

# Transmission, Reflection and Absorption in Sonic and Phononic Crystals

## Tribunal:

Vincent Tournat (Université Du Maine, LAUM France)

Olivier Richoux (Université Du Maine, LAUM France)

Francisco Camarena Femenía (Universidad Politécnica de Valencia)

## Resumen:

Los cristales fonónicos son materiales artificiales formados por una disposición periódica de inclusiones embebidas en un medio, pudiendo ambos ser de carácter sólido o fluido. Controlando la geometría y el contraste de impedancias entre los materiales constituyentes se pueden controlar las propiedades dispersivas de las ondas, dando lugar a una enorme variedad de fenómenos fundamentales interesantes en el contexto de la propagación de ondas. Cuando una onda propagante se encuentra un medio con diferentes propiedades físicas puede ser transmitida y reflejada, en medios sin pérdidas, pero también absorbida, si la disipación es tenida en cuenta. Estos fenómenos fundamentales han sido explicados tradicionalmente en el contexto de medios homogéneos, pero en los últimos años también han sido objeto de un interés creciente en el contexto de estructuras periódicas. La presente tesis está dedicada al estudio de diferentes efectos presentes en cristales sónicos y fonónicos relacionados con la transmisión, reflexión y absorción de ondas, así como el desarrollo de una técnica para la caracterización de sus propiedades dispersivas, descritas por la estructura de bandas.

En primer lugar, se estudia el control de la propagación de ondas en



Autor:

**Alejandro Cebrecos Ruiz**

Directores:

**Víctor Sánchez Morcillo,  
Rubén Picó Vila**

Exposición:

6 de Octubre de 2015

Lugar:

Escuela Politécnica Superior de  
Gandía. Universidad Politécnica de  
Valencia

e-mail:

alcebrui@epsug.upv.es

transmisión en sistemas conservativos. Específicamente, nuestro interés se centra en mostrar cómo los cristales sónicos son capaces de modificar la dispersión espacial de las ondas propagantes, dando lugar al control del ensanchamiento de haces de sonido, característico de la difracción. Haciendo uso de las curvas de dispersión espacial extraídas del análisis de la estructura de bandas, se predice primero la difracción nula y negativa de ondas a frecuencias cercanas al borde de la banda, resultando en la colimación y focalización de haces acústicos en el interior y detrás de un cristal sónico 3D, y posteriormente se demuestra mediante medidas experimentales. La eficiencia de focaliza-

ción de un cristal sónico 3D está limitada debido a las múltiples reflexiones existentes en el interior del cristal, característico del régimen difractivo. Para superar esta limitación se consideran estructuras axisimétricas trabajando en el régimen de longitud de onda larga, como lentes de gradiente de índice. En este régimen, las reflexiones internas se reducen fuertemente y, en configuración axisimétrica, la adaptación de simetría con fuentes acústicas radiando haces de sonido incrementa la eficiencia drásticamente. Además, la teoría de homogenización puede ser empleada para modelar la estructura como un medio efectivo con propiedades físicas efectivas, permitiendo el estudio del frente de ondas en términos refractivos. Se mostrará el modelado, diseño y caracterización de un dispositivo de focalización eficiente basado en los conceptos anteriores.

Considérese ahora una estructura periódica en la que uno de los parámetros de la red, sea el paso de red o el factor de llenado, cambia gradualmente a lo largo de la dirección de propagación. Los cristales chirp representan este concepto y son empleados aquí para demostrar un mecanismo novedoso de incremento de la intensidad de la onda sonora basado en un fenómeno conocido como reflexión «suave». Este incremento está relacionado con una ralentización progresiva de la onda conforme se propaga a través del material, asociado con la velocidad de grupo de la relación de dispersión local en los planos del cristal. Un modelo basado en la teoría de modos acoplados es propuesto para predecir e interpretar este efecto.

Se observan dos fenómenos diferentes al considerar pérdidas en

estructuras periódicas. Por un lado, si se considera la propagación de ondas sonoras en un array periódico de capas absorbentes, cuyo frente de ondas es paralelo a los planos del cristal, se produce una reducción anómala en la absorción combinada con un incremento simultáneo de la reflexión y transmisión a las frecuencias de Bragg, de forma contraria a la habitual reducción de la transmisión, característica de sistemas periódicos conservativos a estas frecuencias. En el caso de la misma estructura laminada en la que se cubre uno de sus lados mediante un reflector rígido, la inci-

dencia de ondas sonoras desde un medio homogéneo, cuyo frente de ondas es perpendicular a los planos del cristal, produce un gran incremento de la fuerza de interacción. Dicho de otra forma, el tiempo de retardo de las ondas sonoras en el interior del sistema periódico aumenta considerablemente, resultando en un incremento de la absorción en un rango amplio de frecuencias.

Por último, se presenta una nueva metodología para el cálculo de estructuras de bandas en medios elásticos. Empleando el método de los elementos finitos en dominio

temporal, se considera una celda unidad aplicando condiciones de contorno periódicas (Bloch) dependientes del espacio y el tiempo. Mediante una una señal de banda ancha se excitan los modos de Bloch permitidos por la estructura periódica y, mediante el análisis de las señales temporales registradas, así como el barrido del vector de onda de Bloch a lo largo de la zona de Brillouin, se detectan los modos de Bloch y obtener la relación de dispersión del sistema. El método computacional es caracterizado en términos de su precisión, convergencia y tiempo de computación.

## Abstract:

Phononic crystals are artificial materials formed by a periodic arrangement of inclusions embedded into a host medium, where each of them can be solid or fluid. By controlling the geometry and the impedance contrast of its constituent materials, one can control the dispersive properties of waves, giving rise to a huge variety of interesting and fundamental phenomena in the context of wave propagation. When a propagating wave encounters a medium with different physical properties it can be transmitted and reflected in lossless media, but also absorbed if dissipation is taken into account. These fundamental phenomena have been classically explained in the context of homogeneous media, but it has been a subject of increasing interest in the context of periodic structures in recent years as well. This thesis is devoted to the study of different effects found in sonic and phononic crystals associated with transmission, reflection and absorption of waves, as well as the development of a technique for the characterization of its dispersive properties, described by the band structure.

We start discussing the control of wave propagation in transmission in conservative systems. Specifically, our interest is to show how sonic crystals can modify the spatial dispersion of propagating waves leading to control the diffractive broadening of sound beams. Making use of the spatial dispersion curves extracted from the analysis of the band structure, we first predict zero and negative diffraction of waves at frequencies close to the band-edge, resulting in collimation and focusing of sound beams in and behind a 3D sonic crystal, and later demonstrate it through experimental measurements. The focusing efficiency of a 3D sonic crystal is limited due to the strong scattering inside the crystal, characteristic of the diffraction regime. To overcome this limitation we consider axisymmetric structures working in the long wavelength regime, as a gradient index lens. In this regime, the scattering is strongly reduced and, in an axisymmetric configuration, the symmetry matching with acoustic sources radiating sound beams increase its efficiency dramatically. Moreover, the homogenization theory can be used to model the structure as an effective medium with effective physical properties, allowing the study of the wave front profile in terms of refraction. We will show the model, design and characterization of an efficient focusing device based on these concepts.

Consider now a periodic structure in which one of the parameters of the lattice, such as the lattice constant or the filling fraction, gradually changes along the propagation direction. Chirped crystals represent this concept and are used here to demonstrate a novel mechanism of sound wave enhancement based on a phenomenon known as "soft" reflection. The enhancement is related to a progressive slowing down of the wave as it propagates along the material, which is associated with the group velocity of the local dispersion relation at the planes of the crystal. A model based on the coupled mode theory is proposed to predict and interpret this effect.

Two different phenomena are observed here when dealing with dissipation in periodic structures. On one hand, when considering the propagation of in-plane sound waves in a periodic array of absorbing layers, an anomalous

decrease in the absorption, combined with a simultaneous increase of reflection and transmission at Bragg frequencies is observed, in contrast to the usual decrease of transmission, characteristic in conservative periodic systems at these frequencies. For a similar layered media, backed now by a rigid reflector, out-of-plane waves impinging the structure from a homogeneous medium will increase dramatically the interaction strength. In other words, the time delay of sound waves inside the periodic system will be considerably increased resulting in an enhanced absorption, for a broadband spectral range.

Finally, a new methodology for elastic band structure calculation is presented. Based on the finite-element in time-domain method, we consider a single unit cell applying Bloch boundary conditions depending on space and time, and compute the band structure by implementing a time-marching algorithm. A wide-band frequency signal excites the Bloch modes allowed to vibrate in the periodic structure and, by analyzing the time-history data, and spanning the Bloch wave vector along the Brillouin zone, we are able to detect these Bloch modes needed to build the dispersion relation of the system. The computational method is characterized in terms of accuracy, convergence and computation times.