

Χαρακτηρισμός ακουστικών μεταλλικών με χρήση πηγών ήχου πλάσματος λέιζερ

Κωνσταντίνος Καλέρης^{1,2,*}, Εμμανουήλ Κανιολάκης-Καλούδης^{1,2}, Νικόλαος Αραβαντινός-Ζαφείρης³, Διονύσιος Τ. Γ. Κατερέλος⁴, Βασίλειος Μ. Δημητρίου^{1,2}, Μάκης Μπακαρέζος^{1,2}, Μιχάλης Ταταράκης^{1,5}, Γιάννης Μουρτζόπουλος⁶, Μιχαήλ Σιγάλας⁷, Νεκτάριος Παπαδογιάννης^{1,2,**}

¹Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λέιζερ, Πανεπιστημιακό Κέντρο Έρευνας και Καινοτομίας, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74100, Ρέθυμνο, Ελλάδα

²Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74133, Ρέθυμνο, Ελλάδα

³Τμήμα Περιβάλλοντος, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, 29100, Ζάκυνθος, Ελλάδα

⁴Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μουσικής Ακουστικής και Δονήσεων, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, 49100, Ληξούρι, Ελλάδα

⁵Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 73133, Χανιά, Ελλάδα

⁶Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, Ρίο, Πάτρα, Ελλάδα

⁷Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, Ρίο, Πάτρα, Ελλάδα

*kkaleris@hmu.gr, **nrapadogiannis@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Φωνονικοί Κρύσταλλοι και τα Ακουστικά Μεταλλικά αποτελούν ανερχόμενη τεχνολογία-κλειδί, η οποία αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην επιστήμη και τη βιομηχανία της ακουστικής τα επόμενα χρόνια. Έως και σήμερα, η αξιολόγηση των ακουστικών μετα-δομών γίνεται με παραδοσιακές ακουστικές μεθόδους όπως οι σωλήνες εμπέδησης και τα Η/Μ μεγάφωνα. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζουμε μια μέθοδο για τον ακριβή χαρακτηρισμό ακουστικών μετα-δομών βασισμένη στις πηγές ήχου πλάσματος λέιζερ. Οι πηγές αυτές παράγουν γρήγορους, ευρυζωνικούς και ισχυρούς ακουστικούς παλμούς ενώ είναι σημειακές και ουσιαστικά άυλες. Η μέθοδος επιτρέπει την αξιολόγηση της απόκρισης συχνότητας και της κατευθυντικότητας των μετα-δομών με οποιαδήποτε γεωμετρία σε πολλαπλούς άξονες διάδοσης του ήχου, ενώ παράλληλα επιτρέπει την ακουστική διέγερση μέσα στη δομή. Παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα ακουστικών αξιολογήσεων φωνονικών κρυστάλλων με φωνονικά χάσματα στην περιοχή των ακουστών συχνοτήτων και με διαφορετικό αριθμό κυψελίδων. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και δίνεται φαινομενολογική εξήγηση για τις παρατηρούμενες αλλαγές που επιφέρει η προσθήκη κυψελίδων. Η προτεινόμενη μέθοδος αναμένεται να ενισχύσει την έρευνα και την εμπορική υιοθέτηση των ακουστικών μεταλλικών στο άμεσο μέλλον.

Characterization of acoustic metamaterials using laser plasma sound sources

ABSTRACT

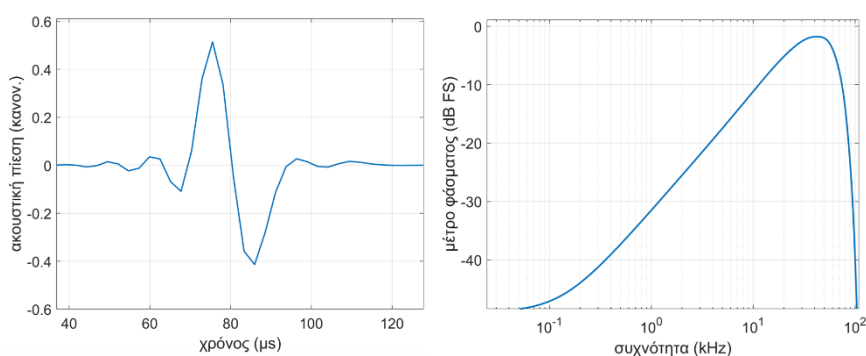
Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials are an emerging key-enabling technology that is expected to play a significant role in the science and industry of acoustics in the coming years. Until now, the evaluation of acoustic meta-structures has been carried out using traditional methods such as impedance tubes and electromagnetic loudspeakers. Here we present a method for the precise characterization of acoustic meta-structures based on laser plasma sound sources. These sources produce rapid, broadband, and powerful acoustic pulses, while being point-like and essentially massless. The method allows for the evaluation of the frequency response and directivity of meta-structures with any geometry in multiple sound propagation axes, while also enabling acoustic excitation inside the structure. Experimental results are presented from acoustic evaluations of phononic crystals with transmission band gaps in the audible range and different number of unit cells. The results are analyzed and phenomenological explanations are given for the changes observed due to the different number of unit cells. The method is expected to boost research and commercial adoption of acoustic metamaterials in the near future.

1. Εισαγωγή

Μέχρι και σήμερα, ο χαρακτηρισμός ακουστικών μεταυλικών (AM) και φωνονικών κρυστάλλων (ΦΚ) με περιοχή λειτουργίας στο ακουστό φάσμα γίνεται είτε με τη χρήση Σωλήνων Εμπέδησης (ΣΕ, αγγλικά: impedance tubes) είτε με συμβατικά ηλεκτρομηχανικά (ΗΜ) μεγάφωνα. Οι σωλήνες εμπέδησης είναι κατάλληλοι για την ακουστική αξιολόγηση δομών μικρών διαστάσεων, π.χ. σε επίπεδο ενός ή λίγων μοναδιαίων κυψελίδων (ΜΚ), ενώ τα ΗΜ μεγάφωνα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση μεγαλύτερων δομών, π.χ. σε επίπεδο ακουστικού πάνελ. Οι ΣΕ παρέχουν περιβάλλον μέτρησης χαμηλού θορύβου, όμως επιβάλλουν σημαντικούς περιορισμούς στη γεωμετρία της δομής. Συγκεκριμένα, το δείγμα πρέπει να είναι κυλινδρικό ή κυβικό με συγκεκριμένες διαστάσεις ώστε να εφαρμόζει με ακρίβεια στον σωλήνα. Επίσης, η αξιολόγηση των δομών σε διαφορετικούς άξονες διάδοσης ήχου απαιτεί διαφορετικό δείγμα για κάθε άξονα. Η ακουστική διέγερση στους ΣΕ γίνεται αναγκαστικά έξω από τη δομή, ενώ η συχνοτική περιοχή λειτουργίας τους είναι συχνά περιορισμένη, συνήθως έως περίπου τα 7 kHz [1]. Τα συμβατικά ηχεία δεν είναι κατάλληλα για την αξιολόγηση μικρότερων δομών, όπως οι μοναδιαίες κυψελίδες, λόγω της αυξημένης περιθλασης που προκαλείται από το μεγάλο μέγεθος της πηγής. Η διέγερση εντός του δείγματος μέσω συμβατικών ηχείων είναι αδύνατη, με εξαίρεση τις υψηλές ακουστικές συχνότητες ή τους υπέρηχους, όπου η διέγερση μπορεί να επιτευχθεί με ιδιαίτερα μικρούς ΗΜ ή πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς. Ωστόσο, αυτό συνπάγεται παρεμβάσεις στο υλικό με δυναμικά επιζήμια αποτελέσματα ή και επίδραση στην

μετρούμενη ακουστική απόκριση [2]. Τέλος, η ισχυρή κατευθυντικότητα τέτοιων συμβατικών ΗΜ και πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων στις υψηλές συχνότητες καθιστά αδύνατη την αξιολόγηση σε διαφορετικές κατευθύνσεις διάδοσης του ήχου.

Στην εργασία αυτή αξιοποιούμε μια νέα μέθοδο για την μελέτη ΦΚ που βασίζεται στις Πηγές Ήχου Πλάσματος Λείζερ (ΠΗΠΛ), η οποία εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, ειδικά για την αξιολόγηση μεταδομών μιας ή λίγων ΜΚ. Οι ΠΗΠΛ παράγονται στον ατμοσφαιρικό αέρα ή σε άλλα αέρια ή υγρά μέσα ως αποτέλεσμα της θερμοελαστικής αντίδρασης που ακολουθεί τον ιονισμό του μέσου από ακτινοβολία λέιζερ υψηλής έντασης (laser-induced breakdown). Αντίστοιχα, στην περίπτωση στερεών στόχων σχηματίζονται από την πίεση που παράγεται στον περιβάλλοντα αέρα από τα θραύσματα υλικού που αποκολλώνται από την επιφάνεια του στόχου. Για τον ιονισμό του ατμοσφαιρικού αέρα από παλμούς λέιζερ νανοδευτερολέπτων, η αλληλεπίδραση παλμών υψηλής έντασης ($> 10^{12} \text{ W/cm}^2$) με τα μόρια του αέρα οδηγεί στη δημιουργία ελευθέρων ηλεκτρονίων υψηλής θερμοκρασίας. Τα ενεργειακά (θερμά) ελεύθερα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με τα αρχικά ψυχρά βαριά σωματίδια, δηλαδή ιόντα, άτομα και μόρια του αέρα εντός του διεγερμένου όγκου προκαλώντας τη θέρμανση των βαρέων σωματιδίων σε χρόνο λίγων μικροδευτερολέπτων [3][4]. Η θέρμανση αυτή οδηγεί σε θερμοελαστική αντίδραση του όγκου αέρα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ακουστικού παλμού N (acoustic N-pulse). Η διάρκεια ενός τέτοιου παλμού κυμαίνεται από τα λίγα μικροδευτερόλεπτα (ή και ακόμη εκατοντάδες νανοδευτερόλεπτα για παλμούς λέιζερ φεμτοδευτερολέπτων) έως και τα εκατοντάδες μικροδευτερόλεπτα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του παλμού λέιζερ. Ένας τυπικός παλμός N φαίνεται στην Εικόνα 1 στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Οι παλμοί N εμφανίζουν υπερτερόμορο προφίλ πρώτης τάξης στην χαμηλή περιοχή του ακουστικού φάσματος συχνοτήτων και συγκεκριμένα από τα 20 Hz έως τις υψηλές συχνότητες (~20 kHz) ή τους κοντινούς υπέρηχους (<60 kHz), ενώ για διέγερση λέιζερ φεμτοδευτερολέπτων μπορεί να εκτείνεται έως τους μέσους υπέρηχους (έως ~500 kHz) ή ακόμα και τα MHz [5]. Η μέγιστη πίεση τους μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή (>130 dB) ανάλογα με την συνολική οπτική ενέργεια που εναποτίθεται στον αέρα. Εκτενείς αναλύσεις των ΠΗΠΛ έχουν γίνει στις εργασίες [6][12].



Εικόνα 1: α) χρονικό και β) φασματικό προφίλ της ΠΗΠΛ που χρησιμοποιήθηκε για τις ακουστικές μετρήσεις. Η ΠΗΠΛ δημιουργήθηκε από παλμούς λέιζερ διάρκειας 6 ns, μήκους κύματος 1064 nm και ενέργειας 20 mJ. Οι παλμοί εστιάστηκαν με φακό εστιακής απόστασης 7.5 cm.

Η άυλη υπόσταση και η σημειακή (σφαιρική) γεωμετρία των ΠΗΠΑ, μαζί με το επαναλαμβανόμενο κρουστικό χρονικό προφίλ τους και το ευρύ συχνοτικό φάσμα, τις καθιστούν κατάλληλες για πληθώρα εφαρμογών. Οι ΠΗΠΑ χρησιμοποιούνται ήδη στην Φασματοσκοπία Ιονισμού Λείζερ (LIBS) [13], σε μη καταστροφικές δοκιμές [14], διαγνωστική υλικών [15] και στρατιωτικές εφαρμογές [16], ενώ έχει προταθεί και η χρήση τους για μετρήσεις ακουστικής χώρων [10]. Πρόσφατα επίσης έχει επιδειχθεί πειραματικά η δυνατότητα ελεγχόμενης αναπαραγωγής σύνθετων ηχητικών σημάτων μέσω ΠΗΠΑ [17]. Η καταλληλότητα και η υψηλή ακρίβεια της μεθόδου για τον ακουστικό χαρακτηρισμό ΦΚ έχει παρουσιαστεί σε εργασία της ερευνητικής ομάδας στο περιοδικό Nature Communications Materials [19]. Στην εργασία μελετήθηκε η ακουστική διάδοση σε ΦΚ διαφορετικών γεωμετριών. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με υπολογισμούς προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων (FEM), εμφανίζοντας εξαιρετική σύγκλιση.

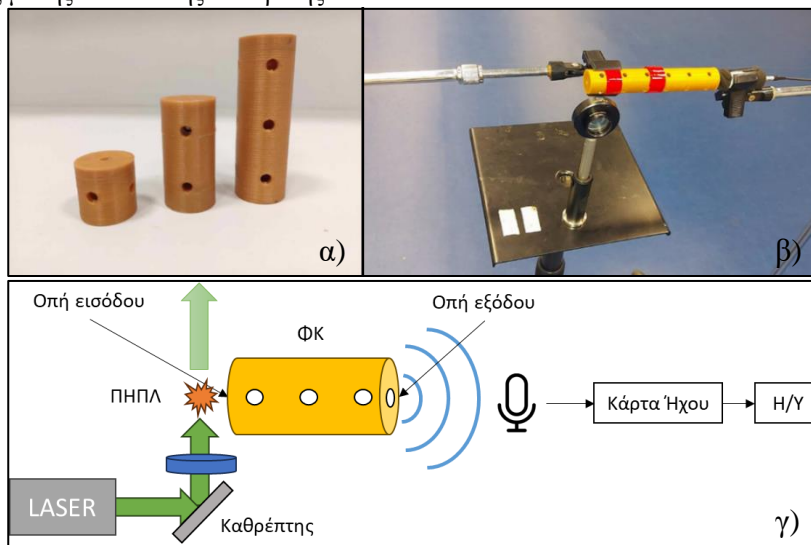
Στην παρούσα εργασία, η οποία αποτελεί συνέχεια της παραπάνω, χρησιμοποιούνται ΠΗΠΑ για την μέτρηση της ακουστικής διάδοσης (transmission) σε ΦΚ αποτελούμενους από διαφορετικό αριθμό MK. Συγκεκριμένα, αξιολογούνται 5 κυλινδρικοί ΦΚ κατασκευασμένοι μέσω επανάληψης 2 έως 6 όμοιων MK. Σκοπός είναι η μελέτη της επίδρασης του αριθμού των MK στο ακουστικό φάσμα διάδοσης των ΦΚ και συγκεκριμένα στο βάθος των φωνονικών χασμάτων και το φασματικό προφίλ των ζωνών διάδοσης. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία μετρήσεων. Ακολουθεί η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων (Ενότητα 3) και τα συμπεράσματα (Ενότητα 4).

2. Μεθοδολογία

Στην Εικόνα 2α φαίνονται η MK και δύο ΦΚ αποτελούμενοι από 2 και 3 κυψελίδες. Οι ΦΚ αποτελούνται από ένα δίκτυο σφαιρικών κοιλοτήτων συνδεδεμένων μέσω κυλινδρικών σωλήνων. Οι κυψελίδες έχουν σταθερά πλέγματος $a = 29 \text{ mm}$, η ακτίνα των σφαιρών είναι $R = 0.395a$ και η ακτίνα των κυλινδρικών σωλήνων $r = 0.095a$. Τα δείγματα κατασκευάστηκαν από πολυγαλακτικό οξύ (PLA) με την τεχνική κατασκευής σύντηξης νημάτων σε 3D εκτυπωτή (daVinci Super).

Οι ΠΗΠΑ δημιουργήθηκαν από παλμούς 6 ns, 1064 nm και ενέργειας 20 mJ, οι οποίοι παρήχθησαν από το laser Quantel Brilliant B. Η εστίαση των παλμών έγινε με φακό 7,5 cm σε απόσταση 1 mm από την οπή εισόδου, βλ. Εικόνα 2β και 2γ. Οι ακουστικοί N-παλμοί είχαν διάρκεια περίπου ~20 μs. Οι πηγές πλάσματος τοποθετήθηκαν στο κέντρο των σφαιρικών όγκων μέσω κάμερας απεικόνισης της φωτεινής ακτινοβολίας πλάσματος. Το ακουστικό σύστημα μέτρησης βασίζεται σε μικρόφωνο ευρέος φάσματος 90 kHz και υψηλού δυναμικού εύρους 35dB(A)-160dB (G.R.A.S 46BE και μονάδα τροφοδοσίας 12AK), το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση 3 mm από την οπή εξόδου. Για τη δειγματοληψία χρησιμοποιήθηκε κάρτα ήχου ευρέος φάσματος 92 kHz (RME Fireface 802) με ρυθμό δειγματοληψίας 192 kHz και ανάλυση 24-bit. Τα ηχητικά σήματα καταγράφηκαν με το λογισμικό Audacity. Κάθε ακουστική μέτρηση έχει διάρκεια 1 λεπτού και περιέχει 600 παλμούς, με ρυθμό επανάληψης 10 Hz. Για την μείωση της στάθμης θορύβου λήφθηκε ο μέσος όρος των 600 ακουστικών αποκρίσεων σε κάθε μέτρηση. Το ακουστικό φάσμα

ηχητικής διάδοσης υπολογίστηκε μέσω γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) της μέσης ακουστικής απόκρισης.



Εικόνα 2: α) μοναδιαία κυψελίδα και φωνονικοί κρύσταλλοι 2 και 3 κυψελίδων, β) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης για την μέτρηση ΦΚ 6 κυψελίδων και γ) σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης.

3. Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 3 φαίνεται η φασματική απόκριση (transmission) των ΦΚ 2 έως 6 κυψελίδων σε διέγερση ΠΗΠΛ. Από την εικόνα προκύπτει ότι η προσθήκη κυψελίδων αλλάζει τη φασματική απόκριση των ΦΚ και συγκεκριμένα οδηγεί σε αύξηση του βάθους των φωνονικών χασμάτων και σε αλλαγές του φασματικού προφίλ στις περιοχές διέλευσης. Είναι γνωστό ότι τα φωνονικά χάσματα (ΦΧ), όπως και οι ζώνες διέλευσης, σχηματίζονται από καταστροφική ή ενισχυτική συμβολή αντίστοιχα, λόγω της περιοδικής αλλαγής στην ακουστική εμπέδηση - ή αντίστοιχα τον ακουστικό δείκτη διάθλασης - του αέρα μέσα στην φωνονική δομή. Συγκεκριμένα, η ακουστική εμπέδηση που συναντάει το διαδιδόμενο ακουστικό κύμα αλλάζει διαδοχικά μεταξύ των στενών κυλινδρικών σωλήνων και των συγκριτικά ευρύτερων σφαιρών. Ως εκ τούτου, η ακουστική συμπεριφορά του ΦΚ παρομοιάζει διαστρωματομένο υλικό, όπου ο ήχος σε κάθε διεπαφή μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται. Ο αριθμός των στρωμάτων εξαρτάται από τον αριθμό των μοναδιαίων κυψελίδων. Η συνθήκη για καταστροφική συμβολή δίνεται από την σχέση:

$$2n_2d \cos(\theta_2) = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (1)$$

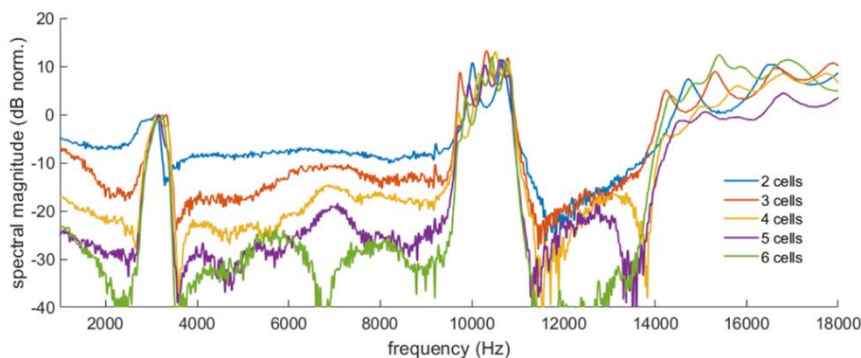
όπου n_2 ο δείκτης διάθλασης του δεύτερου στρώματος, d το πάχος του στρώματος, θ_2 η γωνία διάθλασης, m η τάξη της συμβολής και λ το μήκος κύματος του ήχου. Δεδομένου ότι η γωνία διάθλασης εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης, για μια σφαιρική πηγή η θ_2 παίρνει ένα μεγάλο εύρος τιμών, ενώ οι πιθανές πολλαπλές ανακλάσεις μέσα στη σφαίρα οδηγούν σε διαφορετικά μήκη d . Έτσι η συνθήκη

ικανοποιείται για μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Με την αύξηση του αριθμού των κυψελίδων, αυξάνεται η πιθανότητα ικανοποίησης της συνθήκης συμβολής οδηγώντας σε εμβάθυνση των ΦΧ, σε μια διαδικασία που ονομάζεται σκέδαση Bragg.

Σχετικά με τις ζώνες διέλευσης, πέραν της πρώτης, η αύξηση του αριθμού των κυψελίδων οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των φασματικών κορυφών. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στην φασματική ζώνη διάδοσης μεταξύ 9 και 11 kHz, όπου ο αριθμός των φασματικών κορυφών είναι ίσος με τον αριθμό των κυψελίδων, όπως φαίνεται αναλυτικά στην Εικόνα 4α) - ε). Αυτό γίνεται κατανοητό εξετάζοντας τη σχέση ενισχυτικής συμβολής για κάθετη πρόσπτωσηση $\theta_2 = 0$, όπου:

$$2n_2d = m\lambda \quad (2)$$

Το διάγραμμα της Εικόνας 4στ) δίνει μια σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου, όπου η πρόσπτωσηση έχει σχεδιαστεί διαγώνια για λόγους απεικόνισης. Στην περίπτωση των δύο κυψελίδων σχηματίζονται τρεις διαδρομές διαφορετικού μήκους, όπου μεταξύ τους εμφανίζουν διαφορά μήκους $d_2 - d_1 = \Delta d_1$ (η πρώτη με τη δεύτερη και η δεύτερη με την Τρίτη) καθώς και $d_3 - d_1 = \Delta d_2$ (η πρώτη με την τρίτη). Έτσι, για $m = 1$ υπάρχουν δύο μήκη κύματος λ_1 και λ_2 που ικανοποιούν την Σχέση 2, τα οποία αντιστοιχούν στις δύο κορυφές της Εικόνας 4α). Με την προσθήκη μιας ακόμα κυψελίδας, υπάρχουν τρία μήκη κύματος που ικανοποιούν την Σχέση 2, κ.ο.κ. Στην τρίτη ζώνη διάδοσης που ξεκινάει στα 14 kHz, εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής 2^{ns} τάξης, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του φασματικού προφίλ.

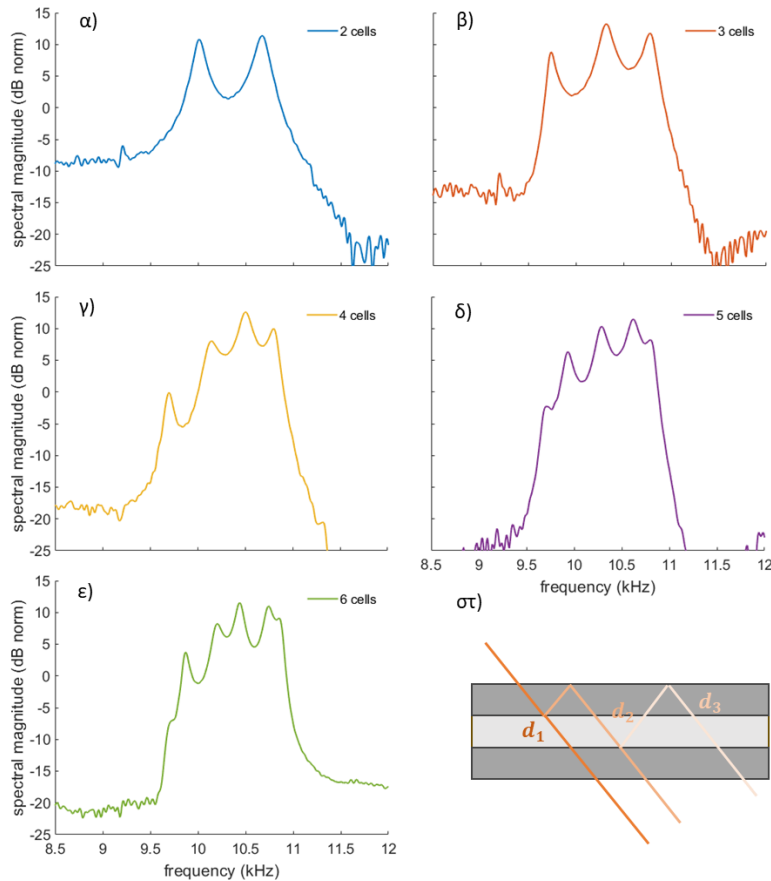


Εικόνα 3. Συχνотική απόκριση ΦΚ αποτελούμενων από 2 έως 6 κυψελίδες, στην ακουστική διέγερση ΠΗΠΛ με το προφίλ της Εικόνας 1.

1. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν νέα πειραματικά αποτελέσματα από την ακουστική αξιολόγηση φωνονικών κρυστάλλων μέσω διέγερσης από πηγές ήχου πλάσματος λέιζερ. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε η ακουστική διάδοση (transmission) μέσα από φωνονικούς κρυστάλλους κατασκευασμένους από διαφορετικό αριθμό μοναδιαίων κυψελίδων. Σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση του αριθμού των κυψελίδων στην ακουστική απόκριση του φωνονικού κρυστάλλου. Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των κυψελίδων οδηγεί σε βάθυνση των φωνονικών χασμάτων καθώς και σε αλλαγές στο φασματικό προφίλ των ζωνών διέλευσης. Οι

παρατηρούμενες αλλαγές ερμηνεύθηκαν μέσω του φαινομενολογικού μοντέλου ακουστικής διάδοσης σε διαστρωματωμένα υλικά. Τα πειραματικά αποτελέσματα αναδεικνύουν την ακρίβεια και την καταλληλότητα της μεθόδου ακουστικής αξιολόγησης μεταλλικών μέσω διέγερσης από πηγές ήχου πλάσματος λέιζερ.



Εικόνα 4: α)-ε) φασματικά προφίλ αποκρίσεων ΦΚ αποτελούμενων από 2 έως 6 κυψελίδες στη συχνοτική ζώνη 8.5 – 12 kHz όπου εμφανίζονται οι φασματικές κορυφές σε συγκεκριμένες συχνότητες διάδοσης, στ) σχηματική απεικόνιση των διαδρομών του ήχου μέσα σε ΦΚ δύο κυψελίδων.

3. Αναφορές

- [1] Aravantinos-Zafirios, N., Sigalas, M. & Katerelos, G. T. D. Complete acoustic bandgaps in a three-dimensional phononic metamaterial with simple cubic arrangement. *J. Appl. Phys.* **133**, 065101 (2023)
- [2] Bilal, O. R., Ballagi, D. & Daraio, C. Architected lattices for simultaneous broadband attenuation of airborne sound and mechanical vibrations in all directions. *Phys. Rev. Appl.* **10**, 054060 (2018)

- [3] Delibašić Marković, H., Kaleris, K., Papadogiannis, N. A. & Petrović, V. Comparative analytical and numerical investigation of the plasma density in atmospheric air generated by nanosecond laser pulses. *Laser Physics Letters* **21**, 033001 (2024)
- [4] Kaleris, K. et al. On the correlation of light and sound radiation following laser-induced breakdown in air. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 435207 (2020)
- [5] Kaleris, K. et al. Laser-plasma sound sources in atmospheric air: A systematic experimental study. *JSV*. **570**, 118000 (2023)
- [6] Kaleris, K. Sound reproduction from laser-driven pulsed acoustic sources. PhD thesis (Electrical and Computer Engineering dept., University of Patras, 2021)
- [7] Oksanen, M. & Hietanen, J. Photoacoustic breakdown sound source in air. *Ultrasonics* **32**, 327–331 (1994)
- [8] Ni Xiao-wu et al. On the generation of laser-induced plasma acoustic waves. *Acta Phys. Sin.* **7**, 143 (1998)
- [9] Qin, Q. & Attenborough, K. Characteristics and application of laser-generated acoustic shock waves in air. *Applied Acoustics* **65**, 325–340 (2004)
- [10] Bolaños, G. J., Pulkki, V., Karppinen, P. & Hæggström, E. An optoacoustic point source for acoustic scale model measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* **133**, 221–227 (2013)
- [11] Kaleris, K. et al. Experimentally validated modeling of the optical energy deposition in highly ionized ambient air by strong femtosecond laser pulses. *Eur. Phys. J. D.* **75**, 236 (2021)
- [12] Manikanta, E., Vinoth Kumar, L., Leela, C. H. & Prem Kiran, P. Effect of laser intensity on temporal and spectral features of laser generated acoustic shock waves: ns versus ps laser pulses. *Appl. Optics* **56**, 6902–6910 (2017)
- [13] Vincent, G. et al. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Imaging for Material and Biomedical Applications: Recent Advances and Future Perspectives. *Anal. Chem.* **95**, 49–69 (2023)
- [14] Murdoch, N. et al. Laser-induced breakdown spectroscopy acoustic testing of the Mars 2020 microphone. *P&SS* **165**, 260–271 (2019)
- [15] Sullenberger, R. M., Kaushik, S. & Wynn, C. M. Photoacoustic communications: delivering audible signals via absorption of light by atmospheric H₂O. *Opt. Lett.* **44**, 622 (2019)
- [16] Kaleris, K., Stelzner, B., Hatziantoniou, P., Trimis, D. & Mourjopoulos, J. Laser-sound: optoacoustic transduction from digital audio streams. *Sci. Rep.* **11**, 476 (2021)
- [17] Hussain shah, S. K. et al. Laser induced breakdown spectroscopy methods and applications: A comprehensive review. *Radiat. Phys. Chem.* **170**, 108666 (2020)
- [18] Kaleris, K., Stelzner, B., Hatziantoniou, P., Trimis, D. & Mourjopoulos, J. Laser-Sound Transduction from Digital $\Sigma\Delta$ Streams. *JAES* **70**, 50–61 (2022)
- [19] Kaleris, K., Kaniolakis-Kaloudis, E., Aravantinos-Zafiris, N. et al. Acoustic metamaterials characterization via laser plasma sound sources. *Commun Mater* **5**, 93 (2024)