

Metamateriales y aplicación a blindaje

Silvina Boggi y Walter G. Fano

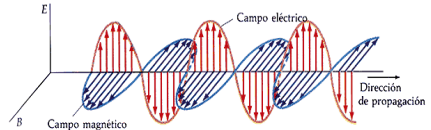


Propagación electromagnética

Las ondas son perturbaciones que se propagan. No transportan materia, transportan energía. Al lanzar una piedra al agua, se origina una onda, que avanza hacia la orilla, pero las partículas del agua no "viajan"; suben y bajan en la misma posición .



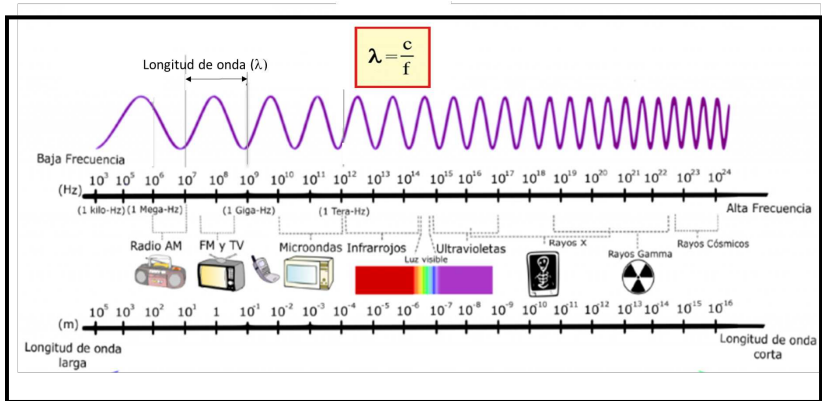
Igual que en el agua pero... en el vacío



Una onda electromagnética es la forma de propagación de la energía electromagnética a través del espacio, es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que en el vacío se propaga a la velocidad de la luz $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Espectro electromagnético

La diferencia entre ellas reside en la frecuencia de oscilación y la longitud de onda.



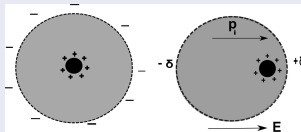
Propagación en medios dispersivos

La propagación de ondas electromagnéticas en medios dispersivos presenta interés tecnológico en la actualidad en diferentes campos de las ciencias e ingenierías. Los materiales dieléctricos y magnéticos son muy utilizados para diseñar dispositivos electrónicos tales como transformadores, antenas, absorbedores y blindajes de ondas electromagnéticas, etc.



Medios dispersivos

Cuando la onda electromagnética incide en un material dieléctrico:



Polarización electrónica

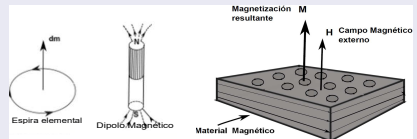
Modificación de las órbitas y centros de masa de los átomos y moléculas.

$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$, Susceptibilidad (χ_e).

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \Rightarrow \mathbf{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E}$
 $\epsilon_r = 1 + \chi_e$

Permitividad eléctrica relativa

Cuando la onda electromagnética incide en un material magnético:



Polarización magnética

Alineación de los dipolos magnéticos.

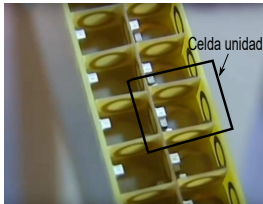
$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$. Susceptibilidad (χ_m)

$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \Rightarrow$

$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H}$, $\mu_r = 1 + \chi$
 μ_r : **Permeabilidad magnética**

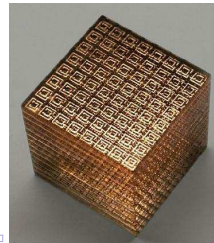
relativa

Metamateriales Electromagnéticos



◆ Son estructuras artificiales que consisten en repeticiones periódicas de un patrón formado por metales y dieléctricos (celda unidad) cuyas propiedades electromagnéticas se pueden controlar dado que dependen del diseño de la estructura.

Metamaterial construido con una estructura periódica de anillos abiertos y alambres aislados.
(foto de Physics Today)

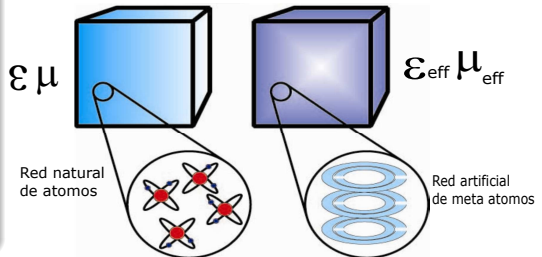


Parámetros constitutivos efectivos

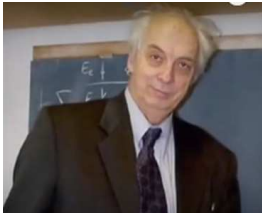
Siendo la longitud de onda de la radiación mucho mayor que la longitud de la celda unidad, esta radiación no alcanza a detectar la estructura interna.

♦ Las propiedades electromagnéticas no dependen de los átomos que forman sus materiales, sino de cómo responden al campo electromagnético los "meta- átomos" que lo forman.

Medios naturales Metamateriales



El concepto físico de Metamaterial fue desarrollado por Viktor Veselago en 1967. Cuarenta años antes de que se pudiera construir el primer metamaterial. Veselago concibió en su imaginación un nuevo material que tuviese simultáneamente la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética negativas en el mismo rango de frecuencias, obteniendo como resultado teórico, el índice de refracción negativo.



SOVIET PHYSICS USPEKH

VOLUME 10, NUMBER 4

JANUARY-FEBRUARY 1968

539.39

THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE
VALUES OF ϵ AND μ

V. G. VESELAGO

P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences, U.S.S.R.

Usp. Fiz. Nauk 92, 517-526 (July, 1964)

I. INTRODUCTION

THE dielectric constant ϵ and the magnetic permeability μ are the fundamental characteristic quantities which determine the propagation of electromagnetic waves in matter. This is due to the fact that they are the only parameters of the substance that appear in the dispersion equation

$$\left| \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\omega) - k^2 \mu(\omega) + k_x k_x \right| = 0, \quad (1)$$

which gives the connection between the frequency ω of a monochromatic wave and its wave vector \mathbf{k} . In the case of an isotropic substance, Eq. (1) takes a simpler form:

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} n^2 = 0, \quad (2)$$

II. THE PROPAGATION OF WAVES IN A SUBSTANCE WITH $\epsilon < 0$ AND $\mu < 0$, "RIGHT-HANDED" AND "LEFT-HANDED" SUBSTANCES

To ascertain the electromagnetic laws essentially connected with the sign of ϵ and μ , we must turn to those relations in which ϵ and μ appear separately, and not in the form of their product, as in (1)-(3). These relations are primarily the Maxwell equations and the constitutive relations

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \text{rot } \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (4)^*$$

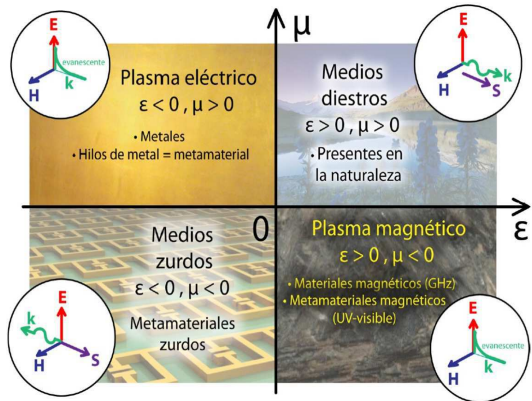
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E}. \end{aligned} \right\} \quad (4')$$

For a plane monochromatic wave, in which all

Siendo el índice de refracción de una sustancia:

$$n = \pm \sqrt{\epsilon\mu}.$$

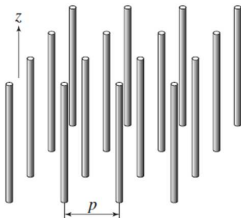
Las cuatro combinaciones de signos (ϵ, μ) se muestran en la figura.



El primer cuadrante corresponde a los medios usuales. El segundo y el cuarto cuadrante corresponde a campos atenuados exponencialmente. El tercer cuadrante, que sugiere permitividad y permeabilidad negativa simultáneamente, corresponde a los metamateriales que se conocen como materiales LH (Left Handed)

Metamaterial con $\varepsilon < 0$ y $\mu > 0$

Sir John Pendry, del Imperial College de Londres, (en 1996) construyó un material de varillas metálicas muy finas (Metal thin-wire) tienen un tamaño de celda promedio p mucho más pequeño que la longitud de onda. El campo eléctrico \mathbf{E} aplicado es paralelo al eje de las varillas.

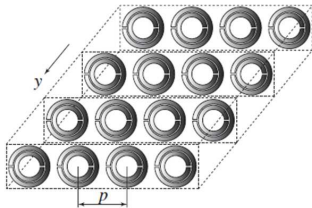


Presenta una permitividad de tipo plasmónico, con permitividad negativa en el rango de microondas.

Esto es distinto de los plasmas convencionales de gas y metal, que tienen su frecuencia de plasma muy por encima del rango de microondas.

Metamaterial con $\varepsilon > 0$ y $\mu < 0$

En 1999 Sir Pendry construyó un medio periódico, SPLIT RING RESONATORS (SRRs)(anillos resonantes) que posee permeabilidad negativa en el mismo rango de GHZ. Si el campo magnético \mathbf{H} es perpendicular al plano de los anillos, induce corrientes resonantes en el bucle y genera momentos dipolares magnéticos equivalentes, este MTM exhibe una permeabilidad de tipo plasmónico.



$$\mu_r = 1 - \frac{\pi \left(\frac{a}{p}\right)^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + j\omega\zeta}, \quad \zeta = 2pR'/a\mu_0$$

$$\omega_{0m} = c \sqrt{\frac{3p}{\pi l (2wa^3/\delta)}},$$

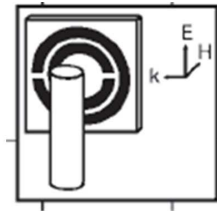
w : Ancho de anillos.

a : Radio interno. δ : Espacio entre anillos.

R' : Resistencia por unidad de longitud del metal.

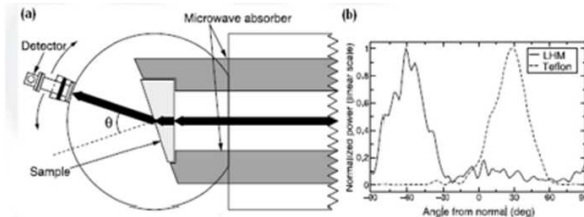
Metamaterial con $\epsilon < 0$ y $\mu < 0$

Combinando estos dos materiales David Smith de la Universidad de California San Diego en el año 2000, sintetizó el primer metamaterial con $\epsilon_{eff} < 0$ y $\mu_{eff} < 0$ que conducía a un material con índice de refracción negativo, lo que fue demostrado experimentalmente [R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction, Science, vol. 292, pp. 77-79, April 2001].



Demostración experimental de la naturaleza LH del Split-ring resonators e hilos de metal

Se construye un prisma con este metamaterial y se hace incidir una onda sobre el mismo. El experimento confirma que la luz se refracta con un ángulo negativo (por debajo de la normal en la figura) al atravesar el metamaterial, dado que se observó un máximo del coeficiente de transmisión, mientras que si el prisma es de teflón, el ángulo es positivo. Las flechas negras representan el haz de microondas como se refractaría por una muestra de índice positivo



La doble naturaleza negativa de los parámetros constitutivos, ϵ y μ , da como resultado la propagación de ondas electromagnéticas que muestran velocidades de grupo y fase antiparalelas u ondas LH.

Una onda plana en un medio sin pérdidas y sin fuentes eléctricas ni magnéticas.

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-j\omega t} \implies \mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-j\omega t} \implies \mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega \epsilon \mathbf{E}$$

Si ϵ y μ son positivos se construye la tríada de la mano derecha $(\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k})$. Si los parámetros constitutivos son ambos negativos resulta: $\mathbf{k} \times \mathbf{E} = -\omega |\mu| \mathbf{H}$ y $\mathbf{k} \times \mathbf{H} = \omega |\epsilon| \mathbf{E}$

Con lo cual se construye la inusual tríada de la mano izquierda. Lo que significa que el vector de onda es antiparalelo al vector de Poynting $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ que indica el avance de la energía.

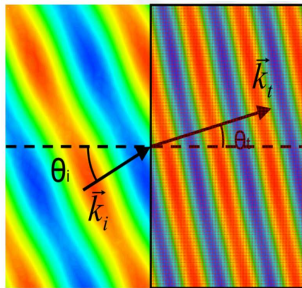
Esto indica un índice de refracción negativo.

Índice de refracción negativo

Ley de Snell

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

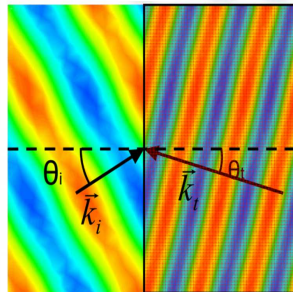
Refracción positiva



$n_1 > 0$

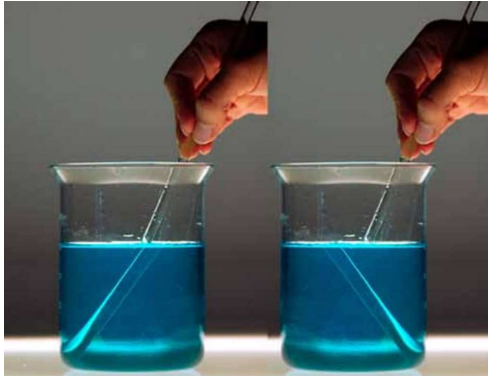
$n_2 > 0$

Refracción negativa



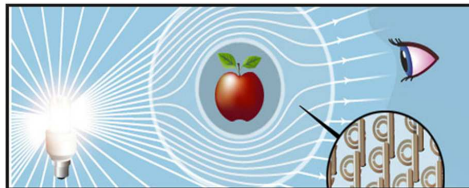
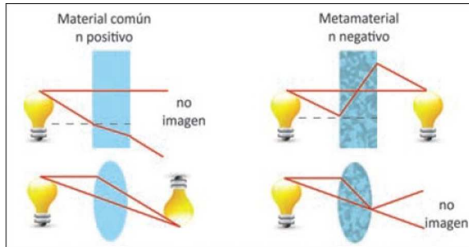
$n_1 > 0$

$n_2 < 0$

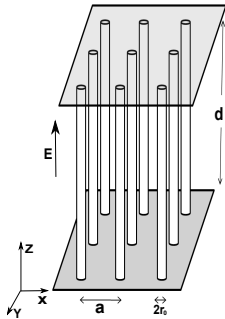


Si el agua tuviese índice de refracción negativo, la varilla parecería doblarse hacia "el otro lado"

Invisibilidad...?



Efecto de un metamaterial de índice de refracción negativo



$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \frac{\vec{J}}{j\omega} \quad \text{Siendo } \vec{J} \text{ la densidad de corriente que fluye por los cilindros conductores}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \hat{z} \frac{I}{j\omega a^2} \quad \text{Siendo } I \text{ es la corriente que fluye por los conductores.}$$

Considerando la inductancia L por unidad de longitud de la la celda unidad, que incluye el acoplamiento mutuo entre los conductores y, siendo Z_{int} la impedancia interna de los conductores cilíndricos, el campo resulta: $E = j\omega LI + Z_{int}I$

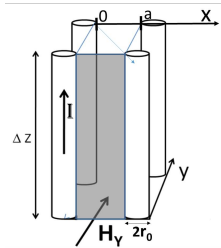
$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \frac{\vec{E}}{j\omega a^2(j\omega L + Z_{int})}$$

Resulta la permitividad eléctrica efectiva del metamaterial:

$$\epsilon_{effr} = 1 + \frac{1}{\epsilon_0 j\omega a^2(j\omega L + Z_{int})}$$

Cálculo de la Inductancia del sistema

Se calcula la inductancia por unidad de longitud en el interior del metamaterial debido al flujo del campo magnético en el espacio entre conductores.



$L = \frac{\Psi}{I}$; Siendo Ψ el flujo del campo magnético por unidad de longitud.

$$\Psi = \mu_0 \int H_y dx$$

El flujo magnético por unidad de longitud:

$$\Psi = \mu_0 \int_{r_0}^{a/2} \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{a-x} \right) dx$$

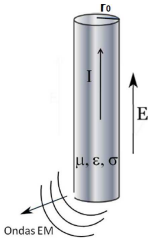
La inductancia resulta:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a^2}{4r_0(a-r_0)}$$

Impedancia interna superficial del conductor

$$Z_{int} = \frac{E_z(r_0)}{I(r_0)} = \frac{E_z(r_0)}{2\pi r_0 H_\theta(r_0)}$$

$E_z(r_0)$ y $H_\theta(r_0)$ los campos eléctricos y magnéticos dentro del conductor en la cara externa



Las ecuaciones de Maxwell

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}; \quad \nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E}$$

En coordenadas cilíndricas dentro del conductor:

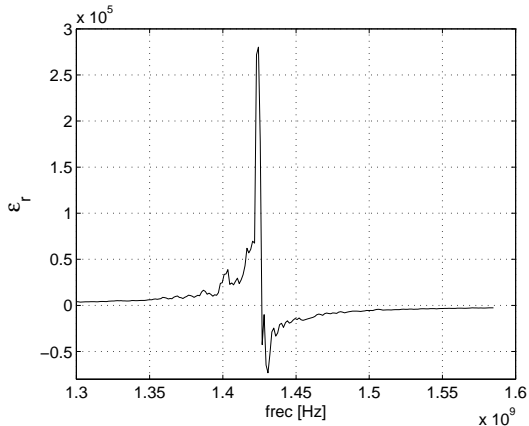
$$\frac{-\partial E_z}{\partial \rho} = -j\omega\mu H_\theta; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho H_\theta)}{\partial \rho} = \sigma E_z$$

Que conducen a la ecuación de Bessel:

$$\frac{\partial^2 E_z}{(\gamma\rho)^2} + \frac{1}{\gamma\rho} \frac{\partial E_z}{\partial(\gamma\rho)} - E_z = 0; \quad \gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

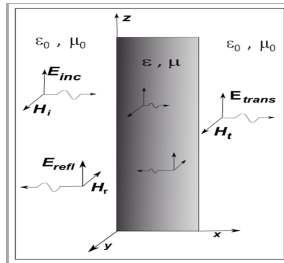
Resultado de la simulación

Permitividad eléctrica efectiva



Eficiencia de blindaje

Blindaje: Barrera a la transmisión de los campos electromagnéticos.



Eficiencia de un blindaje: Relación de la magnitud del campo eléctrico incidente en el material respecto a la magnitud del campo eléctrico que se transmite a través del mismo.

$$SE_{DB} = 20 \log \left| \frac{E_{inc}}{E_{trans}} \right|$$

Prototipo construido



Antenas

(a) La antena utilizada para las medición y (b) Analizador vectorial de redes.

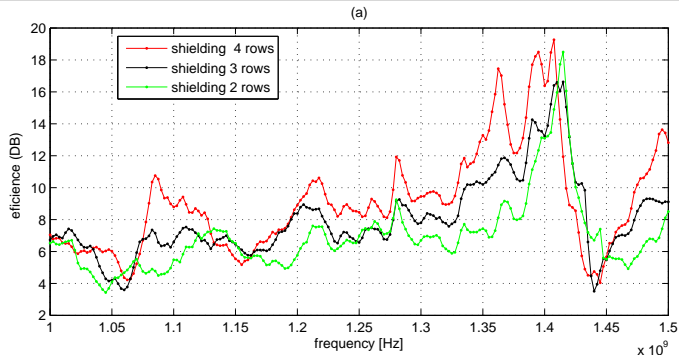


(a)



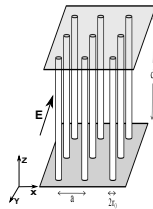
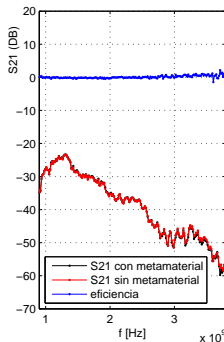
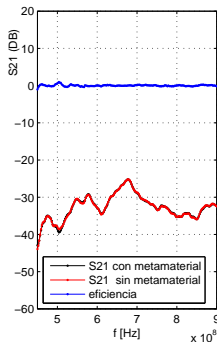
(b)

Eficiencia del blindaje del metamaterial sometido a campo eléctrico polarizado en dirección paralela a los cilindros



La efectividad del blindaje aumenta en frecuencias cercanas a 1.4 GHz, llegando a 20 DB (atenuación de 10 veces) que es consistente con el gráfico de permitividad, en el que se observan valores de permitividad negativos alrededor de esa frecuencia.

Eficiencia del metamaterial sometido a una onda electromagnética plana con el campo eléctrico polarizado en dirección horizontal



- Campo eléctrico perpendicular al eje de los cilindros.

No se observa atenuación del campo eléctrico como predice el modelo de permitividad.

Referencias:

- J. Clerk Maxwell. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field . Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1865 155, 459-512, published 1 January 1865.
- C. A. Balanis, Advanced Electromagnetic Engineering, Arizona, USA: J.Wiley, (1950).
- V. Trainotti y W. G. Fano, Ingeniera Electromagntica, 1 ed. Buenos Aires. Argentina: Ed. Nueva Libreria, (2005).
- L. D. Landau and E. M. Lifchitz, Electrodynamics of continuos Media. Addison Wesley, 1981.
- A. Von Hippel, Dielectrics and Waves, 1st ed. New York, USA: John Wiley and Sons Inc.,1959.
- W. G. Fano, S. Boggi and A. C. Razzitte, Causality study and numerical response of the magnetic permeability as a function of the frequency of ferrites using Kramers Kronig relations, 2nd ed. Physica B 403 (2008).
- V.G. Veselego, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , Soviet Physics UsPekhi 538.30, Volume 10, Number 4 january- february 1968.

- J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs, Phys. Rev. Lett. 76, (1996).
- J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 47, No. 11, November 1999.
- R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", Science 296, 77-79, 2001
- C. Calz, T. Itoh ELECTROMAGNETIC METAMATERIALS: TRANSMISSION LINE THEORY AND MICROWAVE APPLICATIONS. Wiley-Interscience publication (2006).
- S. Boggi, R. Alonso, and W. G. Fano, Shielding effectiveness of a metamaterial measured at microwave range of frequency, known as Wire Screen Metamaterial (WSM). Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 63, 33-46, 2018.
- S. Boggi, A. Kieselewsky, W.G.Fano "A model for the effective dielectric permittivity of Metamaterials" Proceedings of RPIC-IEEE 2015 Symposium, in print October 2015.



Muchas Gracias