

# COMPORTAMIENTO DE PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN APILAMIENTOS CON AGUJEROS SUBLAMBDA Y AGUJEROS PROPAGANTES

Miguel Navarro<sup>(1)</sup>, Miguel Beruete<sup>(1)</sup>, Francisco Falcone<sup>(1)</sup>, Igor Campillo<sup>(2)</sup>, Mario Sorolla<sup>(1)</sup>.  
miguel.navarro@unavarra.es, miguel.beruete@unavarra.es, francisco.falcone@unavarra.es, icampillo@nanogune.eu,  
mario@unavarra.es

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra, Edificio Los Tejos, Planta 1,  
Campus Arrosadía, 31006, Pamplona, Navarra

<sup>(2)</sup> CIC nanoGUNE Consolider, Tolosa Hirbidea 76, 20018 Donostia

**Abstract-** In this work, we provide more insight on the physics underlying the transmission through subwavelength hole arrays metaprism by comparing it with propagating hole arrays prism. We show the critical role that the size of the holes plays in this electromagnetic propagation, changing the effective index of refraction from negative to positive values as the hole diameter increases. This causes negative refraction for the zero-th order emerging beam in the metaprism whereas positive refraction in the non-cut-off holes prism. Experimental results (co- and cross-polar measurements) performed at the V-band of the millimeter waves in the Fresnel zone are well supported by numerical analyses in terms of dispersion diagram, spatial electric field distribution and power flow within the prism along with in the output air zone. As expected, higher order diffracted outgoing beams are recorded for the classical prism but not for the metaprism.

## I. INTRODUCCIÓN

Los dieléctricos artificiales se remontan a los años 40, cuando eran empleados para conformado de haces [1,2]. Posteriormente, se han empleado para reproducir el comportamiento de plasmas en ausencia de campos magneto estáticos [3].

Recientemente, con la propuesta del Split Ring Resonador [4] y de su uso combinado con un medio de hilos, se ha reavivado el interés por los metamateriales y los dieléctricos artificiales [5,6], persiguiendo entre otros objetivos la consecución de medios con índices de refracción negativos.

En la actualidad existe gran interés en sistemas de procesado completamente óptico, debido a su gran ancho de banda potencial, siendo de interés los medios metamateriales por las consideraciones de bajas pérdidas debido al uso de medios de permitividad y permeabilidad negativos [7]. En este sentido, uno de los resultados más prometedores en el rango óptico es el uso de láminas perforadas de bajo espesor (estructuras fishnet) [8,9].

Otra línea de investigación abierta en este sentido es el de Transmisión Óptica Extraordinaria, i.e. la existencia de alta transmitividad en zona de corte de agujeros sublamda, como mecanismo alternativo de control de propagación electromagnética. Se ha demostrado que bajo ciertas condiciones, es posible obtener comportamiento zurdo de bajas pérdidas en aplamientos de láminas metálicas perforadas en el rango de ondas milimétricas [11,12]. Dicho comportamiento se ha verificado en diversos experimentos y se ha descrito mediante análisis modal y en línea de transmisión [9-15]. Los resultados se han extendido al rango óptico [16] y ya se han descrito aplicaciones en ondas milimétricas como demultiplexado o conformación de haces [17-20].

En este trabajo se van a presentar las diferencias entre metamateriales basado en transmisión de ondas extraordinarias y apilamientos de superficies selectivas de frecuencias basados en agujeros propagantes, exhibiendo el primero un comportamiento unidimensional efectivo de índice de refracción negativo, mientras que el segundo lo exhibe positivo. Resultados analíticos, de simulación 3D completa y medidas serán presentados con el fin de ilustrar dicha comparativa.

## II. ANÁLISIS NUMÉRICO

Se ha diseñado un prisma con agujeros sublamda y otro con agujeros propagantes. En ambos casos se consideran láminas de aluminio de 0.5mm de grosor. En el caso de la estructura sublamda se tiene periodicidad en  $d_x = 3$  mm,  $d_y = 5$  mm y diámetro del agujero  $a = 2.5$ mm, mientras que en el caso propagante se tiene  $d_x = d_y = 5$  mm y periodicidad  $a = 4$ mm. Con estos parámetros, la transmisión extraordinaria aparece a una frecuencia de 57GHz, pese a que los agujeros son propagantes a partir de 70 GHz (frecuencia de corte de los agujeros). En el caso de la estructura propagante, la

frecuencia de corte es de 41GHz y en ambos casos, la constante de red longitudinal se fija en  $d_z = 1.5 \text{ mm}$  ( $\sim 0.27\lambda$ ), con el fin de usar un valor de red menor y poder operar en régimen metamaterial en vez de gap electromagnético. Ambos prismas, con 15 láminas, se muestran en la figura 1.

En primer lugar, se calculan los diagramas de dispersión de la estructura infinita mediante el empleo de CST MW Studio. Se considera una celda unitaria con condiciones periódicas con decaje de fase específico en la dirección longitudinal, mientras que paredes eléctricas y magnéticas son aplicadas en la sección transversal, por lo que la onda electromagnética que se propaga por esta guía artificial es similar a un modo TEM [13].

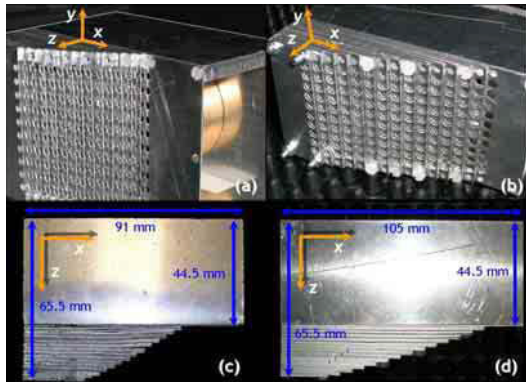


Fig. 1. Prototipos de prisma basado en transmisión extraordinaria (a y c) y prisma basado en agujeros propagantes (b y d).

El metal se ha modelado como conductor perfecto (hipótesis razonable en el rango de ondas milimétricas), pudiendo extraerse del diagrama de dispersión el índice de refracción efectivo, mostrado en la figura 2:

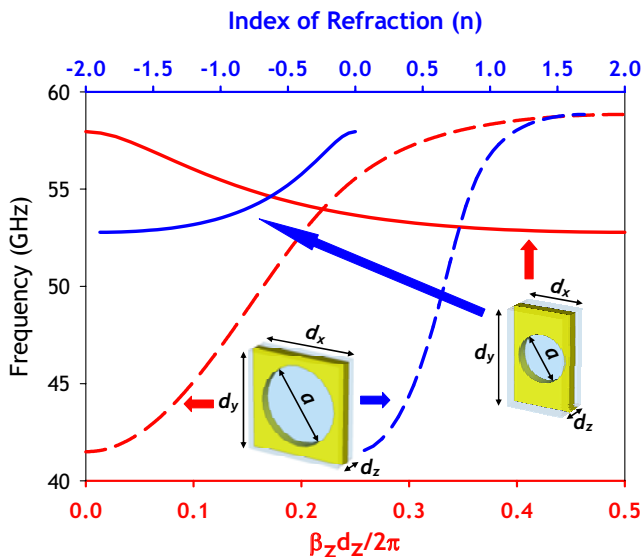


Fig. 2. Diagrama de dispersión obtenido de simulación EM 3D. La línea continua muestra el resultado para agujeros en corte y la línea punteada para lo que no están en corte.

El resultado del diagrama de dispersión muestra las bandas de transmisión extraordinaria de 53 a 58GHz, por debajo de la frecuencia de corte de 70GHz, mientras que la primera banda de transmisión de los agujeros propagantes

comienza en 42GHz y termina en 58GHz. Además, para el caso de transmisión extraordinaria, la pendiente es negativa, mientras que para el caso de agujeros propagantes es positiva. Es destacable que para la frecuencia de 53.5GHz, el índice de refracción presenta un valor de -1.

En la figura 3 se presentan los resultados de la evolución del campo eléctrico vertical. Del resultado se observa que la estructura sublongitudinal modifica de manera notable la respuesta del prisma, desde un índice de refracción positivo a negativo.

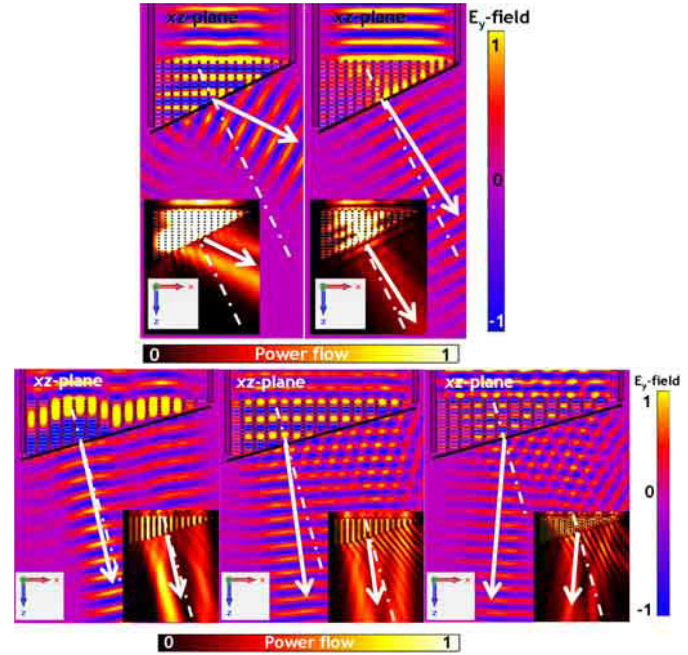


Fig. 3. Campo eléctrico y densidad de potencia para el prisma metamaterial a 53.5GHz (izda.) y 57.5GHz (dcha.) (parte superior) y para las frecuencias de 44GHz, 53.5GHz y 57.5GHz en el prisma propagante (de izda a dcha., parte inferior).

### III. RESULTADOS DE MEDIDA

Se han realizado medidas experimentales, conectando antenas de bocina corrugadas a un analizador vectorial de redes cuasi-óptica AB Millimetre, en zona de campo cercano o Fresnel, a diversas distancias.

En la figura 4 se muestran los valores de potencia medidos para el prisma metamaterial, tanto para el caso copular como para el caso cross polar. En el rango frecuencial de 53GHz a 60GHz, se observa que el haz recibido se ha producido en ángulos negativos en el caso copular (figura 4, recuadro a,c e). En 60GHz se observa un mínimo asociado con la anomalía de Rayleigh Wood y en 63GHz en segundo modo propio aparece. En este caso y tal y como predice la estructura de bandas, el comportamiento de este modo es diestro y el haz de salida de orden cero experimenta refracción positiva. Además, este modo está relacionado con el primer modo propagante de la guía definido por el agujero, con un índice de refracción positivo y menor que 1. De esta manera y de la Ley de Snell, el ángulo de deflexión debe ser menor que el ángulo del prisma, que en el caso del prisma metamaterial es de  $26.6^\circ$ . Los valores cross polares se encuentran 20dB por debajo de los valores copulares en la región de interés.

En la figura 5 se muestran los resultados correspondiente con el prisma con agujeros propagantes. En este caso, el haz de orden cero muestra un ángulo de refracción positivo para los dos primeros modos propios. Se observan picos de transmitividad en ángulos de refracción negativos. No obstante, estos valores corresponden con haces de salida procedentes de modos difractados de mayor orden. Se puede observar para un ángulo de aproximadamente  $70^\circ$  para frecuencias por encima de 67GHz.

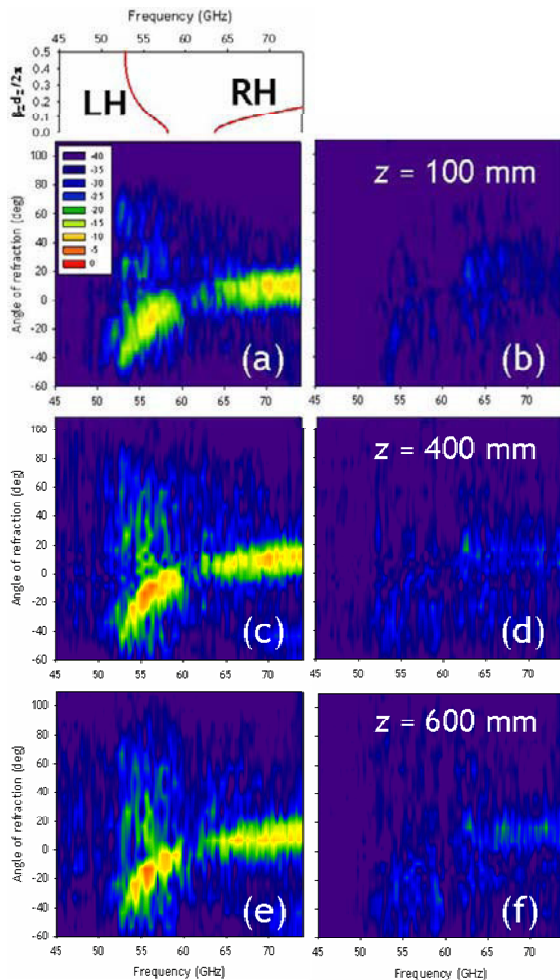


Fig. 4. Distribución angular de potencia del prisma metamaterial en función de la frecuencia en medida copolar (a, c, e) y crosspolar (b, d, f). El ángulo de refracción es referenciado a la superficie normal.

Tal y como se ha comentado previamente, el experimento del prisma permite obtener de manera directa el valor del índice de refracción mediante el empleo de la Ley de Snell. Los resultados obtenidos para una distancia de medida de 600mm se muestran en la figura 6. Se muestra tanto el resultado obtenido experimentalmente como el procedente del análisis numérico de la estructura, procedente del diagrama de dispersión calculado para la estructura periódica infinita. Se observa que ambos valores son similares, con indicación adicional de las curvas de ajuste de error para cada caso.

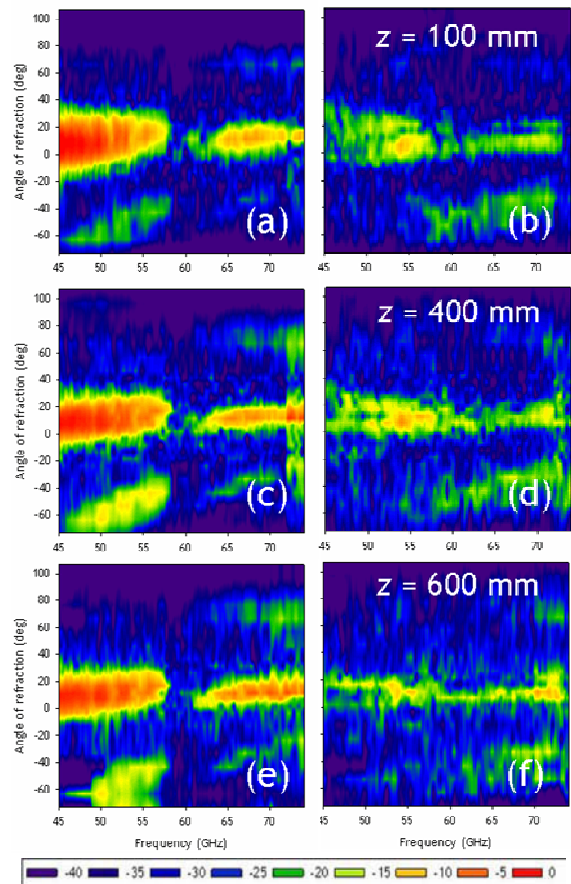


Fig. 5. Distribución angular de potencia del prisma con agujeros por encima de la frecuencia de corte en función de la frecuencia en medida copolar (a, c, e) y crosspolar (b, d, f). El ángulo de refracción es referenciado a la superficie normal.

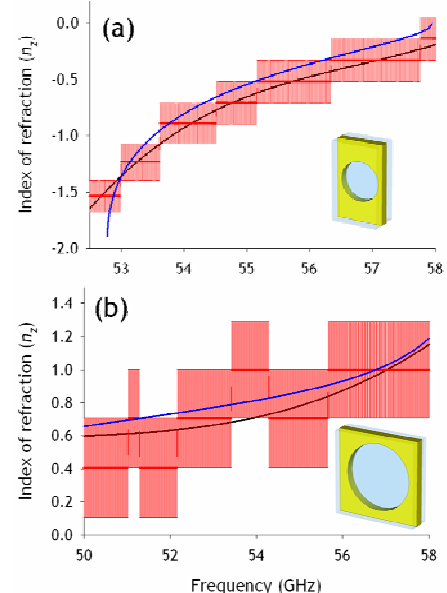


Fig. 6. Evolución del índice de refracción numéricos y experimentales para el prisma metamaterial (a) y el prisma con agujeros por encima de la frecuencia de corte (b).

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha indagado sobre la operación de un apilamiento de láminas metálicas sublongitud de onda perforadas. Se ha demostrado que el tamaño de los agujeros modifica de manera notable el comportamiento del apilamiento, pasando de un comportamiento no convencional con índice de refracción negativo cuando el agujero está en corte hacia un comportamiento convencional cuando el agujero deja de estar al corte. Los diagramas de dispersión para una estructura periódica infinita se han obtenido, con el fin de poder calcular el índice de refracción efectivo, así como las resonancias presentes tanto en el caso metamaterial como en el caso convencional. Se ha procedido a la medida experimental de la distribución de potencia con el ángulo y la frecuencia, demostrando el comportamiento de ambas estructuras. Finalmente, se presenta mediante extracción paramétrica el valor del índice de refracción, negativo para el caso metamaterial y positivo para el prisma convencional.

#### REFERENCIAS

- [1] W. E. Kock, "Metal-lens antennas," *Proc. IRE*, vol. 34, no. 11, pp. 828–836, 1946.
- [2] W. E. Kock, "Path-Length Microwave Lenses," *Proc. IRE*, vol. 37, no. 8, pp. 852–855, 1949.
- [3] W. Rotman, "Plasma simulation by artificial dielectrics and parallel-plate media," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 10, no.1, pp. 82-95, January 1962.
- [4] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins and W.J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, 1999.
- [5] R. A. Shelby, D.R. Smith, and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77–79, 2001.
- [6] V.G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, 1968.
- [7] V. M. Shalaev, "Optical negative-index metamaterials," *Nature Photon.*, vol. 1, pp. 41-48, 2006.
- [8] S. Zhang, W. Fan, N.C. Panoiu, K.J. Malloy, R.M. Osgood, and S.R.J. Brueck, "Experimental Demonstration of Near-Infrared Negative-Index Metamaterials," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, no. 13, pp. 137404-1-4, 2005.
- [9] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C.M. Soukoulis and S. Linden, "Simultaneous Negative Phase and Group Velocity of Light in a Metamaterial," *Science*, vol. 32, no. 5775, pp. 892-894, 2006.
- [10] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays," *Nature*, vol. 391, no. 6668, pp. 667–669, 1998.
- [11] M. Beruete, M. Sorolla, I. Campillo, J. S. Dolado, L. Martín-Moreno, J. Bravo-Abad, and F. J. García-Vidal, "Enhanced millimetre wave transmission through subwavelength hole arrays," *Optics Letters* **29**, 2500-2502 (2004).
- [12] M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Left-handed extraordinary optical transmission through a photonic crystal of subwavelength hole arrays," *Opt. Express*, vol. 14, no. 12, pp. 5445-5455, 2006.
- [13] M. Navarro-Cía, M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Negative refraction in a prism made of stacked subwavelength hole arrays," *Opt. Express*, vol. 16, no. 2, pp. 560-566, 2008.
- [14] M. Beruete, I. Campillo, M. Navarro-Cía, F. Falcone, and M. Sorolla Ayza, "Molding Left- or Right-Handed Metamaterials by Stacked Cutoff Metallic Hole Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 6, pp. 1514-1521, 2007.
- [15] M. Beruete, M. Navarro-Cía, I. Campillo, F. Falcone, I. Arnedo, and M. Sorolla, "Parametrical Study of Left-Handed or Right-Handed Propagation by stacking Hole Arrays," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 39, no. 4-6, pp. 285-293, 2007.
- [16] J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index," *Nature*, vol. 455, no. 7211, pp. 376-379, 2008.
- [17] M. Navarro-Cía, M. Beruete, I. Campillo, and M. Sorolla, "Millimeter-Wave Left- Handed Extraordinary Transmission Metamaterial Demultiplexer," To be published in *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* (10.1109/LAWP.2008.2005041).
- [18] M. Beruete, I. Campillo, J. E. Rodríguez-Seco, E. Perea, M. Navarro-Cía, I. J. Núñez-Manrique, and M. Sorolla, "Enhanced Gain by Double-Periodic Stacked Subwavelength Hole Array," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 831-833, 2007.
- [19] M. Beruete, M. Navarro-Cía, M. Sorolla, and I. Campillo, "Planoconcave lens by negative refraction of stacked subwavelength hole arrays," *Opt. Express*, vol. 16, no. 13, pp. 9677-9683, 2008.
- [20] M. Navarro-Cía, M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Converging Biconcave Lens owing to a Left-Handed Extraordinary Transmission Metamaterial," *Appl. Phys. Lett.*, Applied Physics Letters, Vol. 94, pp. 144107-1-3, April 2009.