferencia de un motivo, por ejemplo, una muestra de material, mediante litografía y aplanamiento). Parece un método prometedor, pero sería un proceso demasiado tedioso y costoso económicamente para poder crear muestras de varias capas con buena calidad.

Otra de las aproximaciones consideradas se muestra en la figura A1.16 (c) con una estructura NIM en el rango de frecuencias del visible realizada con la técnica FIB. La geometría de cada estructura es básicamente invariable a lo largo de la dirección vertical, a excepción de los ángulos inclinados inducidos en los procesos de fabricación.

Por otra parte, también se han estudiado otro tipo de nuevas aproximaciones para fabricación en 3D, tales como: la tecnología fotopolimerización de dos fotones (TPP *Two Photon Photopolymeration*), también conocida como escritura láser directa (DLW *Direct Laser Writing*), la es-

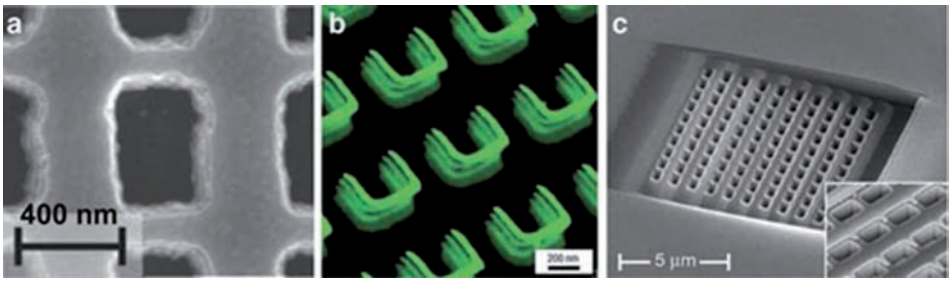


Figura A1.16. Ejemplos de metamateriales ópticos 3D fabricados en forma »capa por capa». (a) NIM en el IR cercano con tres capas funcionales fabricadas con EBL. (Fuente: OSA (2007). (b) Estructura de cuatro capas de SRR basados en EBL con la aproximación patterning-and-flattening. Fuente: Macmillan Publishers Ltd: Nat. Mater (2008). (c) NIM con refracción negativa en el visible realizado con una técnica FIB avanzada. Fuente: Macmillan Publishers Ltd: la naturaleza (2008). Cortesía de X. Zhang estructuras metálicas.)

critura directa de haz de electrones (electron beam writing), el depósito químico en fase de vapor, la litografía holográfica tridimensional y la litografía de nano impresión multicapa.

En conclusión, la mayor parte de los metamateriales se han realizado en estructuras mono y bidimensionales, pero apenas se ha conseguido desarrollar las tecnologías necesarias para la síntesis en estructuras tridimensionales en frecuencias ópticas.

A1.4.3. Extensión del ancho de banda útil

Gran parte de las configuraciones propuestas para la síntesis de metamateriales están basadas en elementos resonantes, como por ejemplo los SRR y los hilos metálicos delgados, que formaban parte de la primera estructura experimental con la que se consiguió simultáneamente permitividad y permeabilidad negativas.

Desafortunadamente, este tipo de metamateriales tienen, hoy por hoy, muy poca utilidad práctica. La razón es que los medios constituidos por elementos resonantes tienden a ser pésimos medios de transmisión de señal, ya que presentan un ancho de banda muy reducido (correspondiente a las frecuencias de resonancia de los resonadores elementales) y unas elevadas pérdidas de señal en transmisión, debido a la energía que se disipa en dichos resonadores. De hecho, existe una relación directa entre el ancho de banda y las pérdidas de transmisión (es decir, a mayor ancho de banda, más pérdidas).

En la actualidad, existe una intensa actividad científica orientada a aumentar el ancho de banda de estas estructuras. Sin embargo, diversos investigadores, reconociendo la debilidad intrínseca de las estructuras de resonadores como medios de transmisión de banda ancha, han decidido explorar enfoques alternativos. Estos esfuerzos han tenido un éxito rotundo en el caso de los metamateriales zurdos o LH, con la introducción de la denominada «teoría de línea de transmisión para metamateriales»[1]. Esta teoría establece la posibilidad de sintetizar metamateriales zurdos basándolos en el concepto de «línea de transmisión». Debido a que las líneas de transmisión no están basadas en elementos resonantes, su aplicación a los metamateriales permite implementar estructuras LH de banda muy ancha y bajas pérdidas de transmisión.

La teoría de Línea de Transmisión para Metamateriales está en la actualidad firmemente establecida, y ha sido utilizada para sintetizar un gran número de nuevos dispositivos de radiofrecuencia con excelentes prestaciones. De hecho, se puede afirmar que las primeras aplicaciones prácticas de los metamateriales han sido posibles gracias a esta teoría (ver apartado 2.3).

Como conclusión a este apartado se considera importante señalar que, probablemente, la viabilidad de aplicaciones futuras como la invisibilidad o los dispositivos ópticos de metamateriales dependerá de la adopción de enfoques teóricos alternativos a las estructuras resonantes, las cuales jugaron un papel verdaderamente esencial en los inicios de la disciplina de metamateriales.

[1] Esta teoría fue propuesta en junio de 2002 de manera independiente por tres grupos de investigación, liderados respectivamente por los profesores G.V. Eleftheriades, C. Caloz y A.A. Oliner.

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

ANEXO 2. BIBLIOGRAFíA

ANEXO 2. BIBLIOGRAFíA

C. Caloz, C. C. Chang, and T. Itoh, «Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations», Journal of Applied Physics, vol. 90, no. 11, pp. 5483–5486, 1 Dec. 2001.

V. G. Veselago, «The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ», Soviet Physical Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp. 509 – 514, 1968.

F. Martin, J. Bonache, F. Falcone, M. Sorolla, and R. Marqués, «Split ring resonator-based left-handed coplanar waveguide,» Applied Physics Letters, vol. 83, no. 22, pp. 4652–4654, 1 Dec. 2003.

R. Marqués, J. Martel, F. Mesa, and F. Medina, «Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in sub-wavelength split-ring resonator loaded metallic waveguides,» Physical Review Letters, vol. 89, no. 18, 28 October 2002.

J. Carbonell, L.J. Roglá and V.E. Boria, «Left Handed behaviour of SRR filled waveguides», 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Sump. Dig., June 2005.

R. Marqués, F. Medina, and R. Rafii-El-Idrissi, «Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials,» Physical Review B, vol. 65, pp. 144 440(1)–144 440(6), 2002.

C. Y. Cheng, and R. W. Ziokolwsky, «Tailoring double-negative metamaterial responses to achieve anomalous propagation effects along microstrip transmission lines,» IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. 51, no. 12, pp. 2306-2314, December 2003.

D. M. Pozar, Microwave Engineering, New York, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1998.

R. Marqués, F. Mesa, J. Martel, and F. Medina, «Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design – theory and experiments,» IEEE Trans. Antennas Propagation,vol. 51, no. 10, pp. 2572–2581, Oct. 2003.

V.G. Veselago, «Electrodynanmics of substances with simultaneously negative values of e and m », Sov. Phys. Usp., 10, pp. 509-514, 1968.

D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, «Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity», Phys. Rev. Lett., 84, pp. 4184-4187, 2000.

R.A. Shelby, D.R. Smith, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz «Microwave transmission through a two - dimensional, isotropic, lefth-handed metamaterial» Applied Phys. Lett., 78, pp.489-491, 2001.

R. Marqués, J. Martel, F. Mesa, and F. Medina, «Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator loaded metallic waveguides,» Phys. Rev. Lett., 89(18), pp. 183901/1-4, 2002.

R. Marqués, J. Martel, F. Mesa, and F. Medina, «A new 2D isotropic left-handed metamaterial design: theory and experiment,» Mic. Opt. Tech. Lett., 35, pp. 405-408, 2002.

Dirección General de Armamento y Material, Ministerio de Defensa, «Documento Público del Plan a Largo Plazo de Armamento y Material», 2008.

Dirección General de Armamento y Material, Ministerio de Defensa «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa», 2010.

Dirección General de Armamento y Material, Ministerio de Defensa «Plan Director de Armamento y Material», 2008.

European Defence Agency, «European Defence Research & Technology Strategy», 2008.

Enlaces de interés:

- www.ee.duke.edu/˜drsmith
- www.nanotechnology.bilkent.edu.tr/
- www.metamorphose-eu.org/
- http://grupo.us.es/gmicronda/REME/REME.htm
- www.imperial.ac.uk/plasmonmeta
- www.aph.kit.edu/english/index.php
- www.fhr.fraunhofer.de/fhr/fhr_c1_f4_en.html
- www.wpafb.af.mil/afrl/ry/
- http://esperia.iesl.forth.gr/~ppm/index.html
- http://grupo.us.es/gmicronda/REME/noticiasREME.htm
- http://146.48.101.78/meta/html/modules.php?name=News&new_topic=7

SOPT

SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

ANEXO 3. ACRÓNIMOS

ANEXO 3. ACRÓNIMOS

2D	bidimensional
3D	tridimensional
AAAS	*American Association for the Advancement of Science*
AMC	*Artificial Magnetic Conductor*
ARO	*Army Research Office*
CIMITEC	Centro de Investigación en Metamateriales para la Innovación en Tecnología Electrónica y de Comunicaciones
CRLH	*Composite Right/Left Handed*
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
DARPA	*Defence Advanced Research Projects Agency*
DNM	*Double Negative Material*
EBG	*Electromagnetic BandGap*
EBL	*Electron Beam Lithography*
EDA	*European Defence Agency*
EDRTS	*European Defence Research and Technology Strategy*
EOT	*Extraordinary Optical Transmission*
ESM	*Environment, Systems and Modelling*
ET	*Exploratory Team*
ETID	Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa
FIB	*Focused Ion Beam*
FSS	*Frequency Selective Surfaces*

GEM	*Guidance, Energy and Materials*
GEMMA	*Grup d'Enginyeria de Microones I Millimètriques Aplicat*
GFO	Grupo de Fenómenos de Onda
GPR	*Ground Penetrating Radar*
GPS	*Global Positioning System*
HIS *High*	*Impedance Surface*
ICET	*Innovative Concepts and Emerging Technologies*
ICFO	Instituto de Ciencias Fotónicas
IL	*Interference Lithography*
IR	*infrarrojo*
JIP	*Joint Investment Programme*
LH	*Left-Handed*
LHM	*Left-Handed Material*
MEMS	*Micro-Electro-Mechanical-Systems*
MIM	*Metal-Insulator-Metal*
MT	meta tecnológica
NIL	*NanoImprint Litography*
NIM	*Negative-Index Material*
NRI	*Negative Refractive Index*
OSA	*Optical Society of America*
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
PBG	*Photonic BandGap*
PDAM	Plan Director de Armamento y Material
PEC	*Perfect Electric Conductor*
PLP-AM	Plan a Largo Plazo de Armamento y Material
PoW	*Program of Work*
REME	Red Española de Metamateriales

RCS	*Radar Cross Section*
RFID	*Radio Frequency IDentification*
RH	*Right-Handed*
RTO	*Research & Technology Organization*
SET	*Sensors and Electronics Technology*
SPR	*Surface Plasmon Resonance*
SRR	*Split-Ring Resonator*
TEM	*Transverse Electromagnetic*
TPP	*Two Photon Photopolymeration*
UAB	Universidad Autónoma de Barcelona
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*s