

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE CRISTALES DE SONIDO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

PACS: 43.35.Bf

V. Romero-García¹, R. Picó¹, I. Pérez-Arjona¹, J. Redondo¹, V. Espinosa¹, L.M. García-Raffi²,
J.V. Sánchez-Pérez³, E. Soliveres¹, A. Cebrecos¹, V.J. Sánchez-Morcillo¹

¹ Instituto para la Gestión Integrada de Zonas Costeras.-Universidad Politécnica de Valencia.
Paranimf, 1. 46730 Grao de Gandía (España)

² Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia.
Camino de Vera s/n, 46022, Valencia (España)

³ Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica. Universidad Politécnica de
Valencia. Camino de Vera s/n, 46022, Valencia (España)

RESUMEN

La Universidad Politécnica de Valencia (UPV) es pionera en el estudio de la propagación de ondas en Cristales de Sonido (CS). Los CS son disposiciones periódicas de dispersores elásticos en medios fluidos. Estos sistemas presentan propiedades únicas relacionadas con la forma particular en que modifican la dispersión del sonido, mostrando efectos como bandas de propagación prohibidas, focalización, autocolimación, refracción negativa y modos evanescentes. Sendos grupos de investigación de los Campus de Valencia y Gandia desarrollan conjuntamente una intensa actividad investigadora y tecnológica relacionada con los CS. Presentamos aquí los últimos avances del grupo en cada una de las líneas actuales en desarrollo.

INTRODUCCIÓN

En el estudio de la física del estado sólido, y en particular dentro de la teoría de semiconductores, es bien conocido el fenómeno de estructura de bandas, donde los niveles electrónicos se agrupan en bandas continuas separadas por regiones prohibidas o "band gaps". Este fenómeno puede interpretarse dentro del marco de la mecánica cuántica como consecuencia del comportamiento ondulatorio de los electrones dentro del cristal, considerado éste como un medio periódico. Por analogía con el caso de los semiconductores, uno puede esperar que el mismo fenómeno ocurra para otros tipos de ondas (mecánicas, acústicas, electromagnéticas). Desde los años 90, estas y muchas otras predicciones se han demostrado para la luz con la construcción de cristales fotónicos, estructuras bi- o tri-dimensionales en las que el índice de refracción presenta una variación periódica en el espacio en la escala del orden de la longitud de onda de la luz, y en los cuales la luz de ciertas frecuencias no puede propagarse. El estudio de estos cristales despertó también el interés (si bien unos años después) en sus equivalentes acústicos y elásticos [1,2]. Los cristales de sonido son estructuras periódicas de dispersores en un medio homogéneo, es decir, son medios que presentan una modulación periódica de las propiedades acústicas. Entre las características acústicas de estas estructuras, una de las que más interés suscitó inicialmente es la existencia de bandas prohibidas. Una estructura bidimensional típica para el estudio de este fenómeno es un conjunto de tubos de algún material sólido en algún fluido (líquido o gaseoso), de modo que

exista una gran diferencia de densidades y velocidades del sonido entre ambos materiales (por ejemplo, dispersores de acero en una matriz de aire o agua).

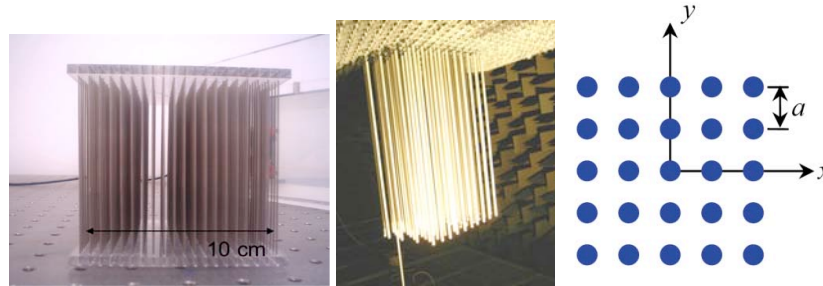


Figura 1: Izquierda: Cristal de ultrasonido bidimensional de geometría cuadrada, diseñado por el grupo de investigación en la EPS de Gandia. Centro: cristal de sonido (audible) diseñado en Valencia. Derecha: Esquema de estructura cuadrada y su constante de red a .

El interés en lograr fabricar un sistema que presente bandas prohibidas o band gaps radica en la posibilidad de usarlo para manipular las propiedades del campo de radiación correspondiente, de la misma manera que se usan los semiconductores en electrónica. Para el caso acústico, las posibles aplicaciones son la construcción de filtros sonoros, sistemas de aislamiento de ruido o de vibraciones, elementos para el control de la difracción (por ejemplo, lentes acústicas) y también el estudio de cuestiones físicas fundamentales, como el efecto de vacantes o defectos en la periodicidad del sistema, o de un cierto grado de desorden en la misma.

Nuestra investigación actual contempla, aunque no exclusivamente, las siguientes líneas de investigación en el campo de los cristales de sonido:

Línea 1. Formación de haces acústicos mediante cristales de sonido

En esta línea investigamos la capacidad de los cristales de sonido para manipular la dispersión *espacial* (o, alternativamente, las propiedades de difracción), de manera que se puedan utilizar para crear haces con un determinado perfil espacial. Esto incluye la posibilidad de colimar, focalizar o filtrar un determinado haz incidente en el cristal. En una serie de trabajos iniciales se demostró, tanto teóricamente [3] como experimentalmente [4], la cancelación del ensanchamiento por difracción de un haz de ultrasonido al atravesar un cristal de sonido bidimensional. Como se puede apreciar en las gráficas siguientes, extraídas de los citados trabajos, el sonido se propaga sin difracción para una determinada frecuencia y en aquella dirección en la que existe modulación de los parámetros acústicos del medio.

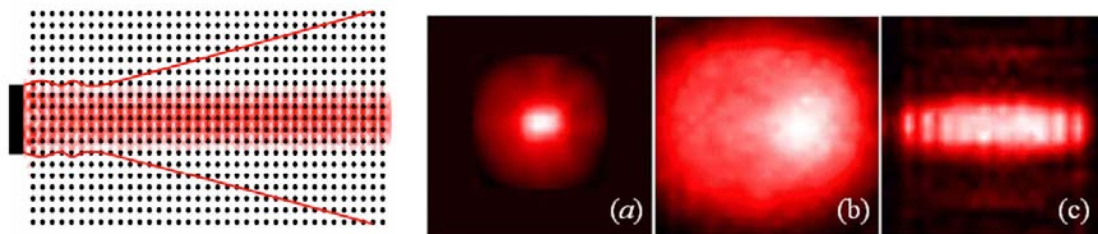


Figura 2: Simulación numérica de la propagación no difractiva (izquierda). Confirmación experimental del fenómeno (derecha).

Una generalización de los resultados anteriores consiste en el estudio de una estructura periódica tridimensional [5]. Para ello, se ha diseñado una novedosa y original estructura (figura 3, superior) que es capaz de mantener el control del campo en todo el plano transversal (figura 3, inferior, compárese con la figura 2) manteniendo a la vez un alto nivel de transmisión.

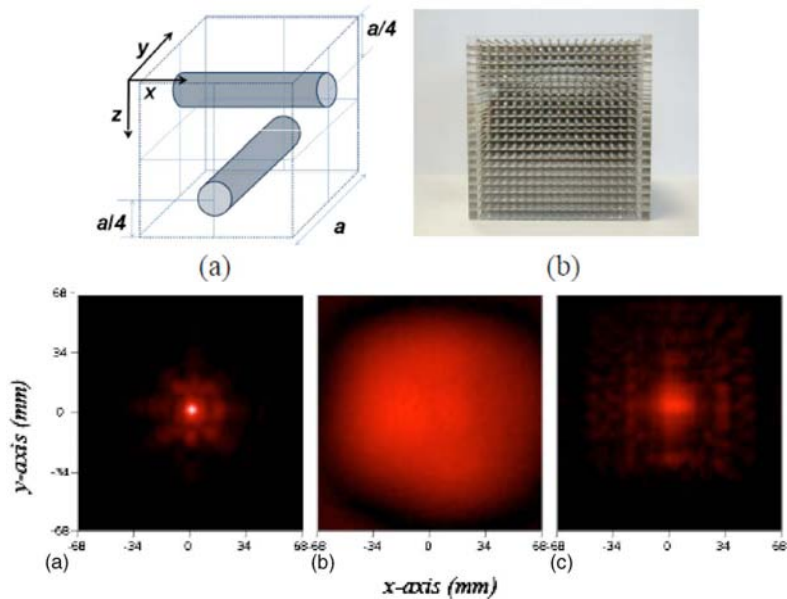


Figura 3: Imagen superior: Cristal de sonido tridimensional, ilustrando la forma de la celda unidad (a) así como el cristal completo (b). Imagen inferior: Confirmación experimental del fenómeno de propagación sub-difractiva en un cristal tridimensional.

En otra serie de trabajos dentro de esta línea [6] se demuestra la posibilidad de emplear los cristales de sonido para focalizar el campo emitido por un transductor ultrasónico plano. Una de las características más interesantes de este fenómeno es que la distancia de focalización es función de la frecuencia, lo que convierte estos dispositivos en lentes acústicas sintonizables y de alta eficiencia en transmisión, características que no son alcanzables con una lente acústica convencional. Se presentan asimismo expresiones analíticas para evaluar tanto la distancia focal como en la anchura del haz en función de la frecuencia y otros parámetros estructurales del cristal. En la figura 4 se muestra la distribución del campo acústico tras el cristal, para distintas frecuencias, así como la amplitud a lo largo del eje

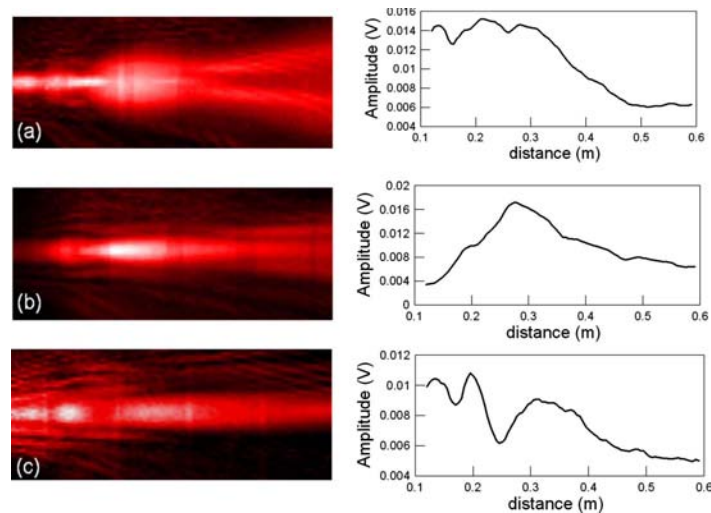


Figura 4: Resultados experimentales demostrando la focalización del sonido por un cristal de sonido bidimensional, para las frecuencias de 225 kHz (a), 240 kHz (b) y 250 kHz (c).

Línea 2: Filtrado espacial de haces acústicos

Un fenómeno muy relacionado con la propagación subdifractiva, estudiado recientemente en nuestro grupo, es el de filtrado espacial, o la eliminación selectiva de las componentes de frecuencia espacial elevada responsables de las inhomogeneidades en la estructura del haz (o ruido espacial). En [7] se muestra que un cristal fotónico es capaz de realizar, para determinadas frecuencias, funciones de filtrado espacial para la radiación electromagnética. Se demuestra además cómo una variación lineal del periodo longitudinal aumenta la eficacia del proceso. Estos resultados se han llevado recientemente al campo de la acústica en [8], donde se ha demostrado experimentalmente el fenómeno de filtrado para haces acústicos tanto en régimen audible como ultrasónico.

Por último, dentro de esta línea consideramos los fenómenos de alta potencia, en los que el grupo tiene amplia experiencia previa, incluyendo la formación de ondas de choque en medios homogéneos, o la dinámica espacio-temporal compleja en resonadores, ambas debidas a la no linealidad (siempre presente) del medio. En este sentido, nos proponemos estudiar las propiedades de transmisión de los cristales de sonido en régimen no lineal. Se trata de un enfoque totalmente novedoso y sobre el que no hay estudios anteriores. Los primeros resultados se han publicado recientemente en [9], donde se muestra que a altas potencias no solo el armónico emitido por la fuente, sino el segundo armónico generado por propagación no lineal en el medio, experimentan efectos de colimación y focalización (en función de su frecuencia) al atravesar el cristal. Como objetivo último se pretende conseguir la focalización eficiente de haces de alta potencia mediante cristales de sonido, situación de gran interés en numerosas aplicaciones prácticas, por ejemplo en medicina.

Línea 3. Reflexión por cristales: focalización y difusión del sonido

Los estudios descritos anteriormente hacen referencia a las propiedades de transmisión de los cristales de sonido. Por tanto quedan excluidas de estos aquellas frecuencias correspondientes a bandas prohibidas del cristal o band-gaps. A pesar de que son bien conocidas, fundamentalmente desde el punto de vista del aislamiento acústico, las propiedades de atenuación de las ondas sonoras con frecuencias pertenecientes a las bandas prohibidas, la estructura espacial del campo reflejado por el cristal apenas ha sido considerada. En este estudio pionero nos planteamos analizar la estructura de campo reflejado, en dos casos límites y de gran interés en acústica: situaciones en la que se obtiene un campo altamente difuso (situación deseable, por ejemplo, en el contexto de la acústica de salas) o situaciones en las que se busca el límite opuesto, es decir, un campo focalizado (y por tanto muy direccional). La figura 5 muestra la estructura investigada (estructura compuesta por cristales de sonido de distinta periodicidad) y el coeficiente de difusión resultante, comparado con otro difusor convencional. El resultado es, como se puede apreciar, muy notable, especialmente a bajas frecuencias.

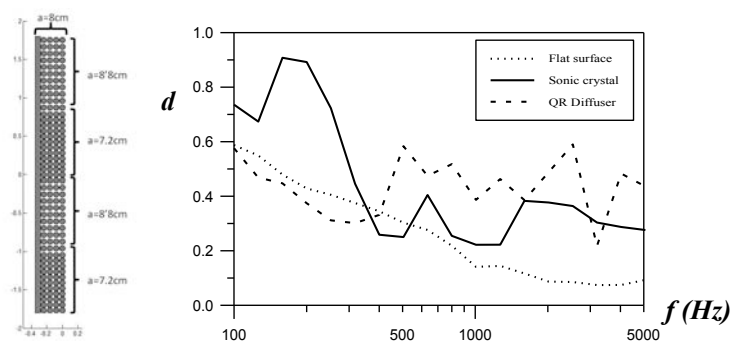


Figura 5. Cristal de sonido biperiódico, y coeficiente de difusión, evaluado para la estructura propuesta (línea continua) y para otras situaciones (panel plano, línea punteada, y difusor QR, línea rayada).

Así mismo se ha demostrado que un cristal de sonido es capaz, para determinadas frecuencias, de focalizar el sonido reflejado, de manera similar a como lo hace con el sonido transmitido. Esta investigación es completamente novedosa y se encuentra en su fase inicial.

Línea 4. Modos evanescentes

El desarrollo en el estudio las propiedades de propagación de los cristales de sonido ha dado lugar a aplicaciones diversas como las previamente presentadas: la formación de haces y el filtrado espacial de haces acústicos. Sin embargo, los medios periódicos soportan los llamados modos evanescentes que se caracterizan por una atenuación espacial y su poca propagación en el interior de los cristales. A pesar de su corto recorrido en el interior del cristal, las propiedades de estos modos son fundamentales para entender de forma más amplia la física de los CS y así, poder avanzar en su desarrollo tecnológico. Por una parte, el control de los modos evanescentes permite el diseño de lentes con super resolución, es decir, lentes que producen imágenes en la zona de campo cercano. Por otra, la caída del modo evanescente puede ser una herramienta de diseño ya que informa del número de filas necesarias en un CS para su uso como dispositivos de atenuación.

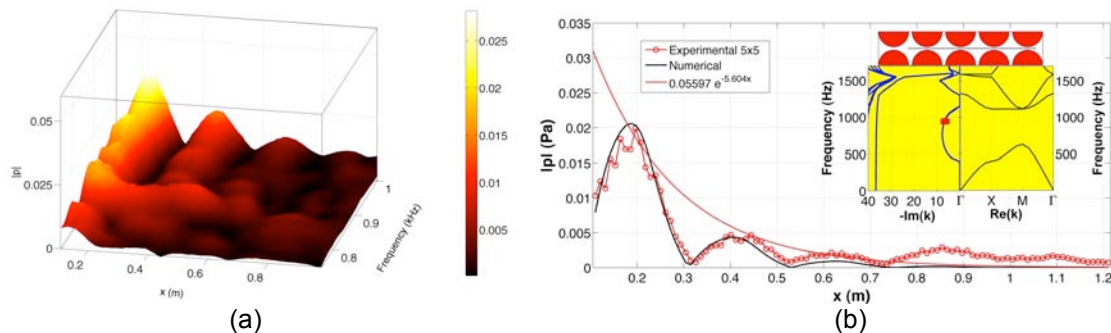


Figura 6: Predicciones teóricas y evidencias experimentales de modos evanescentes en cristales de sonido.

Tradicionalmente los band gaps se han entendido como rangos de frecuencia en los que ningún modo se podía excitar en el CS y por tanto, son bandas de propagación prohibida a través de estos medios modulares. Desde un punto de vista más fundamental, nuestro grupo de investigación ha elaborado una metodología teórica para obtener la relación inversa $k(\omega)$ [10] que proporciona una visión más completa de las propiedades de los CS, introduciendo ambos, los modos de propagación y los evanescentes. Con esto, los band gaps se pueden definir como rangos de frecuencias en los que únicamente se pueden excitar modos evanescentes. La Figura 6 muestra las predicciones teóricas y las evidencias experimentales de la caída de los modos evanescentes en el band gap de un CS. La metodología se ha extendido al análisis de los modos evanescentes en CS con defectos puntuales revisando, desde un punto de vista fundamental, las propiedades de estos sistemas. En [11] se muestra la evanescencia en CS en el que se ha creado un defecto puntual y en [12] se analiza la separación de los modos localizados en un CS con una vacante doble mediante la existencia de modos evanescentes responsables de la interacción. Recientemente nuestro grupo ha descubierto una posible explicación de los modos de repulsión existentes en CS basada en modos evanescentes [13, 14].

Línea 5. Diseño inverso, optimización

La distribución espacial de los dispersores resulta crucial para las propiedades del sistema. Nuestro grupo ha conjugado las técnicas clásicas utilizadas en el estudio de la dispersión múltiple con algoritmos de optimización heurística con el fin de optimizar distribuciones espaciales de dispersores con una propiedades acústicas prefijadas. El eje central de nuestro trabajo en esta línea de investigación ha consistido en la optimización, mediante algoritmos

genéticos simples [15] y multiobjetivo [16], de las propiedades de atenuación de distribuciones cuasi ordenadas de cilindros rígidos en aire, QOS¹. Se han analizado distribuciones simétricas y aleatorias [17] así como el método de búsqueda de la solución casi-óptima [18]. La Figura 7 muestra el análisis teórico y experimental de una QOS optimizada para atenuar el sonido en el rango de frecuencias de 1400 Hz a 2000 Hz en una zona situada a 1 m detrás del CS. Los resultados obtenidos abren la puerta al uso de estas metodologías para la optimización de las propiedades de propagación de estos sistemas con el fin de propiciar su desarrollo tecnológico.

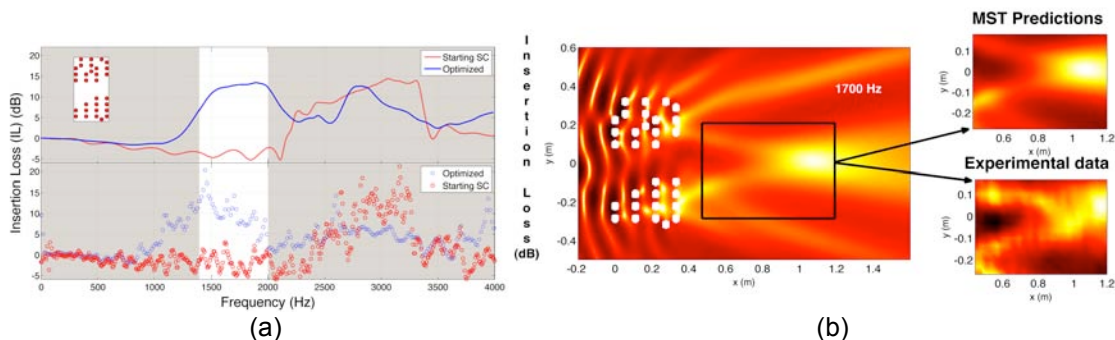


Figura 7: Análisis teórico y experimental de una QOS optimizada para atenuar el sonido en el rango de frecuencias de 1400 Hz a 2000 Hz en una zona situada a 1 m detrás del CS.

Línea 6. Pantallas acústicas basadas en CS

La existencia de band gaps en los CS ha sido explotada por nuestro grupo para diseñar sistemas alternativos a las barreras acústicas tradicionales para la atenuación de ruido aéreo [19, 20]. La Figura 8a muestra la barrera acústica basada en CS de primera generación, donde el único mecanismo de control de ruido es la dispersión múltiple, y por tanto los CS están contruidos con dispersores rígidos. Sin embargo, la dispersión múltiple por elementos rígidos dispuestos periódicamente no es suficiente para conseguir una atenuación eficiente y que pueda competir con las barreras acústicas tradicionales. Se necesita el concurso de nuevos mecanismos de atenuación basados, por ejemplo, en la distribución espacial de dispersores [21], en las propiedades de los dispersores [22] o bien en el aprovechamiento de la atenuación debida a la interferencia producida por las reflexiones en el suelo donde se sustentan los dispersores [23]. Teniendo en cuenta estas posibilidades nuestro grupo ha homologado la barrera acústica basada en CS de segunda generación mostrada en la Figura 7b. Las clasificaciones obtenidas por el prototipo experimental en los ensayos de homologación para la absorción y para el aislamiento a ruido de tráfico han sido A-3 y B-2 respectivamente. Estos resultados demuestran que los CS pueden competir, bajo el punto de vista acústico, con las pantallas tradicionales.

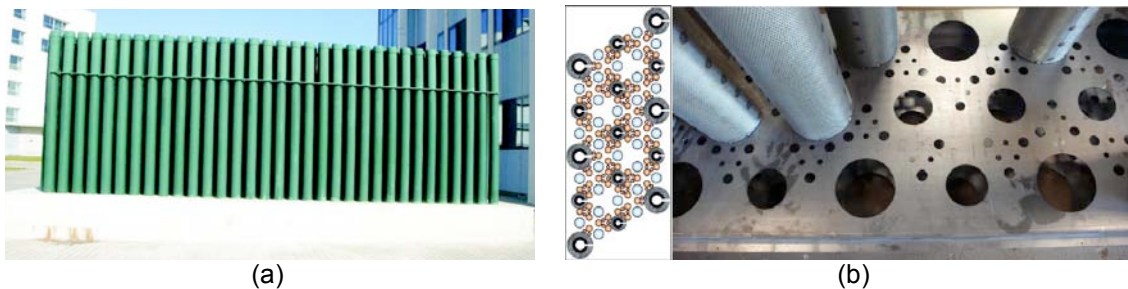


Figura 8: Barreras acústicas basadas en CS. (a) Primera generación. (b) Segunda generación.

¹ Siglas de la denominación en inglés Quasi-Ordered Structures.

CONCLUSIONES

En esta comunicación se han presentado las líneas de investigación principales en el campo de los cristales de sonido llevadas a cabo por los grupos de la Universidad Politécnica pertenecientes al IGIC (campus de Gandía) y Instituto Universitario de Matemática Aplicada y el Centro de Tecnologías Físicas (ambos del campus de Valencia), las cuales se desarrollan en estrecha colaboración.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio español de Ciencia e Innovación a través de los Proyectos Nº FIS2008-06024-C03 y MAT2009-09438. Vicent Romero agradece el apoyo del "Programa de Contratos Post-Doctorales con Movilidad UPV (CEI-01-11)". R. Picó agradece el apoyo de la Generalitat Valenciana mediante el "Proyecto de I+D para grupos de investigación emergentes GV/2011/055"

REFERENCIAS

- [1] T. Miyashita, Sonic crystals and sonic waveguides, *Meas. Sci. Technol.* 16, R47 (2005)
- [2] J. H. Page et al., *Phys. Status Solidi B* 241, 3454 (2004).
- [3] I. Pérez-Arjona, V.J. Sánchez-Morcillo, J. Redondo, V. Espinosa and K. Staliunas, *Theoretical prediction of the nondiffractive propagation of sonic waves through periodic acoustic media*, *Phys. Rev. B* 75, 014304 (2007)
- [4] V. Espinosa, V.J. Sánchez-Morcillo, K. Staliunas, I. Pérez-Arjona, and J. Redondo, *Subdiffractive propagation of ultrasound in sonic crystals*, *Phys. Rev. B* 76, 140302(R) (2007)
- [5] E. Soliveres, V. Espinosa, I. Pérez-Arjona, V. Sánchez-Morcillo y K. Staliunas, *Self collimation of ultrasound in a 3D sonic crystal*, *Applied Physics Letters* 94, 164101 (2009).
- [6] V. J. Sánchez-Morcillo, K. Staliunas, V. Espinosa, I. Pérez-Arjona, J. Redondo, and E. Soliveres, *Propagation of sound beams behind sonic crystals*, *Phys. Rev. B* 80, 134303 (2009)
- [7] Kestutis Staliunas y Victor J. Sánchez-Morcillo, *Spatial filtering of light by chirped photonic crystals*, *Phys. Rev. A* 79, 053807 (2009)
- [8] R. Picó, I. Pérez-Arjona, K. Staliunas y V.J. Sánchez-Morcillo, *Spatial filtering with Sonic crystals*, *Appl. Acoust.* (aceptado, 2011)
- [9] *Second harmonics*, *Applied Physics Letters* (aceptado, 2011)
- [10] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez and L.M. Garcia-Raffi. *Evanescent modes in sonic crystals: Complex dispersion relation and supercell approximation*. *Journ. Appl. Phys.*, (108), 044907, (2010)
- [11] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, S. Castiñeira-Ibáñez and L.M. Garcia-Raffi. *Evidences of evanescent Bloch waves in phononic crystals*. *Appl. Phys. Lett.*, (96), 124102, (2010)
- [12] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez and L.M. Garcia-Raffi. *Propagating and evanescent properties of double-point defects in sonic crystals*. *New Jour. Phys.*, (12), 083024, (2010)
- [13] V. Romero-García, J.O. Vasseur, A.C. Hladky-Hennion, L.M. Garcia-Raffi, J.V. Sánchez-Pérez. *Level repulsion and evanescent waves in periodic acoustic materials*. Enviado a *Phys. Rev. B Rapid Communications*

- [14] V. Romero-García, J.O. Vasseur, L.M. Garcia-Raffi, A.C. Hladky-Hennion. *Theoretical and experimental evidences of evanescent modes and level repulsion states in sonic crystal stubbed waveguides*. *Enviado a New Journal of Physics*
- [15] V. Romero-García, E. Fuster, L.M. García-Raffi, E.A. Sánchez-Pérez, M. Sopena, J. Llinares and J.V. Sánchez-Pérez. *Band gap creation using quasiordered structures based on sonic crystals*. *Appl. Phys. Lett.* (88), 174104, (2006)
- [16] J.M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco, V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez and L.M. Garcia-Raffi. *Optimization of sonic crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionary algorithm*. *Structural Multidisciplinary Optimization*, (39), 203-215, (2008)
- [17] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. Garcia-Raffi, J.M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco. *Hole distribution in phononic crystals: Design and optimization*. *Journ. Acous. Soc. Am.*, 125 (6), 3774-3783, (2009)
- [18] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. Garcia-Raffi, J.M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco. *High optimization process for increassing the attenuation properties of acoustic metamaterials by means of the creatioin of defects*. *Appl. Phys. Lett.*, (93), 223502, (2008)
- [19] J.V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandía, and V. Gómez. *Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers*. *Appl. Phys. Lett.* 81, 5240 (2002)
- [20] R. Martínez-Sala, C. Rubio, L.M. García-Raffi, J.V. Sánchez-Pérez, E.A. Sánchez-Pérez, Enrique, J. Llinares. *Control of noise by tres arranged like Sonic crystals*. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 291, Issue 1-2, p. 100-106.
- [21] S. Castiñeira-Ibáñez, V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez and L.M. Garcia-Raffi. *Overlapping of acoustic bandgaps using fractal geometries*. *Europhysics Letters (EPL)*, (92), 24007, (2010)
- [22] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez and L.M. Garcia-Raffi. *Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two-dimensional multiphysical phenomena periodic systems*. *Jour. Appl. Phys.*, (110), 014904 (2011)
- [23] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez and L.M. Garcia-Raffi. *Analytical model to predict the effect of a finite impedance surface on the propagation properties of 2D Sonic Crystals*. *Jour. Phys. D: Appl. Phys.*, (44), 265501-1, 265501-12, (2011)