

Cristales fonónicos y control de la propagación de ultrasonido

Martínez Esquivel, David. Dr. en Ciencias, egresado del Doctorado en Ciencias, en la Facultad de Ciencias, UAEMéx. Actualmente es investigador posdoctoral en dicha facultad, con financiamiento de la SEHCIT, desarrollado un proyecto sobre cristales fonónicos para sensado y transmisión no recíproca de señales acústicas.



Reyes Contreras, Delfino. Investigador de la Facultad de Ciencias, UAEMéx desde 2016. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 1. Sus intereses en investigación incluyen nanomateriales, óptica y acústica para aplicaciones en fotónica, biomedicina y biotecnología.

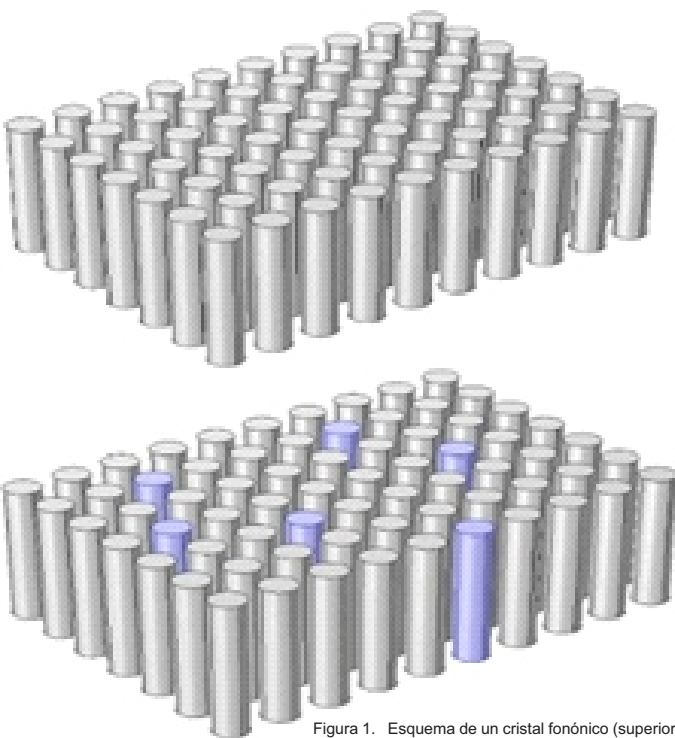


Figura 1. Esquema de un cristal fonónico (superior) y el mismo cristal con defectos (inferior)

Resumen:

El sonido está presente en nuestra vida cotidiana, la música y el habla, son dos ejemplos simples, o la imagen de un bebé en un ultrasonido cotidiano. En muchos casos, es necesario controlar la propagación de las ondas sonoras, y obtener beneficio de ello. Una de las estrategias más innovadoras para este control, es el uso de guías de onda basadas en defectos en cristales fonónicos. Estos materiales permiten manipular el sonido o ultrasonido con una precisión que permite, por ejemplo, confinarlo en un espacio específico, abriendo nuevas posibilidades en diversas aplicaciones tecnológicas.

El sonido

El sonido es una onda que se propaga en un medio, siendo el que escuchamos todos los días por ruido o al hablar, el sonido audible. Existe también sonido que no escuchamos, como el ultrasonido o infrasonido. El ultrasonido, por ejemplo, se utiliza para monitorear el periodo de gestación de bebés, y se propaga de manera eficiente en líquidos.

¿Qué son los cristales fonónicos?

Los cristales fonónicos son materiales artificiales diseñados con estructuras periódicas, que afectan la propagación de las ondas sonoras, incluyendo el ultrasonido. Un ejemplo son cilindros de acero, acomodados periódicamente, como se esquematiza en la Figura 1-superior. De manera similar a como los cristales fotónicos manipulan la luz, los cristales fonónicos permiten que ciertas frecuencias del sonido no pueden propagarse a través de su estructura. Estas propiedades permiten filtrar, guiar o confinar las ondas sonoras de forma controlada.

Guías de onda a partir de defectos en cristales fonónicos

Uno de los mecanismos más efectivos para manipular el sonido en cristales fonónicos es la introducción de defectos estructurales en su periodicidad, lo que se logra al retirar algún componente del cristal, por ejemplo, los cilindros azules de la Figura 1 (inferior). Estos defectos crean caminos preferenciales para la propagación de ondas sonoras, funcionando como guías de onda fonónicas (acústicas). A diferencia de los materiales convencionales, estas guías pueden diseñarse para operar en rangos de frecuencia específicos, minimizando pérdidas y reflejos no deseados.

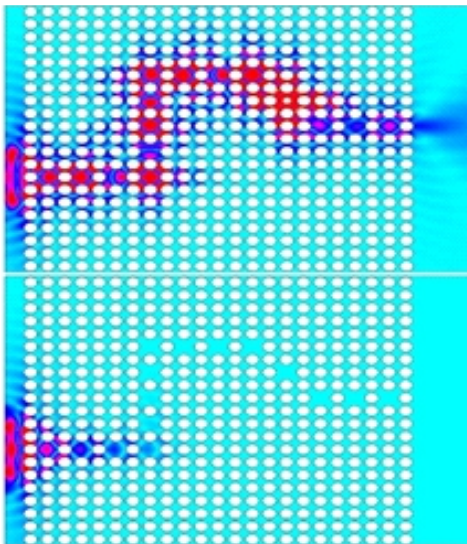


Figura 2 Superior, onda de 427 kHz propagándose;
Inferior, onda de 400 kHz que no se propaga

La Figura 2 (superior), esquematiza cómo se vería la energía acústica, de una onda de 427 kHz, propagándose por un cristal fonónico en el que se ha diseñado una guía de ondas con defectos.

La Figura 2 (inferior), muestra una onda de 400 kHz, que no se propaga por el cristal. La figura es una vista superior del cristal que muestra como una onda sigue la trayectoria de defectos y la onda, con su energía, es liberada en un unto específico.

En la Facultad de Ciencias, UAEMéx.

En la Facultad de Ciencias, de la Universidad Autónoma del Estado de México, se desarrolla trabajo de investigación, tanto computacional como experimental, utilizando cristales fonónicos hechos de cilindros de acero inoxidable, de 1.6 mm de diámetro, acomodados como se ve en la Figura 3, que muestra una vista lateral y superior de dicho cristal.

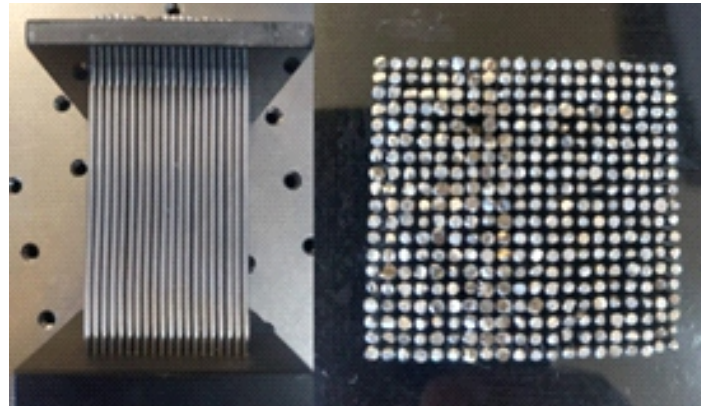


Figura 3. Fotografía real del cristal fonónico

El trabajo desarrollado ha permitido verificar que, a través del cristal mostrado se puede colimar el sonido, algo similar a un láser acústico. Así mismo, se ha mostrado que una onda acústica puede dividirse, lo que se conoce como demultiplexado acústico, o filtrarse de forma eficiente para propagar una onda completamente aislada.

Finalmente, se ha demostrado que al inducir que dos ondas se dividan y luego se mezclen dentro de un cristal fonónico, se inducen efectos de interferencia interesantes, lo que se conoce como interferometría acústica¹.



Imagen 1. Velázquez Garduño, Claudia. Facultad de Ciencias de la UAEMéx. Octubre de 2025.

Ampliando el concepto de interferometría acústica, de acuerdo con Brooks & Gerstoft, (2007), es una técnica que utiliza la interferencia de ondas sonoras o ultrasónicas para medir con alta precisión las propiedades físicas de un medio, como la velocidad del sonido, la densidad o las variaciones estructurales del material.

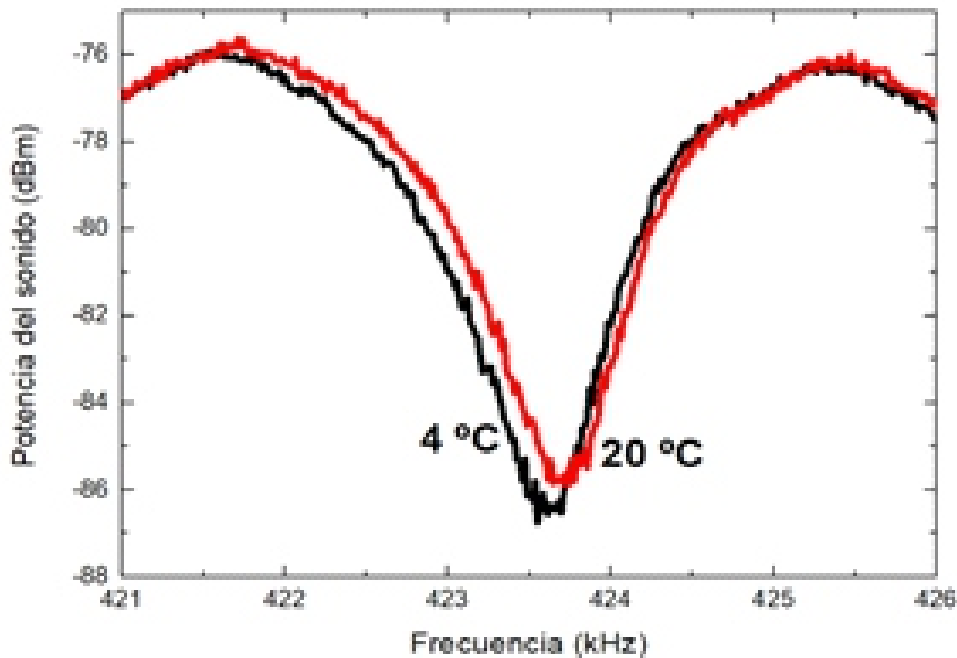


Figura 4 Ejemplo de la respuesta acústica del cristal fonónico a diferentes temperaturas.

El último efecto ha permitido observar experimentalmente que la respuesta acústica de 0.1 mililitros de una muestra de azúcar disuelta en agua, colocada en un defecto de la guía de onda, es diferente al analizarla a 4 °C y a 20 °C, como se muestra en la Figura 4, donde puede observarse dicha diferencia. Mostrando que el cristal fonónico puede funcionar como un sensor de temperatura.

En conclusión, el control de la propagación de ondas de ultrasonido utilizando guías de onda conformadas por defectos en un cristal fonónico, puede permitir su colimación, demultiplexado, filtrado o promover efectos de interferencia. Dichos fenómenos acústicos tienen aplicaciones en detección de tumores, encriptación de datos, transmisión limpia de señales acústicas, así como en el diseño de sensores acústicos. Sin duda, estas estructuras tienen una relevancia científica y tecnológica en sistemas acústicos.

La investigación que se desarrolla al respecto ha permitido la colaboración con instituciones extranjeras, como la Universidad del Norte de Texas (UNT), ubicada en Denton, Texas, USA, o la Universidad de Electrónica, Ciencia y Tecnología de China (UESTC), en la provincia de Chengdú, China, así como instituciones nacionales como la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, o el Instituto de Física, UNAM, conllevando a la presencia de UAEMéx. A nivel nacional e internacional en temas de vanguardia en el área de acústica. Así mismo, dicha investigación ha permitido la incorporación de estudiantes de licenciatura y maestría en temas asociados.

Finalmente, se trabaja en proyectos para la detección temprana de tumores mediante ultrasonido, como una técnica no invasiva, mediante colimación acústica; así como en el desarrollo de sensores acústicos para el control de calidad de productos líquidos, como leches o jugos, incluso contaminantes presentes en el agua, o materiales granulares como cementos y harinas. Se espera que estos desarrollos a corto plazo puedan tener un impacto en el sector salud y productos de consumo directo por la sociedad.

Bibliografía

- Brooks, L. A., & Gerstoft, P. (2007). Ocean acoustic interferometry. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(6), 3377–3389. <https://doi.org/10.1121/1.2713755>
- Reyes, D., Heo, H., Martínez, Á.M., Fujita, Y., Neogi, P.B., Neogi, A., (2024), Underwater analyte sensing using a phononic crystal waveguide-based interferometric acoustic spectrometer, *IEEE Open Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 4, 216.
- Reyes, D., Walker, E., Zubov, Y., Heo, H., Krokhin, A., Neogi, N., (2019), Allacoustic signal modulation and logic operation via defect induced cavity effects in phononic crystal coupled-resonator acoustic waveguides, *New J. Phys.*, 21, 113012.
- Walker, E.L., Jin, Y., Reyes, D., Neogi, A., (2020), Sub-wavelength lateral detection of tissue-approximating masses using an ultrasonic metamaterial lens. *Nature Commun.*, 11, 5967.