

Χαρακτηρισμός και έλεγχος υπερ-υψίσυχνων τρεχόντων ακουστικών κυμάτων σε κρυσταλλικά στερεά με την χρήση ταχείας φασικής απεικόνισης με την χρήση ns λέιζερ

Εμμανουήλ Κανιολάκης Καλούδης^{1,2}, Κωνσταντίνος Καλέρης^{1,2}, Ευάγγελος Κασελούρης^{1,2}, Γιάννης Ορφανός^{1,2}, Μάκης Μπακαρέζος^{1,2}, Βασίλειος Δημητρίου^{1,2}, Μιχαήλ Ταταράκης^{1,3}, Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης^{1,2}

¹Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

²Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74100 Ρέθυμνο

³Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 73133 Χανιά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση υπερ-υψίσυχνων ακουστικών κυμάτων για την δυναμική και ελεγχόμενη διαμόρφωση κρυσταλλικών στερεών βρίσκει σημαντικές εφαρμογές στην επιστήμη και τη βιομηχανία των υλικών καθώς και στην οπτοακουστική τεχνολογία. Η γένεση των ακουστικών κυμάτων στους κρυστάλλους γίνεται με διάφορες μεθόδους, όπως με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς και με διέγερση από υπερβραχείς παλμούς λέιζερ. Τα ακουστικά κύματα ταξιδεύουν μέσα στους κρυστάλλους και διαμορφώνουν τα κρυσταλλικά επίπεδα ανάλογα με την συχνότητα και την ένταση τους. Για την ανάπτυξη σχετικών τεχνολογικών εφαρμογών απαιτούνται ταχείες και υψηλής ακρίβειας διαγνωστικές μέθοδοι χαρακτηρισμού και απεικόνισης των ακουστικών κυμάτων κατά τη διάδοσή τους μέσα στα κρυσταλλικά στερεά. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται τεχνικές ταχείας οπτικής απεικόνισης μέσω συμβολομετρίας και διαθλαστικής απεικόνισης με χρήση παλμών λέιζερ νανοδευτερολέπτων. Ο ιδιαίτερα μικρός χρόνος αλληλεπίδρασης των οπτικών παλμών με το οδεύον ακουστικό κύμα επιτρέπει τη σχεδόν στατική, και κατά συνέπεια ιδιαίτερα ευκρινή, απεικόνιση του.

Characterization and control of ultra-high-frequency acoustic waves in crystalline solids using fast optical imaging with ns lasers

ABSTRACT

In recent years, the use of ultra-high-frequency acoustic waves for the dynamic and controlled modulation of crystalline solids has found significant applications in material science, industry and in optoacoustic technology. The generation of these acoustic waves in crystals is achieved by various methods, such as piezoelectric transducers and excitation from ultrashort laser pulses. The acoustic waves travel through the crystals and modify the crystal planes, depending on their frequency and

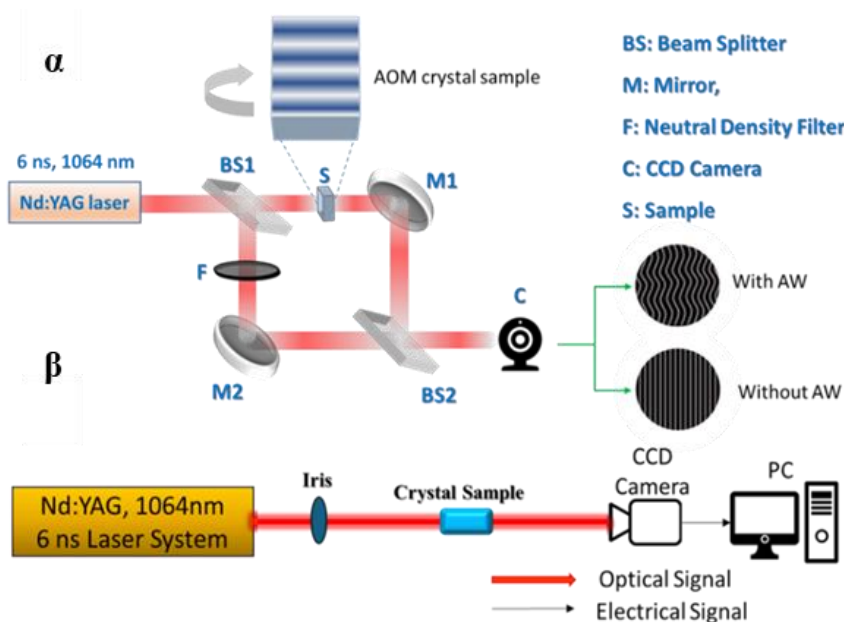
intensity. The development of related technological applications requires rapid and highly accurate diagnostic methods for characterizing and imaging the acoustic waves as they propagate through crystalline solids. This work presents techniques for rapid optical imaging through interferometry and refractive imaging using nanosecond laser pulses. The very short interaction time of the optical pulses with the propagating acoustic wave allows for near-static and, consequently, highly precise imaging.

1. Εισαγωγή

Τα υπερυψίσυχνα τρέχοντα ακουστικά κύματα έχουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη επιστήμη και βιομηχανία. Συγκεκριμένα βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς της ακουστικής και της επιστήμης υλικών, όπως στην κρυσταλλογραφία [1], στις μη καταστροφικές δοκιμές υλικών [2] και στην επεξεργασία σήματος [3]. Ιδιαίτερα, παρουσιάζουν επιστημονικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον ως ένα μέσο για την δυναμική διαμόρφωση κρυστάλλων, καθώς, η διάδοση ακουστικών κυμάτων δύναται να μετατοπίσει ή κάμψει τα κρυσταλλικά επίπεδα με τρόπο που καθορίζεται από την συχνότητα και την ένταση τους. Οι ακουστικά διαμορφωμένοι κρύσταλλοι έχουν διάφορες εφαρμογές στην τεχνολογία και την επιστήμη, όπως στην παραγωγή ακτίνων γ [4][5] και στην ανάπτυξη ακουστικών διαμορφωτών και κατευθυντών οπτικής δέσμης. Η δημιουργία των ακουστικών κυμάτων γίνεται με διάφορους μηχανισμούς και κυρίως με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς [6]. Σε αυτή την περίπτωση η υπερυψίσυχη ημιτονοειδής κίνηση του μετατροπέα δημιουργεί ένα τρέχον ακουστικό κύμα το οποίο, λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται, διαμορφώνει δυναμικά τα κρυσταλλικά επίπεδα. Ο έλεγχος της συχνότητας και του πλάτους των ακουστικών κυμάτων γίνεται μέσω των ηλεκτρικών σημάτων οδήγησης και ιδιαίτερα μέσω της συχνότητας και της τάσης [7]. Για τον αποτελεσματικό έλεγχο και χαρακτηρισμό των τρέχοντων ακουστικών κυμάτων, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της χωρικής κατανομής της ακουστικής πίεσης μέσα στο κρυσταλλικό ή κάποιο άλλο υλικό. Το παραπάνω επιτυγχάνεται με τεχνικές ταχείας οπτικής απεικόνισης, όπως η ns συμβολομετρία και η ns διαθλαστική απεικόνιση. Συγκεκριμένα, στη συμβολομετρία, με χρήση συμβολόμετρου Mach-Zehnder, η χωρική κατανομή των τρέχοντων ακουστικών κυμάτων απεικονίζεται μέσω της παραμόρφωσης των κροσσών συμβολής από την φασική ανομοιογένεια της φωτεινής δέσμης που διέρχεται από περιοχές του κρυστάλλου με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Η παραπάνω ανομοιογένεια στον δείκτη διάθλασης οφείλεται στην αναδιάταξη των κρυσταλλικών επιπέδων από τα τρέχοντα ακουστικά κύματα. Μια εναλλακτική τεχνική απεικόνισης ανομοιογενειών στον δείκτη διάθλασης υλικών κατάλληλη για την απεικόνιση ακουστικών κυμάτων είναι η οπτική φασική διαθλαστική απεικόνιση. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εκτροπή του φωτός λόγω της περιοδικής διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης κάθετα στην διάδοση της δοκιμαστικής οπτικής δέσμης, όπως προκύπτει και από τις εργασίες [8][9]. Η εκτροπή αυτή απεικονίζεται ως ανομοιομορφία στην κατανομή της έντασης του φωτός πάνω στον αισθητήρα μιας κάμερας υψηλής ευκρίνειας [10][11].

2. Μεθοδολογία

Παρουσιάζεται η μεθοδολογία από πειράματα ανίχνευσης και απεικόνισης τρέχοντων ακουστικών κυμάτων σε κρυστάλλους χαλαζία (Quartz) και γυαλιού (BK7). Η ακουστική διέγερση των κυμάτων έγινε με δύο τρόπους, με χρήση πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα καθώς και με εστίαση ns παλμών λέιζερ. Στην πρώτη περίπτωση, για την διέγερση ενός κρυστάλλου Quartz με μήκος 5 εκ χρησιμοποιήθηκε πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας TeO₂ με συχνότητα συντονισμού 40 MHz και χωρητικότητα 300 pF. Ο κρύσταλλος επιλέχθηκε εξαιτίας της υψηλής διαπερατότητάς του από δέσμες λέιζερ με μήκος κύματος 532 nm και 1064 nm, και εξαιτίας του υψηλού ακουστό-οπτικό συντελεστή, που επιτρέπει την έντονη διαμόρφωση της διαγνωστικής δέσμης λέιζερ λόγω της ακουστικής διαμόρφωσης του κρυστάλλου. Η ηλεκτρική οδήγηση του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα έγινε από δύο διαφορετικές μονάδες οδήγησης. Μια ειδικά σχεδιασμένη μονάδα με σταθερή συχνότητα οδήγησης στα 40,65 MHz και τάση οδήγησης 100 Vpp και μια ρυθμιζόμενη γεννήτρια σήματος γενικής χρήσης (Tektronix AFG1062) με μέγιστη συχνότητα 60 MHz και τάση 10 Vpp. Για την ταχεία και στατική απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε, ένα παλμικό σύστημα λέιζερ Nd:YAG, με παλμούς διάρκειας 6 ns και κεντρικό μήκος κύματος στα 1064 nm. Η χρήση παλμικού λέιζερ επιτρέπει την στατική απεικόνιση των τρεχόντων ακουστικών κυμάτων, καθώς στην διάρκεια των 6ns που διαρκεί ο κάθε παλμός το κύμα έχει ταξιδέψει μέσα στο Quartz 33 μm, που είναι μήκος αρκετά μικρότερο από το μήκος κύματος των τρεχόντων ακουστικών κυμάτων.



Εικόνα 1: Σχεδιάγραμμα της οπτικής διάταξης απεικόνισης με α) ns συμβολομετρία β) ns διαθλαστική απεικόνιση

Επιπλέον, και οι δύο τεχνικές επιτρέπουν τον ποσοτικό υπολογισμό της μεταβολής της ακουστικής πίεσης και ως εκ τούτου τον χαρακτηρισμό των ακουστικών κυμάτων που διατρέχουν το υλικό. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της συμβολομετρίας οι γνωστές εξισώσεις διαφοράς φάσης προς πίεση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της μεταβολής της ακουστικής πίεσης κάθετα στην διάδοση y των ακουστικών κυμάτων.

$$\Delta\varphi(y, z) = \frac{qn_0^3\omega z}{2c} \sigma(y, z) \quad (1)$$

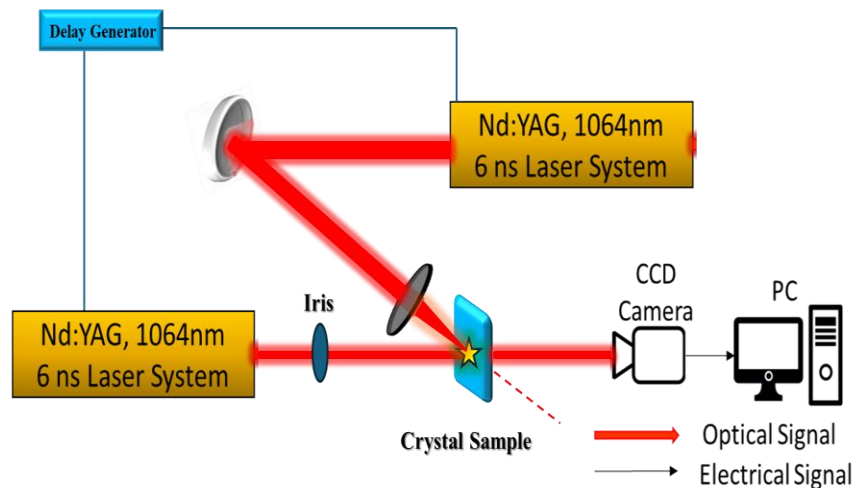
όπου, σ , q , c , n_0 , ω και z είναι, η τάση (σε μονάδες πίεσης Pascal), ο πιεζοπτικός τανυστής του υλικού, η ταχύτητα του φωτός στο υλικό, ο μη διαταραγμένος δείκτης διάθλασης και ο οπτικός δρόμος του φωτός στο υλικό, αντίστοιχα.

Ενώ, για την περίπτωση της διαθλαστικής απεικόνισης αναπτύχθηκε μοντέλο για τον υπολογισμό της μεταβολής της ακουστικής πίεσης των τρέχοντων ακουστικών κυμάτων συναρτήσει της γωνίας διάθλασης του πεδίου του λέιζερ. Συγκεκριμένα, η διαφορά πίεσης dP μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση:

$$\tan \theta_r = -\frac{C_{n_0}}{n_0} \cdot \frac{dP}{dx} w \quad (2)$$

όπου, θ_r , C_{n_0} , n_0 και w είναι η γωνία εκτροπής του φωτός, η πιεζο-οπτική σταθερά του υλικού, ο μη διαταραγμένος δείκτης διάθλασης και ο οπτικός δρόμος του φωτός στο υλικό, αντίστοιχα.

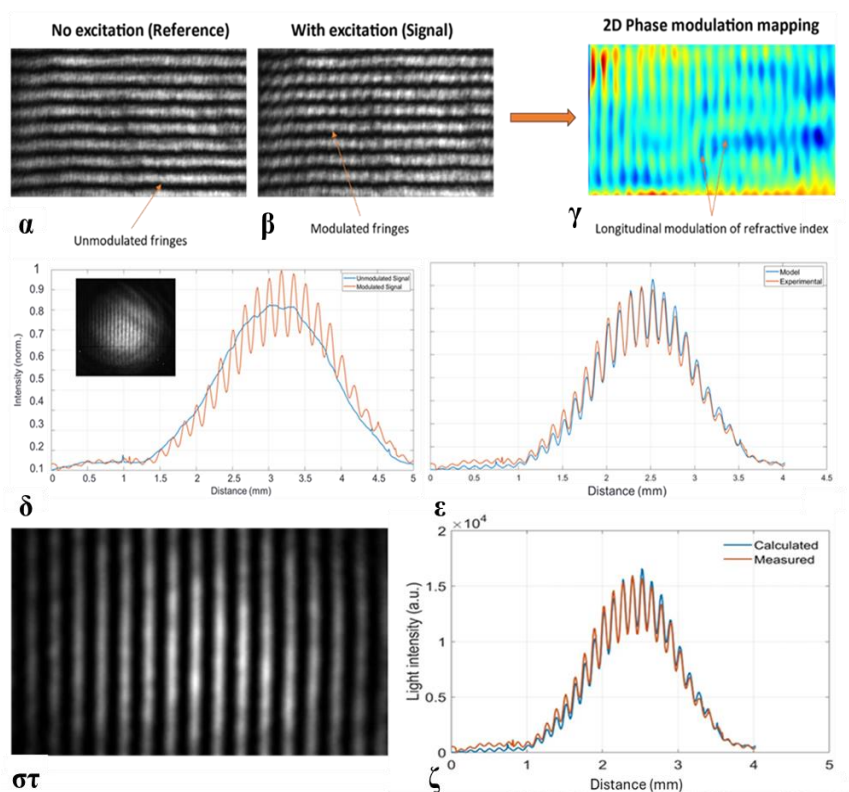
Στην περίπτωση της διέγερσης με ns παλμούς λέιζερ (εικόνα 2), μια δέσμη λέιζερ με κεντρικό μήκος κύματος 1064 nm, διάρκεια παλμού 6 ns και συχνότητα επανάληψης παλμών 5 Hz, εστιάζεται με ένα φακό με εστιακό μήκος 20 cm λίγο μετά τον κρύσταλλο BK7. Η εναποτιθέμενη οπτική ενέργεια της δέσμης θερμαίνει τον κρύσταλλο με αποτέλεσμα την αποκόλληση υλικού από την επιφάνεια του. Η θερμική διέγερση του υλικού από την δέσμη του λέιζερ δημιουργεί το ακουστικό κύμα μέσα στον κρύσταλλο, ενώ το υλικό που αποκολλάται σπρώχνει τα άτομα του αέρα προκαλώντας την δημιουργία ενός δεύτερου ακουστικού κύματος το οποίο διαδίδεται στον αέρα. Η μετατροπή της οπτικής ενέργειας σε ακουστική, καθώς και τα ακουστικά κύματα απεικονίζονται με την τεχνική της διαθλαστικής απεικόνισης, έχοντας ως δέσμη ελέγχου την δέσμη από ένα δεύτερο παλμικό σύστημα λέιζερ Nd:YAG, με παλμούς διάρκειας 6 ns και κεντρικό μήκος κύματος στα 1064 nm. Η δέσμη ελέγχου συγχρονίζεται με μια ps γεννήτρια καθυστέρησης (thinkSRS DG535), ώστε να έπεται χρονικά της δέσμης διέγερσης με καθυστέρηση ρυθμιζόμενη με ακρίβεια λίγων ns.



Εικόνα 2: Σχεδιάγραμμα της διέγερσης τρέχοντων ακουστικών κυμάτων με συγχρονισμό δύο ns laser συστημάτων

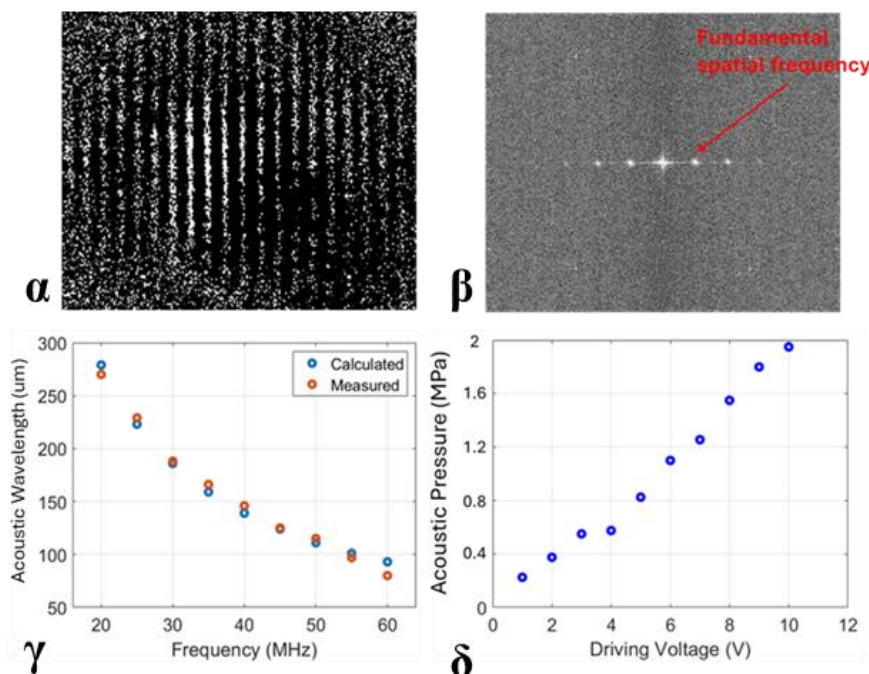
3. Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού των ακουστικών κυμάτων σε κρύσταλλο Quartz με την μέθοδο ταχείας οπτικής απεικόνισης μέσω ps συμβολομετρίας και μέσω ps διαθλαστικής απεικόνισης. Στις εικόνες 3α και 3β παρουσιάζεται το μοτίβο των κροσσών συμβολής, χωρίς και με την παρουσία ακουστικών κυμάτων αντίστοιχα, όπου η χαρακτηριστική παραμόρφωση του μοτίβου από την αλλαγή στον δείκτη διάθλασης είναι φανερή. Με εφαρμογή του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) στις παραπάνω εικόνες μεταβαίνουμε στο πεδίο της χωρικής συχνότητας, όπου με κατάλληλο συχνотικό φίλτρο αφαιρούμε την DC συνιστώσα και επιλέγουμε τη συχνότητα ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, με εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier επιστρέφουμε στο πεδίο του χώρου, όπου αφού εφαρμόσουμε κατάλληλη συνάρτηση ξετυλίγματος φάσης, έχουμε πλέον την απεικόνιση της διαφοράς φάσης στον κρύσταλλο (Εικόνα 3γ). Τέλος, από την εξίσωση 1 μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανομή της πίεσης στον κρύσταλλο. Με την μέθοδο της διαθλαστικής απεικόνισης είναι δυνατή η χαρτογράφηση της ανομοιομορφίας του πεδίου του λέιζερ παρουσία των ακουστικών κυμάτων (Εικόνα 3στ, 3δ). Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραμάτων (Εικόνα 3ε, 3ζ). Το μήκος κύματος των ακουστικών κυμάτων που μετρήθηκε και για τις δύο μεθόδους ήταν $\lambda \approx 140 \text{ m}$. Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε εξαιρετική συμφωνία με το αναμενόμενο μήκος κύματος ($139 \mu\text{m}$), που υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του ήχου στο Quartz (5570 m/s).



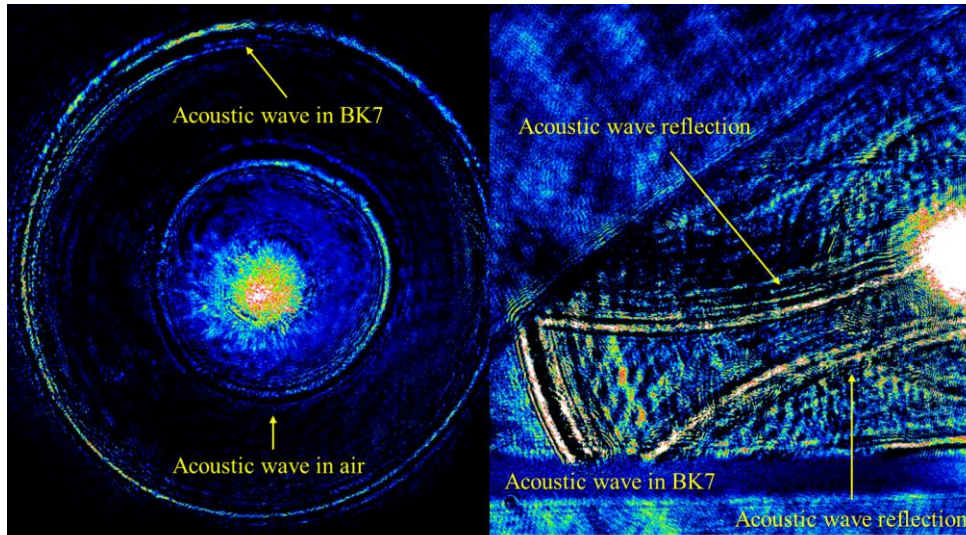
Εικόνα 3: Αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό τρέχοντων ακουστικών κυμάτων με συμβολομετρία (εικόνα α, β, γ) και με διαθλαστική απεικόνιση (εικόνα δ, ε, στ, ζ)

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για την δυνατότητα ρύθμισης / ελέγχου των πιεζοηλεκτρικά δημιουργούμενων ακουστικών κυμάτων μέσω της εφαρμοζόμενης συχνότητας και τάσης οδήγησης. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε το μήκος κύματος των ακουστικών κυμάτων για ένα εύρος συχνοτήτων οδήγησης, από 20 έως 60 MHz. Οι υπολογισμοί έγιναν εφαρμόζοντας μετασχηματισμό FFT στις εικόνες που ελήφθησαν με την μέθοδο της διαθλαστικής απεικόνισης (Εικόνα 4α), ώστε να εξαχθεί η χωρική συχνότητα των κυμάτων (Εικόνα 4β). Έτσι κατασκευάστηκε η καμπύλη (Εικόνα 4γ), που δείχνει την εξάρτηση του μήκους κύματος των κυμάτων από την συχνότητα οδήγησης. Τέλος, μετρήθηκε η γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση οδήγησης και το πλάτος της ακουστικής πίεσης (Εικόνα 7δ).



Εικόνα 4: Αποτελέσματα από την παραμετρική μελέτη στο Quartz

Όσον αφορά στην δημιουργία ακουστικών κυμάτων σε BK7 από ps παλμούς λέιζερ, τα παραγόμενα ακουστικά κύματα απεικονίστηκαν με τη μέθοδο της διαθλαστικής απεικόνισης (Εικόνα 5). Ο κύκλος με την μικρότερη διάμετρο αντιστοιχεί στο κύμα πίεσης που δημιουργείται στον αέρα από τα θραύσματα που απομακρύνονται από την επιφάνεια του κρυστάλλου και ωθούν με μεγάλη ταχύτητα τα σωματίδια του, σε μια διαδικασία γνωστή ως laser ablation. Αντίθετα, ο κύκλος με τη μεγαλύτερη διάμετρο αντιστοιχεί στο κύμα πίεσης που διαδίδεται μέσα στο δείγμα BK7 λόγω της θερμοελαστικής απόκρισης του υλικού στην διέγερση του λέιζερ (Εικόνα 5α). Αυτό αποδεικνύεται κι από το γεγονός ότι για το κύμα της μεγάλης διαμέτρου εμφανίζονται και ανακλάσεις στα όρια του BK7, όπως φαίνεται στην εικόνα 5β παρουσιάζονται. Αντίστοιχες μετρήσεις δείξαν ότι για το κύμα της μικρότερης διαμέτρου δεν εμφανίζονται ανακλάσεις στα όρια του κρυστάλλου, επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι το κύμα διαδίδεται στον αέρα.



Εικόνα 5: Αποτελέσματα από τον εντοπισμό ακουστικών κυμάτων στον αέρα και τον BK7, με την μέθοδο της ns διαθλαστικής απεικόνισης

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε πειραματική διαδικασία χαρακτηρισμού υπερυψίσυχνων τρέχοντων ακουστικών κυμάτων σε κρυστάλλους μέσω συμβολομετρίας και διαθλαστικής απεικόνισης με παλμούς λέιζερ νανοδευτερολέπτων. Παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού των ακουστικών κυμάτων στους κρυστάλλους Quartz και BK7, τα οποία έδειξαν την ικανότητα των παραπάνω ταχέων οπτικών μεθόδων να εντοπίσουν τα τρέχοντα ακουστικά κύματα και να απεικονίσουν την χωρική τους κατανομή. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης, τα οποία έδειξαν την δυνατότητα ελέγχου του πλάτους και της συχνότητας των κυμάτων από τα αντίστοιχα μεγέθη οδήγησης. Τέλος, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την αξιοποίηση της ns διαθλαστικής απεικόνισης για τον εντοπισμό ακουστικών κυμάτων στον αέρα και στον κρύσταλλο BK7, τα οποία παρήχθησαν από ns παλμούς λέιζερ.

5. Αναφορές

- [1] Kepa, M.W., Tomizaki, T., Sato, Y. *et al.* Acoustic levitation and rotation of thin films and their application for room temperature protein crystallography. *Sci Rep* **12**, 5349 (2022)
- [2] E. Zolotoyabko, J. P. Quintana; Control of synchrotron x-ray diffraction by means of standing acoustic waves. *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 3, 699–708 (2004)
- [3] Campbell, Colin. Surface acoustic wave devices and their signal processing applications. Elsevier, (2012)
- [4] Korol, A.V., Solov'yov, A.V. Crystal-based intensive gamma-ray light sources. *Eur. Phys. J. D* **74**, 201 (2020)
- [5] A. V. Korol, A. V. Solov'yov, W. Greiner, Channeling and radiation in periodically bent crystals. Springer Berlin Heidelberg, (2014)
- [6] Sun, Zhigang, et al. A methodological review of piezoelectric based acoustic wave generation and detection techniques for structural health monitoring. *Int. J. Eng.* **1**, 92862 (2013)
- [7] Korol, Andrei V., Andrey V. Solov'yov, and Walter Greiner. Coherent radiation of an ultrarelativistic charged particle channelled in a periodically bent crystal. *J. Phys. B*, **24**, 5 (1998)
- [8] Kudo, N., A simple technique for visualizing ultrasound fields without Schlieren optics. *Ultrasound Med. Biol.*, **41**, 2071-2081 (2015)
- [9] Kudo, N., Optical methods for visualization of ultrasound fields. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 07HA01 (2015)
- [10] Kudo, N. Experimental observation of an acoustic field. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*, 207-238 (2016)
- [11] Grégoire de Izarra and Charles de Izarra, Quantitative shadowgraphy made easy *Eur. J. Phys.* **33**, 1821 (2012).

