



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΪΛΙΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ευαγγέλου Βασίλη

Επιβλέπων : κ. Ιωάννης Ρουμελιώτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΪΛΙΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ευαγγέλου Βασίλη

Επιβλέπων: κ. Ιωάννης Ρουμελιώτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28^η Νοεμβρίου 2019.

.....
Ιωάννης Ρουμελιώτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ιωάννης Τσαλαμέγκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ηλίας Γλότσης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

Ακουστικά Μεταύλικα

.....

Βασίλειος Ευαγγέλου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασίλειος Ευαγγέλου, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	9
Abstract.....	11
Ευχαριστίες.....	13
Εισαγωγή.....	15
Κεφάλαιο 1ο : Ιδιότητες των φωνονικών κρυστάλλων και των ακουστικών μεταϋλικών.....	17
1.1.Φασματικές ιδιότητες.....	17
1.2.Κυματικές Ιδιότητες.....	21
1.3.Φασικές ιδιότητες.....	23
1.4.Πέρα από τις μακροσκοπικές, γραμμικές ελαστικές, παθητικές δομές και παθητικά μέσα.....	23
1.5.Μέσα με απώλειες.....	24
1.6.Ρυθμιζόμενες δομές.....	24
1.7.Επεκτασιμότητα.....	25
1.8.Φωξονικές δομές.....	26
Κεφάλαιο 2ο: Δομή και διάφοροι τύποι φωνονικών κρυστάλλων.....	27
2.1.Μονοδιάστατοι φωνονικοί κρύσταλλοι.....	27
2.2.Δισδιάστατοι και τρισδιάστατοι φωνονικοί κρύσταλλοι.....	29
2.3.Ακουστική διπλή αρνητικότητα.....	30
2.4.Εστίαση και απεικόνιση.....	31
2.5.Απόκριψη μέσω μανδύα αορατότητας.....	33
2.6.Ακουστική διόρθωση.....	33
2.7.Αρνητικός ενεργός συντελεστής όγκου.....	34
2.8.Μη γραμμικές περιοδικές φωνονικές δομές και κοκκώδεις κρύσταλλοι.....	35
2.9.Επίπεδοι φακοί και υπερανάλυση.....	38
2.10.Ηχητική εστίαση μέσω μιας πλάκας υλικού με αρνητικό δείκτη.....	40
2.11.Σχεδίαση υπεραναλυτικού φακού με χρήση φωνονικών κρυστάλλων.....	41
2.12.Τα συμπεράσματα από τα προηγούμενα.....	45
Κεφάλαιο 3ο:Εφαρμογές.....	46
3.1.Διερεύνηση της ζώνης διακένου και των αρνητικών ιδιοτήτων ενός ακουστικού μεταϋλικού με ομόκεντρους δακτυλίους.....	46
3.2.Συνήθης σχηματισμός των ρυθμών ταλάντωσης από την σύνθεση ακουστικού μεταϋλικού.....	49
3.3.Σχεδίαση ακουστικού υπερφακού με χρήση μονοφασικών μεταϋλικών με δομή πλέγματος αστέρα.....	51
3.4.Ο μηχανισμός εξασθένησης κύματος του μεταϋλικού με περιοδικούς τοπικούς συντονιστές.....	54
3.5.Συσκευές υψηλού δείκτη οπτικής κυματοδήγησης.....	55
3.6. Ολική ακουστική απορρόφηση και ευρυζωνική απομόνωση που επιτυγχάνεται με διπλά μηδενικά μεταϋλικά.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	62

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και διερευνήθηκε η βιβλιογραφία που αφορά σύγχρονα και καιρία ζητήματα της έρευνας στον τομέα των μεταύλικών, και συγκεκριμένα των ακουστικών μεταύλικών καθώς και η παρουσίαση της προόδου που συντελείται στον εν λόγω τομέα. Η έρευνα εστιάστηκε κυρίως σε άρθρα που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια (2013-2018) σε επιστημονικά περιοδικά του εξωτερικού. Οι εργασίες αυτές εστίαζαν κυρίως στη βασική έρευνα που αφορά αυτό τον ερευνητικό τομέα και στις πιθανές εφαρμογές που μπορεί να προκύψουν ή ήδη αναπτύσσονται. Ταυτόχρονα εξετάστηκαν και κάποια άρθρα αναφοράς και επισκόπησης πρόσφατα δημοσιευμένα, ώστε να καλυφθεί και η πρωτογενής και η δευτερογενής βιβλιογραφία πάνω στο θέμα.

Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι φωνονικοί κρύσταλλοι και η έρευνα πάνω σε αυτούς στα πεδία της δομής, των ιδιοτήτων, της σχεδίασης επίπεδων υπεραναλυτικών φακών, στον αρνητικό ενεργό συντελεστή όγκου, στις μη γραμμικές περιοδικές φωνονικές δομές, και στην ηχητική εστίαση. Τέλος παρουσιάζονται σύγχρονες εφαρμογές των φωνονικών κρυστάλλων όπως οι συσκευές υψηλού δείκτη κυματοδηγησης, η ολική ακουστική απορρόφηση με ευρυζωνική απομόνωση, και η σχεδίαση του ακουστικού υπερφακού.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι η έρευνα βρίσκεται ακόμα σε βασικό στάδιο, αν και διαρκώς προκύπτουν προτάσεις για δομές και συσκευές που αποτελούνται από φωνονικούς κρυστάλλους, προτείνοντας βελτιώσεις ή καινοτόμες λύσεις στους τομείς της ακουστικής, των τηλεπικοινωνιών, της θερμικής διαχείρισης και ενδεχομένως και στην ηλεκτρονική.

Λέξεις κλειδιά

Μεταύλικά, φωνονικοί κρύσταλλοι, κυματοδηγοί, υπερανάλυση, επίπεδοι φακοί, δομές ζώνης, ακουστική ενίσχυση

Abstract

In the present thesis, the literature on contemporary and key issues of research in the field of metamaterials and in particular of acoustic metamaterials has been studied and explored as well as the presentation of the progress made in this field. The research is focused mainly on articles published in recent years (2013-2018) in various scientific journals. This work is focused mainly on basic research in these research areas and on potential applications that may arise or are already being developed. At the same time, some recently published reference and review articles have been reviewed, to cover both primary and secondary literature on the subject.

Specifically, phononic crystals are presented and research on them in the fields of structure, properties, hyper-resolution lenses design, negative effective bulk modulus, non-linear periodic phononic structures, and acoustic focusing. Finally, modern applications of phononic crystals such as high index waveguide devices, total acoustic absorption and broadband isolation, design of a phononic crystal super resolution lens are presented.

It is concluded that research is still at a fundamental stage, although proposals for structures and devices consisting of phononic crystals are constantly emerging, proposing improvements or innovative solutions in the areas of acoustics, telecommunications, thermal management and possibly electronics.

Keywords

Metamaterials, phononic crystals, waveguides, hyper analysis, flat lenses, band structures, acoustic amplification

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Ρουμελιώτη για τις εύστοχες και πολύτιμες παρατηρήσεις και διορθώσεις του. Επιπλέον να ευχαριστήσω θερμά τους ακούραστους και γεμάτους υπομονή γονείς μου, για όλη την στήριξη και βοήθεια τους στις ακαδημαϊκές μου σπουδές. Ακόμη ενα ευχαριστώ στα αδέρφια μου για την αμέριστη υλική και ψυχική συμπαράσταση τους. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω Τον Θεό που επέτρεψε να ζω καλώς και με αξίωσε να μπορώ να φέρω εις πέρας τις σπουδές μου.

Εισαγωγή

Οι φωνονικοί κρύσταλλοι (phononic crystals) και τα ακουστικά μεταϋλικά (acoustic metamaterials) έχουν προκαλέσει ένα αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον για τις ποικιλόμορφες τεχνολογικές εφαρμογές τους που εκτείνονται από την ελάττωση του ήχου, την υπερηχητική απεικόνιση, τις τηλεπικοινωνίες, τη θερμική διαχείριση (thermal management) έως και τη θερμοηλεκτρική ενέργεια (thermoelectricity). Οι φωνονικοί κρύσταλλοι και τα ακουστικά μεταϋλικά είναι τεχνητά σύνθετα υλικά που επιτρέπουν τον χειρισμό των ιδιοτήτων σκέδασης των δονητικών κυμάτων. Οι φωνονικοί κρύσταλλοι κατασκευάζονται από περιοδικές κατανομές εγκλεισμάτων (σκεδαστών), ενσωματωμένων σε μια μήτρα.

Οι φωνονικοί κρύσταλλοι έχουν σχεδιαστεί για να ελέγχουν τη διασπορά των κυμάτων μέσω της σκέδασης Bragg και τη σκέδαση των κυμάτων από μια διάταξη περιοδικών σκεδαστών, με διαστάσεις και περιόδους συγκρίσιμες με το μήκος κύματος. Τα ακουστικά μεταϋλικά έχουν το επιπρόσθετο χαρακτηριστικό του τοπικού συντονισμού και, αν και συχνά σχεδιάζονται ως περιοδικές κατασκευές, οι ιδιότητές τους δεν βασίζονται στην περιοδικότητα.

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ακουστικών μεταϋλικών πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερα από το μήκος κύματος των κυμάτων που επηρεάζουν. Ο τοπικός συντονισμός μπορεί να οδηγήσει σε αρνητική ενεργό δυναμική πυκνότητα μάζας (negative effective dynamic mass density) και συντελεστή όγκου (bulk modulus) και συνεπώς σε ασυνήθιστα χαρακτηριστικά διασποράς. Εάν αυτά τα υλικά επηρεάσουν την διασπορά των κυμάτων (π.χ τη δομή της δέσμης) μέσω της σκέδασης Bragg ή των τοπικών συντονισμών, μπορούν να επιτύχουν ένα ευρύ φάσμα ασυνήθιστων ιδιοτήτων φάσματος (ο-χώρος), κυμάτων (κ-χώρος) και φάσης (φ-χώρος). Για παράδειγμα, υπό ορισμένες συνθήκες, μπορούν να σχηματίζουν αδιαπέραστα ακουστικά διάκενα ζώνης διέλευσης (absolute acoustic band gaps). Αυτά είναι φασματικές ζώνες όπου η διάδοση των κυμάτων απαγορεύεται, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της διάδοσης.

Ο εντοπισμός ρυθμών (mode localization) στους φωνονικούς κρυστάλλους ή στα ακουστικά μεταϋλικά που έχουν ασυνέχειες υλικού (π.χ. κοιλότητες, γραμμικές αστοχίες κτλ.) μπορεί να παράγει μια ιεραρχία φασματικών χαρακτηριστικών μέσα στη ζώνη διέλευσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών, όπως φιλτράρισμα συχνοτήτων, κυματοδήγηση, πολυπλεξία μήκους κύματος και αποπολυπλεξία. Οι κυματικές διανυσματικές ιδιότητες προκύπτουν από τη διέλευση ζωνών με μοναδικά χαρακτηριστικά διάθλασης, όπως είναι η αρνητική διάθλαση, όταν η ταχύτητα της δέσμης κύματος (δηλ. η ταχύτητα της διάδοσης της ενέργειας) είναι αντιπαράλληλη στο κυματοδιάνυσμα (wave vector).

Η αρνητική διάθλαση μπορεί να αξιοποιηθεί για την επίτευξη εστίασης κύματος με επίπεδους φακούς. Υπό ειδικές συνθήκες, που περιλαμβάνουν την ενίσχυση αποσβεννόμενων κυμάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπεραναλυτική απεικόνιση (superresolution imaging), δηλαδή, να σχηματίζονται εικόνες που υπερβαίνουν το όριο ανάλυσης Rayleigh (Rayleigh limit of resolution).

Φωνονικοί κρύσταλλοι και ακουστικά μεταύλικά με ανισοτροπικές δομές ζώνης μπορεί να παρουσιάζουν διάθλαση μηδενικής γωνίας και μπορεί να οδηγήσουν σε κυματοδήγηση / ευθυγράμμιση χωρίς την ανάγκη γραμμικών ατελειών (linear defects).

Οι κυρίαρχοι μηχανισμοί πίσω από τον έλεγχο της φάσης των εκπεμπόμενων ακουστικών κυμάτων σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, συνδέονται με τη μη-γραμμικότητα του κυματοδιανύσματος και της ταχύτητας της δέσμης, που οδηγεί σε μετατόπιση φάσης. Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις έχουν μελετήσει φωνονικούς κρυστάλλους και ακουστικά μεταύλικά, που αποτελούνται από υλικά που υπερβαίνουν το όριο της γραμμικής συνέχειας της θεωρίας ελαστικότητας (regime of linear continuum elasticity theory).

Αυτές περιλαμβάνουν έντονα μη γραμμικές φωνονικές δομές όπως τα κοκκώδη μέσα (granular media), η επίδραση της απόσβεσης και της ιξωδοελαστικότητας στη δομή της ζώνης, οι φωνονικές δομές αποτελούμενες από τουλάχιστον ένα ενεργό μέσο, και οι φωνονικοί κρύσταλλοι κατασκευασμένοι από διακριτά μη αρμονικά πλέγματα.

Οι φωνονικές δομές που αποτελούνται από έντονα μη γραμμικά μέσα μπορούν να παρουσιάσουν φαινόμενα χωρίς γραμμικό ανάλογο και μπορούν να εμφανίσουν μοναδικές συμπεριφορές που σχετίζονται με τα μοναχικά κύματα (solitary waves), την διχοτόμηση (bifurcation) και την δυνατότητα συντονισμού (tunability). Η δυνατότητα συντονισμού της δομής της ζώνης μπορεί επίσης να επιτευχθεί με στοιχειώδη μέσα με μικτές ιδιότητες, όπως ακουστοοπτικές ή ακουστομαγνητικές ιδιότητες. Η διάχυση συχνά θεωρείται ότι έχει αρνητική επίδραση στην διάδοση κυμάτων, που μπορεί να μετατραπεί σε μέσο ελέγχου της δομής της ζώνης.

Τέλος, η μελέτη των φωνονικών κρυστάλλων και των ακουστικών μεταύλικών έχει επίσης βασιστεί εκτενώς σε ένα συνδυασμό πειραμάτων και θεωρίας, που έχουν δείξει εξαιρετική συμπληρωματικότητα.

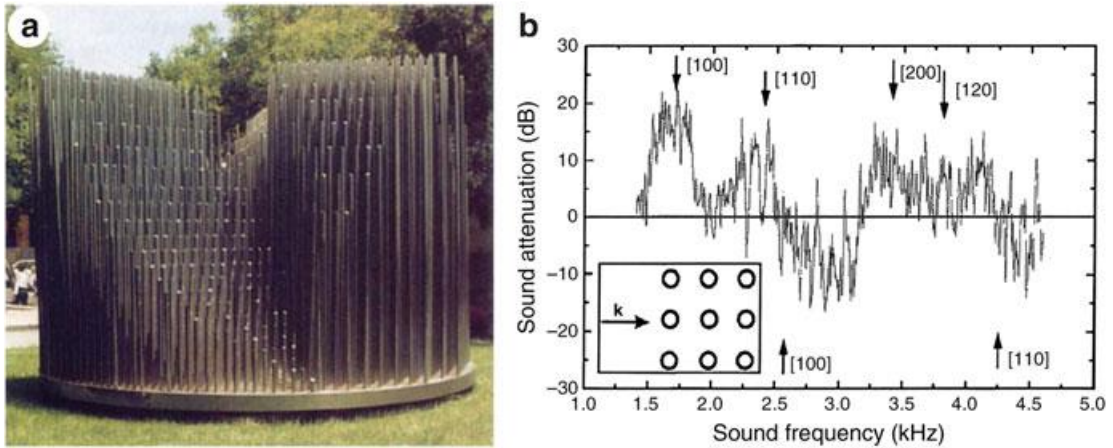
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

Ιδιότητες των φωνονικών κρυστάλλων και των ακουστικών μεταύλικών.

1.1.Φασματικές ιδιότητες.

Η ανάπτυξη των φωνονικών κρυστάλλων για τον έλεγχο των δονητικών κυμάτων ακολούθησε για μερικά χρόνια την ανάλογη ανάπτυξη των φωτονικών κρυστάλλων (1987) για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα [1]. Και οι δύο έννοιες βασίζονται στην ιδέα ότι μια δομή που αποτελείται από μια περιοδική διάταξη σκεδαστών μπορεί να επηρεάσει αρκετά έντονα την διάδοση των κλασσικών κυμάτων, όπως ακουστικά / ελαστικά ή ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ονόματα φωνονικοί και φωτονικοί κρύσταλλοι βασίζονται στις στοιχειώδεις διεγέρσεις που σχετίζονται με την περιγραφή των σωματιδίων των δονητικών κυμάτων (φωνόνια) και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φωτόνια), αντίστοιχα. Η πρώτη παρατήρηση μιας περιοδικής δομής, ενός υπερπλέγματος GaAs/AlGaAs, που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της διάδοσης υψηλής συχνότητας φωνονίων (phonons) αναφέρθηκε από τους Narayanamurti κ.α. το 1979 [2].

Παρόλο που τότε δεν ονομαζόταν φωνονικός κρύσταλλος, ένα υπερπλέγμα σήμερα θεωρείται ότι είναι ένας μονοδιάστατος φωνονικός κρύσταλλος. Η πραγματική γέννηση των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων φωνονικών κρυστάλλων μπορεί να αναχθεί στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Ο Σιγάλας και ο Οικονόμου κατέδειξαν την ύπαρξη ζωνών διακένου στην πυκνότητα καταστάσεων των φωνονίων (phonon density of state) και της δομής ζώνης (band structure) των ακουστικών και ελαστικών κυμάτων σε τρισδιάστατες δομές, αποτελούμενες από πανομοιότυπες σφαίρες διατεταγμένες περιοδικά μέσα σε ένα μέσο υποδοχής [3] και σε δισδιάστατα ρευστά και στερεά συστήματα αποτελούμενα από περιοδικές συστοιχίες κυλινδρικών εγκλεισμάτων (periodic arrays of cylindrical inclusions), σε μια μήτρα υποδοχής [4]. Στη συνέχεια αναφέρθηκε ο πρώτος υπολογισμός της δομής πλήρους ζώνης για εγκάρσια πόλωση της δόνησης (transverse polarization of vibration), σε ένα δισδιάστατο περιοδικό ελαστικό μείγμα [5]. Το 1995 ο Francisco Meseguer και οι συνεργάτες του προσδιόρισαν πειραματικά τις ιδιότητες του ακουστικού φιλτραρίσματος ενός εντελώς πραγματικού αλλά τυχαίου φωνονικού κρυστάλλου, ενός μινιμαλιστικού γλυπτού από τον Eusebio Sempere που στέκεται σε ένα πάρκο στη Μαδρίτη της Ισπανίας [6] (εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1:(a) Γλυπτό του Eusebio Sempere στη Μαδρίτη, Ισπανία, (b) Η μετρούμενη εξασθένιση του ήχου ως συνάρτηση της συχνότητας. Το ένθετο απεικονίζει την κατεύθυνση της διάδοσης των ηχητικών κυμάτων. Οι αγκύλες $[hkl]$ αντιπροσωπεύουν, στο λεξιλόγιο της περίθλασης ακτίνων X, κρυσταλλογραφικά επίπεδα για τα οποία υπάρχουν παρεμβολές Bragg.

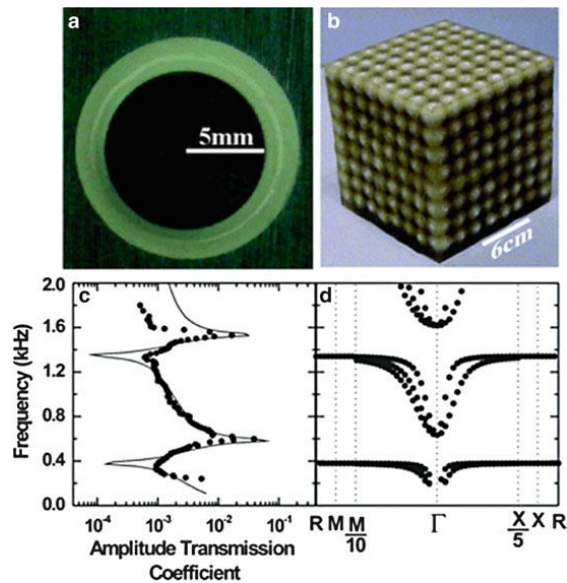
Αυτό το γλυπτό είναι μια δισδιάστατη περιοδική τετραγωνική διάταξη από χαλύβδινους σωλήνες στον αέρα. Έδειξαν ότι η εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων εμφανίζεται σε συγκεκριμένες συχνότητες που οφείλονται όχι στην απορρόφηση, δεδομένου ότι ο χάλυβας είναι ένα πολύ σκληρό υλικό, αλλά στις πολλαπλές παρεμβολές των ηχητικών κυμάτων, καθώς οι χαλύβδινοι σωλήνες συμπεριφέρονται ως πολύ αποδοτικοί σκεδαστές για τα ηχητικά κύματα. Η περιοδική διάταξη των σωλήνων οδηγεί σε ενίσχυση ή καταστολή των παρεμβολών ανάλογα με τη συχνότητα των κυμάτων. Οι καταστροφικές παρεμβολές (destructive interferences) εξασθενούν το πλάτος των μεταδιδόμενων κυμάτων και λέγεται ότι η φωνονική δομή εμφανίζει απαγορευμένες ζώνες ή διάκενα ζώνης σε αυτές τις συχνότητες. Οι ιδιότητες των φωνονικών κρυστάλλων προκύπτουν από τη σκέδαση των ακουστικών ή των ελαστικών κυμάτων (π.χ. τα φαινόμενα αναδίπλωσης της ζώνης (band folding effects)), με τρόπο ανάλογο με τη σκέδαση Bragg των ακτίνων X από περιοδικούς κρυστάλλους. Ο μηχανισμός για το σχηματισμό των ζωνών διέλευσης στους φωνονικούς κρυστάλλους είναι μια σκέδαση τύπου Bragg, των ακουστικών κυμάτων με μήκος κύματος συγκρίσιμο με τη διάσταση της περιόδου του κρυστάλλου, δηλ. τη σταθερά του κρυσταλλικού πλέγματος. Η πρώτη πλήρης υπερηχητική ζώνη διέλευσης (ultrasonic full band gap), που παρατηρήθηκε πειραματικά για διαμήκη κύματα, αναφέρθηκε για μια πλάκα αλουμινίου με τετράγωνη διάταξη κυλινδρικών οπών γεμισμένων με υδράργυρο [7].

Η πρώτη πειραματική και θεωρητική επίδειξη μιας πλήρους ζώνης διέλευσης σε έναν δισδιάστατο φωνονικό κρύσταλλο στερεού-στερεού (solid-solid phononic crystal) μια τριγωνική συστοιχία χαλύβδινων ράβδων σε εποξική μήτρα, παρουσιάστηκε 3 χρόνια αργότερα [8]. Το απόλυτο διάκενο ζώνης (absolute band gap), κάλυψε ολόκληρη τη ζώνη Brillouin του κρυστάλλου και δεν περιορίστηκε σε έναν

συγκεκριμένο τύπο δονούμενης πόλωσης (δηλαδή, διαμήκη ή εγκάρσια).

Το 2000, οι Liu κ.α. [9] παρουσίασαν μια κλάση ηχητικών κρυστάλλων, που εμφάνιζαν φασματικά διάκενα με σταθερές πλέγματα δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες από το αντίστοιχο ηχητικό μήκος κύματος. Ο σχηματισμός των ζωνών διέλευσης σε αυτά τα ακουστικά μεταύλικά βασίζεται στην ιδέα των τοπικά συντονιζόμενων δομών (locally resonant structures). Επειδή το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τη σταθερά πλέγματος της δομής, η περιοδικότητα δεν είναι αναγκαία για το σχηματισμό ενός διακένου. Μη ομογενή μείγματα (disordered composites) φτιαγμένα από τέτοιες τοπικές δομές συντονισμού συμπεριφέρονται ως υλικά με αρνητικές ενεργές ελαστικές σταθερές (effective negative elastic constants) και ως ολικοί ανακλαστές κυμάτων (total wave reflectors), εντός ορισμένων περιοχών συντονισμού στις ακουστικές συχνότητες.

Αυτή η ιδέα υλοποιήθηκε με έναν απλό κυβικό κρύσταλλο, που αποτελείται από ένα υλικό πυρήνα βαριού στερεού (μόλυβδος) επικαλυμμένο με ελαστικά μαλακό υλικό (ελαστομερές σιλικόνης), ενσωματωμένο σε ένα σκληρό υλικό μήτρας (ρητίνη). Δομές μεγέθους μερικών εκατοστών παρήγαγαν μικρά διάκενα εκπομπής στις χαμηλές συχνότητες, όμοια με τους συντονισμούς (resonances) του συντονιστή μολύβδου/ελαστομερούς (lead/elastomer resonator) (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: (a) Διατομή επικαλυμμένης σφαίρας μολύβδου που σχηματίζει τη βασική δομική μονάδα (b) για έναν 8x8x8 ηχητικό κρύσταλλο. (c) Υπολογισμένο (συμπαγής γραμμή) και μετρημένο (κύκλοι) πλάτος συντελεστή μετάδοσης κατά μήκος της κατεύθυνσης [100] ως συνάρτηση της συχνότητας, d) υπολογισμένη δομή ζώνης μιας απλής κυβικής δομής επικαλυμμένων σφαιρών σε άριστη συμφωνία με τις μετρήσεις (οι κατευθύνσεις προς τα αριστερά και προς τα δεξιά του σημείου Γ είναι οι κατευθύνσεις [110] και [100] της ζώνης Brillouin, αντίστοιχα

Καθόσον η πρώιμη έρευνα στους φωνονικούς κρυστάλλους και τα ακουστικά μεταύλικά επικεντρώνεται στις φασματικές ιδιότητες σε

συχνότητες των ηχητικών (10^2 - 10^3 Hz) και υπερηχητικών περιοχών (10^4 - 10^6 Hz), φωνονικοί κρύσταλλοι με υπερηχητικές (GHz) ιδιότητες έχουν κατασκευαστεί με λιθογραφικές τεχνικές και αναλυθεί με χρήση της σκέδασης του φωτός Brillouin (Brillouin Light Scattering)[10]. Έχει αποδειχθεί θεωρητικά και πειραματικά ότι οι φωνονικοί κρύσταλλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την θερμική αγωγιμότητα, επηρεάζοντας άμεσα την διάδοση των θερμικών φωνονίων (THz) [11, 12].

Επίσης έχουν μελετηθεί φαινόμενα κυματικού εντοπισμού (wave localization) σε ατελείς φωνονικούς κρυστάλλους (defected phononic crystals) που περιέχουν γραμμικές ή/και σημειακές ατέλειες [13]. Ο Kafesaki κ.α. [14] υπολόγισαν τη μετάδοση των ελαστικών κυμάτων μέσω ενός ευθύγραμμου κυματοδηγού, που δημιουργήθηκε σε έναν δισδιάστατο φωνονικό κρύσταλλο αφαιρώντας μια σειρά κυλίνδρων. Η ευθυγράμμιση των κυμάτων οφείλεται στην ύπαρξη επεκτεταμένων γραμμικών ρυθμών ατελειών (extended linear defect modes) που βρίσκονται στη ζώνη διέλευσης του φωνονικού κρυστάλλου. Επίσης έχει μελετηθεί η διάδοση των ακουστικών κυμάτων μέσω ενός γραμμικού κυματοδηγού, ο οποίος δημιουργήθηκε μέσα σε ένα δισδιάστατο φωνονικό κρύσταλλο, όπου ένας διακλαδισμένος ταλαντωτής (stub resonator), σημείο ασυνέχειας (point defect), ήταν συνδεδεμένος στο ένα του άκρο [15].

Η πρωταρχική επίδραση του συντονισμού είναι να προκαλέσει μηδενισμό της μετάδοσης στο φάσμα μετάδοσης του τέλειου κυματοδηγού. Η μεταδοτικότητα (transmittivity) παρουσιάζει πολύ στενές βυθίσεις, των οποίων οι συχνότητες εξαρτώνται από το πλάτος και το μήκος του διακλαδωτή. Όταν υπάρχει ένα κενό στην μεταδοτικότητα ενός τέλειου κυματοδηγού, ο διακλαδωτής μπορεί να επιτρέψει την επιλεκτική μετάδοση συχνότητας σε αυτό το κενό.

Εκτός από τα ελαστικά κύματα όγκου (bulk elastic waves), διάφοροι συγγραφείς έχουν μελετήσει θεωρητικά την ύπαρξη επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (surface acoustic waves SAW) που εντοπίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια ενός ημιαπέραντου δισδιάστατου φωνονικού κρυστάλλου [16-19]. Για αυτή τη γεωμετρία, τα παράλληλα εγκλείσματα (parallel inclusions) είναι κυλινδρικού σχήματος και η θεωρούμενη επιφάνεια είναι κάθετη στον άξονά τους.

Ακόμη εξετάστηκαν διάφορες συστοιχίες εγκλεισμάτων [16,17], οι κρυσταλλογραφικές συμμετρίες των συστατικών υλικών [9], καθώς και η πιεζοηλεκτρική ισχύς ενός από τα συστατικά τους [19]. Υπολογίστηκαν επίσης οι δομές ζώνης των δισδιάστατων φωνονικών κρυσταλλικών πλακών με δύο ελεύθερες επιφάνειες [20, 21]. Αυτό περιλαμβάνει τον συμμετρικό ρυθμό δομής ζώνης Lamb των δισδιάστατων φωνονικών κρυστάλλων, αποτελούμενων από τριγωνικές συστοιχίες W κυλίνδρων (W cylinders) σε φόντο πυριτίου (Si). Ο Charles κ.α.[21] αναφέρθηκαν στη δομή ζώνης μιας δισδιάστατης πλάκας κατασκευασμένης από μια τετραγωνική διάταξη σιδερένιων κυλίνδρων, ενσωματωμένων σε μια μήτρα χαλκού. Ο Hsu

και ο Wu [22] προσδιόρισαν τις καμπύλες ελάχιστης διασποράς (lower dispersion curves) στη δομή ζώνης των δισδιάστατων φωνονικών κρυσταλλικών πλακών χρυσού με εποξύ (gold-epoxy).

Επιπλέον, οι Manzanares-Martinez και Ramos-Mendieta έχουν εξετάσει τη διάδοση επιφανειακών ελαστικών κυμάτων κατά μήκος μιας επιφάνειας παράλληλης στους κυλίνδρους, σε ένα δισδιάστατο φωνονικό κρύσταλλο [23]. Η Σαϊνίδου και ο Στεφάνου διερεύνησαν τα οδηγούμενα ελαστικά κύματα (guided elastic waves) σε μια γυάλινη πλάκα επικαλυμμένη στη μία πλευρά με ένα περιοδικό μονόστρωμα από πολυμερείς σφαίρες εμβαπτισμένες σε νερό [24]. Από πειραματική άποψη, ο Wu κ.α. [25] μελέτησαν τα ακουστικά επιφανειακά κύματα (surface acoustic waves SAW) υψηλής συχνότητας με ένα ζεύγος ενδοψηφιακών μετατροπέων (interdigital transducers) τοποθετημένων και στις δύο πλευρές μιας πολύ πυκνής πλάκας πυριτίου, στην οποία είχε ανοικτεί μια σειρά οπών σχήματος τετραγώνου. Παρόμοια πειράματα διεξήχθησαν από τον Benchabane κ.α. σε ένα δισδιάστατο τετραγωνικό πλέγμα πιεζοηλεκτρικού φωνονικού κρυστάλλου, χαραγμένο σε ένωση λιθίου - νιοβίου (lithium niobate) [26]. Ο Zhang κ.α. [27] έδειξαν την ύπαρξη διακένων για ακουστικά κύματα εκπεμπόμενα στην επιφάνεια μιας δισδιάστατης φωνονικής κρυσταλλικής πλάκας αέρα-αλουμινίου, μέσω μετρήσεων με υπερήχους λέιζερ (laser ultrasonic measurements).

1.2.Κυματικές Ιδιότητες.

Οι ιδιότητες του κυματοδιανύσματος (k -χώρος) των φωνονικών κρυστάλλων και των ακουστικών μεταύλικών προκύπτουν περνώντας από τις ζώνες διέλευσης με μοναδικά διαθλαστικά χαρακτηριστικά, όπως η αρνητική διάθλαση ή η διάθλαση μηδενικής γωνίας. Η αρνητική διάθλαση των ακουστικών κυμάτων είναι ανάλογη με την αρνητική διάθλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που παρατηρήθηκε επίσης σε ηλεκτρομαγνητικά και οπτικά μεταύλικά [28]. Η αρνητική διάθλαση επιτυγχάνεται όταν η κυματική ταχύτητα ομάδας (wave group velocity) (δηλ. η διεύθυνση διάδοσης της ενέργειας) είναι αντιπαράλληλη με το κυματοδιάνυσμα (wave vector). Στα ηλεκτρομαγνητικά μεταύλικά η ασυνήθιστη διάθλαση σχετίζεται με υλικά που έχουν αρνητικές τιμές επιτρεπτότητας και διαπερατότητας, τα αποκαλούμενα διπλά αρνητικά υλικά (double negative materials) [29].

Αρνητική διάθλαση ακουστικών κυμάτων μπορεί να επιτευχθεί με διπλά αρνητικά ακουστικά μεταύλικά, στα οποία τόσο η ενεργός πυκνότητα μάζας (effective mass density) όσο και ο συντελεστής όγκου (bulk modulus) είναι αρνητικά [30]. Η διπλή αρνητικότητα της ενεργού δυναμικής μάζας (effective dynamical mass) και του συντελεστή όγκου προκύπτει από την συνύπαρξη, σε συγκεκριμένο εύρος συχνότητας, ενός μονοπολικού και ενός διπολικού συντονισμού

[31]. Ο μονοπολικός συντονισμός μπορεί να οφείλεται σε ένα ρυθμό λειτουργίας <<αναπνοής>> (breathing mode) των εγκλεισμάτων που συντονίζονται εκτός φάσης με ένα προσπίπτον ακουστικό κύμα, που οδηγεί σε ένα αρνητικό ενεργό συντελεστή όγκου (effective negative bulk modulus). Ο διπολικός συντονισμός των βαρέων εγκλεισμάτων, επικαλυμμένων με ένα μαλακό υλικό ενσωματωμένο σε μια άκαμπτη μήτρα, μπορεί να οδηγήσει σε μετατόπιση του κέντρου μάζας του μεταύλικού, το οποίο είναι εκτός φάσης με το ακουστικό κύμα, οδηγώντας σε μια αρνητική δυναμική πυκνότητα μάζας. Αρνητική διάθλαση μπορεί, επίσης, να επιτευχθεί μέσω του φαινομένου της αναδίπλωσης ζώνης λόγω της σκέδασης Bragg, χρησιμοποιώντας φωνονικούς κρυστάλλους.

Η αναδίπλωση ζωνών μπορεί να παράγει ζώνες με αρνητικές κλίσεις (πχ. αρνητική ταχύτητα ομάδας και θετική φασική ταχύτητα), μια προϋπόθεση για αρνητική διάθλαση. Μια συνδυασμένη θεωρητική και πειραματική μελέτη ενός τρισδιάστατου φωνονικού κρυστάλλου αποτελούμενου από χάντρες καρβιδίου του βολφραμίου σε νερό, έχει δείξει την ύπαρξη μιας έντονα ανισότροπης ζώνης με αρνητική διάθλαση [32]. Χρησιμοποιήθηκε μια πλάκα από αυτόν τον κρύσταλλο για να δημιουργήσει έναν επίπεδο φακό [33] και να εστιάσει μια αποκλίνουσα ηχητική δέσμη, χωρίς όμως την ανάγκη κοίλων ή κυρτών επιφανειών, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συμβατικούς φακούς.

Ένας δισδιάστατος φωνονικός κρύσταλλος, αποτελούμενος από ένα τριγωνικό πλέγμα από χαλύβδινες ράβδους βυθισμένες σε υγρό, παρουσίασε αρνητική διάθλαση και χρησιμοποιήθηκε για την εστίαση υπερήχων [34,35]. Η απεικόνιση υψηλής πιστότητας επιτυγχάνεται όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες όλων των γωνιών αρνητικής διάθλασης, όπου αυτή αντιστοιχίζεται με το περίγραμμα ισοσυχνότητας (equifrequency contour) του φωνονικού κρυστάλλου το οποίο είναι κυκλικό και είναι ίδιο με εκείνο του μέσου στο οποίο είναι ενσωματωμένο.

Ένας επίπεδος φακός αυτού του είδους κρυστάλλου επιτυγχάνει την εστίαση και την απεικόνιση σε μήκη κύματος μικρότερα από αυτά των ακουστικών κυμάτων (subwavelength imaging) [36]. Αυτός ο φακός ξεπερνά το όριο περίθλασης (diffraction limit) των συμβατικών φακών, λόγω της μετάδοσης των αποσβεννόμενων συνιστωσών (evanescent components) μιας σημειακής πηγής ήχου, μέσω ενός δονητικού τρόπου διέγερσης που συνδέεται με τη φωνονική πλάκα του κρυστάλλου (phononic crystal slab). Αντίθετα, ένας συμβατικός φακός μεταδίδει μόνο τις μη αποσβεννόμενες συνιστώσες της πηγής. Έχει επίσης αναφερθεί η αρνητική διάθλαση των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων [37] και των κυμάτων Lamb [38].

Μια ευρύτερη περιοχή ασυνήθιστων διαθλαστικών ιδιοτήτων αναφέρθηκε επίσης σε μελέτη ενός φωνονικού κρυστάλλου, που αποτελείται από μια τετραγωνική σειρά κυλινδρικών εγκλεισμάτων πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) στον αέρα [39]. Αυτός ο κρύσταλλος παρουσιάζει θετική, αρνητική ή μηδενική διάθλαση, ανάλογα με τη

γωνία της προσπίπτουσας ηχητικής δέσμης. Η μηδενική διάθλαση μπορεί να οδηγήσει στην κυματοδηγήση ή στον κυματοεντοπισμό χωρίς ελαττώματα (wave guiding/localization without defects). Η διάθλαση σε αυτόν τον κρύσταλλο είναι εξαιρετικά ανισοτροπική, λόγω του σχεδόν τετραγωνικού σχήματος της τέταρτης δονητικής ζώνης. Και για τις τρεις περιπτώσεις διάθλασης η εκπεμπόμενη δέσμη υφίσταται διαχωρισμό κατά την έξοδο της από τον κρύσταλλο, επειδή το περίγραμμα ισοσυχνότητας (equifrequency contour) στο προσπίπτον μέσον (δηλ. τον αέρα), στο οποίο είναι τοποθετημένη μια πλάκα φωνονικού κρυστάλλου, είναι μεγαλύτερο από τη ζώνη Brillouin του κρυστάλλου. Σε αυτή την περίπτωση διεγείρονται ρυθμοί Bloch στην διευρυμένη ζώνη Brillouin εντός του κρυστάλλου και παράγουν πολλαπλές ακτίνες κατά την έξοδο.

1.3.Φασικές ιδιότητες.

Μόνο πρόσφατα σημειώθηκε πρόοδος στην επέκταση των ιδιοτήτων των φωνονικών κρυστάλλων πέρα από το χώρο $\omega - k$ και στο χώρο της φάσης των ακουστικών κυμάτων (φ-χώρος). Η έννοια του ελέγχου της φάσης μεταξύ των εκπεμπόμενων κυμάτων σε έναν φωνονικό κρύσταλλο μπορεί να γίνει αντιληπτή μέσω της ανάλυσης της δομής της ζώνης και των περιγραμμάτων ισοσυχνότητας (equifrequency contour) [40]. Ο κυρίαρχος μηχανισμός πίσω από τον έλεγχο της φάσης μεταξύ της διάδοσης των ακουστικών κυμάτων σε δισδιάστατους φωνονικούς κρυστάλλους, προκύπτει από τη μη συγγραμμικότητα του κυματοδιανύσματος με την ταχύτητα ομάδας (group velocity).

1.4.Πέρα από τις μακροσκοπικές, γραμμικές ελαστικές, παθητικές δομές και παθητικά μέσα.

Μέχρι πρόσφατα έχουν δημιουργηθεί φωνονικοί κρύσταλλοι και ακουστικά μεταύλικά από παθητικά μέσα, που ικανοποιούν τη συνεχή γραμμική ελαστικότητα (continuum linear elasticity). Ένα πλουσιότερο σύνολο ιδιοτήτων προκύπτει με τη χρήση μέσων με απώλειες (dissipative media) ή μέσων που υπακούουν στη μη γραμμική ελαστικότητα (nonlinear elasticity). Τα μέσα που έχουν απώλειες (lossy media) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τροποποιήσουν τις ιδιότητες διασποράς των φωνονικών κρυστάλλων. Οι ακουστικές δομές που δημιουργούνται από μη γραμμικά μέσα μπορούν να υποστηρίξουν κύματα χωρίς διασπορά (nondispersive waves). Σύνθετες δομές αποτελούμενες από ενεργά μέσα (active media), που αποκρίνονται σε εσωτερικά ή εξωτερικά ερεθίσματα, επιτρέπουν τη δυνατότητα προσαρμογής των ιδιοτήτων της ζώνης διακένου (band gap).

1.5.Μέσα με απώλειες.

Ο Ψαρόβας μελέτησε τη συμπεριφορά μιας σύνθετης δομής αποτελούμενης από σφαίρες ιξωδοελαστικού καουτσούκ (viscoelastic rubber spheres), τοποθετημένες η μια κοντά στην άλλη στον αέρα [41]. Ανέφερε την ύπαρξη ενός υπολογίσιμου πανκατευθυντικού διακένου (omnidirectional gap) στο φάσμα μετάδοσης, παρά τις απώλειες. Ακόμη έχει αναφερθεί η ύπαρξη διακένων ζώνης σε φωνονικούς κρυστάλλους αποτελούμενους από ιξωδοελαστικό πυριτιούχο καουτσούκ και αέρα [42]. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η ιξωδοελαστικότητα όχι μόνο εξασθενεί τα ηχητικά κύματα που διαπερνούν έναν φωνονικό κρύσταλλο με βάση το καουτσούκ, αλλά επίσης τροποποιεί τη συχνότητα των διερχομένων ζωνών στο φάσμα μετάδοσης [43]. Μια θεωρία αποσβεννύμενων κυμάτων Bloch (damped Bloch waves) [44] εισήχθη για να δείξει ότι η απόσβεση αλλοιώνει το σχήμα των καμπυλών διασποράς και μειώνει το μέγεθος των διακένων ζώνης και επίσης ανοίγει διανυσματικά κυματικά διάκενα διαμέσου της διακλάδωσης αποκοπής (branch cutoff)[45]. Η απώλεια έχει επίδραση σε ολόκληρη τη σύνθετη δομή ζώνης των φωνονικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένης και της ταχύτητας ομάδας [46].

1.6.Ρυθμιζόμενες δομές (Tunable Structures).

Μέχρι σήμερα οι εφαρμογές των φωνονικών κρυστάλλων και των ακουστικών μεταύλικών έχουν περιοριστεί, επειδή τα συστατικά τους υλικά παρουσιάζουν ουσιαστικά παθητικές αποκρίσεις. Η ικανότητα ελέγχου και ρύθμισης των φωνονικών/ακουστικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών μπορεί να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς. Η ρύθμιση (tunability) μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της γεωμετρίας των εγκλεισμάτων [47] ή με τη μεταβολή των ελαστικών χαρακτηριστικών των συστατικών υλικών, μέσω της εφαρμογής εξωτερικής διέγερσης με επαφή και χωρίς επαφή [48]. Για παράδειγμα, ορισμένοι συγγραφείς πρότειναν τη χρήση ηλεκτροροεολογικών υλικών (electrorheological materials) σε συνδυασμό με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου [49]. Μερικοί συγγραφείς έχουν εξετάσει την επίδραση της θερμοκρασίας στην ελαστική διέγερση [50, 51].

Άλλοι συγγραφείς [52] έχουν ελέγξει τη δομή της ζώνης ενός φωνονικού κρυστάλλου, εφαρμόζοντας μια εξωτερική πίεση που αλλάζει τη δομή του κρυστάλλου. Η ρύθμιση (tunability) μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη χρήση ενεργών υλικών (active constitutive materials). Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση, μερικοί συγγραφείς [53, 54] μελέτησαν πώς το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να επηρεάσει τις ελαστικές ιδιότητες ενός φωνονικού κρυστάλλου και στη συνέχεια να αλλάξει τις καμπύλες διασποράς και τα διάκενα του. Διάφορες μελέτες έχουν επίσης αναφέρει αισθητές μεταβολές στις

δομές της ζώνης των μαγνητο-ηλεκτρο-ελαστικών (magneto-electro-elastic) φωνονικών κρυστάλλων, όταν λαμβάνεται υπόψη η σύζευξη μεταξύ μαγνητικών, ηλεκτρικών και ελαστικών φαινομένων [55, 56] ή όταν εφαρμόζονται εξωτερικά μαγνητικά πεδία [57].

1.7.Επεκτασιμότητα (Scalability).

Η επέκταση των φωνονικών δομών στις νανομετρικές διαστάσεις απαιτεί ατομική επεξεργασία των δομικών υλικών. Παρατηρείται ότι, σε επίπεδο νανοκλίμακας, η διάδοση των φωνονίων μπορεί να μην είναι εντελώς βαλλιστική (ballistic), ομοιάζουσα με κύμα, και να μην εμφανίζονται γραμμικά φαινόμενα όπως η σκέδαση φωνονίου - φωνονίου (κανονικές και Umklapp διεργασίες). Αυτά τα μη γραμμικά φαινόμενα βρίσκονται στον πυρήνα του πεπερασμένου της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών. Ο Gillet κ.α. διερεύνησαν τη θερμομονωτική συμπεριφορά των τρισδιάστατων φωνονικών κρυστάλλων νανοκλίμακας [11]. Ο φωνονικός κρύσταλλος αποτελείται από μια μήτρα σχήματος διαμαντιού με άκρα σχήματος κύβου από πυρίτιο, με μια περιοδική διάταξη νανοσωματιδίων Γερμανίου (που λαμβάνεται με αντικατάσταση των ατόμων του Si από τα άτομα Ge μέσα στο κρυσταλλικό κύτταρο μονάδα). Αυτοί οι συγγραφείς υπολόγισαν τη δομή της ζώνης του φωνονικού κρυστάλλου νανοκλίμακας, με την κλασική δυναμική πλέγματος. Έδειξαν μια επιπεδοποίηση των καμπυλών διασποράς, οδηγώντας σε σημαντική μείωση των ταχυτήτων της δέσμης των φωνονίων. Αυτή η μείωση οδηγεί σε μείωση της θερμικής αγωγιμότητας. Εκτός από τα γραμμικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη σκέδαση Bragg των φωνονίων από την περιοδική συστοιχία εγκλεισμάτων, λαμβάνεται και μια μείωση της θερμικής αγωγιμότητας από την πολλαπλή ανελαστική σκέδαση των φωνονίων, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση μεταφοράς του Boltzmann.

Η θερμική αγωγιμότητα των νανοϋλικών μπορεί να μειωθεί κατά πολλές τάξεις μεγέθους, σε σύγκριση με το χύμα πυρίτιο (bulk Si). Χρησιμοποιήθηκαν ατομικές υπολογιστικές μέθοδοι όπως η μοριακή δυναμική και η μέθοδος Green-Kubo, για να ρίξουν φως στη συμπεριφορά της μεταφοράς των θερμικών φωνονίων σε μοντέλα νανοφωνονικών κρυστάλλων βασισμένα στο γραφένιο, αποτελούμενα από περιοδικές συστοιχίες οπών [58]. Υπολογίστηκαν η διάρκεια ζωής των φωνονίων και η θερμική αγωγιμότητα ως συνάρτηση του κλάσματος πλήρωσης του κρυστάλλου και της θερμοκρασίας. Αυτοί οι υπολογισμοί υπέθεσαν έναν ανταγωνισμό μεταξύ της ελαστικής σκέδασης Bragg και της ανελαστικής σκέδασης φωνονίου - φωνονίου και ένα φαινόμενο ελαστικής σκέδασης μέσω της τροποποίησης της δομής της ζώνης στη διάρκεια ζωής του φωνονίου (π.χ. ανελαστική σκέδαση).

1.8. Φωξονικές δομές (Phoxonic Structures).

Μια πρόσφατη προσπάθεια στόχευε στο σχεδιασμό περιοδικών δομών που μπορούν να ελέγξουν ταυτόχρονα τη διάδοση των φωνονίων και των φωτονίων. Τέτοια περιοδικά υλικά διαθέτουν χαρακτηριστικά δομής ζώνης, όπως η ταυτόχρονη ύπαρξη φωτονικών και φωνονικών διακένων ζώνης. Για το λόγο αυτό, τα υλικά αυτά ονομάζονται "φωξονικά" υλικά ("phoxonic" materials). Ο Maldovan και ο Thomas έδειξαν θεωρητικά ότι υπάρχουν ταυτόχρονα δισδιάστατα φωνονικά και φωτονικά κενά ζώνης, για την επίπεδη διάδοση σε περιοδικές δομές αποτελούμενες από τετραγωνικές και τριγωνικές συστοιχίες κυλινδρικών οπών στο πυρίτιο [59]. Έχουν επίσης δείξει τον εντοπισμό των φωτονικών και φωνονικών κυμάτων στις ατελείς φωξονικές δομές. Τα ταυτόχρονα διάκενα της φωτονικής και της φωνονικής ζώνης έχουν επίσης αποδειχθεί υπολογιστικά σε δισδιάστατες φωξονικές κρυσταλλικές δομές, αποτελούμενες από συστοιχίες οπών αέρα σε νιοβικό λίθιο [60]. Επίπεδες δομές, όπως ο φωξονικός κρύσταλλος που αποτελείται από συστοιχίες κενών κυλινδρικών οπών σε πλάκες πυριτίου με πεπερασμένο πάχος, έχουν δείξει ότι κατέχουν ταυτόχρονα κενά φωτονικής και φωνονικής ζώνης [61]. Άλλα παραδείγματα φωξονικών κρυστάλλων περιλαμβάνουν τρισδιάστατα πλέγματα μεταλλικών νανοσφαιρών, που είναι ενσωματωμένα σε ένα διηλεκτρικό πλέγμα [62]. Οι φωξονικοί κρύσταλλοι με φασματικά κενά, τόσο για οπτικά όσο και για ακουστικά κύματα, είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για εφαρμογές που περιλαμβάνουν ακουστο-οπτικές αλληλεπιδράσεις για τον έλεγχο φωτονίων με φωνόνια. Ο περιορισμός των φωτονίων και των φωνονίων σε ένα μονοδιάστατο μοντέλο μιας φωξονικής κοιλότητας, που ενσωματώνει μη γραμμικά ακουστοοπτικά φαινόμενα, έδειξε ότι οδηγεί σε ενισχυμένη διαμόρφωση του φωτός με ακουστικά κύματα, μέσω των πολυφωνονικών μηχανισμών ανταλλαγής (multiphonon exchange mechanisms) [63].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

Δομή και διάφοροι τύποι φωνονικών κρυστάλλων.

2.1.Μονοδιάστατοι φωνονικοί κρύσταλλοι.

Οι μονοδιάστατοι (1D) φωνονικοί κρύσταλλοι, που ονομάζονται υπερπλέγματα (superlattices SLs), έχουν μεγάλη σημασία στην επιστήμη των υλικών. Αυτές οι δομές, γενικά, αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στρώματα που επαναλαμβάνονται περιοδικά κατά μήκος της κατεύθυνσης της ανάπτυξης (direction of growth). Τα στρώματα που συνιστούν κάθε κύτταρο του υπερπλέγματος (SL) μπορούν να κατασκευαστούν από ένα συνδυασμό στερεών-στερεών, ή στερεών-ρευστών μέσων. Αυτά τα υλικά κατατάσσονται τώρα στην κατηγορία των λεγόμενων φωνονικών κρυστάλλων [3,5,64], που αποτελούνται από εγκλείσματα (σφαίρες, κυλίνδρους, κ.λπ.) διατεταγμένα σε μια μήτρα ξενιστή κατά μήκος των δύο διαστάσεων (2D) και των τριών διαστάσεων (3D) στο χώρο. Μετά την πρόταση για τα υπερπλέγματα (superlattices SLs) από τον Esaki [65], η μελέτη των στοιχειωδών διεγέρσεων (elementary excitations) σε πολυστρωματικά συστήματα ήταν πολύ ενεργή. Μεταξύ αυτών των διεγέρσεων αυξήθηκε το ενδιαφέρον για τα ακουστικά φωνόνια (acoustic phonons), μετά την πρώτη παρατήρηση από τους Colvard κ.α. [66] μιας διπλέτας (doublet), που σχετίζεται με διαμήκη αναδιπλούμενα ακουστικά φωνόνια (folded longitudinal acoustic phonons) μέσω της σκέδασης Raman. Η βασική ιδιότητα αυτών των δομών είναι η ύπαρξη απαγορευμένων ζωνών συχνοτήτων (forbidden frequency bands), που προκαλούνται από τη διαφορά στις ακουστικές ιδιότητες των συστατικών και της περιοδικότητας αυτών των συστημάτων, που οδηγούν σε ασυνήθιστα φυσικά φαινόμενα σε αυτές τις ετεροδομές, σε σύγκριση με τα χύμα υλικά (bulk materials) [67–69].

Όσον αφορά τα ακουστικά κύματα σε υπερπλέγματα (superlattices SLs) στερεού-στερεού, πολλές θεωρητικές και πειραματικές εργασίες έχουν αφιερωθεί στη μελέτη των δομών διακένου ζώνης (band gap structures) των περιοδικών υπερπλεγμάτων (periodic SLs) [66-70], αποτελούμενων από κρυσταλλικούς, άμορφους ημιαγωγούς ή μεταλλικές πολυστρωματικές δομές σε νανομετρική κλίμακα. Τα θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι ουσιαστικά η μήτρα μεταφοράς [68, 71-73] και η μέθοδος επίλυσης με την συνάρτηση Green [67,74-76], ενώ οι πειραματικές τεχνικές περιλαμβάνουν τη σκέδαση Raman (Raman scattering) [66, 77, 78], τους υπερήχους (ultrasonics) [79-89] και τη χρονική ανάλυση της περίθλασης ακτίνων X (time-resolved X-ray diffraction) [90].

Εκτός από την ύπαρξη των δομών διακένου ζώνης (band-gap structures) σε τέλεια περιοδικά υπερπλέγματα, παρουσιάστηκε

θεωρητικά και πειραματικά ότι το ιδανικό υπερπλέγμα πρέπει να τροποποιηθεί για να ληφθούν υπόψη τα μέσα που περιβάλλουν τη δομή ως ελεύθερη επιφάνεια [74, 75, 91-100], μια διασύνδεση υπερπλέγματος - υποστρώματος [74, 75, 94, 101, 102], ένα στρώμα κοιλοτήτων [103-111] κ.λπ., τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά σε πειράματα μαζί με υπερπλέγματα.

Εκτός από τους ελαττωματικούς ρυθμούς (defect modes) που μπορούν να εισαχθούν από τέτοιες ανομοιογένειες μέσα στα διάκενα ζώνης (band gaps), μερικές άλλες εργασίες έχουν δείξει την ύπαρξη μικρών κορυφών σε διαμήκη αναδιπλούμενα ακουστικά φωνόνια (folded longitudinal acoustic phonons) και ερμηνεύονται ως περιορισμένα φωνόνια (confined phonons) ολόκληρου του πεπερασμένου υπερπλέγματος [112-114].

Όλα τα παραπάνω φαινόμενα έχουν αξιοποιηθεί για να προτείνουν μονοδιάστατα μέσα στρώσεων στερεού - στερεού (solid-solid-layered media) για πολλές ενδιαφέρουσες εφαρμογές, όπως στους αντίστοιχους δισδιάστατους και τρισδιάστατους φωνονικούς κρυστάλλους. Μεταξύ αυτών των εφαρμογών, μπορεί κανείς να αναφέρει:

(1) τα πανκατευθυντικά διάκενα ζώνης (omnidirectional band gaps) [115-118], (2) τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε ηχητικούς κρυστάλλους μικρού μεγέθους με τοπικώς συντονιζόμενα διάκενα ζώνης (locally resonant band gaps), στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων [119], (3) υπερηχητικούς κρυστάλλους (hypersonic crystals) [120-123] με διάκενα ζώνης υψηλής συχνότητας για την ενίσχυση της ακουστοπτικής [119-121] ή οπτομηχανικής [134, 135] αλληλεπίδρασης και για την κατανόηση της διεγερμένης εκπομπής των ακουστικών φωνονίων (stimulated emission of acoustic phonons) [136], και (4) για την πιθανότητα να ενισχυθεί η επιλεκτική εκπομπή (selective transmission), μέσω διαφόρων οδηγούμενων ρυθμών (guided modes), ενός στρώματος κοιλότητας που εισάγεται στην περιοδική δομή [67, 137].

Το πλεονέκτημα των μονοδιάστατων συστημάτων έγκειται στο γεγονός ότι ο σχεδιασμός τους είναι πιο εφικτός και απαιτούν μόνο σχετικά απλούς αναλυτικούς και αριθμητικούς υπολογισμούς. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε βαθιά διαφορετικές φυσικές ιδιότητες που σχετίζονται με τα κενά των ζωνών σε τέτοια συστήματα.

Σε σύγκριση με τα μέσα στρωμάτων στερεού-στερεού (solid-solid-layered media), η διάδοση των ακουστικών κυμάτων σε αντίστοιχες δομές στερεού-ρευστού έχει λάβει λιγότερη προσοχή [131]. Οι πρώτες εργασίες σε αυτά τα συστήματα έχουν περατωθεί από τον Rytov [132] και συνοψίζονται από τον Brekhovskikh [131]. Η προσέγγιση του Rytov χρησιμοποιήθηκε από τον Schoenberg [133] μαζί με την διατύπωση της για την κατανόηση της μήτρας διάδοσης (propagator matrix formalism), διαμέσου τέτοιων (solid-solid-layered media) περιοδικών μέσων σε οποιαδήποτε διεύθυνση διάδοσης και σε τυχαία

συχνότητα. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται επίσης από τον Rousseau [134]. Στα όρια χαμηλών συχνοτήτων αποδείχθηκε [133] ότι εκτός από την ύπαρξη μικρών διακένων, υπάρχει ένα μονοδιάστατο κύμα ταχύτητας για την κάθετη διεύθυνση διάδοσης προς την διαστρωμάτωση και ένα δισδιάστατο κύμα ταχύτητας παράλληλο στη διαστρωμάτωση, τα οποία κύματα δεν έχουν ανάλογο σε υπερπλέγματα στερεού - στερεού (solid-solid SLs). Οι δύο τελευταίες ταχύτητες αντιστοιχούν σε διαμήκη κύματα και η ύπαρξή τους υποδηλώνεται από τη θεωρία του Biot [135] για την διάδοση κυμάτων σε πορώδη μέσα.

Εναλλακτικά, στρώματα στερεού και ιξώδους υγρού έχουν προταθεί πρόσφατα [136-138] ως εξιδανικευμένο πορώδες μέσο για την εκτίμηση της διασποράς και της εξασθένησης των ακουστικών κυμάτων σε πορώδη στερεά κορεσμένα με υγρά. Οι πειραματικές ενδείξεις [139] αυτών των κυμάτων συμπεραίνονται με τη χρήση υπερηχητικών τεχνικών σε υπερπλέγματα αργιλίου-νερού (Al-water) και νερού - πλεξιγκλάς (Plexiglas-water). Επιπρόσθετα, αποδείχθηκε θεωρητικά και πειραματικά ότι στρωματικές δομές πεπερασμένου μεγέθους αποτελούμενες από στρώσεις στερεού - υγρού με ελάχιστα κύτταρα και με μια [140, 141], ή πολλαπλές [142] περιοδικότητες μπορεί να εμφανίζουν μεγάλα διάκενα, αλλά και η εμφάνιση στρωματικών ατελειών (defect layers) σε αυτές τις δομές μπορεί να οδηγήσει σε καλώς ορισμένους ατελείς ρυθμούς (well-defined defect modes) σε αυτά τα διάκενα [141]. Πρόσφατα, στρώματα στερεών διαχωρισμένων με διαβαθμισμένα στρώματα ρευστών [143] και πιεζοηλεκτρικών σύνθετων υλικών (piezoelectric composites) [144, 145], εμφάνισαν την πιθανότητα των ακουστικών ταλαντώσεων Bloch, ανάλογων με τις σκάλες Wannier-Stark (Wannier-Stark ladders) των ηλεκτρονικών καταστάσεων σε ένα πολωμένο υπερπλέγμα SL [146].

2.2. Δισδιάστατοι και τρισδιάστατοι φωνονικοί κρύσταλλοι.

Στην εργασία τους οι A. Sukhovich κ.α. [147] επικεντρώθηκαν σε δισδιάστατους και τρισδιάστατους φωνονικούς κρυστάλλους και τις ασυνήθιστες ιδιότητές τους. Έχοντας εισαγάγει τις απαραίτητες έννοιες των πλεγμάτων Bravais και των αντίστοιχων ζωνών Brillouin, συνοψίσατε το πώς μπορούν οι ιδιότητες των φωνονικών κρυστάλλων να διερευνηθούν πειραματικά, ειδικά στην περιοχή των υπερηχητικών συχνοτήτων. Στη συνέχεια η συζήτηση εστιάστηκε στις φασματικές πτυχές των φωνονικών κρυστάλλων. Η ύπαρξη διακένων ζώνης είναι η πρώτη ιδιότητα των φωνονικών κρυστάλλων που διερευνήθηκαν θεωρητικά και πειραματικά. Λόγω του μεταβατικού χαρακτήρα των κυμάτων των οποίων η συχνότητα εμπίπτει στα διάκενα ζώνης, αποδείχθηκε η οδήγηση του ήχου (tunneling of sound). Ωστόσο τα διάκενα των ζωνών, παρά τον πλούτο των εφαρμογών που προσφέρουν (όπως ηχομόνωση, κυματοδήγηση, συντονιστές,

φιλτράρισμα κλπ), δεν είναι το μόνο εντυπωσιακό φαινόμενο των φωνονικών κρυστάλλων. Άλλα φαινόμενα που παρατηρούνται στις ζώνες διέλευσης μελετήθηκαν λεπτομερώς, όπως π.χ. η αρνητική διάθλαση. Αρνητική διάθλαση συμβαίνει όταν το κυματοδιάνυσμα και η ταχύτητα ομάδας είναι αντιπαράλληλα σε ένα υλικό. Παρουσιάστηκαν οι ομοιότητες μεταξύ της αρνητικής διάθλασης των ακουστικών και των ηλεκτρομαγνητικών μεταϋλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης.

Επίσης η εργασία τους παρέχει μια πληθώρα λεπτομερειών σχετικά με πειραματικές συνθήκες αρνητικής διάθλασης. Ακόμη εστιάστηκαν στις συνθήκες που απαιτούνται για τη χρήση της αρνητικής διάθλασης σε συνδυασμό με τη σύζευξη κλειστού πεδίου (closed field coupling) σε μια πλάκα από φωνονικούς κρυστάλλους, προκειμένου να επιτευχθεί υπέρ-ανάλυση, δηλ. απεικόνιση μιας σημειακής πηγής με καλύτερη ανάλυση από το μισό μήκος κύματος (halfwavelength resolution).

Τέλος, περιέγραψαν συνοπτικά τις πρόσφατες εξελίξεις σχετικά με τον αντίκτυπο της συμμετρίας των φωνονικών κρυστάλλων στις διαθλαστικές ιδιότητες. Περιγράφηκε ένα μοντέλο συστήματος που εμφανίζει ιδιότητες ανισοτροπικής διάδοσης, από τις ιδιότητες διάθλασης αυτού ως συνάρτηση των γωνιών πρόσπτωσης. Παρουσιάστηκε αυτός ο τύπος συστήματος στο πλαίσιο της αυτοκαθοδήγησης (self-collimation), του διαχωρισμού δέσμης (beam-splitting), του ελέγχου της φάσης (phase controlling) και της πιθανής εφαρμογής λογικών πυλών. Σε όλη τους την εργασία έχει δειχθεί ότι, παρά την ποικιλία πιθανών υλοποιήσεων των φωνονικών κρυστάλλων, οι ιδιότητές τους μπορούν πάντα να περιγραφούν στο πλαίσιο των ανακλάσεων Bragg των ακουστικών ή ελαστικών κυμάτων, που επιδρούν εποικοδομητικά ή καταστροφικά. Οι συνέπειες της περιοδικότητας εκδηλώνονται στις σχέσεις διασποράς που περιγράφουν πλήρως τις φασματικές, τις κατευθυντικές και τις φασικές ιδιότητες της διάδοσης στις φωνονικές δομές (phononic structures). Από αυτή την άποψη, η αναλογία μεταξύ των φωνονικών κρυστάλλων και του φυσικού κρυσταλλικού υλικού είναι πλήρης.

2.3.Ακουστική διπλή αρνητικότητα (Acoustic Double Negativity).

Επιτυχημένες παρουσιάσεις ακουστικών μεταϋλικών με αρνητικές ενεργές παραμέτρους, οδηγούν φυσικά στη δυνατότητα της ταυτόχρονης διπλής αρνητικότητας στο ίδιο σύστημα συχνότητας (frequency regime). Αρχική θεωρητική πρόβλεψη [30] πρότεινε ότι οι μονοπολικοί και οι διπολικοί συντονισμοί των τοπικών σκεδαστών (local scatterers) είναι καθοριστικοί για τον ενεργό συντελεστή όγκου (effective bulk modulus EBM) και την αρνητική ενεργό πυκνότητα μάζας, αντίστοιχα. Σχεδιάστηκαν υλοποιήσεις για την ταυτόχρονη πραγματοποίησή τους [30,31,148,149]. Όμοια με την ηλεκτρομαγνητική περίπτωση, οι διπλοί αρνητικοί συντελεστές όγκου και

(δυναμικής) πυκνότητας μάζας μπορούν να οδηγήσουν σε αρνητική διασπορά, δηλ. στα αποκαλούμενα αριστερόχειρα ακουστικά υλικά (left-handed acoustic materials). Μετά το 2010 εμφανίστηκε η πρώτη επιτυχία στην πειραματική πραγματοποίηση της ακουστικής διπλής αρνητικότητας [150]. Στο μονοδιάστατο σχέδιο τους τοποθετήθηκαν περιοδικά ελαστικές μεμβράνες για την ρύθμιση του διπολικού συντονισμού (dipolar resonance) [151], με πλευρικά ανοίγματα που παρέχουν μονοπολική απόκριση [152]. Η ζώνη μετάδοσης διπλής αρνητικότητας βρισκόταν στο όριο χαμηλής συχνότητας. Η ίδια ομάδα χρησιμοποίησε αργότερα τον ίδιο σχεδιασμό, για να δείξει μια αντιστροφή της μετατόπισης Doppler του ήχου εντός της διπλά αρνητικής ζώνης [153].

2.4.Εστίαση και απεικόνιση.

Με την εμφάνιση των ακουστικών μεταύλικών εμφανίστηκε ένας νέος ορίζοντας δυνατοτήτων, για τον χειρισμό των ακουστικών κυμάτων. Κατά τα τελευταία χρόνια υπήρξε πολλαπλασιασμός θεωρητικών / αριθμητικών προβλέψεων [154-158], για την επίτευξη ακουστικής εστίασης και υπερφακών με χρήση ακουστικών μεταύλικών. Οι Shu, Zhang κ.α. ανέπτυξαν μια τέτοια ιδέα δημιουργώντας ένα δίκτυο υγρών διασυνδέσεων (interconnecting fluid network). Παρεμβάλλοντας κοιλότητες διαφορετικών όγκων (shunted by cavities of different volumes), κάθε μονάδα στο δίκτυο αντιστοιχίζεται με ένα ταλαντωτή Helmholtz (Helmholtz resonator). Έχει δειχθεί πειραματικά ότι ένα τέτοιο δίκτυο είναι ικανό να επιτύχει την εστίαση του υπερήχου εντός συσκευής [159]. Οι Lucian Zigoneanu κ.α. σχεδίασαν και κατασκεύασαν επίπεδο φακό με δείκτη ακτινοβολίας διάθλασης (radient index of refraction), ο οποίος μεταφέρει αερομεταφερόμενο ήχο μερικών kHz, σε εστίαση εκτός συσκευής [160]. Υλικά μεγάλης διασποράς (Highly dispersive materials) μπορούν να επιτύχουν σχεδόν επίπεδα περιγράμματα ισοσυχνότητας (equi-frequency contours) εντός ενός συγκεκριμένου καθεστώτος λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο "σχηματίζουν κανάλι" για την διάδοση του κύματος [162, 163], επιτυγχάνοντας έτσι την απεικόνιση. Μια τέτοια ιδέα μπορεί να προσαρμοστεί σε ακουστικά κύματα.

Διατάσσοντας τοπικές μονάδες αντήχησης (locally resonant units) σε ένα τετραγωνικό πλέγμα, μπορεί να προκύψει μια ζώνη χαμηλών συχνοτήτων, με σχεδόν επίπεδες ακμές διακένου. Αποδείχθηκε αριθμητικά ότι το περίγραμμα της ισοδύναμης συχνότητας (equi-frequency contour) είναι τετραγωνικό κοντά στα άκρα της ζώνης και είναι ικανό να καναλοποιεί (canalizing) ακόμη και τα αποσβεννύμενα ακουστικά κύματα σε ρυθμούς διάδοσης (propagating modes) [164, 165]. Ο X. Ao και ο C. T. Chan έκαναν ένα βήμα παραπέρα [165], ενσωματώνοντας ένα ορθογωνικό πλέγμα για να εισαγάγουν ανισοτροπία. Με την τοποθέτηση του πλέγματος σε ημικυλινδρική γεωμετρία, αποδείχθηκε αριθμητικά ένα μεγεθυντικό φαινόμενο ανάλογο με αυτό των οπτικών υπερφακών [166, 167]. Η ανισοτροπία

βρίσκεται στον πυρήνα της ιδέας των υπερφακών. Από το πολυπολικό ανάπυγμα, τα κύματα που σκεδάζονται / εκπέμπονται από ένα αντικείμενο μπορούν να αναπαρασταθούν με την υπέρθεση ρυθμών λειτουργίας με διαφορετικές στιγμιαίες γωνίες. Οι γεωμετρικές λεπτομέρειες των σκεδαστών μεταφέρονται σε ρυθμούς λειτουργίας με μεγάλες γωνιακές στροφορμές (angular momenta) που δεν διαδίδονται (δηλ. με αποσβεννύμενο χαρακτήρα). Ωστόσο, για τα ανισότροπα υλικά στα οποία η διηλεκτρική σταθερά κατά μήκος μίας κατεύθυνσης είναι αρνητική, είναι εφικτό να έχουμε υπέρ-ανάλυση. Αυτό είναι εύκολο να το δούμε για μια δισδιάστατη κυκλική γεωμετρία, στην οποία έχουμε ανισότροπες διηλεκτρικές σταθερές ϵ_θ , ϵ_r , με την προϋπόθεση ότι $\epsilon_\theta \epsilon_r < 0$. Στη συνέχεια, από τη σχέση διασποράς είναι εύκολο να δούμε ότι τόσο το k_y όσο και το k_r μπορούν να πάρουν πολύ μεγάλες τιμές, υπονοώντας υψηλή ανάλυση, χωρίς να παραβιάζουν τη σχέση διασποράς.

Αυτά τα υλικά ονομάζονται υπέρ-φακοί [166, 168], και είναι σε θέση να μετατρέπουν τα αποσβεννύμενα κύματα με μεγάλες γωνιακές στροφορμές (high angular momenta) σε ρυθμούς διάδοσης. Ένας ακουστικός μεγεθυντικός "υπέρ-φακός" στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε από τους Jensen Li κ.α. [169], και βασίζεται όχι στην αρνητική διηλεκτρική σταθερά αλλά στην μεγάλη ενεργό πυκνότητα (effective density) και τον σχετικά αδύναμο συντελεστή όγκου (bulk modulus), που πραγματοποιείται από μια δομή τύπου ανεμιστήρα με εναλλασσόμενα πτερύγια από ορείχαλκο και αγωγούς αέρα, έτσι ώστε η πραγματική κυματική ταχύτητα (effective wave speed) να είναι χαμηλή και επομένως το σχετικό μήκος κύματος να είναι μικρό. Οι φακοί έχουν σαφώς καταδείξει ότι η ανάλυση είναι μικρότερη από το ήμισυ του μήκους κύματος (με μεγέθυνση), σε μια χωρική περιοχή που είναι εκτός της συσκευής. Απουσία ιξώδους φαινομένου (viscous effect), ένα διαμήκες ακουστικό κύμα μπορεί να μεταδοθεί σε κυματοδηγούς με πολύ μικρή διατομή, χωρίς τον περιορισμό μιας συχνότητας αποκοπής. Με την εκμετάλλευση αυτού του γεγονότος και με τη βοήθεια των συντονισμών Fabry-Perot, φάνηκε θεωρητικά [170] ότι ένα "ακουστικό ενδοσκόπιο" μπορεί να ενισχύσει τα αποσβεννύμενα κύματα, ανοίγοντας έτσι την πιθανότητα για υπό-διαθλαστική απεικόνιση (sub-diffraction imaging).

Η ιδέα αυτή πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια [171] με μία σειρά κυματοδηγών σε εγκάρσια κλίμακα βαθέων υπό-κυματικών μεγεθών (deep-subwavelength transverse-scale size). Εκτός από τις προσεγγίσεις που συζητήθηκαν παραπάνω, η ομάδα του C. Daraio πήρε μια διαφορετική πορεία προς την ακουστική μη γραμμική εστίαση σε κοκκώδη υλικά [172]. Κατασκεύασαν έναν μη γραμμικό φακό ενώνοντας κοκκώδεις αλυσίδες σφιχτά μεταξύ τους. Τέτοιες κοκκώδεις αλυσίδες μπορούν να μετατρέψουν έναν ακουστικό παλμό σε μοναχικά κύματα (solitary waves), των οποίων η φασική ταχύτητα εξαρτάται από το πλάτος τους. Ρυθμίζοντας την προ-εφαρμοζόμενη στατική δύναμη που ασκήθηκε σε κάθε μεμονωμένη αλυσίδα, ο φακός

βρέθηκε ικανός να εστιάσει τον ηχητικό παλμό με πολύ υψηλή ένταση.

2.5. Απόκρυψη μέσω μανδύα αορατότητας (Cloaking).

Η ακουστική απόκρυψη (acoustic cloaking) έχει προσελκύσει το θεωρητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια [173-184]. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές έχουν σχεδιάσει συσκευές χρησιμοποιώντας τους "ακουστικούς μετασχηματισμούς" ως εργαλείο. Προτάθηκαν θεωρητικά και μελετήθηκαν με αριθμητικές προσομοιώσεις σχέδια για την απόκρυψη των ακουστικών επιφανειακών κυμάτων [185], των αναδιπλούμενων κυμάτων σε λεπτές πλάκες [186-188] ή ακόμη και για τον έλεγχο της ροής ρευστών [189]. Η πειραματική ανακάλυψη προήλθε από την ομάδα του Fang [190]. Χρησιμοποιώντας την αναλογία μεταξύ της εξίσωσης του ακουστικού κύματος και της εξίσωσης του τηλεγραφήτη (telegrapher's equation), διερεύνησαν την ιδέα της χρήσης ρευστών δικτύων (fluid networks) ως πλατφόρμας για την πραγματοποίηση της ακουστικής απόκρυψης. Η ενεργός πυκνότητα μάζας (effective mass density) και ο συντελεστής όγκου (bulk modulus) σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να δημιουργήσουν μια κλίση στην ακτινική κατεύθυνση, τέτοια ώστε το υπερηχητικό κύμα να κάμπτεται γύρω από την κεντρική περιοχή, ελαχιστοποιώντας τη σκέδαση του αντικειμένου που τοποθετείται στο εσωτερικό του πεδίο (domain), έτσι ώστε να το καθιστά "αόρατο" στους εξωτερικούς παρατηρητές. Η πειραματική επίδειξη έχει δείξει το σαφώς μειωμένο φαινόμενο σκίασης (reduced shadowing effect) του αντικειμένου σκέδασης, παρουσία του μανδύα. Η μη τέλεια προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης (impedance mismatch) και η αναπόφευκτη απώλεια (inevitable dissipative loss) λήφθηκαν υπόψη για το σχεδόν τέλει φαινόμενο της απόκρυψης (less-than-perfect cloaking effect). Πρόσφατα, η μέθοδος των ακουστικών μετασχηματισμών έδειξε τη δύναμή της στο σχεδιασμό και την πειραματική υλοποίηση ενός ακουστικού "μανδύα χαλιού (carpet cloak)" στον αέρα [191].

2.6. Ακουστική διόρθωση.

Η συμμετρία χρονικής αναστροφής (time-reversal symmetry) και η συμμετρία χωρικής αναστροφής (spatial inversion symmetry) είναι θεμελιώδεις για την εξίσωση του γραμμικού ακουστικού κύματος. Ως εκ τούτου, η μη αμοιβαία μετάδοση του κύματος απαιτεί ορισμένες επιπλέον συνθήκες για να σπάσει αυτές τις συμμετρίες. Έτσι εισάγοντας δεύτερες αρμονικές (μη γραμμικό φαινόμενο) στην εξίσωση κύματος διασπάται η συμμετρία χρονικής αναστροφής, και για αυτό προτάθηκε ένας ακουστικός καθρέφτης μιας κατεύθυνσης (acoustic one-way mirror) [192].

Αυτό στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σε υπερηχητικά συστήματα (ultrasonic regime) [193]. Προσφάτως, η ομάδα του C. Daraio χρησιμοποίησε ένα μονοδιάστατο, αυστηρά μη γραμμικό τεχνητό

κοκκώδες μέσο, για τη διόρθωση ακουστικών κυμάτων και πρότεινε πρωτότυπα από μηχανικές λογικές πύλες (mechanical logic gates) [194]. Από την άλλη πλευρά, πραγματοποιήθηκε επίσης ένας ακουστικός "καθρέφτης μονής κατεύθυνσης" χρησιμοποιώντας απλούς δισδιάστατους φωνονικούς κρυστάλλους με ατελείς ζώνες διακένου (incomplete bandgap) [195]. Ο Li κ.α. ενσωμάτωσαν διαθλαστικές δομές (diffraction structures) στο ένα άκρο του φωνονικού κρυστάλλου για την επαγωγή χωρικών ρυθμών με διαφορετικά κ-διανύσματα, με αποτέλεσμα να μιμείται την κατάσταση της πλάγιας πρόσπτωσης (oblique incidence), ώστε να έχει ως αποτέλεσμα τη μετάδοση μέρους της ακουστικής ενέργειας.

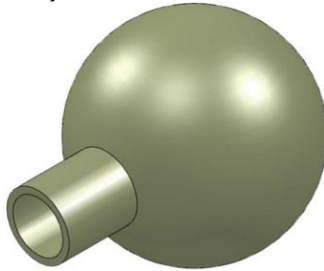
2.7.Αρνητικός ενεργός συντελεστής όγκου (Negative Effective Bulk Modulus).

Οι ελαστικές σταθερές παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο όπως η πυκνότητα μάζας, για τον προσδιορισμό της απόκρισης ενός υλικού σε ελαστικά / ακουστικά κύματα. Στο πλαίσιο της ελαστικότητας, ο συντελεστής όγκου περιγράφει την ελαστική παραμόρφωση που οδηγεί σε μεταβολή του όγκου [196]. Διαισθητικά, μια τέτοια παραμόρφωση μπορεί να γίνει κατανοητή ως αποτέλεσμα υδροστατικής πίεσης χωρίς προτιμώμενη κατεύθυνση (-εις). Αυτό το γεωμετρικό χαρακτηριστικό του συντελεστή όγκου, το οποίο διαφέρει από εκείνο της πυκνότητας μάζας, ανάγεται στην θεώρηση του ενεργού συντελεστή όγκου (effective bulk modulus E.B.M.) για ακουστικά μεταύλικά. Το πολυπολικό ανάπτυγμα (multipole expansion) είναι μια τυπική τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκαλύψει τον γεωμετρικό χαρακτήρα των συναρτήσεων απόκρισης (response functions). Όντας παγκατευθυντική - πολυκατευθυντική (omnidirectional), η χωρική απόκριση τύπου modulus (bulk modulus-type response) έχει τον υψηλότερο βαθμό περιστροφικής συμμετρίας (rotational symmetry). Μεταφράζοντας το στη γλώσσα της πολυπολικής αναπαράστασης (multipole representation), αυτή η απόκριση πρέπει να κυριαρχείται από τον μονοπολικό όρο[197].

Από την άλλη πλευρά, η απόκριση τύπου πυκνότητας μάζας είναι έντονα κατευθυντική, όπως αποδεικνύεται από τους δονητικούς ρυθμούς και έχει τη μορφή διπόλου. Η αρνητικότητα του ενεργού χωρικού συντελεστή σημαίνει ότι το μέσο διαστέλλεται υπό πίεση και συστέλλεται χωρίς πίεση. Η θερμοδυναμική υπαγορεύει ότι ένα σύστημα με ένα τέτοιο χαρακτηριστικό στατικής απόκρισης πρέπει να είναι ασταθές. Εντούτοις, ο αρνητικός χωρικός συντελεστής είναι εφικτός στο πλαίσιο της δυναμικής απόκρισης ενός ελαστικού / ακουστικού συστήματος, όπου το υλικό εμφανίζει μια απόκριση εκτός φάσης (out-of-phase response) σε ένα πεδίο πίεσης εναλλασσομένου ρεύματος (AC pressure field). Έχουν προταθεί ορισμένα θεωρητικά μοντέλα, όπως το νερό με αιωρούμενες φυσαλίδες αέρα [198], για την

πραγματοποίηση αρνητικού EBM.

Όσον αφορά την πειραματική υλοποίηση, μέχρι στιγμής έχει υπάρξει μόνο μία συνταγή που επιτυγχάνει επιτυχώς αρνητικό EBM [199]. Η δομή αποτελείται από ένα κανάλι ρευστού που απομακρύνεται προς τα πλάγια από μια σειρά περιοδικά τοποθετημένων συντονιστών Helmholtz (Helmholtz resonators HRs). Αντί να χρησιμοποιεί συνδυασμούς διαφόρων υλικών, αυτό το σύστημα μεταύλικών επιδιώκει να παράγει απόκριση τύπου μέτρου (modulus-type response), διαμορφώνοντας τη γεωμετρία που περιβάλλει το ρευστό στο οποίο μεταδίδεται ο ήχος [200]. Πολλά παράγωγα έργα υπάρχουν επίσης σε δομές που εμφανίζουν αρνητικό EBM, π.χ. HRs στον αέρα που λειτουργούν σε συχνότητες kHz [201,202], και δομές που μοιάζουν με φλογέρες (flute-like structures)[203]. Η HR είναι μια πολύ γνωστή δομή ακουστικού συντονισμού που μπορεί να αναλυθεί με το μοντέλο ελατηρίου - μάζας. Ένας HR είναι βασικά ένα μπουκάλι με μεγάλη κοιλιά και ένα μικρό στόμιο ανοίγματος, που συνδέονται με ένα στενό λαιμό (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Τυπικός συντονιστής Helmholtz (HR).

Δεδομένου ότι ο όγκος του λαιμού είναι πολύ μικρότερος από αυτόν της κοιλιάς, είναι μια καλή προσέγγιση να θεωρήσουμε ότι το υγρό στο λαιμό είναι ασυμπίεστο. Το υγρό στην κοιλιά, ωστόσο, συμπιέζεται όταν το υγρό στο τμήμα του λαιμού κινείται προς τα μέσα. Μόλις συμπιεσθεί, η πίεση του υγρού στην κοιλιά αυξάνεται φυσικά, παρέχοντας έτσι μια δύναμη αποκατάστασης. Καθόσον το μήκος κύματος του ήχου είναι, γενικά, πολύ μεγαλύτερο από τη διάσταση του συνολικού συντονιστή, η κλίση της πίεσης μέσα στην κοιλιότητα μπορεί να παραμεληθεί. Από αυτή την περιγραφή του HR, το υγρό στον λαιμό χρησιμεύει ως μάζα και η κοιλιά παίζει το ρόλο ελατηρίου.

2.8. Μη γραμμικές περιοδικές φωνονικές δομές και κοκκώδεις κρύσταλλοι (Nonlinear Periodic Phononic Structures and Granular Crystals).

Σε άρθρο τους οι Γ. Θεοχάρης κ.α. [204] κατέδειξαν πώς η δομική περιοδικότητα (structural periodicity) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία νέων υλικών με καινοφανείς φυσικές ιδιότητες. Σε τέτοια υλικά τα μεμονωμένα δομικά στοιχεία συναρμολογούνται σε προσεκτικά σχεδιασμένες δομές, όπου η μεταξύ τους συνεργασία,

εμφανίζει στο νεο υλικό (bulk material) καλύτερες ιδιότητες από εκείνες των επιμέρους συστατικών του. Αυτή η γενική έννοια της απόκτησης "υλικών από το σχεδιασμό" δεν είναι καινούργια και υπήρξε μια μακροπρόθεσμη αναζήτηση για τους χημικούς και τους επιστήμονες υλικών. Για παράδειγμα, οι χημικοί προσπαθούν από καιρό να κατασκευάσουν κρυστάλλους και μόρια με τη διάταξη των ατόμων σε συγκεκριμένα πλέγματα και γεωμετρίες, για να αποκτήσουν μια συγκεκριμένη νέα ιδιότητα (bulk property) .

Ωστόσο, επεκτείνοντας αυτήν την έννοια, τα αρχικά μόρια (past molecules) και οι κρυσταλλικοί κόκκοι (crystal grains), σε ειδικά σχεδιασμένα δομικά στοιχεία - από την νάνο-κλίμακα στη μακροκλίμακα, - αποκτούν ένα νέο πεδίο δυνατοτήτων. Ένα από τα κύρια οφέλη σε τέτοια σχεδιασμένα υλικά είναι ότι καθιστούν εφικτές νέες τεχνολογικές δυνατότητες. Μπορούν να σχεδιαστούν νέα υλικά με πολυλειτουργικές ιδιότητες, τα οποία έχουν τόσο δομικές όσο και δυναμικές λειτουργίες. Ίσως το πιο σημαντικό, με τη δημιουργία υλικών με πρωτόγνωρες ιδιότητες, είναι να δίνεται η δυνατότητα για νέες συσκευές και εφαρμογές.

Επιπλέον, καθώς αυτά τα υλικά "σχεδιάζονται" κατά την κατασκευή τους μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν για χρήση σε συγκεκριμένα στοχευμένες εφαρμογές. Το εύρος των πιθανών νέων αποκρίσεων (bulk responses) από τέτοια σχεδιασμένα υλικά εξαρτάται, εν μέρει, από την πολυπλοκότητα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των θεμελιωδών δομικών στοιχείων. Ο σχεδιασμός αυτών των περιοδικών δομών ιστορικά βασίστηκε σε γραμμικές αλληλεπιδράσεις. Η παρουσία μη γραμμικότητας σε αυτά τα συστήματα προσφέρει πρόσθετα πλεονεκτήματα λόγω της πολυπλοκότητας.

Επιπλέον στο άρθρο [204] επικεντρώθηκαν κυρίως σε μη γραμμικά δυναμικά φαινόμενα σε κοκκώδη κρυσταλλικά συστήματα, όπου η μη γραμμικότητα προκαλείται από τις γεωμετρικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ελαστικών σωματιδίων. Όπως περιγράφηκε, η μη γραμμική δυναμική επιτρέπει την ύπαρξη νέων χρήσιμων δυναμικών φαινομένων και συνεκτικών δομών. Αυτό περιλαμβάνει μοναχικά κύματα (solitary waves), διακριτούς αναπνευστήρες (discrete breathers), διακλαδώσεις (bifurcations), οιονεί-περιοδικότητα (quasi-periodicity), και χάος (chaos), μεταξύ άλλων. Η μη γραμμικότητα επιτρέπει επίσης μια δραματική προσαρμογή των αποκρίσεων του υλικού, παρέχοντας μια άνευ προηγουμένου ευαισθησία στις παραλλαγές των υλικών και των εξωτερικών παραμέτρων. Ωστόσο, εξαιτίας της εγγενούς πολυπλοκότητας των μη γραμμικών συστημάτων, η οποία επιτρέπει τέτοια χρήσιμα φαινόμενα, η ανάλυση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τέτοιων συστημάτων είναι επίσης πιο δύσκολη.

Στο μέλλον, η ανάπτυξη νέων προγνωστικών θεωρητικών και υπολογιστικών εργαλείων θα είναι απαραίτητη για να καθοδηγήσει περαιτέρω την εξέλιξη, το σχεδιασμό και τη δοκιμή των μη γραμμικών περιοδικών φωνονικών δομών. Ορισμένες συγκεκριμένες μελλοντικές

περιοχές ενδιαφέροντος, σε σχέση με τη μελέτη των μη γραμμικών περιοδικών φωνονικών δομών, περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τα ακόλουθα: Καθόσον η μη γραμμικότητα έχει εφαρμοσθεί σε συστήματα τύπου μάζας-ελατηρίου, σε κοκκώδεις κρυστάλλους, θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί περαιτέρω στη μελέτη μη γραμμικών μεταύλικών, μη γραμμικών συντονιστών ή φωνονικών κρυστάλλων με μη γραμμικά ελαστικά συστατικά. Η μελέτη των υβριδικών γραμμικών-μη γραμμικών συστημάτων θα μπορούσε να οδηγήσει στην παρατήρηση μιας σειράς νέων δυναμικών φαινομένων, όπως το φιλτράρισμα ακουστικών σημάτων εξαρτώμενο από το πλάτος [205].

Νέα συστήματα υλικών, όπου οι αποκρίσεις των μη γραμμικών υλικών αλληλεπιδρούν με ενεργά δομικά στοιχεία ή άλλα πολυ-φυσικά φαινόμενα (multi-physical effects), είναι ένας άλλος τομέας που θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανακάλυψη πρωτόγνωρων αποκρίσεων των υλικών. Η δυνατότητα ζευγαρώματος (couple multi-physical effects) πολλαπλών φυσικών φαινομένων σε περιοδικές δομές, μπορεί επίσης να οδηγήσει στη δημιουργία συντονιζόμενων πολυλειτουργικών και ενεργειακών συσκευών (tunable multifunctional and energy-harvesting devices), όπως οπτομηχανικών αισθητήρων [206] ή συστημάτων ροχονία [207]. Για παράδειγμα, η δημιουργία μη γραμμικών ρυθμών σε μη γραμμικούς ακουστικούς κρυστάλλους, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μηχανισμός μετατροπής συχνοτήτων ή η παρουσία μη γραμμικών εντοπισμένων ρυθμών ταλάντωσης (nonlinear localized modes) θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τον εντοπισμό και τη συλλογή της ενέργειας.

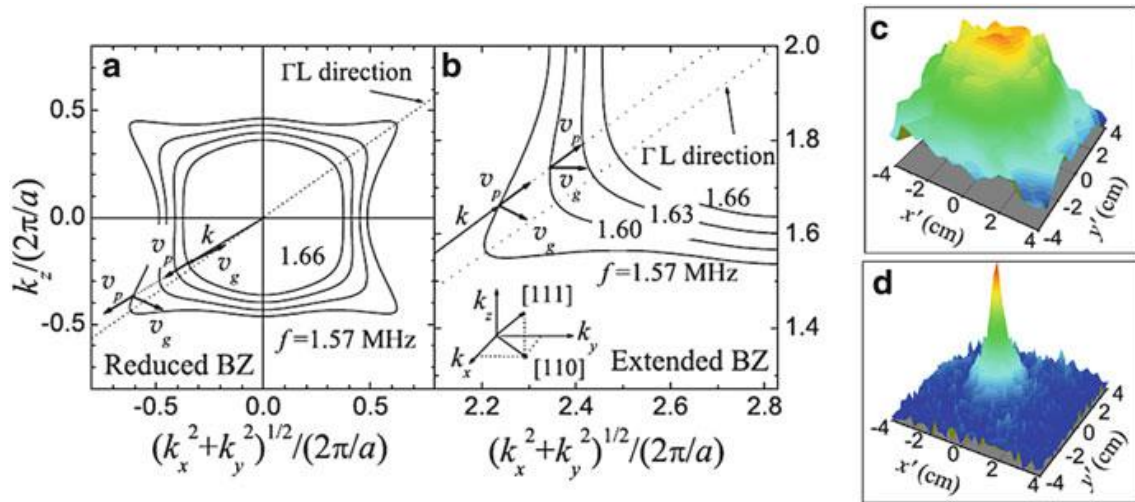
Λόγω της ομοιότητας της διάδοσης του ακουστικού και του ελαστικού κύματος με τη διάδοση των φωνονίων, τα αποτελέσματα που μελετήθηκαν θα μπορούσαν επίσης να επεκταθούν σε μικρότερες κλίμακες που περιλαμβάνουν διάδοση της θερμότητας, π.χ. στην ακουστική, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί μη γραμμικές περιοδικές δομές για τη δημιουργία συντονισμένων ανορθωτών βασισμένων στην εμφάνιση ασταθειών διακλάδωσης (bifurcation instabilities). Αυτός ο τύπος συσκευών θα μπορούσε να παρέχει νέους τρόπους για τον έλεγχο της ροής της ακουστικής ενέργειας, την ενεργοποίηση ακουστικών λογικών διατάξεων και τη χρήση σε νέα συστήματα συλλογής ενέργειας [208].

Επιπλέον, τα πρόσφατα διερευνημένα φαινόμενα, τα οποία εμφανίζονται σε κοκκώδεις κρυστάλλους και σε άλλες μη γραμμικές περιοδικές φωνονικές δομές, θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω για τις δυνατότητές τους στις εφαρμογές της μηχανικής. Η ικανότητα να σχεδιάζεται η σχέση διασποράς μέσω μη γραμμικοτήτων, μπορεί να εφαρμοστεί σε ρυθμιζόμενες συσκευές διήθησης κραδασμών (tunable vibration filtering devices) και σε συστήματα απομόνωσης θορύβου και κραδασμών (vibration-insulating systems). Τα συμπαγή αυτο-εντοπιζόμενα μοναχικά κύματα (compact solitary waves) με ισχυρές ιδιότητες (robust properties) και μεγάλα πλάτη, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε βιοϊατρικές συσκευές με βελτιωμένη ανάλυση και

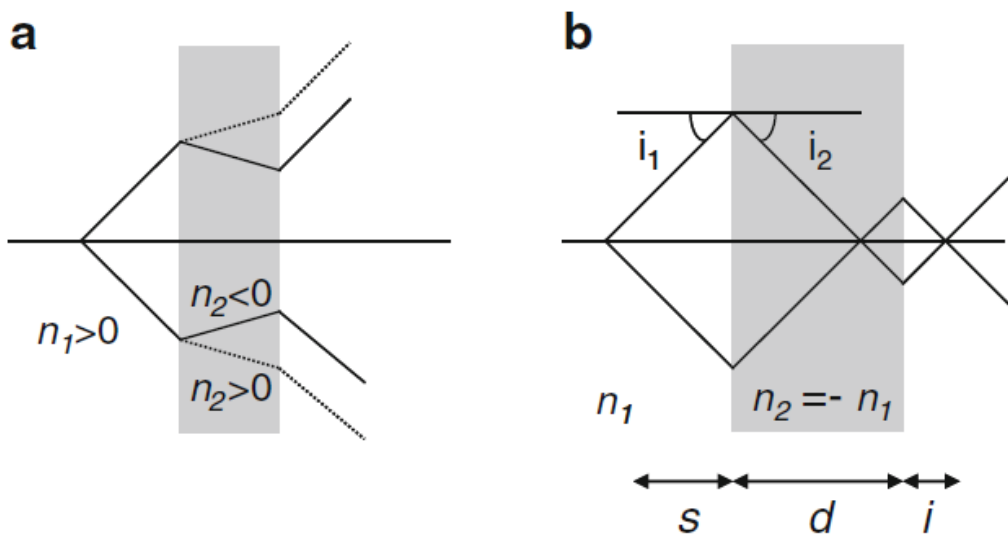
λόγο σήματος προς θόρυβο [209], ή στη μη καταστροφική αξιολόγηση υλικών (nondestructive evaluation of materials) [210].

2.9 Επίπεδοι φακοί και υπεράνάλυση.

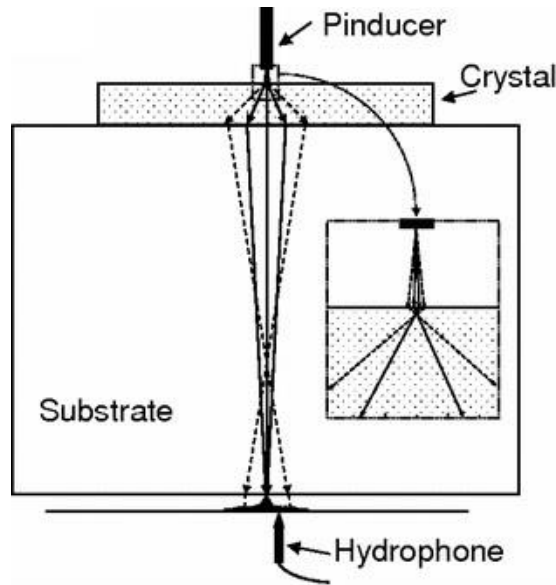
Το 2000, ο Pendry [211] πρότεινε να χρησιμοποιηθούν τα μεταύλικά "διπλής αρνητικότητας" (double - negative metamaterials), δηλαδή σύνθετα υλικά που παρουσιάζουν τόσο αρνητική επιτρεπτότητα όσο και διαπερατότητα, ως δομικά υλικά για δυνητικά τέλειους φακούς, που ξεπερνούν το όριο περίθλασης Rayleigh. Αυτό είναι δυνατό χάρη στη συμβολή δύο φαινομένων. Το πρώτο είναι οι εσωτερικές ιδιότητες (intrinsic capabilities) των μεταύλικών αρνητικού δείκτη, που παρέχουν αυτοεστιακές δυνατότητες (self-focusing capabilities) σε μια απλή πλάκα αυτών των υλικών. Το δεύτερο φαινόμενο απαιτεί το αποσβεννύμενο μέρος (evanescent part) των φασμάτων μιας πηγής να συζευχθεί με τους φακούς και να ενισχυθεί συντονισμένα (resonantly amplified) ώστε να φτάσει στην εικόνα χωρίς απώλειες. Αρχικά αποτελέσματα από τους Yang κ.α. [212] το 2004 έχουν δείξει τη δυνατότητα των φωνονικών κρυστάλλων για ηχητική εστίαση. Έχουν υλοποιήσει φωνονικούς κρυστάλλους κατασκευασμένους από σφαιρίδια καρβιδίου - βολφραμίου διαμέτρου 0.8 mm, περιβαλλόμενα από νερό. Η κυβικά εδροκεντρωμένη δομή (face centered cubic structure) των συσκευασμένων σφαιριδίων παρουσιάζει ένα πλήρες διάκενο ζώνης (complete band gap) στην περιοχή από 0.98 έως 1.2 MHz. Από την ανάλυση των επιφανειών ίσης συχνότητας που συνοψίζονται στις εικόνες 2.2a, 2.2b, οι συγγραφείς έχουν δείξει ότι αναμένονται σημαντικά φαινόμενα αρνητικής διάθλασης, λόγω των υψηλών ανισοτροπικών ιδιοτήτων των σχέσεων διασποράς. Διεξήχθησαν πειράματα για τη μελέτη της διάδοσης του ήχου κατά μήκος μιας στοίβας αποτελούμενης από φωνονικούς κρυστάλλους τοποθετημένης πάνω σε ένα παχύ υπόστρωμα. Όπως θα συζητηθεί στην εικόνα 2.3, η αρνητική διάθλαση διαμέσου μιας πλάκας από φωνονικό κρύσταλλο αναμένεται να παράγει μια εστίαση μέσα στον κρύσταλλο και άλλη μια στο μέσο εξόδου. Αυτή η τελευταία εστίαση παρατηρήθηκε από τους Yang κ.α. στη σωστή απόσταση από την επιφάνεια του υποστρώματος. Χρησιμοποίησαν έναν ακροφύσιο (pinducer) που παράγει υπερηχητικούς παλμούς και ένα υδρόφωνο (hydrophone) τοποθετημένο σε μια τρισδιάστατη εξέδρα μεταφοράς (3D translation stage) (εικόνα 2.4). Τα καταγεγραμμένα δεδομένα στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με μετασχηματισμό Fourier, προκειμένου να ανακτηθούν τα στοιχεία με τη συχνότητα ενδιαφέροντος. Τα σχήματα στις εικόνες 2.2c, 2.2d δείχνουν το φαινόμενο της εστίασης παρουσία του φωνονικού κρυστάλλου. Το 2009, οι Sukhovich κ.α. παρέθεσαν αποδεικτικά στοιχεία για ένα φαινόμενο ηχητικού υπερφακού. [213].



Εικόνα 2.2 .Ηχητική εστίαση σε ένα τρισδιάστατο φωνονικό κρύσταλλο από τους Yang κ.α. [212]. α) Διατομή επιφανειών ίσης συχνότητας (Cross section of the equifrequency surfaces) με συχνότητες κοντά στο $1,60$ MHz στις ελαττωμένες (α) και επεκταμένες (β) ζώνες Brillouin . Η διατομή περιέχει τις διευθύνσεις $[001]$, $[110]$ και $[111]$. (c) Πειραματικά πεδιακά μοντέλα μέτρησης $1,57$ MHz χωρίς τον φωνονικό κρύσταλλο στη θέση του. (d) ίδια με (c) με τον φωνονικό κρύσταλλο στη θέση του.



Εικόνα 2.3 . Αναπαράσταση των ιδιοτήτων διάθλασης μιας πλάκας με αρνητικό δείκτη διάθλασης . (α) Στη συνήθη περίπτωση ενός θετικού υλικού μια πηγή δίνει μόνο αποκλίνουσες δέσμες. Εάν η πλάκα είναι κατασκευασμένη από μεταλλικό με αρνητικό δείκτη, τότε οι δέσμες είναι συγκλίνουσες στο άκρο της πλάκας. (β) Εάν η πλάκα είναι αρκετά παχιά (ή ο δείκτης έχει μεγάλο μέγεθος), οι εισερχόμενες ακτίνες επικεντρώνονται δύο φορές στο πάχος της πλάκας και στην πλευρά εξόδου, αντίστοιχα. Εδώ ο δείκτης διάθλασης είναι αρνητικός. Δημιουργούνται δύο εικόνες, μια μέσα στην πλάκα και μια στην πλευρά εξόδου (Εάν η πλάκα είναι πολύ λεπτή (Εικ.2.3 α) τότε υπάρχει μια ενιαία φανταστική (virtual) εικόνα)



Εικόνα 2.4 Πειραματική διάταξη .

2.10. Ηχητική εστίαση μέσω μιας πλάκας υλικού με αρνητικό δείκτη (Sound Focusing by a Slab of Negative Index Material).

Μεταξύ των πολυάριθμων συνεπειών της αρνητικής διάθλασης, η πιο ελπιδοφόρα, από την άποψη των εφαρμογών, είναι η δυνατότητα για μια πλάκα υλικού με αρνητικό δείκτη διάθλασης να παράγει μια εικόνα από οποιαδήποτε σημειακή πηγή. Πράγματι, στην προέκταση ενός ισοδύναμου ομογενούς υλικού με αρνητικό δείκτη διάθλασης, ο νόμος του Snell εφαρμόζεται απλώς χρησιμοποιώντας τον αρνητικό δείκτη διάθλασης .

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1)$$

Εδώ, τα n_1 και n_2 είναι οι δείκτες διάθλασης και i_1 και i_2 οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης, αντίστοιχα. Η αρνητική τιμή της i_2 αντιστοιχεί τόσο στις διαθλώμενες όσο και στις προσπίπτουσες δέσμες οι οποίες βρίσκονται στην ίδια πλευρά σε σχέση με το κάθετο επίπεδο (normal plane). Ας εξετάσουμε μια πηγή ήχου που εκπέμπει κύματα σε ένα συνηθισμένο θετικό μέσο, μπροστά από μια πλάκα άλλου υλικού. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.3a, η γεωμετρική ανίχνευση ακτίνων προβλέπει ότι εάν και τα δύο υλικά είναι θετικά, κάθε δέσμη από την πηγή θα διασχίσει τις δύο διεπαφές μεταξύ των δύο υλικών και θα αποκλίνει επίσης στην πλευρά εξόδου της πλάκας. Αντιθέτως, εάν η πλάκα κατασκευάζεται από υλικά με αρνητικό δείκτη, τότε οποιαδήποτε απόκλιση δέσμης θα συγκλίνει μέσα στο πάχος της πλάκας. Στην τελευταία περίπτωση, με την προϋπόθεση ότι η πλάκα είναι αρκετά παχιά, η δέσμη θα εστιαστεί δύο φορές (Εικ. 2.3b). Με αυτόν τον τρόπο μια απλή πλάκα αρνητικού υλικού εκτελεί από μόνη της την εστίαση μιας εικόνας, όπως θα έκανε ο φακός. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχή ενός τέτοιου φακού δεν βασίζεται στο φαινόμενο της διαμόρφωσης του υλικού (effect of shaping the material) αλλά

στις ιδιότητες των υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Οι ιδιότητες αυτών των φακών είναι εντελώς διαφορετικές από τα συνηθισμένα ανάλογα τους. Πρώτον, μια απλή γεωμετρική ανάλυση δείχνει ότι η σχέση μεταξύ των αντίστοιχων θέσεων της εικόνας και των σημειακών πηγών είναι:

$$i = d \frac{\tan i_2}{\tan i_1} - s = d \frac{-n_1/n_2 \cos i_2}{\sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 i_1}} - s \quad (2)$$

όπου d είναι το πάχος της πλάκας, s η απόσταση της σημειακής πηγής από την πλευρά εισόδου και i η απόσταση της εικόνας από την πλευρά εξόδου. Η συνέπεια αυτής της σχέσης είναι ότι οι ακτίνες με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης εστιάζονται σε διαφορετικές αποστάσεις από την πλευρά εξόδου. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα, διότι η παραγωγή μιας εικόνας από μια σημειακή πηγή απαιτεί ότι όλα τα γωνιακά συστατικά του προσπίπτοντος σήματος εστιάζονται στο ίδιο σημείο, το οποίο ονομάζεται στιγματισμός (stigmatism). Εδώ η απαίτηση αυτή ικανοποιείται μόνο εάν:

$$n_2 = -n_1 \quad (3)$$

η οποία είναι η προϋπόθεση για την αρνητική διάθλαση όλων των γωνιών (All Angles Negative Refraction AANR).

Αυτή προϋπόθεση είναι μια αναγκαία και ικανή συνθήκη για την απεικόνιση με μια πλάκα μεταύλικού με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Στην περίπτωση αυτή (2) καταλήγει στην:

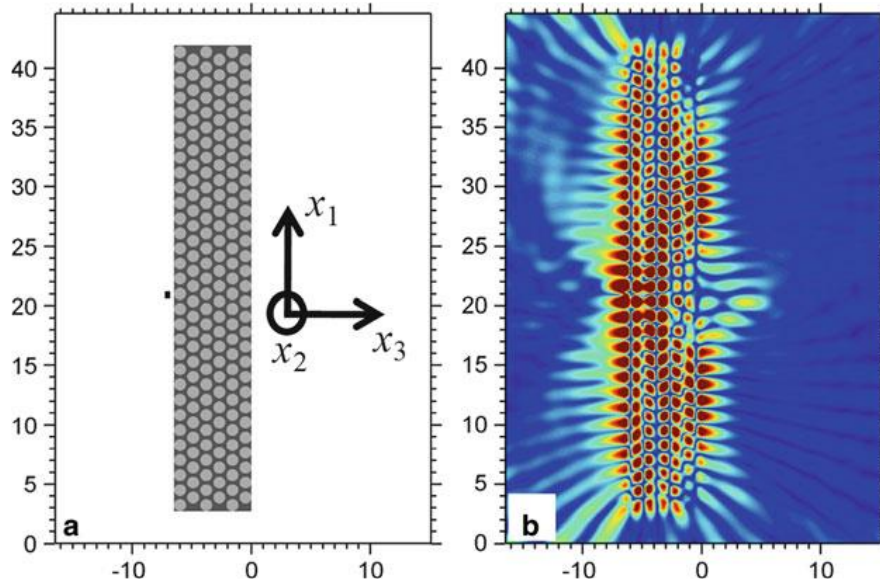
$$i = d - s \quad (4)$$

2.11. Σχεδίαση υπεραναλυτικού φακού με χρήση φωνονικών κρυστάλλων (Design of a Phononic Crystal Super Resolution Lens).

Η αναλυτική απεικόνιση σε υποκυματικές περιοχές (subwavelength resolution imaging) ήταν ένα θέμα μείζονος ενδιαφέροντος κατά την τελευταία δεκαετία. Το φαινόμενο αυτό απαιτεί αρνητική διάθλαση και την ικανότητα ενός συστήματος να μεταδίδει ολόκληρο το χωρικό φάσμα Fourier από μια πηγή, συμπεριλαμβανομένων των αποσβεννύμενων συνιστωσών. Η δυνατότητα εφαρμογής ενός τέτοιου ακουστικού υπέρ-φακού πειραματικά και θεωρητικά μελετήθηκε από τον J.-F. Robillard κ.α. [214] χρησιμοποιώντας μια δομή αποτελούμενη από ένα τριγωνικό πλέγμα χαλύβδινων κυλίνδρων σε μεθανόλη και στις επιφάνειες τους τοποθετείται λεπτό στρώμα πλαστικού φιλμ το οποίο, συνολικά, περιβάλλεται από νερό (Εικ. 2.5a).

Η πρώτη απαίτηση της αναλυτικής απεικόνισης σε υποκυματικές περιοχές είναι η αρνητική διάθλαση και αυτή προκύπτει με έναν από δύο μηχανισμούς. Πρώτον από διπλά αρνητικά μεταύλικά τα οποία

αποτελούνται από συστήματα που περιλαμβάνουν τοπικά συντονιζόμενες δομές (locally resonant structures), οι οποίες παρουσιάζουν αρνητική ενεργό μάζα (negative effective mass) και αρνητικό συντελεστή όγκου (negative bulk modulus) [219, 220].

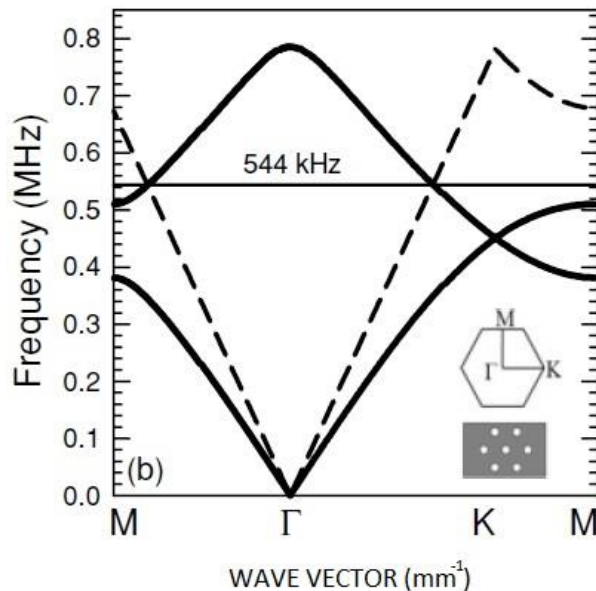


Εικόνα 2.5.: Σχήμα του συστήματος που μελετήθηκε από τους J.-F. Robillard κ.α. [214]. Η ακτίνα των εγκλεισμάτων χάλυβα είναι $r = 0,51$ mm με μια παράμετρο πλέγματος ύψους $a = 1,27$ mm. (a) πλέγμα FDTD που χρησιμοποιείται για την αριθμητική μελέτη. Η μαύρη γραμμή μπροστά από την πλευρά εισόδου αναπαριστά την πηγή. (b) Μέσο πεδίο πίεσης που λαμβάνεται μέσω προσομοίωσης FTDT. Σημειώστε την εικόνα στην πλευρά εξόδου, της οποίας η ανάλυση ($0,35\lambda$) είναι κάτω από το όριο Rayleigh.

Δεύτερον από φωνονικούς κρυστάλλους, που αποτελούνται από μια περιοδική σειρά εγκλεισμάτων σε μια φυσικά ανόμοια μήτρα [212, 213, 220-223]. Η αρνητική διάθλαση στους φωνονικούς κρυστάλλους βασίζεται στη σκέδαση Bragg, που προκαλεί ζώνες με αρνητικές ταχύτητες ομάδας. Πρέπει να σημειωθεί ότι, δεδομένου ότι τόσο τα μεταύλικά όσο και οι φωνονικοί κρύσταλλοι έχουν πολύπλοκη καμπύλη διασποράς, η προσέγγιση ενός ομογενούς μέσου δεν είναι πιθανό να ικανοποιηθεί για ολόκληρη την περιοχή των συχνοτήτων. Ωστόσο, είναι δυνατόν να σχεδιαστούν αυτά τα συστήματα έτσι ώστε σε μια στενή ζώνη συχνοτήτων, να μπορούν να θεωρηθούν ως διπλά αρνητικά υλικά με έναν ενεργό αρνητικό δείκτη διάθλασης (effective negative index). Προκειμένου να επιτευχθεί αρνητική διάθλαση όλων των γωνιών (AANR), πρέπει να σχεδιαστεί ο φωνονικός κρύσταλλος έτσι ώστε σε μια δεδομένη συχνότητα, το περίγραμμα ίσης συχνότητας (equifrequency contour) να είναι παρόμοιο με αυτό ενός ιστροπικού μέσου, δηλαδή να είναι ένας κύκλος. Επιπλέον, σε αυτή τη συχνότητα, για να ικανοποιηθεί η συνθήκη $c_1 = c_2 = c$, όπου c_1, c_2 η ταχύτητα του ήχου στο μέσο 1 και στο μέσο 2, αντίστοιχα.

Ο κύκλος αυτός πρέπει να έχει την ίδια διάμετρο με το περίγραμμα ίσης συχνότητας του μέσου που περιβάλλει τους φακούς οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από φωνονικούς κρυστάλλους. Αυτή η απαίτηση

εξηγεί την επιλογή της μεθανόλης ως υγρού μέσου που περιβάλλει τις χαλύβδινες ράβδους στο φωνονικό κρύσταλλο, έτσι ώστε σε μία συχνότητα στη δεύτερη ζώνη το μέγεθος των κυκλικών περιγραμμάτων ίσης συχνότητας (circular equifrequency contours) του κρυστάλλου να μπορεί να συντονίζεται, ώστε να ταιριάζει με το περίγραμμα ίσης συχνότητας του νερού έξω από τον κρύσταλλο (Εικ. 2.6).



Εικ. 2.6 Δομή ζώνης του φωνονικού κρυστάλλου μεθανόλης-χάλυβα [214]. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις καμπύλες διασποράς. Η σχέση διασποράς του περιβάλλοντος μέσου (νερό) έχει σχεδιαστεί με τις διακεκομμένες γραμμές. Η δεύτερη ζώνη εμφανίζει αρνητική ομαδική ταχύτητα και τέμνει τον κώνο νερού σε κυκλική συχνότητα ίση με 544 kHz

Έτσι, μία από τις σημαντικές συνθήκες για καλή εστίαση θα μπορούσε να επιτευχθεί με αυτόν τον συνδυασμό υλικών. Πράγματι, οποιοδήποτε υγρό με μια ταχύτητα ήχου αρκετά μικρή, σε σχέση με το νερό, θα αρκούσε, με την μεθανόλη να είναι μια βολική επιλογή όχι μόνο επειδή είναι ένα ρευστό χαμηλών απωλειών με χαμηλή ταχύτητα (περίπου τα δύο τρίτα της ταχύτητας στο νερό), αλλά και επειδή είναι άμεσα διαθέσιμη. Στην περίπτωση αυτή στη γειτονική συχνότητα των 544 kHz (συχνότητα λειτουργίας), οι φακοί χάλυβα - μεθανόλης συμπεριφέρονται ως μέσο με αρνητικό δείκτη διάθλασης, του οποίου ο δείκτης είναι αντίθετος από τον δείκτη του νερού, επιτυγχάνοντας έτσι την κατάσταση AANR.

Η δεύτερη απαίτηση για λήψη εικόνας σε υποκυματικές περιοχές (sub wavelength imaging) είναι να διατηρηθεί η συμβολή των αποσβεννύμενων ρυθμών λειτουργίας εκπομπής της πηγής.

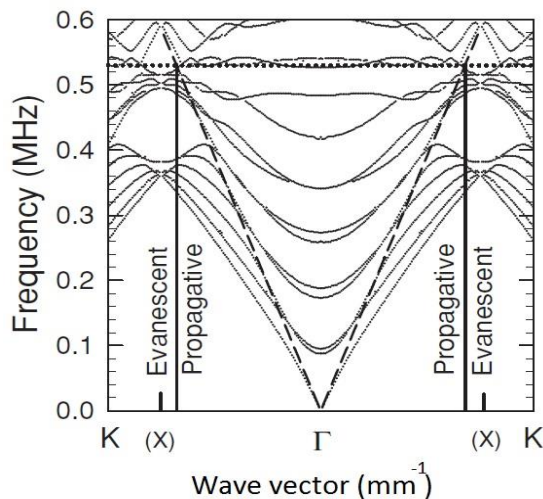
Ακολουθώντας τους Sukhovich κ.α. [213], η απεικόνιση ακουστικών κυμάτων σε υποκυματικές περιοχές έχει επίσης αποδειχθεί ότι είναι εφικτή, χρησιμοποιώντας ένα τετράγωνο πλέγμα εγκλεισμάτων στο οποίο εισάγεται μια διαμόρφωση επιφανειακών ακουστικών κυμάτων [215], μια χαλύβδινη πλάκα με περιοδική

διάταξη σχισμών [216] ή έναν ακουστικό υπερφακό κατασκευασμένο από φύλλα ορείχαλκου [217]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο μηχανισμός με τον οποίο συμβαίνει αυτό το φαινόμενο αποδόθηκε στην ενίσχυση των αποσβεννύμενων ρυθμών λειτουργίας διαμέσου δεσμευμένων επιφανειακών ή ρυθμών πλάκας του συστήματος (bound surface or slab modes of the system).

Στα συστήματα αυτά υπάρχουν δεσμευμένοι ακουστικοί ρυθμοί λειτουργίας (bound acoustic modes), των οποίων η συχνότητα πέφτει κοντά στην συχνότητα λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση, υπό τον όρο ότι ο φακός βρίσκεται στο κοντινό πεδίο της πηγής, κάποια ενέργεια που εκπέμπεται με τους αποσβεννύμενους ρυθμούς λειτουργίας θα συζευχθεί με συντονισμένο τρόπο, σε αυτούς τους δεσμευμένους ρυθμούς.

Ολόκληρη η πλάκα από φωνονικό κρύσταλλο διεγείρεται και επανεκπέμπει τα απαραίτητα αποσβεννύμενα συστατικά για την τέλεια ανακατασκευή της εικόνας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μηχανισμός ενίσχυσης δεν παραβιάζει τη διατήρηση της ενέργειας αφού τα αποσβεννύμενα κύματα δεν μεταφέρουν ενέργεια όπως επισημαίνεται από τον Pendry [211]. Σε αυτή την περίπτωση, οι συζεύξεις με οριοθετημένες λειτουργίες παίζουν το ρόλο του μηχανισμού ενίσχυσης.

Αυτές οι λειτουργίες μπορούν να μελετηθούν μέσω προσομοίωσης με πεπερασμένες διαφορές στο πεδίο του χρόνου (FDTD), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7. Αν κοιτάξουμε το διάγραμμα διασποράς σε κατεύθυνση παράλληλη με τη διασύνδεση νερού / φακού (δηλαδή στην κατεύθυνση ΓΚ της πρώτης ζώνης Brillouin των φωνονικών κρυστάλλων), βλέπουμε έναν αριθμό κλάδων που αντιστοιχούν σε κύματα των οποίων η μετατόπιση περιορίζεται στον φωνονικό κρύσταλλο ή στην επιφάνεια της πλάκας. Ειδικότερα, στη συχνότητα λειτουργίας 544 kHz, μερικοί σχεδόν οριζόντιοι κλάδοι εκτείνονται έξω από τον κώνο διασποράς του νερού. Αυτές οι λειτουργίες είναι πιθανό να συζευχθούν με κυματοδιανύσματα έξω από τον κώνο, σε αυτή τη συχνότητα, σύμφωνα με το σχήμα που περιγράφεται από τους Luo κ.ά [218].



Εικόνα 2.7 . Διάγραμμα δομής ζώνης ολόκληρης της πλάκας φωνονικού κρυστάλλου και συστήματος νερού, σε κατεύθυνση παράλληλη με την επιφάνεια του φακού (μετά από υπολογισμό FDTD [214]). Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα ηχητικό ρυθμό που διαδίδεται είτε στη φωνονική πλάκα κρυστάλλου είτε στη διασύνδεση νερού / πλάκας. Η συχνότητα λειτουργίας (544 kHz) υποδεικνύεται ως οριζόντια διακεκομμένη γραμμή. Οι ευθείες διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν τη σχέση διασποράς του νερού. Το εύρος του άξονα x έχει μεγαλώσει ως την πρώτη ζώνη Brillouin Γ του τριγωνικού πλέγματος.

2.12. Τα συμπεράσματα από τα προηγούμενα

Η ακουστική αποτελεί έναν από τους παλαιότερους κλάδους της επιστημονικής έρευνας. Η ισχυρή της αναβίωση κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες ήταν μια πολύ ευχάριστη εμπειρία για πολλούς ερευνητές στον τομέα αυτό. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να δώσουμε ένα στίγμα σε ορισμένες από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουμε μια επισκόπηση στις διαφορετικές προεκτάσεις του ζητήματος της δυναμικής πυκνότητας μάζας, που περιλαμβάνει τόσο τις εκδηλώσεις των ακουστικών μεταϋλικών όσο και την ενεργό πυκνότητα μάζας (effective mass density) του μείγματος υγρού-στερεού, στο όριο μηδενικής συχνότητας. Η σύνδεση με την αντισυντονιστική συμπεριφορά (antiresonance behavior) τονίζεται και διαλευκαίνεται, ειδικά σε σχέση με τα ακουστικά μεταϋλικά τύπου μεμβράνης. Περιλαμβάνεται επίσης μια σύντομη ανασκόπηση άλλων τύπων ακουστικών μεταϋλικών. Σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά μεταϋλικά, ο ρόλος των απωλειών (dissipation) είναι μηδαμινός για τα ακουστικά μεταϋλικά, τουλάχιστον στο όριο των χαμηλών συχνοτήτων. Δεδομένου ότι η παρουσία των απωλειών είναι αναπόφευκτη, η θεώρηση της, ενώ ακόμη βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, μπορεί να γίνει πιο σημαντική στο μέλλον. Ένα άλλο ζήτημα είναι ο ρόλος των αποσβεννύμενων κυμάτων, τα οποία αναμένεται να διαδραματίσουν όλο και σημαντικότερο ρόλο στην μετασχηματιστική ακουστική (transformational acoustics), όπως και στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών μεταϋλικών. Ωστόσο, σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική περίπτωση, η ελαστικότητα των σύνθετων στερεών (solid composites) έχει περισσότερες παραμέτρους και ως εκ τούτου μπορεί να αναμένεται να παρουσιάσει μια πολύ πιο πλούσια ποικιλία συμπεριφορών. Ένα παράδειγμα αυτής της κατεύθυνσης είναι το πρόσφατο έργο για υβριδικά ελαστικά στερεά. Πιθανές εφαρμογές των ακουστικών μεταϋλικών θα ήταν αναμφισβήτητα η θεώρηση των μελλοντικών εξελίξεων στον τομέα αυτό. Η επιδίωξη ενός τέτοιου αξιολογικού στόχου μπορεί όχι μόνο να ανοίξει νέα θέματα για τη βασική έρευνα, αλλά μπορεί επίσης να επηρεάσει εκείνα τα επιστημονικά πεδία (disciplines) που σχετίζονται παραδοσιακά με την ακουστική - όπως η αρχιτεκτονική, η ηχορύπανση, οι ιατρικοί υπέρηχοι, η ακουστική απεικόνιση κλπ.

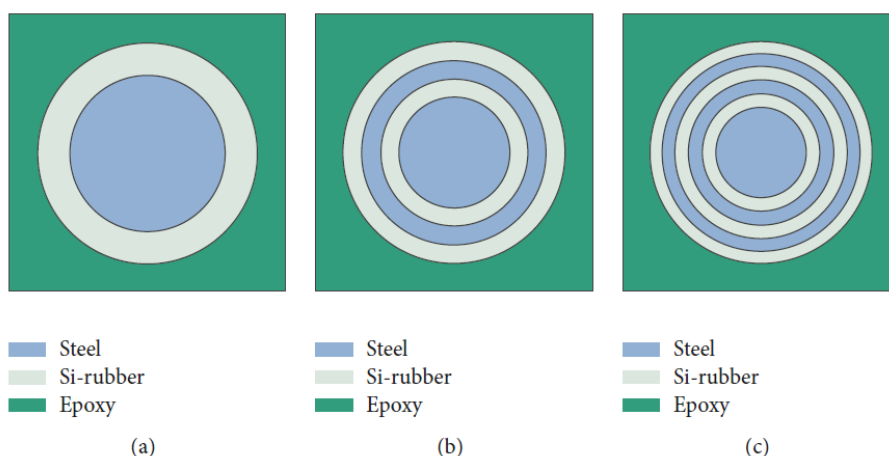
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Εφαρμογές

3.1. Διερεύνηση της ζώνης διακένου και των αρνητικών ιδιοτήτων ενός ακουστικού μεταυλικού με ομόκεντρους δακτυλίους.

Σε αυτή τη ενότητα, εξετάζεται ένα σύστημα πολλαπλών ταλαντωτών (multi-oscillator system) για τις ακουστικές του ιδιότητες, εισάγοντας ένα σύστημα μεταυλικών με δομή ομόκεντρων δακτυλίων. Το σύστημα των πολλαπλών ταλαντωτών που ερευνηθήκε δημιουργήθηκε με την εισαγωγή πολλαπλών συντονιστών (resonators) σε ένα κύτταρο μονάδας και παρήγαγε νέες μορφές συντονισμού, μέσω της αμοιβαίας σύζευξης (mutual coupling) μεταξύ των ταλαντωτών, για τον έλεγχο των ακουστικών ιδιοτήτων [224,225]. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι σε σύγκριση με τα συστήματα με ένα ταλαντωτή, τα συστήματα ακουστικών μεταυλικών πολλαπλών ταλαντωτών διευκολύνουν την εγκαθίδρυση μεγαλύτερου εύρους ζώνης [226]. Ωστόσο, λόγω της πολύπλοκης δομής του συστήματος των πολλαπλών ταλαντωτών, είναι μια μάλλον δύσκολη προσπάθεια να καθοριστεί πλήρως ο μηχανισμός δημιουργίας των ακουστικών ιδιοτήτων του. Η δομή ομόκεντρων δακτυλίων στο δοκιμαστικό μας σύστημα, σχεδιάστηκε με την εισαγωγή μίας σειράς ομοαξονικών συντονιστών (coaxial resonators), δηλ., ενός τυπικού συστήματος πολλαπλών ταλαντωτών. Η δομή αυτή είναι σχετικά απλή και χαρακτηρίζεται από ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των ταλαντωτών. Ο αριθμός των ταλαντωτών μπορεί να ελεγχθεί ελεύθερα, προσαρμόζοντας τον αριθμό των στρώσεων των σκεδαστών. Αυτή η δομή αποδείχθηκε ιδανική για τη διερεύνηση των ακουστικών ιδιοτήτων του συστήματος πολλαπλών ταλαντωτών. Μια αλληλουχία ομόκεντρων κυκλικών δακτυλίων με εναλλασσόμενες ιδιότητες, που χρησιμοποιούνται ως ίνες Bragg, διερευνήθηκε ευρέως σε φωτονικούς κρυστάλλους [227,228] και πρόσφατα οι ερευνητές διεξήγαγαν προκαταρκτικές μελέτες για τα ακουστικά μεταύλικά που είναι διατεταγμένα σε ομόκεντρους δακτυλίους, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηχητικά φίλτρα. Για παράδειγμα, ο Larabi κ.α. μελέτησαν την δομή συστημάτων ομόκεντρων δακτυλίων με νερό ως μήτρα, εστιάζοντας στον τρόπο με τον οποίο η απόκριση μετάδοσης μεταβάλλεται με τον αριθμό των ταλαντωτών και διαπίστωσαν ότι στην καμπύλη απόκρισης της μετάδοσης αυξάνεται ο αριθμός των κορυφών εξασθένησης, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ταλαντωτών [229]. Οι Torrent και Sanchez-Dehesa κατασκεύασαν το ακουστικό μεταύλικο με ακτινικά περιοδική δομή και ανέπτυξαν μια νέα τάξη δομών που ονομάζονται κρύσταλλοι ακτινικών κυμάτων [230]. Μεταγενέστερα, οι

δομές ζώνης χαμηλών συχνοτήτων, δισδιάστατων (2D) φωνονικών κρυστάλλων σχήματος τόξου, μελετήθηκαν με τη μέθοδο της μήτρας μεταφοράς [231]. Ο Zhou και ο Chen εισήγαγαν ηλεκτροροεολογικά (electrorheological) ρευστά σε ομόκεντρους δακτυλίους (που θεωρήθηκαν ως ένα μαλακό στρώμα στο σύστημα) και απέδειξαν ότι η δομή διπλού ταλαντωτή έχει περισσότερα διάκενα ζώνης από τη δομή ενός μονού ταλαντωτή [232]. Βασικά, η δομή ομόκεντρων δακτυλίων είναι ένα τυπικό σύστημα πολλαπλών ταλαντωντών, του οποίου ενισχύονται οι ακουστικές ιδιότητες. Οι μελέτες σε αυτό το θέμα επικεντρώθηκαν κυρίως στα χαρακτηριστικά μετάδοσης ή στα διάκενα ζώνης, ενώ αγνόησαν τις ενεργές παραμέτρους του μέσου (effective medium parameters). Στην προσπάθεια επίλυσης αυτού του προβλήματος, εξετάστηκαν τα ακουστικά χαρακτηριστικά της δοκιμαστικής δομής ομόκεντρων δακτυλίων μέσω αριθμητικού υπολογισμού. Δομές ομόκεντρων δακτυλίων σχεδιάστηκαν για να κατασκευάσουν συστήματα ακουστικών μεταύλικών δύο διαστάσεων μονού ταλαντωτή, διπλού ταλαντωτή και τριπλού ταλαντωτή και οι ιδιότητες καθενός αναλύθηκαν διεξοδικά με αριθμητική ανάλυση και σύγκριση των αντίστοιχων δομών ζώνης, των χαρακτηριστικών μετάδοσης, των ενεργών παραμέτρων του μέσου (effective medium parameters) και άλλων αναγκαίων παραγόντων. Διαπιστώθηκε ότι καθώς ο αριθμός των ταλαντωτών αυξάνεται, αυξάνεται επίσης και ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας των δονήσεων του συστήματος. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των ταλαντωτών σε μία πλειάδα συχνοτήτων προκάλεσε αρνητική ενεργό πυκνότητα μάζας, ενώ το μέτρο (modulus) παρέμεινε θετικό. Σύμφωνα με το μέτρο (modulus), τα κύματα σε αυτές τις συχνότητες δεν ήταν ικανά να διαδοθούν και έτσι ο αριθμός των ακουστικών / ελαστικών κυματικών ζωνών (acoustic/elastic wave bands) αυξήθηκε σημαντικά.



Εικόνα 3.1 Τομή δισδιάστατων ακουστικών μεταύλικών σε δομή μονού, διπλού και τριπλού σκεδαστή a,b,c αντίστοιχα

Ελέγχοντας τη δομή του σκεδαστή δημιουργείται μια σειρά από διαφορετικά δισδιάστατα συστήματα ακουστικών μεταύλικών: ένα με

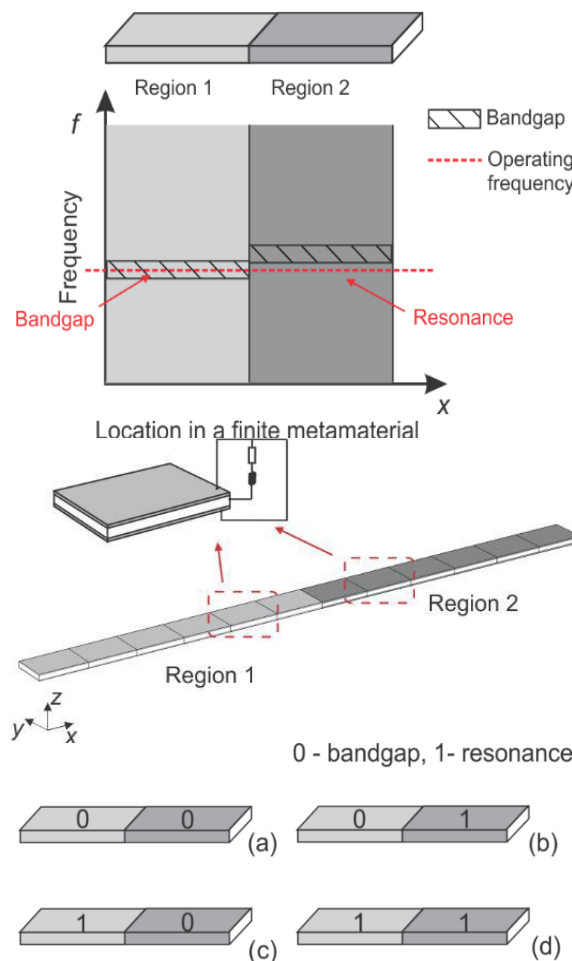
ένα ταλαντωτή αποτελούμενο από μια πεπερασμένη χαλύβδινη ράβδο που περιβάλλεται από ένα στρώμα πυριτίου - καουτσούκ (Si -rubber), περιβεβλημένο, από ρητίνη (εικόνα 3.1a), ένα με δύο ταλαντωτές αποτελούμενο από δύο ομόκεντρες κυλινδρικές χαλύβδινες ράβδους και ανάμεσα και γύρω τους στρώμα πυριτίου - καουτσούκ καλυμμένα όλα αυτά με ρητίνη εικόνα 3.1b και από ένα με τρεις ταλαντωτές, όπου η δομή του είναι ίδια με το σύστημα με δύο ταλαντωτές, περιλαμβάνοντας μια χαλύβδινη ράβδο και μια ακόμη στρώση πυριτίου - καουτσούκ (εικόνα 3.1c), αντίστοιχα. Η μοναδική ακουστική απόδοση κάθε συστήματος παρατηρείται και αναλύεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και διαπιστώνεται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ταλαντωτών αυξάνεται και ο αριθμός των διακένων ζώνης και επίσης αυξάνεται σταδιακά η αρχική συχνότητα της πρώτης ζώνης διακένου .

Έπειτα διευκρινίζεται ο φυσικός μηχανισμός της ζώνης διακένου εξετάζοντας τους ρυθμούς δόνησης και τις ενεργές παραμέτρους σε κάθε σύστημα. Όσον αφορά τα μοντέλα μονού, διπλού και τριπλού ταλαντωτή, όλοι οι διπολικοί συντονισμοί του σκεδαστή προκαλούν αρνητική ενεργό πυκνότητα μάζας, προκαλώντας αποσβεννύμενα κύματα συμπίεσης (evanescent compression waves) και διατμητικά κύματα (shear waves), τα οποία σχηματίζουν ζώνες διακένου.

Επιπλέον, καθώς ο αριθμός των ταλαντωτών αυξάνεται, υπάρχουν σχετικές κινήσεις μεταξύ των ταλαντωτών, που δημιουργούν το φαινόμενο σύζευξης (coupling effect), προκαλώντας αύξηση των ρυθμών διπολικού συντονισμού (dipolar resonance modes) και δημιουργούν περισσότερες περιοχές συχνοτήτων αρνητικής ενεργού πυκνότητας μάζας (negative effective mass density frequency ranges), αυξάνοντας έτσι περαιτέρω τον αριθμό των διακένων ζώνης. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης παρέχουν πολύτιμη αναφορά για το σχεδιασμό ακουστικών μεταύλικών και ακουστικών συσκευών στο μέλλον.

3.2. Συνήθης σχηματισμός των ρυθμών ταλάντωσης από την σύνθεση ακουστικού μεταύλικού. (Customized Shaping of Vibration Modes by Acoustic Metamaterial Synthesis).

Στην εργασία τους οι Jiawen Xu κ.α.[233] μελέτησαν τον χειρισμό ενός στάσιμου κύματος για τη διαμόρφωση των ρυθμών ταλάντωσης μιας δομής δέσμης, ενσωματώνοντας περιοδικά διατεταγμένα πιεζοηλεκτρικά κύτταρα - μονάδες με επαγωγικά κυκλώματα (inductive circuits), για να σχηματιστεί μια δέσμη μεταύλικού πεπερασμένου μήκους (εικόνα 3.2).



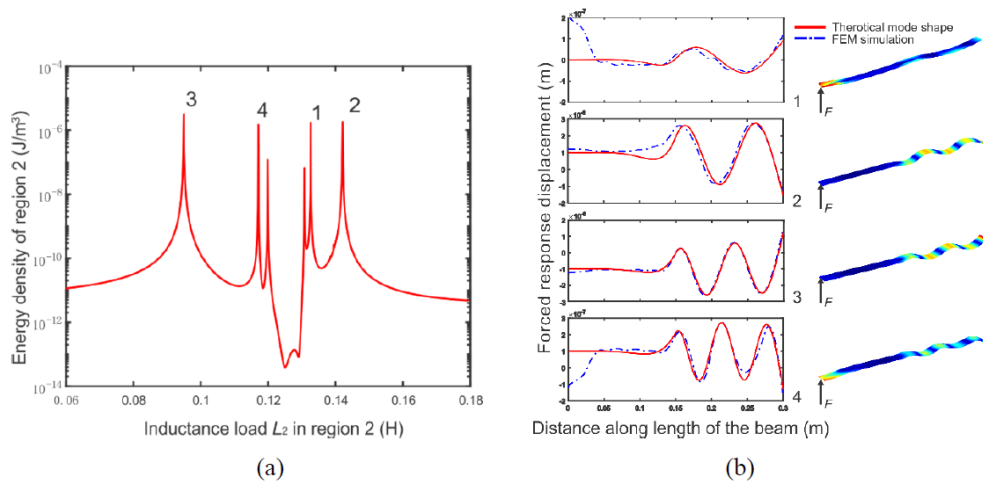
Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση πιεζοηλεκτρικού κυττάρου και των τεσσάρων περιπτώσεων των περιοχών συντονισμού

Αυτό αποδεικνύεται από την αναλυτική επεξεργασία των ρυθμών (analytical modal analysis) και την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, όπου κάτω από την δεδομένη συχνότητα λειτουργίας ενδιαφέροντος μπορεί κανείς να ορίσει το σχεδιασμό του μεταύλικού, έτσι ώστε αυτή η συχνότητα να γίνει μια φυσική συχνότητα ολόκληρου του συστήματος και ο αντίστοιχος ρυθμός ταλάντωσης να μπορεί να προσαρμοστεί και να διαμορφωθεί. Ο υποκείμενος

μηχανισμός αυτού του ρυθμού διαμόρφωσης είναι ο συνδυασμός του χαρακτηριστικού της ζώνης διακένου και του χαρακτηριστικού ενεργού συντονισμού της κοιλότητας (effective resonant cavity feature). Με σωστή επιλογή των τιμών επαγωγής των κυκλωμάτων διακλάδωσης στη συχνότητα λειτουργίας, μπορούν να δονηθούν σε διαφορετικές περιοχές της δέσμης, είτε εντός του κενού ζώνης είτε να ενισχύσουν την απόκριση που οφείλεται στο φαινόμενο του συντονισμού της κοιλότητας (resonant cavity effect).

Το πιεζοηλεκτρικό μεταλλικό έχει το μεγάλο πλεονέκτημα να είναι προσαρμοστικό. Έτσι όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2, το '1' αναφέρεται στην περιοχή σε κατάσταση ενεργού συντονισμού της κοιλότητας και με ενισχυμένη μετατόπιση, και το '0' αναφέρεται στην περιοχή της ζώνης διακένου με εξασθένιση της δόνησης. Δεδομένου ότι η πλάκα του μεταλλικού χωρίζεται σε δύο περιοχές, εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις για την αντιστοίχιση του συντονισμού, που υποδεικνύονται ως 0-1, 0-0, 1-0 και 1-1 αντίστοιχα.

Στις εικόνες 3.3a.b μπορεί κανείς να διακρίνει για την περίπτωση 0-1, εναλλάσσοντας την αυτεπαγωγή L_2 στην συχνότητα των 2885Hz, τις αποκρίσεις της πυκνότητας μηχανικής ενέργειας. Οι αποκρίσεις αφού πρώτα περάσουν χωρίς να ενισχυθούν από την περιοχή 1, ενισχύονται εσωτερικά στην περιοχή 2 και λαμβάνονται από αυτήν (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.3: Εξαναγκασμένες αποκρίσεις για την περίπτωση 0-1 στα 2885Hz
 α) Απόκριση αλλάζοντας τιμές της αυτεπαγωγής (inductance) L_2
 β) Αποκρίσεις μετατοπίσεων στις σημειωμένες κορυφές

Αυτή η στρατηγική σχεδίασης είναι θεμελιωδώς διαφορετική από τις υπάρχουσες τεχνικές διαμόρφωσης ρυθμών (mode shaping techniques) που βασίζονται κυρίως στην ανάλυση αντίστροφων ιδιοτιμών (inverse eigenvalue analysis) η οποία χρησιμοποιεί την τροποποίηση γεωμετρίας ή τον έλεγχο ανατροφοδότησης (feedback control) με πολλούς ενεργοποιητές και γενικά αποδίδει πολύ βελτιωμένη απόδοση. Στην [233] παρουσιάζονται έλεγχοι υποθέσεων για την απεικόνιση της προσαρμοστικότητας της προτεινόμενης τεχνικής διαμορφώσεως των δονήσεων. Αυτή η προσαρμοσμένη τεχνική διαμόρφωσης έχει τη δυνατότητα να επεκταθεί και σε άλλους

τύπους μεταϋλικών, συμπεριλαμβανομένου του μεταϋλικού τύπου μάζας σε μάζα (mass-in-mass) και των φωνονικών κρυστάλλων που βασίζονται στη σκέδαση Bragg. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας έχει πιθανές εφαρμογές στην καταστολή των δονήσεων, την ενίσχυση της ανίχνευσης και τη συλλογή της ενέργειας.

3.3.Σχεδίαση ακουστικού υπερφακού με χρήση μονοφασικών μεταϋλικών με δομή πλέγματος αστέρα (Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure)

Η επίτευξη υψηλής ανάλυσης στην υπερ-εστίαση του ήχου (high-resolution super focusing of sound) αποτελεί μια μακρόχρονη πρόκληση. Το κρίσιμο ζήτημα είναι η εύρεση των απεικονιστικών κέντρων υψηλής ανάλυσης (super-resolution imaging centers), όσον αφορά τον τρόπο ανίχνευσης των αποσβεννύμενων κυμάτων [33] και αυτό το πρόβλημα έχει βελτιωθεί σημαντικά από την πρόσφατη ανάπτυξη των ακουστικών μεταϋλικών [160,170,234,235]. Τα ακουστικά μεταϋλικά σχεδιάζονται συνήθως με σύνθετο τρόπο, μέσω συντονιστών υποκυματικής κλίμακας (subwavelength-scale resonant), για την παραγωγή εξωτικών φυσικών ιδιοτήτων μέσω αρνητικών συντελεστών όγκου [199,236] και αρνητικής πυκνότητας μάζας [237,238].

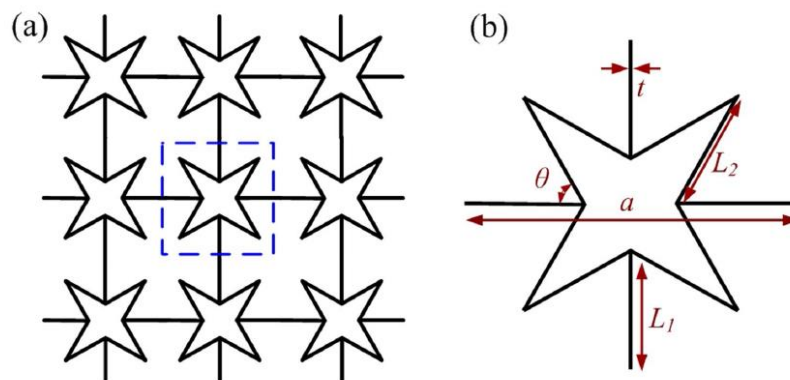
Αυτές οι ιδιότητες επιτρέπουν στην εστίαση του ήχου να ξεπεράσει το όριο περίθλασης, ανάλογα με τις αρνητικές διαθλάσεις και τις επιφανειακές καταστάσεις (surface states) [234]. Με βάση την προσέγγιση της απεικόνισης με υπερανάλυση που προσφέρεται από τα μεταϋλικά [33], αναπτύχθηκε μια σειρά υπερ-φακών χρησιμοποιώντας μια ποικιλία ακουστικών μεταϋλικών με ιδιότητες διπλής-αρνητικότητας (double-negative), μονής-αρνητικότητας (single-negative) ή με σχεδόν μηδενική μάζα (near-zero mass) .

Ωστόσο, η δομή τους είναι συνήθως περίπλοκη και ογκώδης, λόγω της ανάγκης κατασκευής των μονάδων συντονισμού. Ο σχεδιασμός των υπερ-φακών θα μπορούσε συνεπώς να ωφεληθεί σημαντικά από την εισαγωγή μιας νέας, απλής και ελαφριάς δομής συντονισμού. Η παραδοσιακή δομή συντονισμού των ακουστικών μεταϋλικών που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό ενός υπέρ-φακού μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις τύπους: στους συντονιστές Helmholtz (Helmholtz resonators), στους συντονιστές τριών υλικών, στα τρυπητά μεταϋλικά και στις δομές συσσωρευμένης μάζας (lumped mass structures) . Οι συντονιστές Helmholtz, οι οποίοι συνήθως εμφανίζουν αρνητικό συντελεστή όγκου (negative modulus), χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην ενδεδειγμένη μελέτη ενός υπερφακού και σχεδιάστηκαν ως ένα επίπεδο δίκτυο (planar network) για να εστιάσουν υπερήχους στο νερό. Ακολούθως, ο σχεδιασμός ενός υπερφακού με αρνητική ενεργό μάζα (negative effective mass) προτάθηκε βασισμένος σε ένα

μεταϋλικό τριών συστατικών, κατασκευασμένο από χρυσές σφαίρες επικαλυμμένες με καουτσούκ και εμβαπτισμένες σε εποξική ρητίνη.

Ομοίως, παράχθηκε ένας φακός στερεού (solid lens) με υβριδικούς συντονιστές (hybrid resonators), ο οποίος εμφάνισε αρνητικούς δείκτες διάθλασης για να εστιάσει τα κύματα. Έχουν προταθεί τρυπητά μεταϋλικά (Holey-structure metamaterials) απαρτιζόμενα από μεταλλικές πλάκες με οπές, για την επίτευξη απεικόνισης υψηλής ανάλυσης οφειλόμενης στον συντονισμό Fabry-Pérot (FP).

Ωστόσο, συνήθως απαιτείται το πάχος του φακού να είναι ίσο με ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος, για να ικανοποιήσει την συνθήκη συντονισμού FP. Τέλος, δομές συσσωρευμένης μάζας, όπως μια διάτρητη πλάκα (perforated slab), δομές τύπου σωλήνα (pillar structures), ή δομές βασισμένες σε μεμβράνες (membrane-based structures), συνήθως αποτελούνται από μεγάλα κομμάτια στερεού υλικού συνδεδεμένα με μικρούς ή μαλακούς συνδέσμους, και μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να λειτουργούν ως υπερφακοί, λόγω των αρνητικών τους ιδιοτήτων.



Εικόνα 3.4:α) Κατασκευαστική δομή β) δομή κυττάρου αστέρα τεσσάρων σημείων

Οι παραπάνω δομές είναι πολύ πολύπλοκες για χρήση και συχνά απαιτούν τη χρησιμοποίηση πολυφασικών υλικών (multiphase materials). Οι αλυσιδωτές δομές (lattice structures), που αποτελούνται από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο ελαστικών δοκών (interconnected network of elastic beams), για παράδειγμα το πλέγμα Kagome, το πλέγμα επανεισόδου (re-entrant grid) και οι δομές πλέγματος ζιγκ-ζαγκ (zigzag lattices) χρησιμοποιούνται ευρέως σε αυτόνομες διαμορφώσεις (standalone configurations), λόγω της απλής κατασκευής και της χαμηλής πυκνότητάς τους.

Από την άποψη των κυματικών χαρακτηριστικών τους έχουν άφθονους συντονιστές κάμψης (bending resonators), που σχηματίζουν ευκολότερα ένα διάκενο ζώνης χαμηλής συχνότητας και παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες. Από την άποψη αυτή αποτελούν τις ιδανικές δομές για το σχεδιασμό νέων ελαφρών υπερφακών, ωστόσο οι περισσότερες από τις τρέχουσες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο διάκενο ζώνης των δομών πλέγματος.

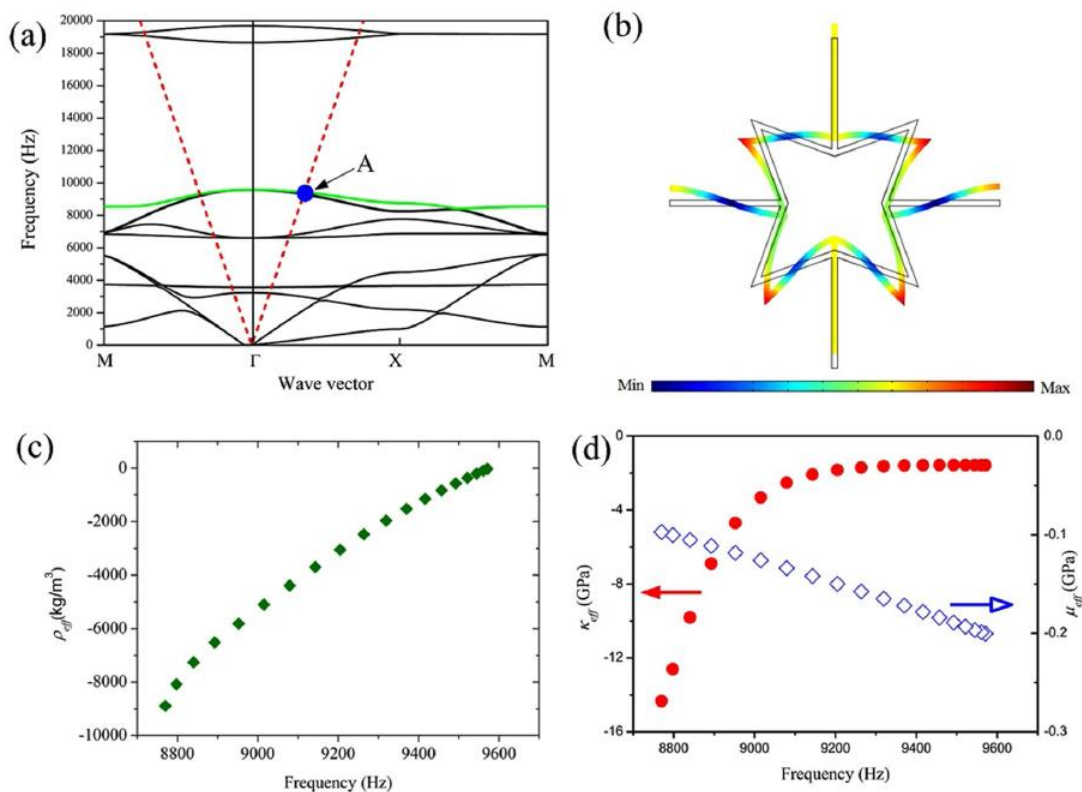
Στο άρθρο [239] χρησιμοποιήθηκε μια δομή πλέγματος, σχήματος

αστέρα τεσσάρων γωνιών (εικόνα 3.4a), για να σχεδιαστεί ένα στερεός υπέρ-φακός (solid super-lens) για χρήση στο νερό, λόγω της μονοφασικής και ελαφριάς του κατασκευής.

Αυτή η δομή είναι ένα απλό τετραγωνικό πλέγμα με στοιχειώδη κύτταρα-μονάδες τετραγωνικής μορφής, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4b και αποτελείται από τέσσερις αμφίδρομες (re-entrant) γωνίες με πλευρές ίσου μήκους L_2 , οι οποίες είναι συμμετρικά διατεταγμένες και ενωμένες με τέσσερις ευθείες δοκούς (straight beams) ίσου μήκους L_1 και πάχους t .

Η δομή ζώνης κατά μήκος της διαδρομής ΜΓΧΜ της ζώνης Brillouin του απλού τετραγωνικού πλέγματος (εικόνα 3.5a) δείχνει δύο διάκενα ζώνης χαμηλής συχνότητας, στα 5591-6610 Hz και 9574-18653 Hz. Στην εικόνα 3.5b φαίνεται η κατανομή της μετατόπισης (displacement) του στοιχειώδους κυττάρου μονάδας, συναρτήσει του ιδιορυθμού (eigenmode) 'A', (εικόνα 3.5a).

Τόσο η ενεργός πυκνότητα μάζας όσο και το μέτρο του όγκου κλάδου κατά μήκος της κατεύθυνσης ΓΧ, όπως φαίνονται στις εικόνες 3.5 (c) και (d), αντίστοιχα, δείχνουν ότι η ενεργός πυκνότητα ρ_{eff} , ο ενεργός συντελεστής όγκου k_{eff} (bulk modulus) και το ενεργό μέτρο διάτμησης μ_{eff} (shear modulus) είναι όλα αρνητικά σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων.



Εικόνα 3.5 a) Δομή ζώνης ενός μεταύλικού τεσσάρων σημείων σχήματος αστέρα (συνεχείς γραμμές) και καμπύλες διασποράς νερού (διακεκομμένες κόκκινες γραμμές) b) Κατανομές μετατόπισης του κυττάρου μονάδας αντιστοιχιζόμενες στην ιδιοκατάσταση (eigenstate) σημειωμένη ως A στην a εικόνα, c,d) υπολογισμός ενεργών πυκνοτήτων μάζας και όγκου συναρτήσει της συχνότητας.

3.4.Ο μηχανισμός εξασθένησης κύματος του μεταϋλικού με περιοδικούς τοπικούς συντονιστές (The wave attenuation mechanism of the periodic local resonant metamaterial).

Οι I-Ling Chang κ.α. [240] μελέτησαν αριθμητικά τη συμπεριφορά της διάδοσης κύματος μέσα σε ελαστικό μεταϋλικό με υποδομή από περιοδικούς τοπικούς συντονιστές (periodic local resonant sub-structure). Από την μελέτη προέκυψαν οι ισοδύναμες δυναμικές ιδιότητες του συστήματος με ένα μόνο συντονιστή, οι οποίες βρέθηκαν να εξαρτώνται από τη συχνότητα.

Εξέτασαν αν το διάκενο ζώνης συμπίπτει πάντα με το φάσμα συχνοτήτων των αρνητικών ενεργών ιδιοτήτων (negative effective properties). Από την ανάλυση αποσαφηνίσθηκε ότι όταν η συχνότητα αποκοπής, η οποία συμπίπτει με την μεγαλύτερη συχνότητα διάδοσης της κύριας δομής, ήταν μικρότερη από αυτήν του τοπικού συντονιστή (local resonator) της υποδομής (sub-structure), το διάκενο ζώνης δεν υπερκαλύπτεται πλήρως με το εύρος συχνοτήτων των αρνητικών ενεργών ιδιοτήτων (frequency range of negative effective properties). Ο μηχανισμός εξασθένησης του κύματος και η χαρακτηριστική δυναμική συμπεριφορά του ακουστικού μεταϋλικού εξετάστηκαν σε τρεις αντιπροσωπευτικές συχνότητες, δηλ., στη ζώνη διέλευσης, στο διάκενο ζώνης με θετικές ενεργές ιδιότητες και στο διάκενο ζώνης με αρνητικές ενεργές ιδιότητες, χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

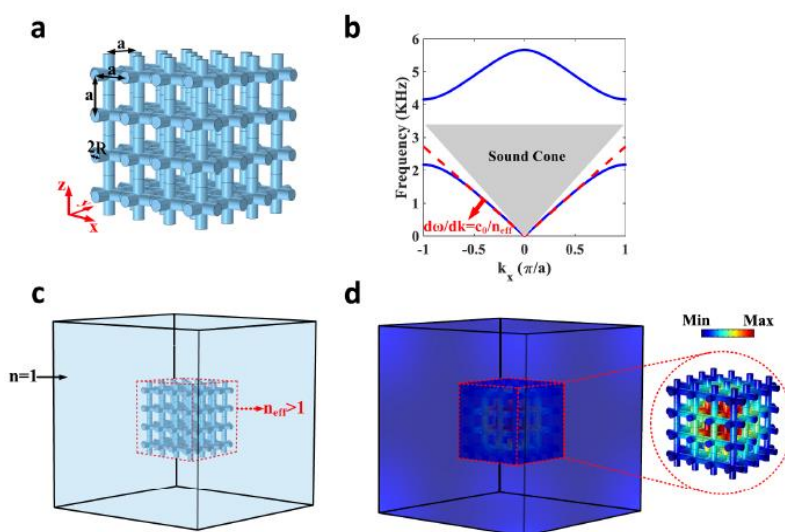
Παρατήρηθηκε από τη χρονική μετατόπιση (temporal displacement) και το έργο που παρήχθη, ότι οι μηχανισμοί εξασθένησης κύματος για τη συχνότητα με αρνητικές και θετικές ενεργές ιδιότητες οφειλόταν στον συντονισμό της υποδομής (sub-structure resonance) και στη σκέδαση Bragg της κύριας δομής, αντίστοιχα. Το συνολικό έργο που παρήχθη κυριαρχήθηκε κυρίως από την κύρια δομή για τη σκέδαση Bragg και το συνολικό έργο αθροιστικά ήταν αρνητικό, γεγονός που έδειξε ότι οι κινητικές ενέργειες του συστήματος θα μειώνονταν με το χρόνο και το κύμα δεν θα μπορούσε να διαδοθεί.

Έτσι, το διάκενο ζώνης του περιοδικού τοπικού συντονιστή του μεταϋλικού καθίσταται πολύ ευρύτερο εάν είναι ένας συζευγμένος συντονιστής Bragg από αυτόν τον τοπικό συντονιστή με στενή ζώνη υποδομής (the narrowbanded local resonance of the sub-structure). Η ανάλυση που παρουσίασαν μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες μορφές ακουστικών μεταϋλικών, όπως οι ακτίνες ή οι πλάκες που περιλαμβάνουν περιοδικούς συντονιστές, καθόσον τα ευρήματα τους ανοίγουν το δρόμο για πολλές πιθανές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου του αποκλεισμού κύματος και του φιλτραρίσματος.

3.5.Συσκευές υψηλού δείκτη οπτικής κυματοδηγησης (High index optical waveguide devices).

Οι συσκευές υψηλού δείκτη οπτικής κυματοδηγησης, όπως κυματοδηγοί πλάκας, κυματοδηγοί ταινίας και ινών, παίζουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα σύγχρονων εφαρμογών, όπως οι τηλεπικοινωνίες, η ανίχνευση (sensing), το λέιζερ (lasing), η συμβολομετρία (interferometry) και η ενίσχυση συντονισμού (resonant amplification). Ωστόσο, η μεταφορά αυτών των πλεονεκτικών εφαρμογών από την οπτική στην ακουστική παραμένει μια θεμελιώδης πρακτική πρόκληση, καθώς τα περισσότερα υλικά εμφανίζουν δείκτες διάθλασης χαμηλότερους από εκείνους του αέρα για ηχητικά κύματα. Στην εργασία τους οι Zangeneh κ.α. [243] έδειξαν τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά τη συνάφεια των μη συντονιζόμενων ακουστικών μεταύλικών (non-resonant acoustic metamaterials) για την αντιμετώπιση αυτού του κεντρικού προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, θεώρησαν ένα μεταύλικό που κατασκευάζεται από υποκυματικούς ακουστικούς σωλήνες γεμισμένους με αέρα (subwavelength air-filled acoustic pipes), σχεδιασμένους ώστε να παρουσιάζουν αποτελεσματικά υψηλότερο δείκτη διάθλασης από τον ομοιογενή αέρα, [εικόνες 3.6(a-d)].

Έδειξαν ότι ένα τέτοιο μέσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιληφθούμε τα ακουστικά ισοδύναμα κυματοδηγών διηλεκτρικής πλάκας (dielectric slab) ή ταινίας (strip) και οπτικών ινών. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς ακουστικούς σωλήνες, η προσέγγιση τους επιτρέπει στον κυματοδηγό να εξαρτάται από το εξωτερικό μέσο, γεγονός που ανοίγει μια πληθώρα νέων ευκαιριών στη διαχείριση θορύβου, την ιατρική απεικόνιση, στα υποβρύχια συστήματα επικοινωνίας και την ανίχνευση.

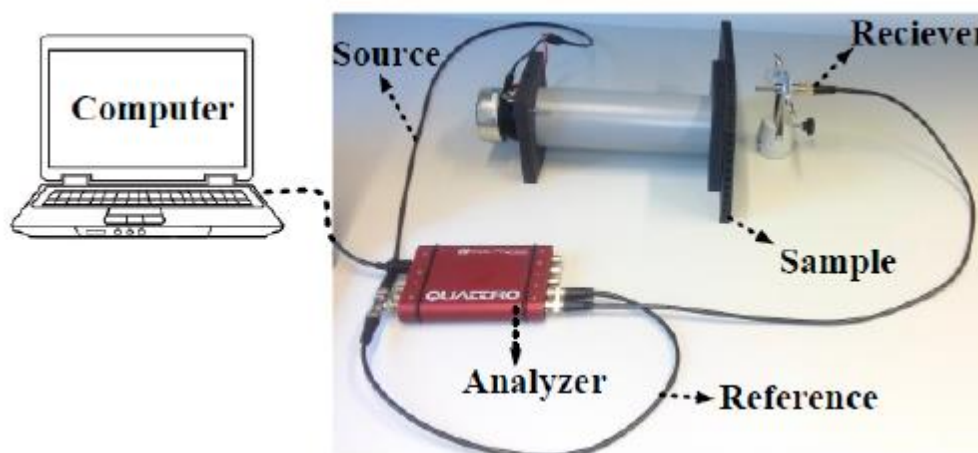


Εικόνα 3.6: Ανοικτές ακουστικές κοιλότητες υψηλού δείκτη διάθλασης. a) Τρισδιάστατη γενίκευση του δισδιάστατου μεταύλικού: Οι ακουστικοί σωλήνες γεμισμένοι με αέρα με ακτίνες $2R = 0,3a$ είναι διατεταγμένοι σε έναν κρύσταλλο, περιοδικά και στις τρεις κατευθύνσεις. b) Συχνότητα διασποράς του κρυστάλλου για $a = 5\text{cm}$. Όπως και στη δισδιάστατη περίπτωση, η χαμηλότερη ζώνη πέφτει έξω από τον ηχητικό κώνο και μπορεί να εκτιμηθεί καλά μέσω μιας γραμμικής συνάρτησης, με κλίση που υποδηλώνει έναν ενεργό δείκτη διάθλασης υψηλό-

τερο από τον αέρα για το μέσο c) Ένα πεπερασμένο κομμάτι του μεταύλικού τοποθετημένο στον αέρα. d) Το προφίλ της λειτουργίας κοιλότητων με υψηλό ηχητικό δείκτη διάθλασης και πεπερασμένη διάρκεια ζωής.

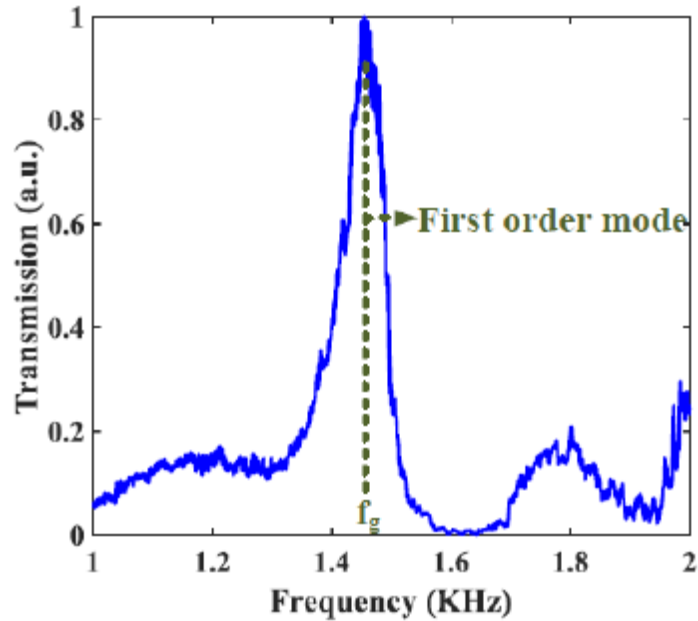
Συμπερασματικά, έδειξαν συνολικά τα ακουστικά ισοδύναμα συσκευών κυματοδηγού υψηλού οπτικού δείκτη, συμπεριλαμβανομένων κυματοδηγών πλάκας, κυματοδηγών ταινιών, ακουστικών ινών και κοιλοτήτων. Η αριθμητική προσομοίωση και οι πειραματικές τους μετρήσεις υπογράμμισαν τις αναλογίες μεταξύ αυτών των συσκευών και των οπτικών τους ισοδυνάμων.

Έτσι κατάφεραν την παραγωγή πολλών νέων συσκευών, που χρησιμοποιούν τον περιορισμό του ήχου (sound confinement) που παρέχεται από τέτοια ακουστικά υλικά με υψηλό δείκτη διάθλασης. Το παράδειγμα που χρησιμοποιούν είναι το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί ο κυματοδηγός πλάκας (slab waveguide) που παρουσίασαν για την πραγματοποίηση ενός απλού ακουστικού αισθητήρα (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Υλοποίηση της πειραματικής διάταξης του κυματοδηγού πλάκας

Οποιαδήποτε αλλαγή στις ιδιότητες του αέρα του περιβάλλοντος θα μεταβάλλει τη συχνότητα συντονισμού του ρυθμού κυματοδήγησης, που υποστηρίζεται από την πλάκα. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μετατόπιση του φάσματος εκπομπής (transmission spectrum) του δείγματος, αλλάζοντας έτσι τη συχνότητα με την οποία η μετάδοση φτάνει τη μέγιστη τιμή της (εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 : Φάσμα εκπομπής συναρτήσει της συχνότητας

Με τη χρήση αυτού του φαινομένου οι βασικές ιδιότητες του περιβάλλοντος, όπως η υγρασία ή η θερμοκρασία του, μπορούν να ανιχνευθούν και να παρακολουθούνται συνεχώς μέσω της ακουστικής συσκευής. Η ευαισθησία του αισθητήρα μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τη χρήση πιο προηγμένων σχεδιασμών που περιλαμβάνουν, για παράδειγμα συντονισμούς Fano . Το γεγονός ότι τέτοιοι κυματοδηγοί και κοιλότητες είναι εκτεθειμένοι στο εξωτερικό μέσο είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό των ευρημάτων τους, όπως για παράδειγμα η σύζευξη με την εξωτερική ροή (coupling with external flow), σε συνδυασμό με υλικά βραδύτερων κυμάτων (slower wave materials), όπως με λαβυρινθώδη ηχητικά μονοπάτια. Αυτό μπορεί να επιτρέψει την δημιουργία επόμενης γενιάς διθυρων μη αμφίδρομων ακουστικών συσκευών (two-port non-reciprocal acoustic devices) [241,242].

Η τοποθέτηση σκεδαστών μικρότερων του μήκους κύματος (subwavelength scatterers) στο κοντινό πεδίο της πλάκας μπορεί να επιτρέψει την ευρυζωνική ζεύξη (broadband coupling) του κυματοδηγούμενου ρυθμού (guided mode) με το μακρινό πεδίο, μια ενδιαφέρουσα δυνατότητα για τον έλεγχο και τη διαχείριση θορύβου. Άλλες, πολλά υποσχόμενες και ελκυστικές συσκευές για εφαρμογές επεξεργασίας σήματος, συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτών ήχου, των μη γραμμικών διακοπών, των ακουστικών πλεγμάτων, των ηχητικών απομονωτών, των φίλτρων και των διαμορφωτών, μπορούν επίσης να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας αυτούς τους κυματοδηγούς.

3.6.Ολική ακουστική απορρόφηση και ευρυζωνική απομόνωση, που επιτυγχάνεται με διπλά μηδενικά μεταϋλικά (Acoustic perfect absorption and broadband insulation achieved by double-zero metamaterials).

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά βαριά και ογκώδη ηχοαπορροφητικά υλικά, όπως οι πυκνές πλάκες και τα πορώδη υλικά, η εμφάνιση των ακουστικών μεταϋλικών προέκυψε από τις ασυνήθιστες ιδιότητες τους, που οφείλονται στους τοπικούς συντονισμούς (local resonances), και δημιουργεί νέες ιδέες για υποκυματικές δομές (subwavelength structures), σχεδιασμένες κατ' απαίτηση για τον έλεγχο του θορύβου στις χαμηλές συχνότητες.

Βασιζόμενοι στους τρόπους χειρισμού των ακουστικών κυμάτων, τα υφιστάμενα ακουστικά μεταϋλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, τα ανακλαστικά ακουστικά μεταϋλικά (reflective acoustic metamaterials) και τα ηχοαπορροφητικά ακουστικά μεταϋλικά (absorptive acoustic metamaterials). Τα πρωταρχικά ακουστικά μεταϋλικά ανήκαν κατά κύριο λόγο στα ανακλαστικά, τα οποία μπορούσαν να παρεμποδίσουν και να ανακλάσουν σχεδόν ολικά όλα τα προσπίπτοντα ηχητικά κύματα στις εκάστοτε συχνότητες εργασίας. Ο βασικός μηχανισμός αυτών των ανακλαστικών ακουστικών μεταϋλικών είναι η ανώμαλη δυναμική μάζα που προκαλείται από τον αντι-συντονισμό (anti-resonance-induced anomalous dynamic mass).

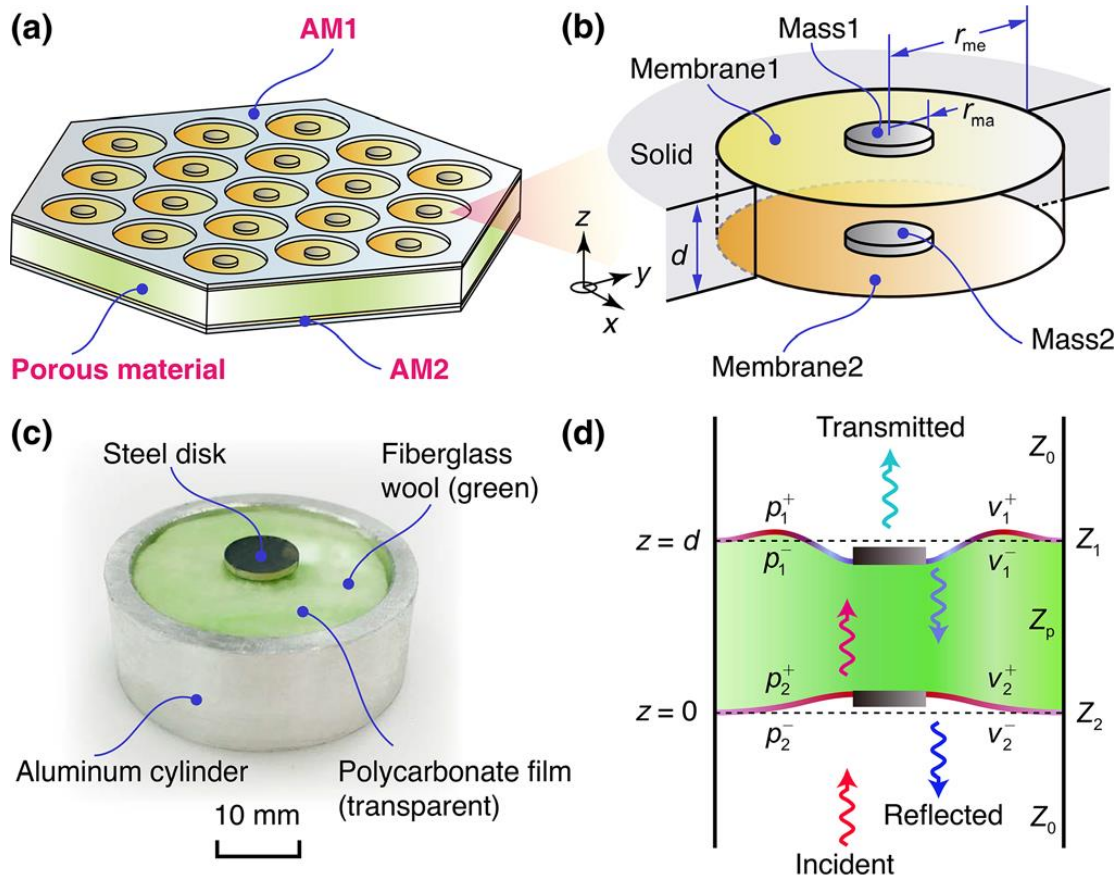
Ωστόσο, τα νεότερα ανακλαστικά ακουστικά μεταϋλικά μοιράζονται δύο σημαντικούς περιορισμούς. Πρώτον, το εύρος ζώνης της κορυφής της ολικής ανάκλασης (bandwidth of the total-reflection peak), δηλαδή το εύρος ζώνης εργασίας είναι πολύ στενό, για να απομονώνει τον ευρυζωνικό θόρυβο (broadband noise). Προτάθηκαν μερικές προσεγγίσεις, όπως π.χ. η τοποθέτηση πολλαπλών μαζών σε κάθε στοιχειώδες κύτταρο, ή η χρήση πολλαπλών στρώσεων ακουστικών μεταϋλικών, για να διευρυνθεί το εύρος ζώνης εργασίας, αυξάνοντας τον αριθμό των κορυφών ολικής ανάκλασης με διαφορετικές συχνότητες εργασίας. Ωστόσο, αυτές οι προσεγγίσεις μεγαλώνουν αναπόφευκτα τους βαθμούς ελευθερίας (degrees-of-freedom) ολόκληρου του συστήματος, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα περισσότερες κορυφές μετάδοσης συντονισμού (resonance-transmission peaks) και έτσι καταστρέφεται η απομόνωση του εύρους ζώνης (broadband insulation, BI). Δεύτερον, τα ανακλαστικά ακουστικά μεταϋλικά δεν μπορούν να υιοθετηθούν για τη μετατροπή της μεταδιδόμενης ακουστικής ενέργειας σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως π.χ. θερμότητας ή ηλεκτρισμού.

Ως εκ τούτου τα ηχοαπορροφητικά ακουστικά μεταϋλικά, τα οποία γνωρίζουν μεγαλύτερη άνθηση σε εφαρμογές μηχανικής, έχουν προσελκύσει μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τα ανακλαστικά ακουστικά μεταϋλικά. Συγκεκριμένα, οι ολικοί ακουστικοί αποσβεστήρες (acoustic perfect absorbers) σε βαθιά υποκυματική κλίμακα (deep sub-wavelength scale) είναι μεταξύ των σημερινών καυτών θεμάτων

έρευνας. Για ένα γραμμικό σύστημα απορρόφησης (linear dissipative system), η τέλεια ακουστική απορρόφηση (PA) μπορεί να επιτευχθεί όταν ικανοποιηθούν οι κρίσιμες συνθήκες σύζευξης, δηλ. δεν μεταδίδεται ενέργεια και δεν ανακλάται ενέργεια. Οι περισσότεροι από τους υπάρχοντες τέλειους ηχοαπορροφητές υποστηρίζονται από σκληρούς τοίχους για να επιτευχθεί μη-μετάδοση, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στο ελεύθερο ακουστικό πεδίο (acoustic free field) ως υλικά ή κατασκευές απορρόφησης ήχου, π.χ., πόρτες, ηχομονωτικά φράγματα (sound barriers) και σώματα οχημάτων (vehicle bodies). Ως εναλλακτική προσέγγιση, ο τέλεια σύμφωνος απορροφητής (coherent perfect absorber CPA) μπορεί να λειτουργήσει στο ελεύθερο ακουστικό πεδίο. Ωστόσο, ο τέλεια σύμφωνος απορροφητής απαιτεί ένα επιπλέον σύμφωνο κύμα αντίθετης εκπομπής, με συγκεκριμένα πλάτη και φάσεις.

Επιπλέον, για την κατανόηση της μη ανάκλασης της ακουστικής ενέργειας (non-reflection of acoustic energy) πρέπει να πληρούνται οι συνθήκες αντιστοίχισης της αντίστασης, δηλαδή η επιφανειακή ακουστική αντίσταση (surface acoustic resistance) του συστήματος απορρόφησης (dissipative system) να ισούται με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του γειτονικού μέσου και η επιφανειακή ακουστική αντίδραση πρέπει να είναι μηδενική, δηλαδή σε μια συντονισμένη κατάσταση. Ως αποτέλεσμα, η ακουστική ενέργεια παγιδεύεται γύρω από τα στοιχεία συντονισμού, όπου παράγεται τέλεια ηχομόνωση από τις εσωτερικές απώλειες (intrinsic losses). Πρόσφατα έχουν προταθεί αρκετοί τύποι μεταδομών για την επίτευξη ενός σχεδόν τέλειου αποσβεστήρα (perfect absorber) στον ανοικτό χώρο, αλλά δεν μπορούν ταυτόχρονα να έχουν αποδοτική απομόνωση όλου του εύρους ζώνης (bandwidth isolation performance).

Στην εργασία τους [244] οι Xiaole Wang κ.α. δημιούργησαν ένα πολυεπίπεδο ακουστικό μεταύλικο (LAM), με τη ένωση δύο ακουστικών μεταύλικών γεμισμένων με πορώδη υλικά. Στο πολυεπίπεδο ακουστικό μεταύλικο η συχνότητα συντονισμού του άνω ακουστικού μεταύλικού είναι συντονισμένη έτσι ώστε να είναι η ίδια με τη συχνότητα αντισυντονισμού του κάτω μεταύλικού. Στην κρίσιμη συχνότητα το πολυεπίπεδο ακουστικό μεταύλικο μπορεί να ικανοποιήσει τις συνθήκες για απόλυτη ηχομόνωση και ταυτόχρονα να αποτρέψει την μονοπολική συντονισμένη μετάδοση (monopolar-resonance transmission) των δύο ακουστικών μεταύλικών, έτσι ώστε να επιτύχει απομόνωση του εύρους ζώνης στο ακουστικό ελεύθερο πεδίο (acoustic free field).



Εικόνα 3.9:(a) Εννοιολογική άποψη μιας πρακτικής διαμόρφωσης του στρωματοποιημένου ακουστικού μεταϋλικού (LAM) που περιλαμβάνει δύο ακουστικά μεταϋλικά οριακά συζευγμένα (σημειωμένα με AM1 και AM2) γεμάτα με πορώδες υλικό. (b) Σχηματική σχεδίαση ενός ιδανικού κυττάρου μονάδας για την αγνόηση των παρεμβαλλόμενων επιδράσεων των γειτονικών κυττάρων. c) Φωτογραφία δείγματος κυψελίδων μονάδας για τη μέτρηση. (d) Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου με βάση την αντίσταση.

Η εικόνα 3.9(a) απεικονίζει την εννοιολογική άποψη μιας πρακτικής διαμόρφωσης ενός πολυεπίπεδου ακουστικού μεταϋλικού, που αποτελείται από δύο οριακά ενωμένα ακουστικά μεταϋλικά, που υποδηλώνονται με AM1 και AM2 και ένα στρώμα πορώδους υλικού που καλύπτει πλήρως την κοιλότητα μεταξύ των δύο ακουστικών μεταϋλικών, λειτουργώντας ως καταναλωτής (dissipater). Κάθε ακουστικό μεταϋλικό κατασκευάζεται από ένα φύλλο μεμβράνης και μια κεντρικά τοποθετημένη μάζα (central positioned mass) στις εξωτερικές επιφάνειες, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9b. Κατασκευάστηκε ένα δείγμα κυττάρου που περιλαμβάνει δύο ακουστικά μεταϋλικά που έχουν επικολληθεί στις επάνω και κάτω επιφάνειες ενός κοίλου κυλίνδρου αλουμινίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9c. Χρησιμοποιείται ένα μοντέλο βασισμένο στη σύνθετη αντίσταση για την ανάλυση των χαρακτηριστικών σκέδασης και απορρόφησης του πολυεπίπεδου ακουστικού μεταϋλικού, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9d, όπου ο προσπίπτων ήχος είναι επίπεδα κύματα που χτυπούν κανονικά στην επιφάνεια του ακουστικού μεταϋλικού 2.

Συνοπτικά, ερευνήθηκε πειραματικά και θεωρητικά ένα

πολυεπίπεδο ακουστικό μεταύλικο που διαθέτει εξαιρετική απόδοση στην σχεδόν ολική ηχοαπορρόφιση (nearly perfect absorption) και στην απομόνωση του εύρους ζώνης (broadband insulation). Η εξαιρετική απόδοση προέρχεται από τις διπλά μηδενικές ενεργές ακουστικές παραμέτρους (double-zero effective acoustic parameters), δηλαδή την ενεργό πυκνότητα μάζας (effective mass density) και τον συντελεστή όγκου (bulk modulus). Κάτω από τις διεγέρσεις των ηχητικών κυμάτων στην κρίσιμη συχνότητα, το στρωματοποιημένο ακουστικό μεταύλικο μπορεί να συγκεντρώσει αποτελεσματικά την ακουστική ενέργεια στην περιοχή μεταξύ των δύο οριακά ενωμένων ακουστικών υλικών τύπου μεμβράνης και να την μετατρέψει σε θερμική ενέργεια στο υλικό με απώλειες (lossy material). Η σχεδιαστική ιδέα του προτεινόμενου στρωματοποιημένου ακουστικού μεταύλικού μπορεί να διαδοθεί άμεσα και απλά στο βέλτιστο σχεδιασμό της ηχοαπορρόφησης και των αποδοτικών μονώσεων για ακουστικά συστήματα πολλαπλών στρώσεων, με κρυφούς συντονισμούς (hidden resonances).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059 (1987).
- 2) V. Narayanamurti, H.L. Stormer, M.A. Chin, A.C. Gossard, W. Wiegmann, Selective transmission of high-frequency phonons by a superlattice: the "Dielectric" phonon filter. *Phys. Rev.Lett.* 2, 2012 (1979).
- 3) M.M. Sigalas, E.N. Economou, Elastic and acoustic wave band structure. *J. Sound Vib.* 158,377 (1992).
- 4) M. Sigalas, E. Economou, Band structure of elastic waves in two-dimensional systems. *Solid State Commun.* 86, 141 (1993).
- 5) M.S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Phys. Rev. Lett.* 71, 2022 (1993).
- 6) R. Martinez-Salar, J. Sancho, J.V. Sanchez, V. Gomez, J. Llinares, F. Meseguer, Sound attenuation by sculpture. *Nature* 378, 241 (1995).
- 7) F.R. Montero de Espinoza, E. Jimenez, M. Torres, Ultrasonic band gap in a periodic two dimensional composite. *Phys. Rev. Lett.* 80, 1208 (1998).
- 8) J.O. Vasseur, P. Deymier, B. Chenni, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, D. Prevost, Experimental and theoretical evidence for the existence of absolute acoustic band gap in two dimensional periodic composite media. *Phys. Rev. Lett.* 86, 3012 (2001).
- 9) Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y.Y. Zhu, Z. Yang, C.T. Chan, P. Sheng, Locally resonant sonic crystal. *Science* 289, 1734 (2000).
- 10) T. Gorishnyy, C.K. Ullal, M. Maldovan, G. Fytas, E.L. Thomas, Hypersonic phononic crystals. *Phys. Rev. Lett.* 94, 115501 (2005).
- 11) J.N. Gillet, Y. Chalopin, S. Volz, Atomic-scale three-dimensional phononic crystals with a very low thermal conductivity to design crystalline thermoelectric devices. *J. Heat Transfer* 131, 043206 (2009)
- 12) P.E. Hopkins, C.M. Reinke, M.F. Su, R.H. Olsson III, E.A. Shaner, Z.C. Leseman, J.R. Serrano, L.M. Phinney, I. El-Kady, Reduction in the thermal conductivity of single crystalline silicon by phononic crystal patterning. *Nano Lett.* 11, 107 (2011)
- 13) M. Torres, F.R. Montero de Espinosa, D. Garcia-Pablos, N. Garcia, Sonic band gaps in finite elastic media: surface states and localization phenomena in linear and point defects. *Phys. Rev. Lett.* 82, 3054 (1999)
- 14) M. Kafesaki, M.M. Sigalas, N. Garcia, Frequency modulation in the transmittivity of wave guides in elastic-wave band-gap materials. *Phys. Rev. Lett.* 85, 4044 (2000)
- 15) A. Khelif, B. Djafari-Rouhani, J.O. Vasseur, P.A. Deymier, P. Lambin, L. Dobrzynski, Transmittivity through straight and stublike waveguides in a two-dimensional phononic crystal. *Phys. Rev. B* 65, 174308 (2002)
- 16) Y. Tanaka, S.I. Tamura, Surface acoustic waves in two-dimensional periodic elastic structures. *Phys. Rev. B* 58, 7958 (1998)
- 17) Y. Tanaka, S.I. Tamura, Acoustic stop bands of surface and bulk modes in two-dimensional phononic lattices consisting of aluminum and a polymer. *Phys. Rev. B* 60, 13294 (1999)
- 18) T.T. Wu, Z.G. Huang, S. Lin, Surface and bulk acoustic waves in two-dimensional phononic crystal consisting of materials with general anisotropy. *Phys. Rev. B* 69, 094301 (2004)
- 19) V. Laude, M. Wilm, S. Benchabane, A. Khelif, Full band gap for surface acoustic waves in a piezoelectric phononic crystal. *Phys. Rev. E* 71, 036607 (2005)
- 20) J.J. Chen, B. Qin, J.C. Cheng, Complete band gaps for lamb waves in cubic thin plates with periodically placed inclusions. *Chin. Phys. Lett.* 22, 1706 (2005)
- 21) C. Charles, B. Bonello, F. Ganot, Propagation of guided elastic waves in two-dimensional phononic crystals. *Ultrasonics* 44, 1209(E) (2006)
- 22) J.C. Hsu, T.T. Wu, Efficient formulation for band-structure calculations of two-dimensional phononic-crystal plates. *Phys. Rev. B* 74, 144303 (2006)
- 23) B. Manzanares-Martinez, F. Ramos-Mendieta, Surface elastic waves in solid composites of two-dimensional periodicity. *Phys. Rev. B* 68, 134303 (2003)
- 24) R. Sainidou, N. Stefanou, Guided and quasiguided elastic waves in phononic crystal slabs. *Phys. Rev. B* 73, 184301 (2006)
- 25) T.T. Wu, L.C. Wu, Z.G. Huang, Frequency band gap measurement of two-dimensional air/silicon phononic crystals using layered slanted finger interdigital transducers. *J. Appl. Phys.* 97, 094916 (2005)
- 26) S. Benchabane, A. Khelif, J.-Y. Rauch, L. Robert, V. Laude, Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal. *Phys. Rev. E* 73, 065601(R) (2006)
- 27) X. Zhang, T. Jackson, E. Lafond, P. Deymier, J. Vasseur, Evidence of surface acoustic wave band gaps in the phononic crystals created on thin plates. *Appl. Phys. Lett.* 88, 0419 (2006)
- 28) N. Engheta, R.W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations* (Wiley, New York, 2006).
- 29) V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Usp.* 10, 509 (1967)
- 30) J. Li, C.T. Chan, Double negative acoustic metamaterials. *Phys. Rev. E* 70, 055602 (2004)
- 31) Y. Ding, Z. Liu, C. Qiu, J. Shi, Metamaterials with simultaneous negative bulk modulus and

- mass density. *Phys. Rev. Lett.* 99, 093904 (2007)
- 32) S. Yang, J.H. Pahe, Z. Liu, M.L. Cowan, C.T. Chan, P. Sheng, Focusing of sound in a 3D phononic crystal. *Phys. Rev. Lett.* 93, 024301 (2004)
- 33) J.B. Pendry, Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000)
- 34) M. Ke, Z. Liu, C. Qiu, W. Wang, J. Shi, W. Wen, P. Sheng, Negative refraction imaging with two-dimensional phononic crystals. *Phys. Rev. B* 72, 064306 (2005)
- 35) A. Sukhovich, L. Jing, J.H. Page, Negative refraction and focusing of ultrasound in two dimensional phononic crystals. *Phys. Rev. B* 77, 014301 (2008)
- 36) A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, J.O. Vasseur, Y. Pennec, P.A. Deymier, J.H. Pae, Experimental and theoretical evidence for subwavelength imaging in phononic crystals. *Phys. Rev. Lett.* 102, 154301 (2009)
- 37) B. Bonello, L. Beillard, J. Pierre, J.O. Vasseur, B. Perrin, O. Boyko, Negative refraction of surface acoustic waves in the subgahertz range. *Phys. Rev. B* 82, 104108 (2010)
- 38) M.K. Lee, P.S. Ma, I.K. Lee, H.W. Kim, Y.Y. Kim, Negative refraction experiments with guided shear horizontal waves in thin phononic crystal plates. *Appl. Phys. Lett.* 98, 011909 (2011)
- 39) J. Bucay, E. Roussel, J.O. Vasseur, P.A. Deymier, A.-C. Hladky-Hennion, Y. Penec, K. Muralidharan, B. Djafari-Rouhani, B. Dubus, Positive, negative, zero refraction and beam splitting in a solid/air phononic crystal: theoretical and experimental study. *Phys. Rev. B* 79, 214305 (2009)
- 40) N. Swinck, J.-F. Robillard, S. Binguier, J. Bucay, K. Muralidharan, J.O. Vasseur, K. Runge, P.A. Deymier, Phase controlling phononic crystal. *Appl. Phys. Lett.* 98, 103508 (2011)
- 41) I.E. Psarobas, Viscoelastic response of sonic band-gap materials. *Phys. Rev. B* 64, 012303 (2001)
- 42) B. Merheb, P.A. Deymier, M. Jain, M. Alohyna-Lessuffleur, S. Mohanty, A. Berker, R.W. Greger, Elastic and viscoelastic effects in rubber/air acoustic band gap structures: a theoretical and experimental study. *J. Appl. Phys.* 104, 064913 (2008)
- 43) B. Merheb, P.A. Deymier, K. Muralidharan, J. Bucay, M. Jain, M. Alohyna-Lessuffleur, R.W. Greger, S. Moharty, A. Berker, Viscoelastic Effect on acoustic band gaps in polymerfluid composites. *Model. Simul. Mat. Sci. Eng.* 17, 075013 (2009)
- 44) M.I. Hussein, Theory of damped bloch waves in elastic media. *Phys. Rev. B* 80, 212301 (2009)
- 45) M.I. Hussein, M.J. Frazier, Band structure of phononic crystals with general damping. *J. Appl. Phys.* 108, 093506 (2010)
- 46) R.P. Moiseyenko, V. Laude, Material loss influence on the complex band structure and group velocity of phononic crystals. *Phys. Rev. B* 83, 064301 (2011)
- 47) C. Goffaux, J.P. Vigneron, Theoretical study of a tunable phononic band gap system. *Phys. Rev. B* 64, 075118 (2001)
- 48) J. Baumgartl, M. Zvyagolskaya, C. Bechinger, Tailoring of phononic band structure in colloidal crystals. *Phys. Rev. Lett.* 99, 205503 (2007)
- 49) J.-Y. Yeh, Control analysis of the tunable phononic crystal with electrorheological material. *Physica B* 400, 137 (2007)
- 50) Z.-G. Huang, T.-T. Wu, Temperature effect on the band gaps of surface and bulk acoustic waves in two-dimensional phononic crystals. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 52, 365 (2005)
- 51) K.L. Jim, C.W. Leung, S.T. Lau, S.H. Choy, H.L.W. Chan, Thermal tuning of phononic band structure in ferroelectric ceramic/epoxy phononic crystal. *Appl. Phys. Lett.* 94, 193501 (2009)
- 52) K. Bertoldi, M.C. Boyce, Mechanically triggered transformations of phononic band gaps in periodic elastomeric structures. *Phys. Rev. B* 77, 052105 (2008)
- 53) Z. Hou, F. Wu, Y. Liu, Phononic crystals containing piezoelectric material. *Solid State Commun.* 130, 745 (2004)
- 54) Y. Wang, F. Li, Y. Wang, K. Kishimoto, W. Huang, Tuning of band gaps for a two dimensional piezoelectric phononic crystal with a rectangular lattice. *Acta Mech. Sin.* 25, 65 (2008)
- 55) Y.-Z. Wang, F.-M. Li, W.-H. Huang, X. Jiang, Y.-S. Wang, K. Kishimoto, Wave band gaps in two-dimensional piezoelectric/piezomagnetic phononic crystals. *Int. J. Solids Struct.* 45, 4203 (2008)
- 56) Y.-Z. Wang, F.-M. Li, K. Kishimoto, Y.-S. Wang, W.-H. Huang, Elastic wave band gaps in magnetoelastoelectric phononic crystals. *Wave Motion* 46, 47 (2009)
- 57) J.-F. Robillard, O. Bou Matar, J.O. Vasseur, P.A. Deymier, M. Stippinger, A.-C. Hladky-Hennion, Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, Tunable magnetoelastic phononic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 95, 124104 (2009)
- 58) J.-F. Robillard, K. Muralidharan, J. Bucay, P.A. Deymier, W. Beck, D. Barker, Phononic metamaterials for thermal management: an atomistic computational study. *Chin. J. Phys.* 49, 448 (2011)
- 59) M. Maldovan, E.L. Thomas, Simultaneous complete elastic and electromagnetic band gaps in periodic structures. *Appl. Phys. B* 83(4), 595 (2006)
- 60) M. Maldovan, E.L. Thomas, Simultaneous localization of photons and phonons in two dimensional periodic structures. *Appl. Phys. Lett.* 88(25), 251 (2006)
- 61) S. Sadat-Saleh, S. Benchabane, F. Issam Baida, M.-P. Bernal, V. Laude, Tailoring simultaneous photonic and phononic band gaps. *J. Appl. Phys.* 106, 074912 (2009)
- 62) N. Papanikolaou, I.E. Psarobas, N. Stefanou, Absolute spectral gaps for infrared light and

- hypersound in three-dimensional metallodielectric phoxonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 96, 231917 (2010)
- 63) I.E. Psarobas, N. Papanikolaou, N. Stefanou, B. Djafari-Rouhani, B. Bonello, V. Laude, Enhanced acousto-optic interactions in a one-dimensional phoxonic cavity. *Phys. Rev. B* 82, 174303 (2010)
- 64) M.S. Kushwaha, *Int. J. Mod. Phys. B* 10, 977 (1996)
- 65) L. Esaki, R. Tsu, *IBM J. Res. Dev.* 14, 61 (1970)
- 66) L. Colvard, R. Merlin, M.V. Klein, A.C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.* 45, 298 (1980)
- 67) For a recent review, see: E.H. El Boudouti, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj and L. Dobrzynski, *Surf. Sci. Rep.* 64, 471 (2009)
- 68) J. Sapriel, B. Djafari-Rouhani, *Surf. Sci. Rep.* 10, 189 (1989)
- 69) B. Jusserand, M. Cardona, in *Light Scattering in Solids*, ed. by M. Cardona, G. Guntherodt (Springer, Berlin, 1989), p. 49.
- 70) D.J. Lockwood, J.F. Young, *Light Scattering in Semiconductor Structures and Superlattices* (Plenum, New York, 1991)
- 71) S. Tamura, *Phys. Rev. B* 39, 1261 (1989)
- 72) S. Mizuno, S. Tamura, *Phys. Rev. B* 45, 13423 (1992)
- 73) M.J.S. Lowe, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 42, 525 (1995)
- 74) E.H. El Boudouti, B. Djafari-Rouhani, E.M. Khourdifi, L. Dobrzynski, *Phys. Rev. B* 48, 10987 (1993)
- 75) E.H. El Boudouti, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, L. Dobrzynski, *Phys. Rev. B* 54, 14728 (1996)
- 76) F. Garcia-Moliner, V.R. Velasco, *Theory of Single and Multiple Interfaces. The Method of Surface Green Function Matching* (World Scientific, Singapore, 1992)
- 77) B. Jusserand, D. Paquet, F. Mollet, F. Alexandre, G. LeRoux, *Phys. Rev. B* 35, 2808 (1987)
- 78) D.J. Lockwood, R.L.S. Devine, A. Rodriguez, J. Mendialdua, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, *Phys. Rev. B* 47, 13553 (1993)
- 79) A.S. Barker, J.L. Merz, A.C. Gossard, *Phys. Rev. B* 17, 3181 (1978)
- 80) V. Narayanamurti, H.L. Stormer, M.A. Chin, A.C. Gossard, W. Wiegmann, *Phys. Rev. Lett.* 43, 2012 (1979)
- 81) O. Koblinger, J. Mebert, E. Dittrich, S. Dottinger, W. Eisenmenger, P.V. Santos, L. Ley, *Phys. Rev. B* 35, 9372 (1987)
- 82) D.J. Dielemen, A.F. Koenderink, M.G.A. van Veghel, A.F.M. Arts, H.W. de Wijn, *Phys. Rev. B* 64, 174304 (2001)
- 83) S. Tamura, D.C. Hurley, J.P. Wolf, *Phys. Rev. B* 38, 1427 (1988)
- 84) P.J. Shull, D.E. Chimenti, A. Safaeinili, *J. Acoust. Soc. Am.* 95, 99 (1994)
- 85) A. Safaeinili, D.E. Chimenti, *J. Acoust. Soc. Am.* 98, 2336 (1995)
- 86) H.T. Grahn, H.J. Maris, J. Tauc, B. Abeles, *Phys. Rev. B* 38, 6066 (1988)
- 87) A. Yamamoto, T. Mishina, Y. Masumoto, M. Nakayama, *Phys. Rev. Lett.* 73, 740 (1994)
- 88) A. Bartels, T. Dekorsy, H. Kurz, *Appl. Phys. Lett.* 72, 2844 (1998)
- 89) A. Bartels, T. Dekorsy, H. Kurz, K. Köhler, *Phys. Rev. Lett.* 82, 1044 (1999)
- 90) P. Sondhaus, J. Larsson, M. Harbst, G.A. Naylor, A. Plech, K. Scheidt, O. Synnnergren, M. Wulff, *J.S. Wark, Phys. Rev. Lett.* 94, 125509 (2005) P. Sondhaus, J. Larsson, M. Harbst, G.A. Naylor, A. Plech, K. Scheidt, O. Synnnergren, M. Wulff, *J.S. Wark, Phys. Rev. Lett.* 94, 125509 (2005)
- 91) B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, O. Hardouin Duparc, R.E. Camley, A.A. Maradudin, *Phys. Rev. B* 28, 1711 (1983)
- 92) T. Aono, S. Tamura, *Phys. Rev. B* 58, 4838 (1998)
- 93) S. Mizuno, S. Tamura, *Phys. Rev. B* 53, 4549 (1996)
- 94) M. Hammouchi, E.H. El Boudouti, A. Nougaooui, B. Djafari-Rouhani, M.L.H. Lahlaouti, A. Akjouj, L. Dobrzynski, *Phys. Rev. B* 59, 1999 (1999)
- 95) H.J. Trodahl, P.V. Santos, G.V.M. Williams, A. Bittar, *Phys. Rev. B* 40, R8577 (1989)
- 96) W. Chen, Y. Lu, H.J. Maris, G. Xiao, *Phys. Rev. B* 50, 14506 (1994)
- 97) B. Perrin, B. Bonello, J.C. Jeannet, E. Romatet, *Physica B* 219–220, 681 (1996)
- 98) B. Bonello, B. Perrin, E. Romatet, J.C. Jeannet, *Ultrasonics* 35, 223 (1997)
- 99) N-W Pu, J. Bokor, *Phys. Rev. Lett.* 91, 076101 (2003)
- 100) N-W Pu, *Phys. Rev. B* 72, 115428 (2005)
- 101) E.M. Khourdifi, B. Djafari-Rouhani, *Surf. Sci.* 211/212, 361 (1989)
- 102) D. Bria, E.H. El Boudouti, A. Nougaooui, B. Djafari-Rouhani, V.R. Velasco, *Phys. Rev. B* 60, 2505 (1999)
- 103) E.M. Khourdifi, B. Djafari-Rouhani, *J. Phys. Condens. Matter* 1, 7543 (1989)
- 104) D. Bria, E.H. El Boudouti, A. Nougaooui, B. Djafari-Rouhani, V.R. Velasco, *Phys. Rev. B* 61, 15858 (2000)
- 105) K.-Q. Chen, X.-H. Wang, B.-Y. Gu, *Phys. Rev. B* 61, 12075 (2000)
- 106) S. Mizuno, *Phys. Rev. B* 65, 193302 (2002)
- 107) S. Tamura, H. Watanabe, T. Kawasaki, *Phys. Rev. B* 72, 165306 (2005)
- 108) G.P. Schwartz, G.J. Gualtieri, W.A. Sunder, *Appl. Phys. Lett.* 58, 971 (1991)
- 109) M. Trigo, A. Bruchhausen, A. Fainstein, B. Jusserand, V. Thierry-Mieg, *Phys. Rev. Lett.* 89, 227402 (2002)
- 110) P. Lacharmoise, A. Fainstein, B. Jusserand, V. Thierry-Mieg, *Appl. Phys. Lett.* 84, 3274 (2004)
- 111) N.D. Lanzillotti Kimura, A. Fainstein, B. Jusserand, *Phys. Rev. B* 71, 041305(R) (2005)
- 112) P.X. Zhang, D.J. Lockwood, J.M. Baribeau, *Can. J. Phys.* 70, 843 (1992)

- 113) P.X. Zhang, D.J. Lockwood, H.J. Labbe, J.M. Baribeau, *Phys. Rev. B* 46, 9881 (1992)
- 114) M. Trigo, A. Fainstein, B. Jusserand, V. Thierry-Mieg, *Phys. Rev. B* 66, 125311 (2002)
- 115) A. Bousfia, E.H. El Boudouti, B. Djafari-Rouhani, D. Bria, A. Nougauoui, V.R. Velasco, *Surf. Sci.* 482-485, 1175 (2001)
- 116) D. Bria, B. Djafari-Rouhani, A. Bousfia, E.H. El Boudouti, A. Nougauoui, *Europhys. Lett.* 55, 841 (2001)
- 117) D. Bria, B. Djafari-Rouhani, *Phys. Rev. E* 66, 056609 (2002)
- 118) B. Manzanares-Martinez, J. Sanchez-Dehesa, A. Hakansson, F. Cervera, F. Ramos-Mendieta, *Appl. Phys. Lett.* 85, 154 (2004)
- 119) G. Wang, D. Yu, J. Wen, Y. Liu, X. Wen, *Phys. Lett. A* 327, 512 (2004)
- 120) L.C. Parsons, G.T. Andrews, *Appl. Phys. Lett.* 95, 241909 (2009)
- 121) G.N. Aliev, B. Goller, D. Kovalev, P.A. Snow, *Appl. Phys. Lett.* 96, 124101 (2010)
- 122) N. Gomopoulos, D. Maschke, C.Y. Koh, E.L. Thomas, W. Tremel, H.J. Butt, G. Fytas, *Nano Lett.* 10, 980 (2010)
- 123) P.M. Walker, J.S. Sharp, A.V. Akimov, A.J. Kent, *Appl. Phys. Lett.* 97, 073106 (2010)
- 124) T. Berstermann, C. Braggemann, M. Bombeck, A.V. Akimov, D.R. Yakovlev, C. Kruse, D. Hommel, M. Bayer, *Phys. Rev. B* 81, 085316 (2010)
- 125) I.E. Psarobas, N. Papanikolaou, N. Stefanou, B. Djafari-Rouhani, B. Bonello, V. Laude, *Phys. Rev. B* 82, 174303 (2010)
- 126) A.J. Kent, R.N. Kini, N.M. Stanton, M. Henini, B.A. Glavin, V.A. Kochelap, T.L. Linnik, *phys. Rev. Lett.* 96, 215504 (2006)
- 127) A. Bousfia, Ph.D. Thesis, University Mohamed I, Oujda, Morocco (2004)
- 128) H. Kato, *Phys. Rev. B* 59, 11136 (1999)
- 129) S. Mizuno, *Phys. Rev. B* 63, 035301 (2000)
- 130) D. Zhao, W. Wang, Z. Liu, J. Shi, W. Wen, *Physica B* 390, 159 (2007)
- 131) L.M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media* (Academic, New York, 1981)
- 132) S.M. Rytov, *Phys. Acoust.* 2, 68 (1956)
- 133) M. Schoenberg, *Wave Motion* 6, 303 (1984)
- 134) M. Rousseau, *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 2369 (1989)
- 135) M.A. Biot, *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 168 (1962)
- 136) B. Gurevich, *J. Acoust. Soc. Am.* 106, 57 (1999)
- 137) B. Gurevich, *Geophysics* 67, 264 (2002)
- 138) R. Ciz, E.H. Saenger, B. Gurevich, *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 642 (2006)
- 139) T.J. Plona, K.W. Winkler, M. Schoenberg, *J. Acoust. Soc. Am.* 81, 1227 (1987)
- 140) C. Gazanhes, J. Sageloli, *Acustica* 81, 221 (1995)
- 141) R. James, S.M. Woodley, C.M. Dyer, F. Humphrey, *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 2041 (1995)
- 142) M. Shen, W. Cao, *Appl. Phys. Lett.* 75, 3713 (1999)
- 143) H. Sanchis-Alepuz, Y.A. Kosevich, J. Sanchez-Dehesa, *Phys. Rev. Lett.* 98, 134301 (2007)
- 144) G. Monsivais, R. Rodriguez-Ramos, R. Esquivel-Sirvent, L. Fernandez-Alvarez, *Phys. Rev. B* 68, 174109 (2003)
- 145) R. Rodriguez-Ramos, G. Monsivais, J.A. Otero, H. Cala's, V. Guerra, C. Stern, *J. Appl. Phys.* 96, 1178 (2004)
- 146) E.E. Mendez, F. Agullo-Rueda, J.M. Hong, *Phys. Rev. Lett.* 60, 2426 (1988)
- 147) A. Sukhovich, J.H. PSage, J.O. Vasseur, J.F. Robillard, N. Swintek, and Pierre A. Deymier 2D-3D Phononic Crystals (Springer 2013), *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals.*
- 148) Y. Cheng, J. Xu, X. Liu, One-dimensional structured ultrasonic metamaterials with simultaneously negative dynamic density and modulus. *Phys. Rev. B* 77, 045134 (2008)
- 149) X. Hu, K.M. Ho, C. Chan, J. Zi, Homogenization of acoustic metamaterials of Helmholtz resonators in fluid. *Phys. Rev. B* 77, 172301 (2008)
- 150) S.H. Lee, C.M. Park, Y.M. Seo, Z.G. Wang, C.K. Kim, Composite acoustic medium with simultaneously negative density and modulus. *Phys. Rev. Lett.* 104, 54301 (2010)
- 151) S.H. Lee, C.M. Park, Y.M. Seo, Z.G. Wang, C.K. Kim, Acoustic metamaterial with negative density. *Phys. Lett. A* 373, 4464 (2009)
- 152) S.H. Lee, C.M. Park, Y.M. Seo, Z.G. Wang, C.K. Kim, Acoustic metamaterial with negative modulus. *J. Phys. Condens. Matter* 21, 175704 (2009).
- 153) S.H. Lee, C.M. Park, Y.M. Seo, C.K. Kim, Reversed Doppler effect in double negative metamaterials. *Phys. Rev. B* 81, 241102 (2010)
- 154) M. Ambati, N. Fang, C. Sun, X. Zhang, Surface resonant states and superlensing in acoustic metamaterials. *Phys. Rev. B* 75, 195447 (2007)
- 155) S. Guenneau, A. Movchan, G. Pe'tursson, S. Anantha Ramakrishna, Acoustic metamaterials for sound focusing and confinement. *New J. Phys.* 9, 399 (2007)
- 156) K. Deng, Y. Ding, Z. He, H. Zhao, J. Shi, Z. Liu, Theoretical study of subwavelength imaging by acoustic metamaterial slabs. *J. Appl. Phys.* 105, 124909 (2009)
- 157) X. Zhou, G. Hu, Superlensing effect of an anisotropic metamaterial slab with near-zero dynamic mass. *Appl. Phys. Lett.* 98, 263510 (2011)
- 158) J. Li, Z. Liu, C. Qiu, Negative refraction imaging of acoustic waves by a two-dimensional three-component phononic crystal. *Phys. Rev. B* 73, 054302 (2006)
- 159) S. Zhang, L. Yin, N. Fang, Focusing ultrasound with an acoustic metamaterial network. *Phys. Rev. Lett.* 102, 194301 (2009)
- 160) L. Zigoneanu, B.I. Popa, S.A. Cummer, Design and measurements of a broadband two dimensional acoustic lens. *Phys. Rev. B* 84, 024305 (2011)

- 161) L. Zigoneanu, B.I. Popa, S.A. Cummer, Design and measurements of a broadband twodimensional acoustic lens. *Phys. Rev. B* 84, 024305 (2011)
- 162) P.A. Belov, C.R. Simovski, P. Ikonen, Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals. *Phys. Rev. B* 71, 193105 (2005)
- 163) Y. Jin, S. He, Canalization for subwavelength focusing by a slab of dielectric photonic crystal. *Phys. Rev. B* 75, 195126 (2007)
- 164) Z. He, F. Cai, Y. Ding, Z. Liu, Subwavelength imaging of acoustic waves by a canalization mechanism in a two-dimensional phononic crystal. *Appl. Phys. Lett.* 93, 233503 (2008)
- 165) X. Ao, C. Chan, Far-field image magnification for acoustic waves using anisotropic acoustic metamaterials. *Phys. Rev. E* 77, 025601 (2008)
- 166) Z. Jacob, L.V. Alekseyev, E. Narimanov, Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit. *Opt. Express* 14, 8247 (2006)
- 167) Z. Liu, H. Lee, Y. Xiong, C. Sun, X. Zhang, Far-field optical hyperlens magnifying subdiffraction-limited objects. *Science* 315, 1686 (2007)
- 168) D. Smith, D. Schurig, Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors. *Phys. Rev. Lett.* 90, 77405 (2003)
- 169) J. Li, L. Fok, X. Yin, G. Bartal, X. Zhang, Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens. *Nat. Mater.* 8, 931 (2009)
- 170) F. Liu, F. Cai, S. Peng, R. Hao, M. Ke, Z. Liu, Parallel acoustic near-field microscope: a steel slab with a periodic array of slits. *Phys. Rev. E* 80, 026603 (2009)
- 171) J. Zhu, J. Christensen, J. Jung, L. Martin-Moreno, X. Yin, L. Fok, X. Zhang, F. Garcia-Vidal, A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging. *Nat. Phys.* 7, 52 (2010)
- 172) A. Spadoni, C. Daraio, Generation and control of sound bullets with a nonlinear acoustic lens. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 7230 (2010)
- 173) G.W. Milton, M. Briane, J.R. Willis, On cloaking for elasticity and physical equations with a transformation invariant form. *New J. Phys.* 8, 248 (2006)
- 174) H. Chen, C. Chan, Acoustic cloaking in three dimensions using acoustic metamaterials. *Appl. Phys. Lett.* 91, 183518 (2007)
- 175) S.A. Cummer, D. Schurig, One path to acoustic cloaking. *New J. Phys.* 9, 45 (2007)
- 176) Y. Cheng, F. Yang, J.Y. Xu, X.J. Liu, A multilayer structured acoustic cloak with homogeneous isotropic materials. *Appl. Phys. Lett.* 92, 151913 (2008)
- 177) J. Pendry, J. Li, An acoustic metafluid: realizing a broadband acoustic cloak. *New J. Phys.* 10, 115032 (2008)
- 178) D. Torrent, J. Sanchez-Dehesa, Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach. *New J. Phys.* 10, 063015 (2008)
- S.A. Cummer, B.I. Popa, D. Schurig, D.R. Smith, J. Pendry, M. Rahm, A. Starr, Scattering theory derivation of a 3d acoustic cloaking shell. *Phys. Rev. Lett.* 100, 24301 (2008)
- 179) A.N. Norris, Acoustic cloaking theory. *Proc. R. Soc. A* 464, 2411 (2008)
- 180) Y. Urzhumov, F. Ghezzo, J. Hunt, D.R. Smith, Acoustic cloaking transformations from attainable material properties. *New J. Phys.* 12, 073014 (2010)
- 181) Y. Bobrovnikskii, Impedance acoustic cloaking. *New J. Phys.* 12, 043049 (2010)
- 182) Z. Liang, J. Li, Bending a periodically layered structure for transformation acoustics. *Appl. Phys. Lett.* 98, 241914 (2011)
- 183) X. Zhu, B. Liang, W. Kan, X. Zou, J. Cheng, Acoustic cloaking by a superlens with singlenegative materials. *Phys. Rev. Lett.* 106, 14301 (2011)
- 184) H. Chen, C. Chan, Acoustic cloaking and transformation acoustics. *J. Phys. D Appl. Phys.* 43, 113001 (2010)
- 185) M. Farhat, S. Enoch, S. Guenneau, A. Movchan, Broadband cylindrical acoustic cloak for linear surface waves in a fluid. *Phys. Rev. Lett.* 101, 134501 (2008)
- 186) M. Farhat, S. Guenneau, S. Enoch, A.B.. Movchan, Cloaking bending waves propagating in thin elastic plates. *Phys. Rev. B* 79, 033102 (2009)
- 187) M. Farhat, S. Guenneau, S. Enoch, Ultrabroadband elastic cloaking in thin plates. *Phys. Rev. Lett.* 103, 24301 (2009)
- 188) A. Norris, A. Shuvalov, Elastic cloaking theory. *Wave Motion* 48, 525–538 (2011)
- 189) Y.A. Urzhumov, D.R. Smith, Fluid flow control with transformation media. *Phys. Rev. Lett.* 107, 074501 (2011)
- 190) S. Zhang, C. Xia, N. Fang, Broadband acoustic cloak for ultrasound waves. *Phys. Rev. Lett.* 106, 24301 (2011)
- 191) B.I. Popa, L. Zigoneanu, S.A. Cummer, Experimental acoustic ground cloak in air. *Phys. Rev. Lett.* 106, 253901 (2011)
- 192) B. Liang, B. Yuan, J. Cheng, Acoustic diode: rectification of acoustic energy flux in onedimensional systems. *Phys. Rev. Lett.* 103, 104301 (2009)
- 193) B. Liang, X. Guo, J. Tu, D. Zhang, J. Cheng, An acoustic rectifier. *Nat. Mater.* 9, 989 (2010)
- 194) N. Boechler, G. Theocharis, C. Daraio, Bifurcation-based acoustic switching and rectification. *Nat. Mater.* 10, 665 (2011)
- 195) X.F. Li, X. Ni, L. Feng, M.H. Lu, C. He, Y.F. Chen, Tunable unidirectional sound propagation through a sonic-crystal-based acoustic diode. *Phys. Rev. Lett.* 106, 84301 (2011)
- 196) L. Landau, E. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, 3rd edn. (Elmsford, New York, 1982)
- 197) J. Li, C. Chan, Double-negative acoustic metamaterial. *Phys. Rev. E* 70, 055602 (2004)
- 198) Y. Ding, Z. Liu, C. Qiu, J. Shi, Metamaterial with simultaneously negative bulk modulus and

- mass density. *Phys. Rev. Lett.* 99, 93904 (2007)
- 199) N. Fang, D. Xi, J. Xu, M. Ambati, W. Srituravanich, C. Sun, X. Zhang, Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nat. Mater.* 5, 452 (2006)
- 200) L. Fok, M. Ambati, X. Zhang, Acoustic metamaterials. *MRS Bull.* 33, 931 (2008)
- 201) C. Ding, L. Hao, X. Zhao, Two-dimensional acoustic metamaterial with negative modulus. *J. Appl. Phys.* 108, 074911 (2010)
- 202) C.L. Ding, X.P. Zhao, Multi-band and broadband acoustic metamaterial with resonant structures. *J. Phys. D Appl. Phys.* 44, 215402 (2011)
- 203) S.H. Lee, C.M. Park, Y.M. Seo, Z.G. Wang, C.K. Kim, Acoustic metamaterial with negative modulus. *J. Phys. Condens. Matter* 21, 175704 (2009)
- 204) G. Theocharis, N. Boechler, and C. Daraio Nonlinear Periodic Phononic Structures and Granular Crystals P.A. Deymier (ed.), *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*, Springer Series in Solid-State Sciences 173, DOI 10.1007/978-3-642-31232-8_7, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- 205) J. Yang, S. Dunatunga, C. Daraio, Amplitude-dependent attenuation of compressive waves in curved granular crystals constrained by elastic guides. *Acta Mech.* 223, 549–562 (2012).
- 206) M. Eichenfield et al., Optomechanical crystals. *Nature* 462(7269), 78–82 (2009).
- 207) S. Sadat-Saleh et al., Tailoring simultaneous photonic and phononic band gaps. *J. Appl. Phys.* 106(7), 074912 (2009).
- 208) N. Boechler, G. Theocharis, C. Daraio, Bifurcation-based acoustic switching and rectification. *Nat. Mater.* 10(9), 665–8 (2011).
- 209) A. Spadoni, C. Daraio, Generation and control of sound bullets with a nonlinear acoustic lens. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 7230 (2010).
- 210) D. Khatri, P. Rizzo, C. Daraio. Highly Nonlinear Waves' Sensor Technology for Highway Infrastructures. in SPIE Smart Structures/NDE, 15th annual international symposium. San Diego, CA, 2008.
- 211) J.B. Pendry, Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000)
- 212) S. Yang, J.H. Page, Z. Liu, M.L. Cowan, C.T. Chan, P. Sheng, Focusing of sound in a 3D phononic crystal. *Phys. Rev. Lett.* 93, 024301 (2004).
- 213) A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, J.O. Vasseur, Y. Pennec, P.A. Deymier, J.H. Page, Experimental and theoretical evidence for subwavelength imaging in phononic crystals. *Phys. Rev. Lett.* 102, 154301 (2009)
- 214) J.-F. Robillard, J. Bucay, P.A. Deymier, A. Shelke, K. Muralidharan, B. Merheb, J.O. Vasseur, A. Sukhovich, J.H. Page, Resolution limit of a phononic crystal superlens. *Physical Review B* 83, 224301 (2011)
- 215) Z. He, X. Li, J. Mei, Z. Liu, Improving imaging resolution of a phononic crystal lens by employing acoustic surface waves. *Journal of Applied Physics* 106, 026105 (2009).
- 216) F. Liu, F. Cai, S. Peng, R. Hao, M. Ke, Z. Liu, Parallel acoustic near-field microscope: A steeslab with a periodic array of slits. *Physical Review E* 80, 026603 (2009)
- 217) P. Sheng, Metamaterials: Acoustic lenses to shout about. *Nature Materials* 8, 928 (2009).
- 218) C. Luo, S.G. Johnson, J.D. Joannopoulos, J.B. Pendry, Subwavelength imaging in photonic crystals. *Phys. Rev. B* 68, 045115 (2003)
- 219) P. Sheng, J. Mei, Z. Liu, W. Wen, Dynamic mass density and acoustic metamaterials. *Physica B* 394, 256 (2007)
- 220) X. Zhang, Z. Liu, Negative refraction of acoustic waves in two-dimensional phononic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 85, 341 (2004)
- 221) A. Sukhovich, L. Jing, J.H. Page, Negative refraction and focusing of ultrasound in two dimensional phononic crystals. *Phys. Rev. B* 77, 014301 (2008)
- 222) J.H. Page, A. Sukhovich, S. Yang, M.L. Cowan, F. Van Der Biest, A. Tourin, M. Fink, Z. Liu, C.T. Chan, P. Sheng, Phononic crystals. *Phys. Stat. Sol. (b)* 241(15), 3454 (2004)
- 223) K. Imamura, S. Tamura, Negative refraction of phonons and acoustic lensing effect of a crystalline slab. *Physical Review B* 70, 174308 (2004)
- 224) Meng Chen, Dan Meng, Heng Jiang, and Yuren Wang Hindawi. Investigation on the Band Gap and Negative Properties of Concentric Ring Acoustic Metamaterial. *Shock and Vibration* Volume 2018, Article ID 1369858, 12 pages <https://doi.org/10.1155/2018/1369858>
- 225) M. B. Assouar and M. Oudich, "Enlargement of a locally resonant sonic band gap by using double-sides stubbed phononic plates," *Applied Physics Letters*, vol. 100, no. 12, Article ID 123506, 2012.
- 226) Y. Xiao, B. R. MacE, J. Wen, and X. Wen, "Formation and coupling of band gaps in a locally resonant elastic system comprising a string with attached resonators," *Physics Letters A*, vol. 375, no. 12, pp. 1485–1491, 2011.
- 227) P. Yeh, A. Yariv, and E. Maron, "Theory of Bragg fiber," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 68, no. 9, pp. 1196–1201, 1978.
- 228) A. Kitagawa and J.-I. Sakai, "Bloch theorem in cylindrical coordinates and its application to a Bragg fiber," *Physical Review A*, vol. 80, no. 3, Article ID 033802, pp. 2962–2964, 2009.
- 229) H. Larabi, Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, and J. O. Vasseur, "Multicoaxial cylindrical inclusions in locally resonant phononic crystals," *Physical Review E*, vol. 75, no. 6, Article ID 066601, 2007.
- 230) D. Torrent and J. Sanchez-Dehesa, "Radial wave crystals: radially periodic structures from anisotropic metamaterials for engineering acoustic or electromagnetic waves," *Physical Review Letters*, vol. 103, Article ID 064301, 2009.
- 231) Z. Xu, F. Wu, and Z. Guo, "Low frequency phononic band structures in two-dimensional arc-shaped phononic crystals," *Physics Letters A*, vol. 376, pp. 2256–2263, 2012.
- 232) X. Zhou and C. Chen, "Tuning the locally resonant phononic band structures of two-dimensional

- periodic electroactive composites," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 431, pp. 23–31, 2013.
- 233) Jiawen Xu, Shilong Li, and J. Tang Customized Shaping of Vibration Modes by Acoustic Metamaterial Synthesis (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aaad9f>)
- 234) Zhang, X. & Liu, Z. Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nat. Mat.* 7(6), 435 (2008).
- 235) Liu, A., Zhou, X., Huang, G. & Hu, G. Super-resolution imaging by resonant tunneling in anisotropic acoustic metamaterials. *J. Acoust. Soc. Am.* 132(4), 2800–2806 (2012).
- 236) Lee, S. H., Park, C. M., Yong, M. S., Wang, Z. G. & Kim, C. K. Acoustic metamaterial with negative modulus. *J. Phys. Condens. Mat.* 21(17), 175704 (2009).
- 237) Liu, Z. et al. Locally resonant sonic materials. *Science* 289(5485), 1734–1736 (2000).
- 238) Yang, Z., Mei, J., Yang, M., Chan, N. H. & Sheng, P. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Phys. Rev. Lett.* 101(20), 204301 (2008).
- 239) Meng Chen, Heng Jiang, Han Zhang, Dongsheng Li & Yuren Wang Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure, scientific reports 2018
- 240) I-Ling Chang , Zhen-Xian Liang, Hao-Wei Kao, Shih-Hsiang Chang, Chih-Ying Yang, The wave attenuation mechanism of the periodic local resonant metamaterial , Elsevier 11-10-2017
- 241) Fleury, R., Sounas, D. L., Sieck, C. F., Haberman, M. R., & Alù, A. Sound isolation and giant linear nonreciprocity in a compact acoustic circulator. *Science*, 343, 516- 519 (2014).
- 242) Fleury, R., Sounas, D., Haberman, M. R., & Alù, A. (2015). Nonreciprocal acoustics. *Acoustics Today*, 11, 14-21 (2015).
- 243) Farzad Zangeneh-Nejad and Romain Fleury Acoustic Analogues of High-Index Optical Waveguide Devices Laboratory of Wave Engineering, EPFL, 1015 Lausanne, Switzerland
- 244) Xiaole Wang Xudong Luo, Hui Zhao and Zhenyu Huang, Acoustic perfect absorption and broadband insulation achieved by double-zero metamaterials . *Applied physics letters* 112, 021901 (2018).