

Bandas prohibidas en compuestos metálicos bi-dimensionales

F.R. Montero de Espinosa¹, E. Jiménez¹, M. Torres²

¹Instituto de Acústica, C.S.I.C.

²Instituto de Física Aplicada, C.S.I.C., Serrano, 144, 28006 Madrid

Resumen

En este trabajo experimental se muestra un estudio pormenorizado sobre la propagación acústica en una estructura compuesta bi-dimensional periódica. Los resultados obtenidos permiten afirmar que se ha localizado una estructura de banda prohibida de propagación de ondas longitudinales en compuestos metálicos. El compuesto consiste en una placa de aleación de aluminio con una distribución periódica de agujeros cilíndricos llenos de mercurio. La banda de atenuación es abrupta y con forma de "U". La banda tiene un ancho de 600 kHz centrada en 750 kHz. La atenuación es mayor de 40 dBs. Se han utilizado técnicas de transmisión, asegurando generación de ondas planas. Para estudiar el tipo de propagación, se realizaron barridos en la superficie de la placa con hidrófonos tipo aguja de banda ancha.

Antecedentes

La posibilidad de diseñar estructuras mecánicas capaces de filtrar completamente una banda de frecuencias, ha sido y sigue siendo un tema de investigación muy importante en los campos de la Acústica y de las Vibraciones. Por otro lado, existe en la actualidad una búsqueda muy activa de sistemas periódicos bidimensionales que posean bandas acústicas prohibidas. En los últimos años se han publicado algunos trabajos teóricos sobre bandas prohibidas en composites piezoeléctricos monodimensionales [1,2] y también en estructuras pasivas bidimensionales [3-6]. La unión de la necesidad práctica de estas estructuras en

Acústica y Vibraciones, y el interés científico de primer orden del estudio de bandas prohibidas en sistemas mesoscópicos que surgió recientemente para el caso de radiación EM de microondas, han motivado este trabajo.

La única experiencia que conocen los autores sobre sistemas acústicos reivindicados como poseedores de una banda prohibida, ha sido debida a Martínez Salas et al. [8]. En este experimento los autores realizaron una medida de atenuación acústica a través de una escultura de Sempere, sita a la entrada de la sede de la Fundación March en Madrid. En la única gráfica que presentan en el trabajo, muestran unas zonas de atenuación que se corresponden con las direcciones [100] y [110], con valores de atenuación del orden de 20 dBs. Estas bandas de atenuación son estrechas y con una clara geometría en "V". Los picos de atenuación corresponden como era de esperar a las frecuencias de resonancia de Bragg de la estructura. Desafortunadamente, Sigalas et al. acaban de refutar la existencia de una banda prohibida completa en dicho experimento [9]. Como es bien conocido, las resonancias de Bragg provocan fuertes atenuaciones, siendo candidatas para la aparición de bandas prohibidas. Sin embargo, la existencia de una banda prohibida completa, implica una atenuación infinita en una banda sensiblemente ancha.

No se había realizado hasta la fecha ninguna medida de propagación ultrasónica en composites bidimensionales buscando la existencia de bandas prohibidas. La estrategia en este trabajo ha sido escalar una estructura experimental al rango dimensional de los ultrasonidos para poder utilizar bien co-

nocidas y desarrolladas técnicas de excitación y medida. De esta forma, además, se puede asegurar la condición de propagación de ondas planas.

Resultados y discusión

La estructura propuesta en este trabajo consiste en una placa rectangular de aleación de aluminio agujereada según una disposición periódica cuadrada, en la que los huecos son cilíndricos y se llenan con mercurio.

Hemos usado la topología favorable para la aparición de bandas prohibidas, donde los dispersores tienen velocidad de propagación menor que el medio, teniendo en cambio una densidad mayor. De otro lado, las impedancias acústicas específicas de los dos metales son similares (aluminio 18.2 Mrayl, mercurio 19.7 Mrayl ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)). En este experimento, el mecanismo de interferencia es debido principalmente a un mecanismo de retraso temporal, producido por la parte de la onda que atraviesa los dispersores de mercurio. Por otro lado la dispersión en la interfase aluminio-mercurio, se debe a un fenómeno de ángulo límite provocado por la geometría circular del dispersor y por la gran diferencia de velocidades. Finalmente, la extraordinaria similitud de impedancias evita la conversión de modos de longitudinal a transversal.

Hemos empleado una técnica experimental de transmisión. Esta técnica consiste en el uso de un par de transductores ultrasónicos de banda ancha para poder emitir y recibir en condiciones de onda plana. El experimento consistió en la medida de los parámetros de propagación de varias placas de aluminio (ALPLAN MEC 7079 T 651).

Las placas eran todas de las mismas dimensiones : : 15mm de espesor , 50 mm de longitud y 40 mm de anchura. Las placas fueron mecanizadas haciendo agujeros cilíndricos de 2 mm de diámetro según redes cuadradas con diferentes parámetros de red. Para poder rellenar los agujeros con mercurio, se pegó una delgada lámina de PET al borde inferior de las placas. Los transductores eran parejas de distinta frecuencia (Panametrics serie Videoscan). El transductor emisor era excitado con una señal de banda ancha por un Analizador Ultrasonico Panametric 5052 UA. La señal fue capturada con un osciloscopio digital Tektronix TS 520 con módulo incorporado de FFT en tiempo real. Tras barrer un amplio margen de frecuencias, se estudió detenidamente la banda de frecuencia de interés en cada caso. Se fabricaron y estudiaron placas con relación de perforación entre 0 y 47%. Únicamente las placas con relación de perforación entre 40 y 47% presentan posibles bandas prohibidas. En todos los casos se ha estudiado y comparado el llenado con aire y mercurio, resultando siempre mucho más favorable este último.

El primer conjunto de medidas consistió en la comparación del espectro en frecuencia de una señal transmitida de banda ancha con frecuencia central de 1 MHz después de atravesar las distintas placas. El espectro de referencia fue el correspondiente a la transmisión a través de la placa sin agujeros - ver fa Figura 1 -. En todos los espectros es posible localizar la primera y segunda resonancia de la red de dispersores correspondientes a la dirección [100]. La experiencia se centró en el estudio de las resonancias del modo longitudinal en esta dirección. Las otras direcciones de propagación no pueden detectarse debido a la especial configuración experimental en la que los transductores están enfrentados con las superficies de los mismos paralelas entre sí, y cubriendo la superficie de la placa.

Puede observarse la aparición de una clara y abrupta banda de atenuación de frecuencia en el caso de la placa con una relación de perforación de 40%. Esta banda prohibida está centrada en la frecuencia correspondiente a la primera resonancia de Bragg, pre-

sentando bordes abruptos con un ancho de 600kHz, un 80% de la frecuencia central. El valor de la atenuación es mayor que 40 dBs. Si se comparan los espectros de todas las placas - ver la Figura 1 (b)- se puede observar la existencia de dos valles que corresponden a las dos primeras resonancias de la red. Los valles se ensanchan en la placa con relación de perforación óptima -40%- . La deriva de estos valles es consecuencia de la relación de dispersión de la propagación en este tipo de estructuras compuestas.

La siguiente prueba experimental tenía como meta el conocimiento del tipo de atenuación de la propagación. Se usó un hidrófono de aguja de PVDF de 0.2 mm de radio activo que fue acoplado con un sistema de desplazamientos automático en forma consecutiva sobre los espacios entre agujeros [10]. Se midió la amplitud de vibración a una frecuencia incluida en la banda prohibida. La sonda se desplazaba a pasos del parámetro de red , comenzando por el punto más cercano al transductor emisor y desplazando el hidrófono en la dirección de propagación. La vibración detectada, perpendicular a la superficie de la placa y, por tanto, a la dirección de propagación, es una consecuencia del acoplamiento elástico de Poisson en la interfase placa-aire. Esta amplitud de vibración es, en consecuencia, proporcional a la amplitud de vibración del modo longitudinal. En la Figura 2 puede observarse el resultado de la medida. Es notorio el decaimiento exponencial que concuerda con lo esperado de un fenómeno de penetración en una banda prohibida. El fenómeno es similar al que se produce en los estados vibracionales localizados debidos a desorden en la estructura. El resultado es similar si se excita otra frecuencia incluida en la banda prohibida.

Siguiendo la misma técnica de medida [10], se ha barrido el plano perpendicular a la dirección de propagación en el extremo de la placa -plano de recepción-, emitiendo una frecuencia más alta que el límite superior de la banda prohibida -1.2 MHz-. La Figura 3 muestra el resultado del barrido en escala de grises. Las zonas más brillantes corresponden a las zonas situadas entre los agujeros, separadas por el pa-

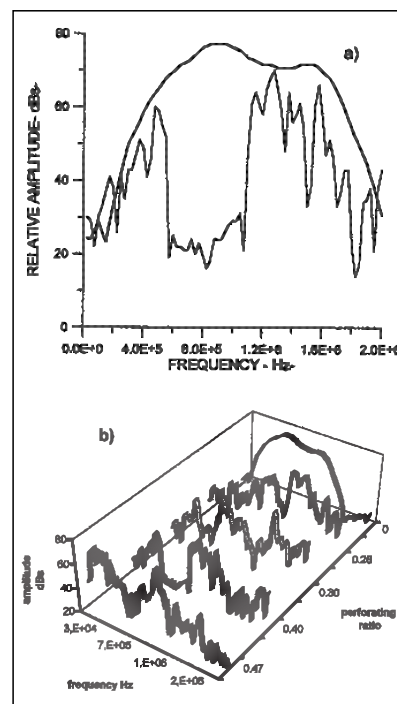


Figura 1.- Banda prohibida de frecuencia en una placa de aluminio agujereada según un matriz cuadrada, con los agujeros rellenos con mercurio. La relación de perforación es 40%. La línea gruesa representa el espectro de frecuencia de la placa sin agujeros mientras que la línea delgada corresponde al espectro de frecuencia del composite (a). Esquema 3D de los espectros de frecuencia correspondientes a las relaciones de perforación entre 0 y 47% (b).

ámetro de red. Se aprecian también otras zonas de menor intensidad, asociadas con el fenómeno de la difracción.

Se realizó a continuación el mismo tipo de barrido excitando esta vez una frecuencia incluida en la banda prohibida -750 kHz-. En este caso, debido a que la señal se atenúa mas de 40 dBs, el detector de pico del sistema de adquisición no es capaz de discriminar señal alguna por lo que no se presenta el barrido.

Finalmente, se realizó una medida puntual muy precisa de la amplitud de vibración en el plano de recepción. Se emitió una señal monocromática de 1.2 MHz, claramente fuera de la banda prohibida, recibéndola con el citado hidrófono de PVDF, y tratándola con transformada de Fourier rápida (FFT). El resultado se puede observar en la Figura 4(a). Es evidente que el perfil es mo-

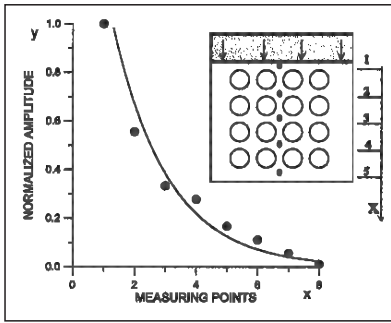


Figura 2.- Decaimiento exponencial de la amplitud de vibración de una onda longitudinal de 750 kHz -frecuencia central de la banda prohibida-, para la placa de relación de perforación del 40%. Los puntos representan los valores medidos. La línea continua es el mejor ajuste exponencial de los valores experimentales: $y = e^{-0.5507x}$. El parámetro de red es tomado como la unidad. Puede observarse también en la figura el esquema de la medida, donde se indican los puntos de medida y la localización del emisor.

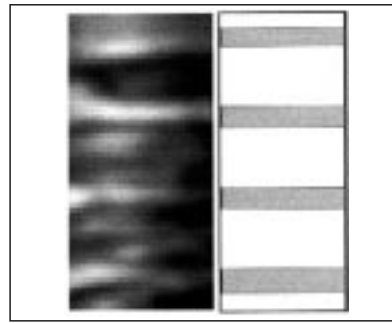


Figura 3.- Amplitud de vibración, en escala de grises, de una onda transmitida de 1.2 MHz, fuera de la banda prohibida. Observación en el plano de recepción. Las zonas vibrantes corresponden con los espacios entre los agujeros, separadas por el parámetro de red. Las otras zonas vibrantes corresponden a efectos de difracción. En el esquema, los agujeros son la zona blanca.

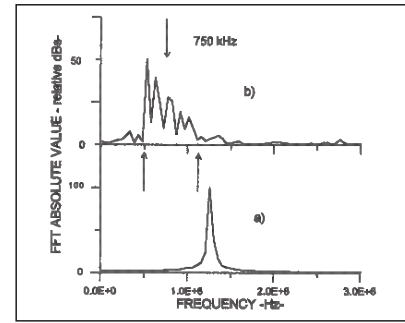


Figura 4.- Espectro obtenido mediante FFT de una señal monocromática de 1.2 MHz grabada en el plano de recepción (a). Espectro obtenido de una señal monocromática de 750 kHz -en el centro de la banda prohibida- obtenida en las mismas condiciones que en caso anterior (b). Las flechas indican los límites de la banda prohibida y la localización del centro de dicha banda.

nocromático. A continuación, se emitió una señal monocromática de 750 kHz al mismo nivel de amplitud que la anterior de 1.2 MHz, frecuencia localizada en el centro de la banda prohibida, recibiendo en el mismo punto y las mismas condiciones experimentales. La correspondiente FFT se presenta en la Figura 4(b). El nivel de esta señal recibida está 50 dBs por debajo de la anterior de 1.2 MHz. Por otro lado, el mono-

cromatismo desaparece. Se puede detectar en dicha la existencia de estados localizados confinados entre los ejes de movilidad que definen la banda prohibida. La existencia de estos estados puede ser debida a las pequeñas imperfecciones introducidas durante el proceso de mecanización. Es muy notable apreciar como el ancho del espectro de los estados localizados define, precisamente, el ancho de la banda

prohibida. Esto constituye otra prueba de la existencia de una banda prohibida.

Como conclusión, hemos encontrado y caracterizado experimentalmente una banda prohibida ultrasónica en un composite metálico bidimensional. Este trabajo podría extenderse a sistemas de rango superior de frecuencia usando técnicas de micro-mecanizado.

Referencias

- [1] Y. Wang and B. A. Auld, en Proceedings of the 1985 Ultrasonics Symposium, editado por B.R. McAvoy, vol 2, (New York, 1986), p 637.
- [2] A. Alippi, F. Cracium and E. Molinari, Appl. Phys. Lett.,53, 1806(1988).
- [3] M.S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski and B. Djafari-Rouhani, Phys. Rev. Lett.,71,2022 (1993).
- [4] M. Sigalas and E.N. Economou, Solid State Commun.,86,141(1993)
- [5] E.N. Economou and M.M. Sigalas, Phys Rev. B, 48, 13434 (1993)
- [6] M.S. Kushwaha, P. Halevi, G. Martínez, L. Dobrzynski and B. Djafari-Rouhani, Phys. Rev. B, 49,2313 (1994)
- [7] M.S. Kushwaha, P. Halevi, Appl. Phys. Lett.,64,1085 (1994)
- [8] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J.V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares and F. Meseguer, Nature,378, 241 (1995)
- [9] M. M. Sigalas and E.N. Economou, Europhys. Lett., 36,241 (1996)
- [10] F. Montero de Espinosa and M. Torres, Appl. Phys. Lett., 65, 1352 (1994)