

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

"ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ"

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

ΜΙΧΑΗΛ ΡΙΝΑΚΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

ΔΡ. ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ
ΔΡ. ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΜΠΑΚΑΡΕΖΟΣ

ΡΕΘΥΜΝΟ 2010

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες μου, Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη και Δρ. Ευθύμιο Μπακαρέζο, τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσαν να εκπονήσω την πτυχιακή μου στο εργαστήριο "Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας" του τμήματος "Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής" όσο και για την πολύτιμη βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας μελέτης. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Ιωάννη Ορφανό και κ. Σπύρο Μπρέζα, για την υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πειραματικής μου διάταξης. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου, για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους. Αυτή η εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς όλους τους παραπάνω.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή..... σελ. 3

Κεφάλαιο 2 – Παραγωγή & ανίχνευση ελαστικών κυμάτων - οπτικές τεχνικές

2.1 Παραγωγή ελαστικών κυμάτων..... σελ. 5

2.2 Ανίχνευση ελαστικών κυμάτων..... σελ. 7

2.2.1 Συμβολή φωτός και συμβολομετρία..... σελ. 8

2.2.2 Συμβολόμετρο και 3D απεικόνιση υπερήχου..... σελ. 11

Κεφάλαιο 3 – Πειραματική διαδικασία - υλοποίηση διάταξης

3.1 Πειραματική μέθοδος..... σελ. 13

3.2 Υλοποιηθείσα διάταξη..... σελ. 16

3.2.1 Διαδικασία παραγωγής υπερήχου..... σελ. 17

3.2.2 Διαδικασία ανίχνευσης υπερήχου..... σελ. 19

3.2.3 Διαδικασία μετρήσεων..... σελ. 23

Κεφάλαιο 4 – Αποτελέσματα & ανάλυση

4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων..... σελ. 29

4.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων..... σελ. 32

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα & μελλοντική εργασία..... σελ. 34

Βιβλιογραφικές αναφορές..... σελ. 36

Παράρτημα..... σελ. 37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 – Εισαγωγή

Ο μη-καταστρεπτικός έλεγχος υλικών καθώς και η μη-καταστρεπτική αξιολόγηση αυτών κάνοντας χρήση ελαστικών κυμάτων υπερήχων, έχουν προκαλέσει και εξακολουθούν να προκαλούν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, για αρκετές δεκαετίες. Τόσο για την παραγωγή όσο και για την ανίχνευση ελαστικών κυμάτων σε διάφορα υλικά, έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες, τεχνικές οι οποίες βασίζονται στη χρήση λέιζερ [1 - 3].

Η χρήση υπερήχων είναι επιθυμητή λόγω της διεισδυτικής τους ικανότητας καθώς και του αρκετά μικρού μήκους κύματός τους, άρα και της σχετικά υψηλής χωρικής διακριτικής τους ικανότητας, ιδιότητες που τους καθιστούν ιδανικούς σε διαγνωστικές εφαρμογές, και συγκεκριμένα σε περιπτώσεις που το φως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η χρήση ακτίνων-Χ είναι καταστρεπτική. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση παλμικών λέιζερ για τη δημιουργία τέτοιων κυμάτων, είναι η δυνατότητα επίτευξης υπερήχων εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων (μικρό μήκος κύματος / μεγάλη διακριτική ικανότητα). Επιπλέον, η ανίχνευση των υπερήχων αυτών με τη χρήση λέιζερ, παρέχει επίσης υψηλή διακριτική ικανότητα, κάτι το οποίο προκύπτει από τα χαρακτηριστικά της ίδιας της φύσης του φωτός.

Στο εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής - όπου και διεξήχθη εξ ολοκλήρου η πτυχιακή αυτή εργασία - έχουν αναπτυχθεί και εξελιχθεί μέχρι σήμερα, διάφορες μέθοδοι παραγωγής και ανίχνευσης ελαστικών κυμάτων σε υλικά. Η εργασία αυτή αποτελεί την αρχή της εξέλιξης των υπαρχόντων μεθόδων, κυρίως ως προς την παραγωγή και τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης των φαινομένων με τεχνικές «διέγερσης-ανίχνευσης» (pump - probe).

Πιο συγκεκριμένα, στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η παραγωγή και ανίχνευση υψίσυχνων υπερηχητικών ελαστικών κυμάτων σε φιλμ μεταλλικού υλικού (*Au - χρυσός*) εναποτεθειμένο σε διηλεκτρικό υλικό (*BK7 - γυαλί*), κάνοντας χρήση παλμικού λέιζερ υπερβραχέων παλμών (6 nanosecond, *Nd:YAG - μήκος κύματος 532nm*). Μέρος της δέσμης του λέιζερ αυτού χρησιμοποιείται για την παραγωγή των κυμάτων, ενώ μέρος της ίδιας δέσμης χρησιμοποιείται και για την ανίχνευση και μελέτη τους, μέσω απεικονιστικής διάταξης οπτικής συμβολομετρίας.

Το υπόλοιπο της πτυχιακής εργασίας αυτής είναι δομημένο ως εξής: στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται οι αρχές των μεθόδων παραγωγής και ανίχνευσης ελαστικών υπερηχητικών κυμάτων χρησιμοποιώντας δέσμη παλμικού λέιζερ, στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε και επεξήγηση της πειραματικής μεθόδου και των τεχνικών μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, στο Κεφάλαιο 4 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ανάλυση αυτών και το Κεφάλαιο 5, πραγματεύεται τα συμπεράσματα της όλης προσπάθειας καθώς και τις προτάσεις και ιδέες όσων αφορά στα μελλοντικά βήματα ανάπτυξης, των εν λόγω τεχνικών.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σκοπός της εργασίας αυτής είναι η επίδειξη αρχής λειτουργίας της συγκεκριμένης τεχνικής καθώς και μία πρώτη διερεύνηση των δυνατοτήτων της, των περιορισμών της και των πλεονεκτημάτων της, θέτοντας έτσι τις βάσεις για τη χρήση, σε τυχόν μελλοντικές προσπάθειες, ακόμη στενότερων παλμών (της τάξης των femtosecond), που θα έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη δημιουργίας υπερήχων με συχνότητες ανώτερες ίσως της τάξεως των Gigahertz, μέχρι δηλαδή και συχνοτήτων φωνονίων (κβαντισμένες δονήσεις πλέγματος σε Terahertz), με άμεση συνέπεια την χρήση σε εφαρμογές όπως, για παράδειγμα, ελέγχου νανοδομών και μεγεθών πλέον συγκρίσιμων με το μέγεθος ενός κυττάρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 – Παραγωγή ελαστικών κυμάτων

Μία δέσμη λέιζερ δεδομένης έντασης και μήκους κύματος, η οποία κατευθύνεται στην επιφάνεια ενός υλικού, είναι δυνατόν να προκαλέσει ελαστικά κύματα υψηλών συχνοτήτων (υπερηχητικά κύματα) με ή χωρίς την αποδόμηση της επιφάνειας του υλικού. Το ελαστικό αυτό κύμα καθώς εξελίσσεται χρονικά, εξαπλώνεται χωρικά με τρόπο που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της δέσμης που το προκάλεσε όσο και από τις ιδιότητες της επιφάνειας και της εσωτερικής δομής του υλικού [4]. Από την εξέλιξη αυτή, δύναται στη συνέχεια η εξαγωγή συμπερασμάτων, χρήσιμων ως προς τον έλεγχο και την αξιολόγηση του υλικού αυτού [4, 5].

Μπορούν να διακριθούν δύο κύριοι μηχανισμοί παραγωγής ελαστικών κυμάτων μέσω δέσμης παλμικού λέιζερ, σε σχέση με το εάν προκαλείται καταστροφή (αποδόμηση) της επιφάνειας του υλικού από το λέιζερ ή όχι. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την ένταση της δέσμης (ενέργεια και χρονοδιάρκεια παλμού) καθώς και από το κατώφλι αποδόμησης του υλικού. Οι παραπάνω μηχανισμοί είναι το *θερμοελαστικό φαινόμενο* (μη-αποδόμηση) και η *εκρηκτική φωτοαποδόμηση*. Στο θερμοελαστικό φαινόμενο, η επιφάνεια του υλικού διεγείρεται από τη δέσμη λέιζερ (αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας - ύλης) προκαλώντας γρήγορη αλλαγή της θερμοκρασίας, με συνέπεια τη θερμική διαστολή και την παραγωγή θερμοελαστικών πιέσεων μέσα στο υλικό, οι οποίες πιέσεις οδηγούν τελικά στη δημιουργία του ελαστικού κύματος. Στην εκρηκτική φωτοαποδόμηση παρατηρείται ταχύτερη αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω της αυξημένης έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πλάσματος (αποδόμηση του υλικού) και τελικά την παραγωγή του ελαστικού κύματος υπερήχου, από μία δύναμη ανάδρασης

που δρα κάθετα στην επιφάνεια του υλικού [6]. Όσον αφορά στην ανίχνευση των κυμάτων αυτών, χρησιμοποιούνται πλέον διάφορες τεχνικές απεικονιστικής συμβολομετρίας [2, 3], οι οποίες προσφέρουν τόσο υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, όσο και δυνατότητα μελέτης της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου.

Αυτό που προσφέρει η χρήση λέιζερ και συγκεκριμένα η χρήση των παλμικών λέιζερ στη δημιουργία υπερηχητικών κυμάτων, είναι η δυνατότητα επίτευξης εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων, κατά πολύ υψηλότερων από αυτές που μπορεί να επιτύχει κανείς κάνοντας χρήση μηχανικών διεγερτών όπως για παράδειγμα, πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, με τους εμπορικά διαθέσιμους να έχουν ανώτατο όριο παραγόμενης συχνότητας γύρω στα 400 με 500 MHz (λίγες εκατοντάδες παραπάνω σε ιδιαίτερα εξειδικευμένες εφαρμογές, σε ερευνητικό επίπεδο [7]). Επίσης, με τη βοήθεια των κατάλληλων οπτικών (π.χ. εστιακών φακών) είναι δυνατή η δημιουργία πραγματικά σημειακών πηγών ελαστικών κυμάτων, στην επιφάνεια του υλικού. Το παλμικό λέιζερ, όπως και το συνεχές, χαρακτηρίζεται σε αρκετά υψηλό βαθμό από μονοχρωματικότητα (εκπομπή συγκεκριμένων μηκών κύματος φωτός) και συμφωνία (σταθερή διαφορά φάσης κυματομετώπου για συγκεκριμένο χρόνο / απόσταση), χαρακτηριστικά απαραίτητα για την παρατήρηση φαινομένων συμβολής [8] και κατ' επέκταση, για την εφαρμογή συμβολομετρικών τεχνικών στις διαδικασίες ανίχνευσης κυμάτων υπερήχων.

2.2 – Ανίχνευση ελαστικών κυμάτων

Φαινόμενα μικρής χρονικής διάρκειας (της τάξης των λίγων nsec ή λιγότερο), όπως η εξέλιξη ενός ελαστικού κύματος υπερήχου, δεν είναι δυνατόν να μελετηθούν με ακρίβεια μέσω ηλεκτρονικών συσκευών καθώς αυτές δεν έχουν την απαιτούμενη χρονική διακριτική ικανότητα, και αυτός ακριβώς είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται οπτικές τεχνικές διέγερσης - ανίχνευσης. Στις τεχνικές διέγερσης - ανίχνευσης με χρήση δέσμης λέιζερ η δέσμη ανίχνευσης είναι επιλεκτικά χρονικά καθυστερημένη σε σχέση με τη δέσμη διέγερσης, έτσι ώστε το φαινόμενο να μελετάται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, μετά τη δημιουργία του. Επιπλέον, οπτικές συμβολομετρικές τεχνικές συνδυάζονται με αυτές, για την τρισδιάστατη απεικόνιση του υπό μελέτη φαινομένου, έτσι ώστε εκτός από την εξαγωγή του μήκους κύματος (από την ανίχνευση και καταγραφή του υπερήχου), να εξάγεται επίσης και το πλάτος του παραγόμενου κύματος και η χωρική κατανομή του.

2.2.1 – Συμβολή φωτός και συμβολομετρία

Όταν δύο ή περισσότερα κύματα φωτός αλληλεπικαλύπτονται στο χώρο, πραγματοποιείται συμβολή αυτών, δεδομένου ότι πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- οι πηγές που εκπέμπουν τα κύματα φωτός που συμβάλουν, είναι σύμφωνες, έχουν δηλαδή σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ τους,
- οι πηγές αυτές είναι μονοχρωματικές, δηλαδή εκπέμπουν κύματα φωτός, με μήκος κύματος το οποίο είναι το ίδιο και για τις δύο πηγές και
- ισχύει η αρχή της επαλληλίας / γραμμικής υπέρθεσης.

Στην περίπτωση αυτή, η φωτεινή ένταση που προκύπτει σε οποιοδήποτε σημείο και χρονική στιγμή, βρίσκεται εάν προστεθούν οι στιγμιαίες εντάσεις που θα παράγονταν στην περίπτωση που το κάθε κύμα ξεχωριστά, υφίσταντο αφ εαυτού (όπως ορίζει και η αρχή της επαλληλίας). Όταν δύο κύματα φωτός βρίσκονται σε φάση τότε οι εντάσεις αυτών προστίθενται και η ένταση που προκύπτει, είναι μεγαλύτερη από την ένταση του καθενός ξεχωριστά. Η συμβολή αυτή ονομάζεται *ενισχυτική*. Εάν τα κύματα είναι εκτός φάσης, το πλάτος του προκύπτοντος κύματος μειώνεται και είναι ίσο με τη διαφορά των δύο πλατών, των επιμέρους κυμάτων. Η συμβολή αυτή ονομάζεται *αναιρετική* ή *καταστρεπτική*. Εάν τα επιμέρους πλάτη των δύο κυμάτων είναι ίσα τότε κατά την ενισχυτική συμβολή, το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι διπλάσιο από αυτά, ενώ στην καταστρεπτική συμβολή, το πλάτος αυτό είναι μηδέν.

Αν δύο φωτεινές πηγές σύμφωνου φωτός τοποθετηθούν σε απόσταση **δ** μεταξύ τους και μία οθόνη σε απόσταση L από τις πηγές, παρατηρείται μία εικόνα συμβολής πάνω στην οθόνη, που αποτελείται από φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς. Για να παρατηρηθούν οι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί, πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες της ενισχυτικής και καταστρεπτικής συμβολής. Όταν τα φωτεινά κύματα των πηγών συμβάλλουν ενισχυτικά, δημιουργούν φωτεινό κροσσό. Όταν συμβάλλουν καταστρεπτικά, δημιουργούν σκοτεινό κροσσό. Για την ικανοποίηση της ενισχυτικής συμβολής, πρέπει να ισχύει:

$$\mathbf{n*\delta*\sin\theta = m*\lambda} \quad (m = 0, \pm1, \pm2, \ldots) \qquad (2.1)$$

ενώ για την ικανοποίηση της καταστρεπτικής συμβολής, πρέπει να ισχύει:

$$\mathbf{n*\delta*\sin\theta = (m + ½)*\lambda} \quad (m = 0, \pm1, \pm2, \ldots) \qquad (2.2)$$

όπου **n*δ*sinθ** η διαφορά οπτικού δρόμου (**n** ο δείκτης διάθλασης του μέσου διάδοσης), **λ** το μήκος κύματος και **m** ακέραιος.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις, καλύπτονται πλήρως από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των παλμικών λέιζερ, όπως ήδη αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, με τη χρήση των οποίων δύναται η εφαρμογή *συμβολομετρίας*, η οποία αποτελεί στην ουσία την τεχνική διάγνωσης των ιδιοτήτων των επιμέρους κυμάτων, μελετώντας τη συμβολή, που δημιουργείται από την υπέρθεση τους.

Γενικά, για την οπτική συμβολομετρία ως μέθοδο ανίχνευσης ελαστικών κυμάτων υπερήχων (παραγόμενων με λέιζερ), ισχύει ότι από τη συμβολή δύο δεσμών λέιζερ, δέσμης αναφοράς και δέσμης αντικειμένου, προκύπτουν κροσσοί συμβολής (παράλληλες φωτεινές και σκοτεινές λωρίδες - ενισχυτική και καταστρεπτική συμβολή, αντίστοιχα) που μπορούν να καταγραφούν και στη συνέχεια να αναλυθούν, ώστε να μας δώσουν το φάσμα του παραγόμενου κύματος. Η δέσμη αναφοράς και η δέσμη αντικειμένου προέρχονται από την ίδια αρχική δέσμη (δέσμη ανίχνευσης), η οποία έχει υποστεί διαχωρισμό σε κάποιο προηγούμενο σημείο της διάταξης [3]. Η πρώτη κατευθύνεται απευθείας στο σύστημα καταγραφής (CCD) ενώ η δεύτερη - για να οδηγηθεί πάνω στο CCD και να συμβάλει με την πρώτη - ανακλάται από το υλικό, μεταφέροντας έτσι τις τυχόν μεταβολές του, οι οποίες φανερώνονται από τις διαφορές φάσης ανάμεσα στη δέσμη αυτή και στη δέσμη αναφοράς, αφού η τελική καταγεγραμμένη εικόνα επεξεργαστεί και αναλυθεί. Να σημειωθεί πως, για να είναι ευδιάκριτοι οι κροσσοί συμβολής, θα πρέπει οι ξεχωριστές διαδρομές των δύο αυτών δεσμών να είναι ίσες μεταξύ τους, ή τουλάχιστον η διαφορά οπτικού τους δρόμου να είναι μικρότερη από το μήκος συμφωνίας, της πηγής λέιζερ.

Μήκος συμφωνίας είναι η απόσταση διάδοσης ενός κύματος, μέσα στην οποία το κύμα αυτό διατηρεί έναν ορισμένο βαθμό συμφωνίας. Συγκεκριμένα, για τη χρήση λέιζερ σε τεχνικές συμβολομετρίας, ως μήκος συμφωνίας ορίζεται η διαφορά δρόμου μίας δέσμης λέιζερ που συμβάλει με τον εαυτό της, η οποία διαφορά αντιστοιχεί σε

μείωση της ορατότητας των κροσσών συμβολής κατά 50%. Η ορατότητα των κροσσών **V**, ορίζεται ως:

$$\mathbf{V = I_{max} - I_{min} / I_{max} + I_{min}} \qquad (2.3)$$

όπου $\mathbf{I_{max}}$ και $\mathbf{I_{min}}$ η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση των κροσσών αντίστοιχα. Η σημασία του μήκους συμφωνίας για το φαινόμενο της συμβολής είναι ότι μπορούμε να έχουμε συμβολή μέσα στο μήκος συμφωνίας της πηγής και όχι πέρα από αυτό.

Η σημασία της ανάκλασης της δέσμης αντικειμένου πάνω στο υλικό, προέρχεται από το ότι όταν ένα οπτικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενο, αλλάζει με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρει πληροφορία για το αντικείμενο αυτό (χωρίς να επηρεάζει την κατάσταση του) σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα - λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος του φωτός [2, 3, 8]. Ακόμα, πλεονέκτημα της εν λόγω χρήσης λέιζερ, είναι το ότι οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιούνται εξ αποστάσεως και το ίδιο το λέιζερ δεν έρχεται σε επαφή με το υλικό προς μελέτη. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η αύξηση της πρακτικότητας των τεχνικών αυτών, σε σύγκριση με τη χρήση μηχανικών μέσων διέγερσης και ανίχνευσης των ταλαντώσεων, ειδικά σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών στο περιβάλλον του υλικού καθώς επίσης και σε περιπτώσεις που δεν ενδείκνυται η χρήση συζευκτικού μέσου ανίχνευσης [1, 2]. Τέλος, μεγάλο πλεονέκτημα των τεχνικών που κάνουν χρήση λέιζερ, είναι η ταχύτητά τους καθώς και η δυνατότητα ανίχνευσης και μελέτης του παραγόμενου ελαστικού κύματος υπερήχου, σε πραγματικό χρόνο (on-line).

2.2.2 – Συμβολόμετρο και 3D απεικόνιση υπερήχου

Το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη συμβολή κυμάτων φωτός σε τεχνικές συμβολομετρίας, ονομάζεται *συμβολόμετρο* και αντιστοιχεί στην πειραματική διάταξη που ξεκινάει από το διαχωρισμό των δύο δεσμών (αναφοράς και αντικειμένου) και καταλήγει στην επανένωση αυτών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Η έξοδος του συμβολομέτρου δημιουργεί κροσσούς συμβολής πάνω στο CCD της ψηφιακής κάμερας, η οποία είναι συνδεδεμένη με έναν Η/Υ ώστε να επιτυγχάνεται η καταγραφή της εν λόγω συμβολής, σε μορφή εικόνας bitmap.

Βάσει σχετικών ερευνών [9, 10], η καταγεγραμμένη εικόνα μπορεί να αναλυθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή μιας τρισδιάστατης απεικόνισης του παραγόμενου ελαστικού κύματος. Η διαδικασία ανάλυσης αυτή ξεκινάει με την εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) στην καταγεγραμμένη εικόνα και η εικόνα που προκύπτει έχει τρία διακριτά μέγιστα, στο DC και στις συχνότητες $+f_0$ και $-f_0$ (όπου f_0, η συχνότητα φορέα των κροσσών συμβολής). Μια από τις δύο αυτές συχνότητες απομονώνεται με ένα φίλτρο, ορίζοντας την περιοχή εκτός του φίλτρου, στο μηδέν. Στη συνέχεια, η εναπομένουσα f ανελκύεται στο DC και εφαρμόζεται αντίστροφος FFT, στην τελική εικόνα. Από τον πολύπλοκο λογάριθμο της εικόνας, βρίσκεται - σε κάθε εικονοκύτταρο (pixel) αυτής - η φάση $\boldsymbol{\varphi}(x, y)$, η οποία αντιστοιχεί στο φανταστικό μέρος του λογαρίθμου. Η φάση που εξάγεται, όντας ισοδύναμη με την εφαπτομένη τόξου του λόγου του φανταστικού και πραγματικού μέρους του λογάριθμου, τυλίγεται (phase wrap) στο εύρος μεταξύ $-\pi$ και $+\pi$. Προσθέτοντας τον κατάλληλο ακέραιο, πολλαπλάσιο του 2π, σε κάθε εικονοκύτταρο - με έναν απλό αλγόριθμο [9] - η φάση ξετυλίγεται (phase unwrapping - αφαίρεση των 2π-ασυνεχειών) και μετατρέπεται στην επιφανειακή μετατόπιση **d** με τον τύπο:

$$\mathbf{d = \varphi * \lambda \,/\, 4 * \pi * \cos\theta} \qquad (2.4)$$

όπου **λ**, το μήκος κύματος του λέιζερ που χρησιμοποιείται για τη συμβολομετρία και **θ**, η γωνία πρόσπτωσης. Η πλήρως αναλυμένη εικόνα αφαιρείται από τη δυναμική,

όπως επίσης και από την εικόνα απείρου-χρόνου, εξαλείφοντας έτσι τυχόν προ-υπάρχουσες επιφανειακές ιδιότητες, από τις εικόνες αυτές. Ένα περαιτέρω αποτέλεσμα της αφαίρεσης αυτής, είναι το ότι δεν είναι πλέον απαραίτητη η προσεκτική αντιστοίχηση των κυματομετώπων αναφοράς και αντικειμένου, μιας και οποιαδήποτε αναντιστοιχία είναι πανομοιότυπη για όλα τα συμβολογράμματα και έτσι αναιρείται, μέσω της ίδιας της αφαίρεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 – Πειραματική μέθοδος

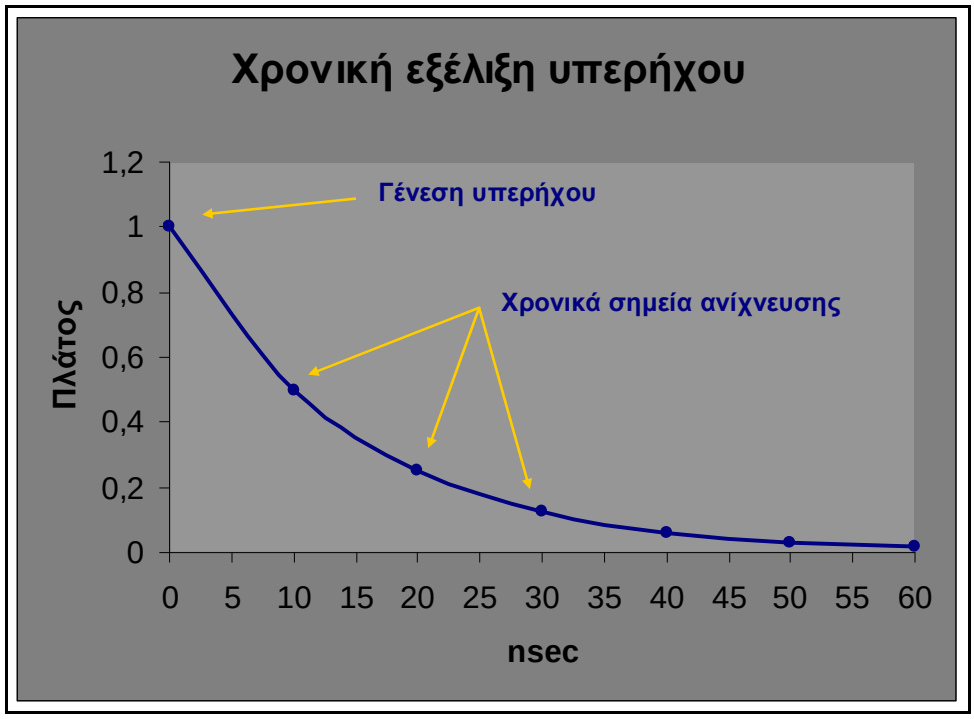
Η βασική ιδέα πίσω από την σχεδίαση και υλοποίηση της διάταξης του πειράματός, ήταν ότι θα πρέπει να περιέχει τα απαραίτητα επιμέρους στοιχεία και ιδιότητες ώστε να είναι δυνατόν:

- να παραχθεί το επιθυμητό ελαστικό κύμα υπερήχου στην επιφάνεια του υλικού,
- να είναι η παραγωγή αυτή καθώς και η εξέλιξη του κύματος, χρονικά και χωρικά, ανιχνεύσιμες με τη βοήθεια των συμβολομετρικών τεχνικών που θα χρησιμοποιηθούν,
- να δύναται η καταγραφή της όλης διαδικασίας, μέσω του CCD της ψηφιακής κάμερας, στο σκληρό δίσκο του ηλεκτρονικού υπολογιστή του εργαστηρίου.

Εκεί που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, είναι η διάρκεια εξέλιξης του υπερηχητικού ελαστικού κύματος, η οποία αναμένεται να είναι της τάξης των nanosecond - όπως έχουν δείξει προηγούμενες μελέτες [10] - γεγονός που σημαίνει πως πρέπει η χρονική διαφορά ανάμεσα στη διαδρομή της *Δέσμης Παραγωγής* (Δ.Π.) του υπέρηχου και στη διαδρομή της *Δέσμης Συμβολομετρίας* (Δ.Σ.), να είναι τέτοια ώστε να δίδεται η δυνατότητα ανίχνευσης της εξέλιξης του υπέρηχου στην επιφάνεια του υλικού, σε χρόνους της ίδιας τάξης μεγέθους όπως για παράδειγμα, 10 ή 20 ή 30 nanosecond αργότερα από τη γένεση - μέσω της Δ.Π. - του κύματος (βλ. *σχήμα 3.1*). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψην ότι η ταχύτητα του φωτός, είναι περίπου $\mathbf{c = 3 \times 10^8\ m/sec}$ και άρα βάσει του τύπου:

$$\mathbf{s} = \mathbf{u} \times \mathbf{t} \qquad (3.1)$$

(όπου **s** το διάστημα / απόσταση που διανύει το φως σε χρόνο **t** και **υ = c** η ταχύτητα του), να πραγματοποιηθεί επέκταση της διαδρομής της Δ.Σ. κατά περίπου 3 ή 6 ή 9 μέτρα αντίστοιχα, σε σχέση με το μήκος της διαδρομής της Δ.Π. για να επιτευχθεί η επιθυμητή αυτή, μεταξύ τους, καθυστέρηση. Ένας εναλλακτικός τρόπος, είναι το να διατηρηθεί σταθερό το μήκος της Δ.Σ. για παράδειγμα, στα 9 μέτρα (σε σχέση πάντα με τη διαδρομή της Δ.Π.) και στη συνέχεια, να πραγματοποιηθεί επέκταση του μήκους της διαδρομής της Δ.Π., σε σχέση με το αρχικό της, κατά 3 ή 6 μέτρα. Οι αποστάσεις αυτές ήταν και ένας από τους περιορισμούς της σχεδίασης όσον αφορά στο διαθέσιμο χώρο πάνω στην επιφάνεια του συστήματος απορρόφησης κραδασμών του εργαστηρίου (τράπεζα και πνευματικά πόδια) πάνω στο οποίο πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση της τελικής πειραματικής διάταξης - απαραίτητο, για την αποφυγή ανεπιθύμητων δονήσεων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

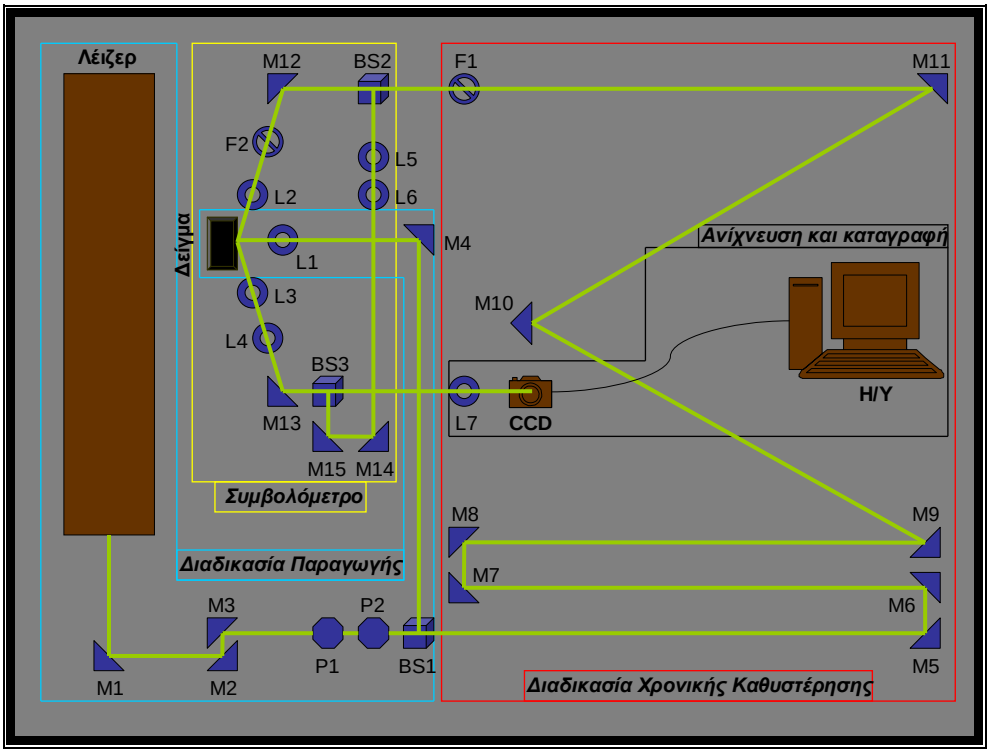


Σχήμα 3.1: *Χρονικά σημεία ανίχνευσης κατά την εξέλιξη ελαστικού κύματος.*

Να σημειωθεί τέλος, πως για να είναι δυνατή η λήψη και καταγραφή δεδομένων σε τόσο μικρά χρονικά παράθυρα, θα πρέπει επιπρόσθετα να υπάρχει ακριβής και επιλεκτικός (μέσω Η/Υ) χρονισμός του λέιζερ και της κάμερας με τη βοήθεια κατάλληλης κάρτας καταγραφής και αποστολής δεδομένων καθώς και αντίστοιχου λογισμικού.

3.2 – Υλοποιηθείσα διάταξη

Μελετώντας προσεκτικά τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη το τι επιμέρους υλικά και συσκευές είναι διαθέσιμα καθώς επίσης και τις ακριβείς διαστάσεις της επιφάνειας του συστήματος απορρόφησης κραδασμών του εργαστηρίου, προέκυψε η πρόχειρη σχεδίαση τριών παραλλαγών της ίδιας πειραματικής διάταξης (ένα για κάθε μήκος διαδρομής της Δ.Π.) από τις οποίες εν τέλει, χάριν επιβεβαίωσης της λειτουργικότητας και των δυνατοτήτων αυτής, πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση της πρώτης, η οποία φαίνεται στο *σχήμα 3.2* και αντιστοιχεί σε χρονική διαφορά 30 nsec.



Σχήμα 3.2: *Τελική πειραματική διάταξη (παραλλαγή 1η – χρονική διαφορά 30nsec).*

Στην πειραματική, αυτή, διάταξη λαμβάνει χώρα η διαδικασία παραγωγής και η διαδικασία ανίχνευσης (χρονική καθυστέρηση και συμβολόμετρο) του ελαστικού κύματος καθώς και η διαδικασία λήψης μετρήσεων, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

3.2.1 – Διαδικασία παραγωγής υπερήχου

Η διαδικασία παραγωγής του ελαστικού κύματος υπερήχου περιλαμβάνει την διαδρομή της δέσμης παλμικού λέιζερ από την έξοδο της συσκευής παραγωγής της, κάθετα στην επιφάνεια του υλικού προς μελέτη. Η παραπάνω κατεύθυνση της δέσμης φωτός, επιτυγχάνεται με τη χρήση *κατόπτρων* (διηλεκτρικών, μεταλλικών) και την κατάλληλη ευθυγράμμιση αυτών (Mirrors **M1** – **M4**). Επιπλέον, στην εν λόγω διαδρομή παρεμβάλλονται *δύο πολωτές* (Polarizers **P1**, **P2**), για τη δυνατότητα ρύθμισης της σωστής πόλωσης και έντασης του φωτός - αντίστοιχα - [10] καθώς και την ορθή λειτουργία των λοιπών οπτικών στοιχείων της διάταξης (π.χ. των BS), *ένας διαχωριστής δέσμης* (Beam Splitter **BS1**) 50/50 ώστε να δύναται ο διαχωρισμός της αρχικής δέσμης σε δύο άλλες, νέες δέσμες - *Δέσμη Παραγωγής (Δ.Π.* - προς M4*)* και *Δέσμη Συμβολομετρίας (Δ.Σ. – προς M5)* - η κάθε μία 50% περίπου της έντασης της αρχικής και τέλος, *ένας εστιακός φακός* (Lense **L1**), εστιάζοντας την δέσμη σε όσο το δυνατόν μικρότερο σημείο, στο υλικό [5, 10].

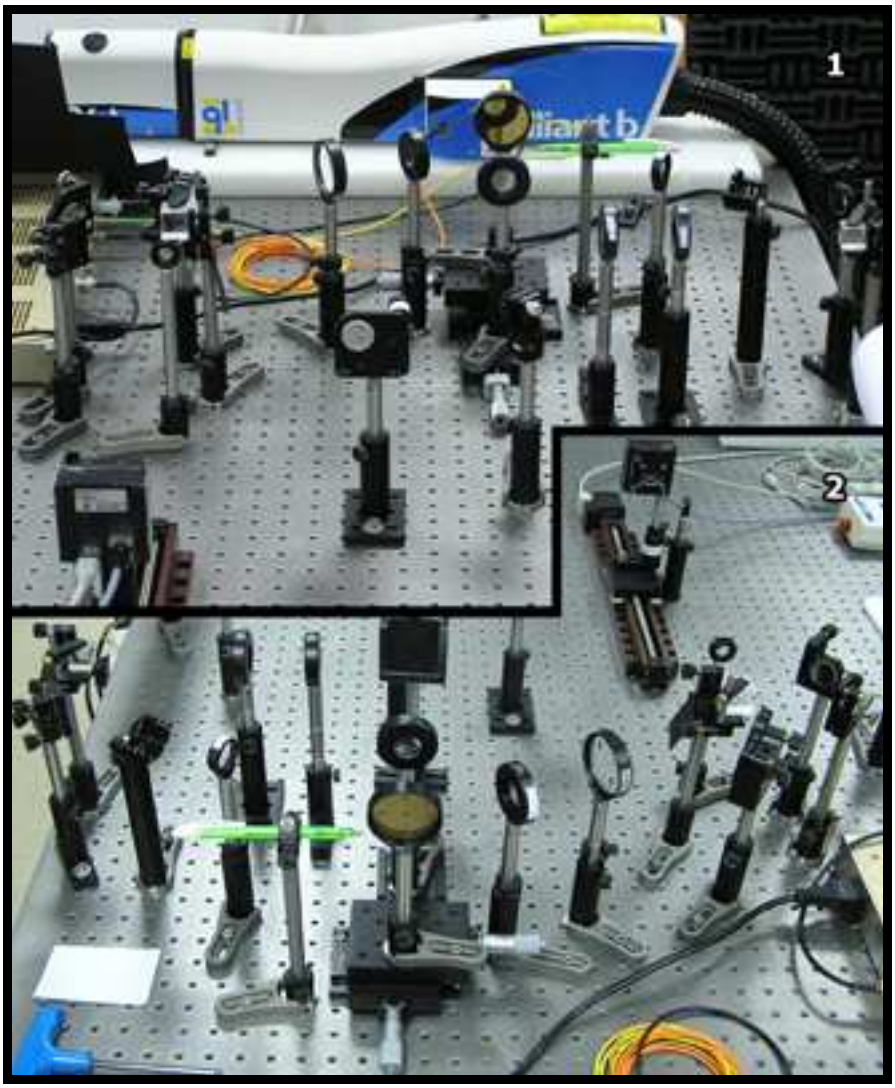


Εικόνα 3.1: *1. Λέιζερ, 2. Διηλεκτρικό κάτοπτρο, 3. Μεταλλικό κάτοπτρο, 4. Πολωτής, 5. Απορροφητής ανακλάσεων πολωτή, 6. Διαχωριστής δέσμης, 7. Εστιακός φακός, 8. Μικρομετρική βάση φακού, 9. Μικρομετρική βάση δείγματος, 10. Δείγμα (υλικό προς μελέτη).*

Ο εστιακός φακός καθώς και το υλικό προς μελέτη, βρίσκονται τοποθετημένα πάνω σε μικρό-μετρικά κινούμενες βάσεις, οι οποίες επιτρέπουν απειροελάχιστες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια τόσο της ευθυγράμμισης του υλικού σε σχέση με τα λοιπά στοιχεία της διάταξης όσο και της σωστής εύρεσης του εστιακού σημείου / απόστασης φακού - υλικού, το οποίο αντιστοιχεί στο εστιακό μήκος του φακού.

3.2.2 – Διαδικασία ανίχνευσης υπερήχου

Η διαδικασία ανίχνευσής του ελαστικού κύματος υπερήχου αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο (χρονική καθυστέρηση) περιλαμβάνει την καθοδήγηση της Δέσμης Συμβολομετρίας από τον διαχωριστή δέσμης BS1 σε ένα δεύτερο διαχωριστή δέσμης **BS2** (70/30 – 70% προς M12, 30% προς L5). Στη διαδρομή της Δέσμης Συμβολομετρίας, περιλαμβάνεται και μία ομάδα φίλτρων (**F1**) τοποθετημένη αμέσως πριν από το διαχωριστή δέσμης BS2, με σκοπό την ελάττωση της ολικής έντασης της Δ.Σ. προτού αυτή εισέλθει στο *Συμβολόμετρο*, το οποίο αποτελεί στην ουσία, το δεύτερο μέρος της διαδικασίας ανίχνευσης του ελαστικού κύματος.



Εικόνα 3.2: *1. Συμβολόμετρο (πρόσθια όψη), 2. Συμβολόμετρο (οπίσθια όψη).*

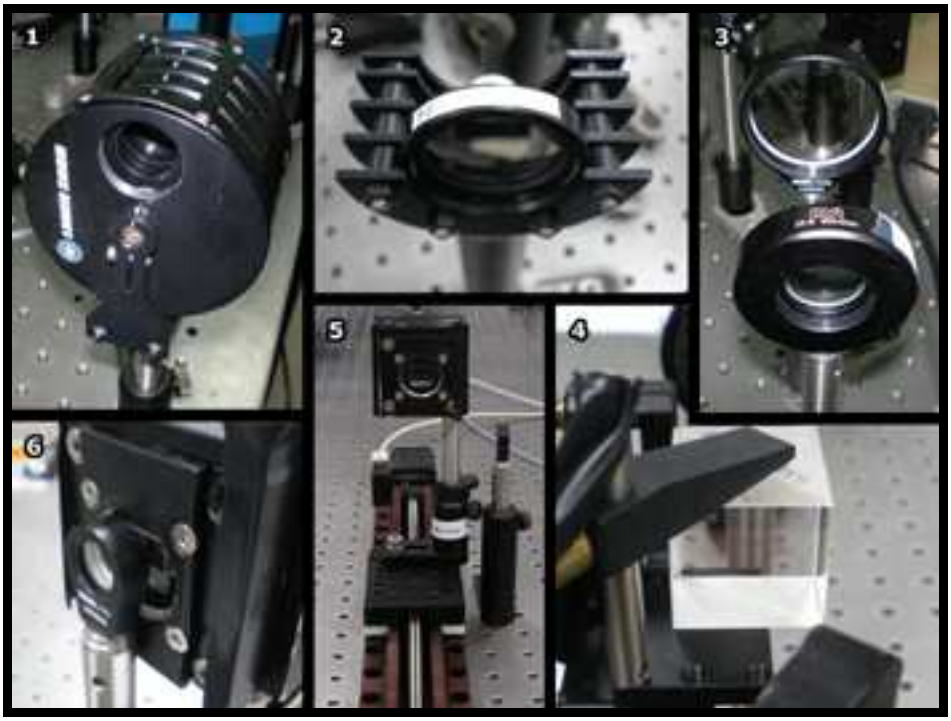
Η ονομασία «Συμβολόμετρο» αντιστοιχεί στην περιοχή της διάταξής μας που ξεκινάει από τον BS2 και καταλήγει στο CCD της ψηφιακής κάμερας του εργαστηρίου και η οποία περιλαμβάνει όλα τα επιμέρους στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία επίτευξης και ανίχνευσης της συμβολής των δύο νέων δεσμών, οι οποίες αποτελούν τα υπό-μέρη της Δ.Σ. και αποκαλούνται:

- *δέσμη αντικειμένου*, η δέσμη εκείνη που αποτελεί το 70% περίπου της Δ.Σ., ξεκινάει από την αντίστοιχη πλευρά του BS2 (προς M12) και αφού περάσει από ένα ακόμη φίλτρο (**F2**) καθώς και από έναν από-εστιακό φακό **L2**, οδηγείται στο υλικό υπό γωνία **21.5**$^{\circ}$ [10], ανακλάται και συγκεντρώνεται από έναν εστιακό φακό **L3** για να περάσει από ένα τελικό φακό μεγέθυνσης **L4,** να οδηγηθεί σε έναν κρύσταλλο ένωσης δεσμών **BS3** (30/70) για να συμβάλει με την δέσμη αναφοράς και να κατευθυνθούν μαζί στο CCD, ώστε να καταγραφεί η εν λόγω συμβολή,
- *δέσμη αναφοράς*, η δέσμη εκείνη που αποτελεί το 30% περίπου της Δ.Σ., ξεκινάει από την αντίστοιχη πλευρά του BS2 (προς L5), περνάει από ένα ζεύγος φακών **L5** και **L6** (όμοιων με τους L2 και L3) και κατευθύνεται - με μια μικρή καθυστέρηση - απευθείας στον BS3, για την επανένωση της με την δέσμη αντικειμένου. Οι αποστάσεις που διανύουν ξεχωριστά οι δύο αυτές δέσμες, από τον BS2 μέχρι τον BS3, είναι ίσες ώστε να εισέλθουν ταυτόχρονα στον κρύσταλλο ένωσής των.

Η ανάκλαση της δέσμης αντικειμένου από την επιφάνεια του υλικού αποσκοπεί, όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος, στη μεταφορά - μέσω του φωτός - των ιδιοτήτων και των μεταβολών της περιοχής του δείγματος που βρίσκεται υπό μελέτη, στη συσκευή καταγραφής (CCD). Η περιοχή αυτή βρίσκεται προφανώς, γύρω από το σημείο γένεσης και εξέλιξης του ελαστικού κύματος υπερήχου που προκαλείται από την Δέσμη Παραγωγής και για αυτόν ακριβώς το λόγο, είναι απαραίτητη η ευθυγράμμιση των δύο παραπάνω δεσμών, δέσμης αντικειμένου και Δ.Π., ώστε να κατευθύνονται στην ίδια περιοχή / σημείο αντίστοιχα.

Ο από-εστιακός φακός L2 χρησιμοποιείται με σκοπό τη διεύρυνση της ακτίνας της δέσμης αντικειμένου, προτού οδηγηθεί στην επιφάνεια του υλικού, ώστε να έχει τη δυνατότητα να φωτίσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιοχή του δείγματος,

γύρω από το σημείο στο οποίο κατευθύνεται η Δέσμη Παραγωγής. Ο εστιακός φακός L3 χρησιμοποιείται αντίστοιχα - μετά την ανάκλαση της δέσμης από την επιφάνεια του υλικού - με σκοπό την επιστροφή και πάλι της ακτίνας της δέσμης αντικειμένου, στο αρχικό της περίπου μήκος ώστε να επανενωθεί η δέσμη αυτή επιτυχώς, με την δέσμη αναφοράς και να ολοκληρωθεί τελικά η διαδικασία συμβολής αυτών. Η δέσμη αναφοράς , υπόκειται και αυτή σε παρόμοιες μεταβολές, μέσω των φακών L5 και L6 (προσομοίωση των L2, L3 και των μεταβολών που προκαλούν αυτοί, στη δέσμη αντικειμένου) με σκοπό τη διευκόλυνση ανίχνευσης και αναγνώρισης των μεταβολών της επιφάνειας του υλικού, ως τη μόνη διαφορά μεταξύ των δύο δεσμών. Επίσης, για να είναι εφικτή μία δεύτερη σειρά μετρήσεων και γενικά, μία επιπλέον καταγραφή της συμβολής των δύο παραπάνω δεσμών, τοποθετείται ένας ακόμη μεγεθυντικός φακός, ο **L7**, αυτή τη φορά αμέσως πριν από το CCD της ψηφιακής κάμερας. Έτσι, πραγματοποιείται πολλαπλασιασμός της μεγέθυνσης αυτού, με τη μεγέθυνση του L4, ώστε να δίδεται μία πολύ πιο κοντινή άποψη της εικόνας των κροσσών συμβολής καθώς και των τυχόν οπτικά διακριτών μεταβολών στην επιφάνεια του δείγματος, κατά την εξέλιξη του ελαστικού κύματος, όπως επίσης και μία επιβεβαίωση, όσον αφορά στην ορθότητα της λειτουργίας της διάταξης του πειράματος.



Εικόνα 3.3: *1. Ομάδα φίλτρων, 2. Φίλτρο, 3. Μεγεθυντικός (πίσω) και εστιακός (εμπρός) φακός, 4. Ενωτής δεσμών, 5. CCD και μηχανοκίνητη βάση, 6. Μεγεθυντικός φακός και CCD.*

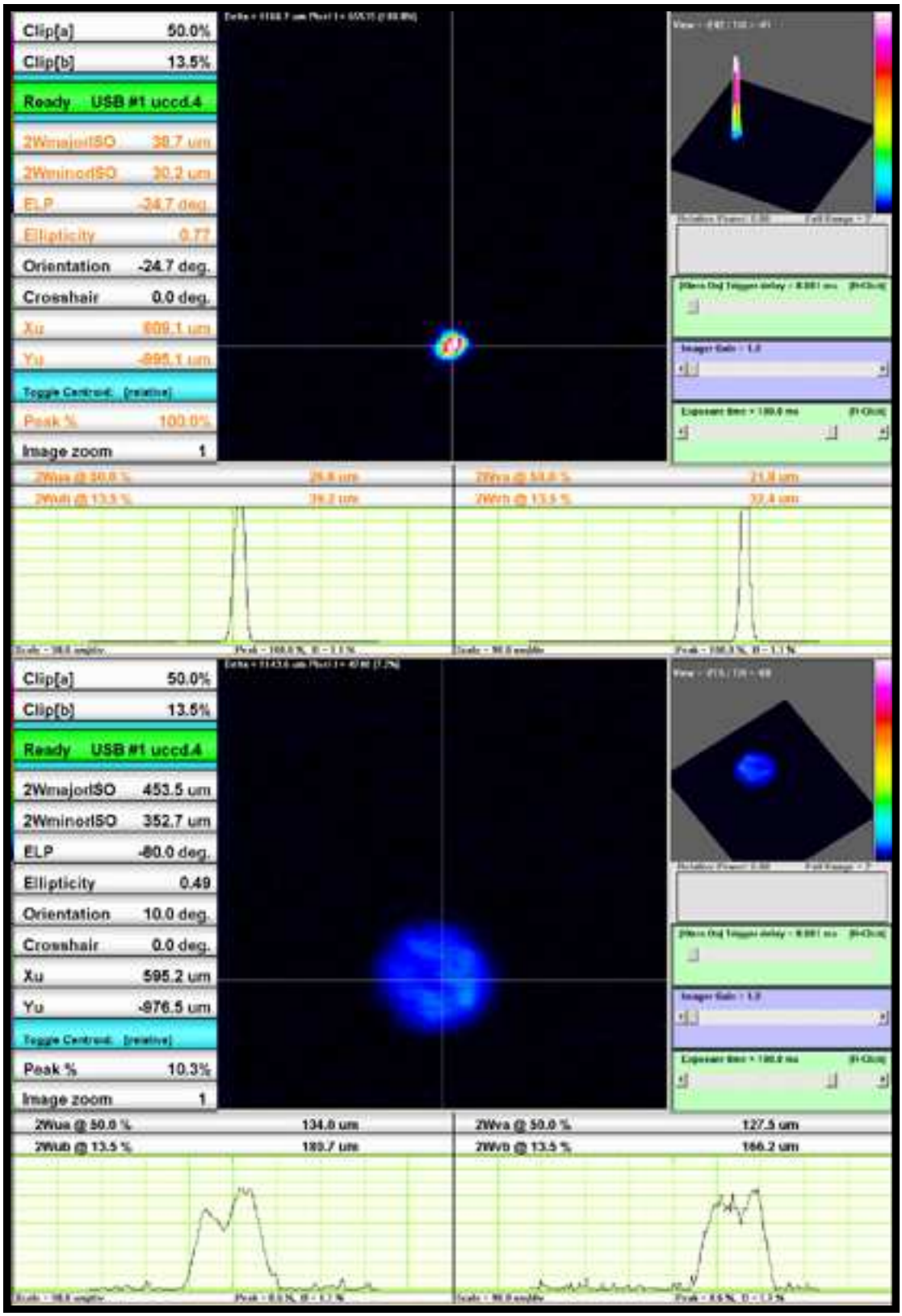
Ο BS3, τέλος, δεν είναι τίποτα άλλο από έναν beam splitter όμοιο με τον διαχωριστή δέσμης BS2, τοποθετημένο όμως αντίθετα, με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιηθεί αντίστοιχα, η επανένωση της προηγουμένως διαχωριζόμενης - από τον BS2 - Δέσμης Συμβολομετρίας, η ένωση δηλαδή των δύο υπό-μερών της, δέσμης αναφοράς και αντικειμένου και η κατεύθυνση αυτών στην επιφάνεια του CCD.

3.2.3 – Διαδικασία μετρήσεων

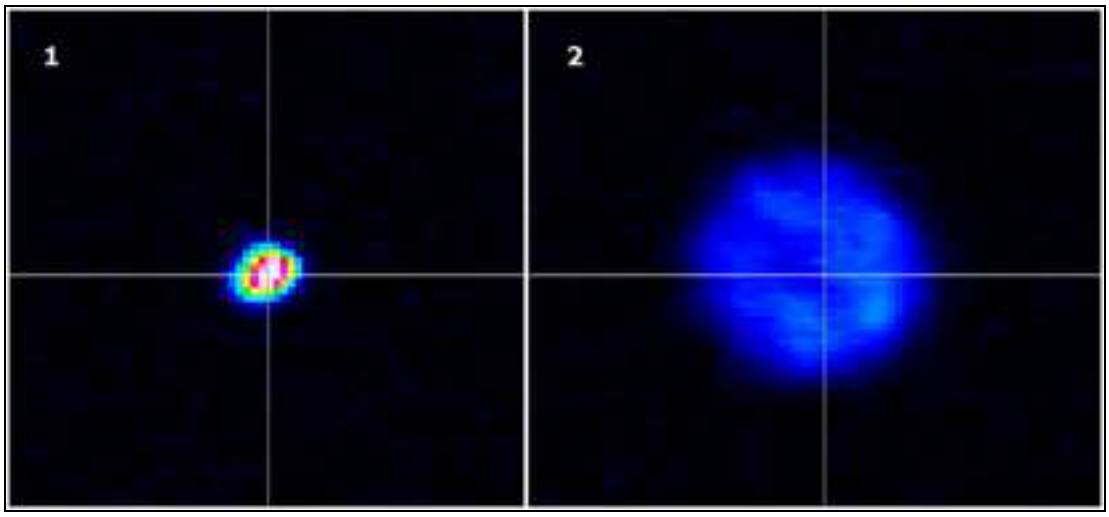
Οι κύριες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν, στη διάταξη που υλοποιήθηκε, ήταν: παλμικό λέιζερ BrilliantB (Nd:YAG) της εταιρείας Quantel, ψηφιακή κάμερα (CCD) A102f της εταιρείας Basler και γεννήτρια παλμών (Digital Delay/Pulse Generator) DG535 της εταιρείας SRS. Ο έλεγχος αυτών των οργάνων/συσκευών γινόταν με ειδικό λογισμικό, ανεπτυγμένο σε περιβάλλον LabView καθώς και με τη χρήση κατάλληλης κάρτας καταγραφής και αποστολής δεδομένων (DAQ card 6014 της εταιρείας National Instruments).

Η πηγή λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε, είναι ένα παλμικό λέιζερ που παράγει υπερβραχείς παλμούς ακτινοβολίας, μέσω της χρήσης του συστήματος άντλησης flashlamp και της τεχνικής Q-switching και το ενεργό μέσο είναι κρύσταλλος Yttrium Aluminium Garnet (YAG), στον οποίο έχουν εμβαπτιστεί ιόντα Neodymium (Nd3+). Αποτελείται από δύο κύριες μονάδες, την οπτική κεφαλή και την τροφοδότηση ισχύος, συνδεδεμένες μεταξύ τους. Η διαχείριση του λέιζερ γίνεται μέσω ενός τηλεχειριστήριου κουτιού και την διασύνδεση αυτού με τον υπολογιστή, μέσω του λογισμικού RS232. Το λέιζερ διαθέτει μονάδα παραγωγής δεύτερης αρμονικής και έτσι μπορεί να παράγει ακτινοβολία φωτός σε μήκος κύματος 532nm (η οποία και χρησιμοποιήθηκε) πέραν της θεμελιώδους του Nd:YAG μέσου (1064nm). Ο προκύπτων παλμός του λέιζερ έχει χρονική διάρκεια 6nsec, ο τυπικός ρυθμός επαναληψιμότητας (repetition rate) είναι 10Hz και η μέγιστη ενέργεια ανά παλμό είναι 850mJ στα 1064nm και 270mJ στα 532nm (σε μονορυθμική λειτουργία).

Μερικές από τις δυνατότητες του λέιζερ είναι ο συγχρονισμός της flashlamp, με εσωτερικό ή εξωτερικό ηλεκτρικό σήμα, η λειτουργία single shot που δίνει τη δυνατότητα εκπομπής, ενός μόνο παλμού λέιζερ καθώς και η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη, όπως του χρονισμού της λειτουργίας του flashlamp και του Q-switch. Επίσης διαθέτει εξωτερική μονάδα, που το επιτρέπει να λειτουργεί ως μονορυθμικό, που ήταν και η επιλεγμένη λειτουργία (single longitudinal mode). Τέλος, υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας σε repetition rate, μικρότερο από 10Hz. Στην *εικόνα 3.4* φαίνεται η κατανομή της δέσμης του λέιζερ, όπως μετρήθηκε σε μακρινό και κοντινό πεδίο αντίστοιχα, για εκπομπή δέσμης 532nm και repetition rate 10Hz.



Εικόνα 3.4: *Κατανομή της δέσμης του BrilliantB λέιζερ σε μακρινό (πάνω) και κοντινό (κάτω) πεδίο, στα 532nm και repetition rate 10Hz. Αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών της μέσω ειδικού λογισμικού (παρεχόμενο από την κατασκευάστρια εταιρία της ειδικής ψηφιακής κάμερας profiling).*



Εικόνα 3.5: *Μεγέθυνση της κατανομής της δέσμης του BrilliantB λέιζερ σε μακρινό (1) και κοντινό (2) πεδίο, στα 532nm και repetition rate 10Hz.*

Η καταγραφή της κατανομής επιτεύχθηκε με χρήση ειδικού λογισμικού καθώς και την τοποθέτηση της ψηφιακής κάμερας profiling του εργαστηρίου (WinCamD – UCD 12 της εταιρίας DataRay) στη θέση του υλικού προς μελέτη στην υλοποιηθείσα διάταξη και με τη μετακίνηση του εστιακού φακού L1 αναλόγως (μακρινό πεδίο - εστίαση δέσμης, κοντινό πεδίο - μη εστίαση δέσμης).

Η CCD κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των ελαστικών υπερηχητικών κυμάτων έχει ανάλυση (resolution) 1392×1040 pixels, μέγεθος pixel 6.45×6.45 μm και μέγιστο ρυθμό καταγραφής (frame rate) 15frames/sec. Επίσης διαθέτει κατάλληλο φακό συλλογής φωτός. Συνδέεται απ’ ευθείας στον υπολογιστή μέσω διασύνδεσης firewire IEEE 1394a και από την στιγμή που η κάμερα δέχεται εντολή ενεργοποίησης, απαιτούνται 8μsec για να ξεκινήσει η λειτουργία αυτής. Ο χρόνος έκθεσης της κάμερας (exposure time), ο χρόνος δηλαδή που παραμένει ανοιχτός ο φακός της κάμερας για να καταγραφεί μία φωτογραφία, έχει τη δυνατότητα ρύθμισης από το χρήστη και η κάμερα ρυθμίστηκε στον ελάχιστο χρόνο έκθεσής της, που είναι τα 58μsec, λόγω του ότι αφού η διάρκεια του φωτεινού παλμού είναι 6nsec, τόσος θα ήταν ο χρόνος που αυτή αναγκαστικά θα χρησιμοποιούσε για να καταγράφει τις εικόνες, οπότε δεν υπήρχε καμία ουσία στο να αυξηθεί ο χρόνος έκθεσής της.



Εικόνα 3.6: *1. CCD κάμερα, 2. Τηλεχειριστήριο λέιζερ, 3. Εξωτερική μονάδα μονορυθμικής λειτουργίας λέιζερ (single longitudinal mode), 4. Βοηθητική ίριδα για τη σωστή ευθυγράμμιση μεταξύ των οπτικών, 5. Ειδικά γυαλιά (goggles) προστασίας από ανακλάσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα 532nm.*

Η γεννήτρια παλμών, που χρησιμοποιήθηκε για τον χρονισμό και έλεγχο των συσκευών με την παροχή ηλεκτρικών σημάτων καλά διαχωρισμένων στο χρόνο, έχει μία είσοδο και τέσσερις εξόδους, που στέλνουν παλμούς σε ακριβώς καθορισμένους από τον χρήστη, χρόνους. Η χρονική στιγμή που η γεννήτρια ενεργοποιείται από την είσοδό της, ονομάζεται T_0 (αρχικός χρόνος) και με βάση αυτήν ο χρήστης μπορεί να ρυθμίζει το χρόνο που θέλει να στέλνεται παλμός από τις εξόδους της. Οι παλμοί εξόδου της γεννήτριας μπορούν να έχουν καθυστέρηση (delay) που προστίθεται στον αρχικό χρόνο T_0 ή στο χρόνο delay κάποιας άλλης εξόδου. Οι έξοδοι της γεννήτριας παρέχουν την δυνατότητα στους παραγόμενους παλμούς της να απέχουν μεταξύ τους από 1000sec έως 5psec.

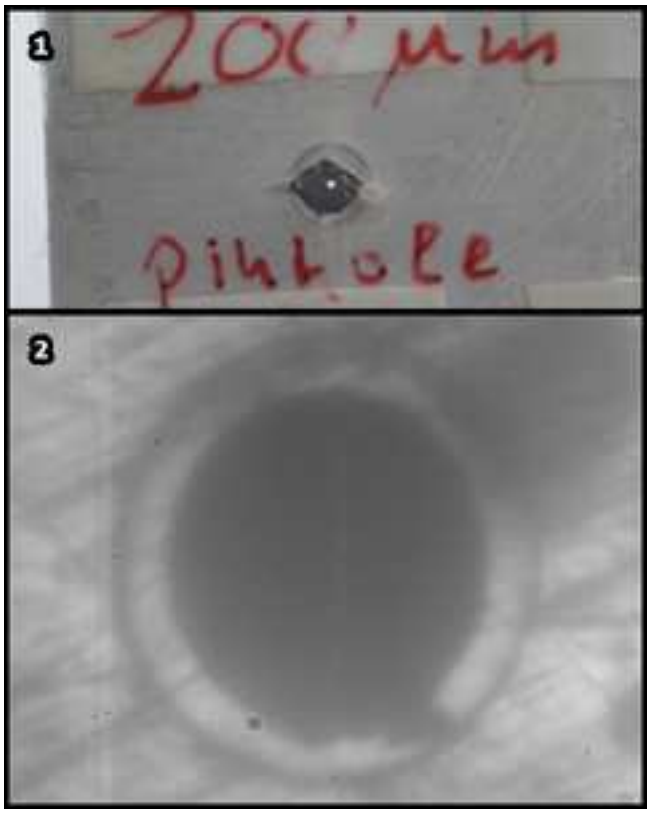
Στον Η/Υ του εργαστηρίου, ήταν εγκατεστημένη η κάρτα 6014 της National Instruments (16 Analog Inputs SE/8 DI, 12 bits Input Resolution, 2 Analog Outputs, 12 bits Output Resolution, Digital Triggers) η οποία ελεγχόταν μέσω προγραμμάτων οδήγησης περιφερειακών (drivers) καθώς και από το software LabView 8.5. Μέσω προγράμματος αναπτυγμένου σε περιβάλλον LabView, ήταν εφικτός ο συγχρονισμός των εμπλεκομένων συσκευών με την αρχική παρέμβαση του χρήστη καθώς η κάρτα NI6014 αποτελούσε τη master ηλεκτρονική συσκευή του πειράματος. Ο χρήστης παρεμβαίνοντας στο γραφικό περιβάλλον, δημιουργημένο μέσω του LabView, με τη χρήση ενός εικονικού κουμπιού (Shoot) ενεργοποιεί την κάρτα NI6014, η διαδικασία

της απεικόνισης ολοκληρώνεται αυτόματα και εμφανίζεται η τελική εικόνα του αντικειμένου, στην οθόνη του υπολογιστή (βλ. *εικόνα 3.7*).



Εικόνα 3.7: *Γραφικό περιβάλλον (Pulsed Control On Demand - LabView). Στιγμιότυπο από την πρώτη δοκιμή παραγωγής ελαστικού κύματος, άνω του κατωφλίου φωτοαποδόμησης (ablation threshold) του υλικού προς μελέτη.*

Το πρωταρχικό βήμα όσων αφορά στη διαδικασία λήψης μετρήσεων και στην επιβεβαίωση λειτουργίας της πειραματικής διάταξης, ήταν η δοκιμή της επιτεύξιμης μεγέθυνσης καθώς και η δοκιμαστική καταγραφή μετρήσεων, υπό μορφή εικόνων bitmap, μέσω του παραπάνω γραφικού περιβάλλοντος. Σε πρώτη φάση λοιπόν, έγινε χρήση απλού φωτός (λάμπα φωτισμού Mille Luce M1000 της εταιρίας Stocker & Yale), αντί της δέσμης παλμικού λέιζερ και στη θέση του δείγματος προς μελέτη, τοποθετήθηκε ένα λεπτό κομμάτι μέταλλο, με μια μικρή οπή (pinhole) διαμέτρου 200μm. Το αποτέλεσμα της καταγεγραμμένης μεγέθυνσης παρουσιάζεται στην *εικόνα 3.8*.



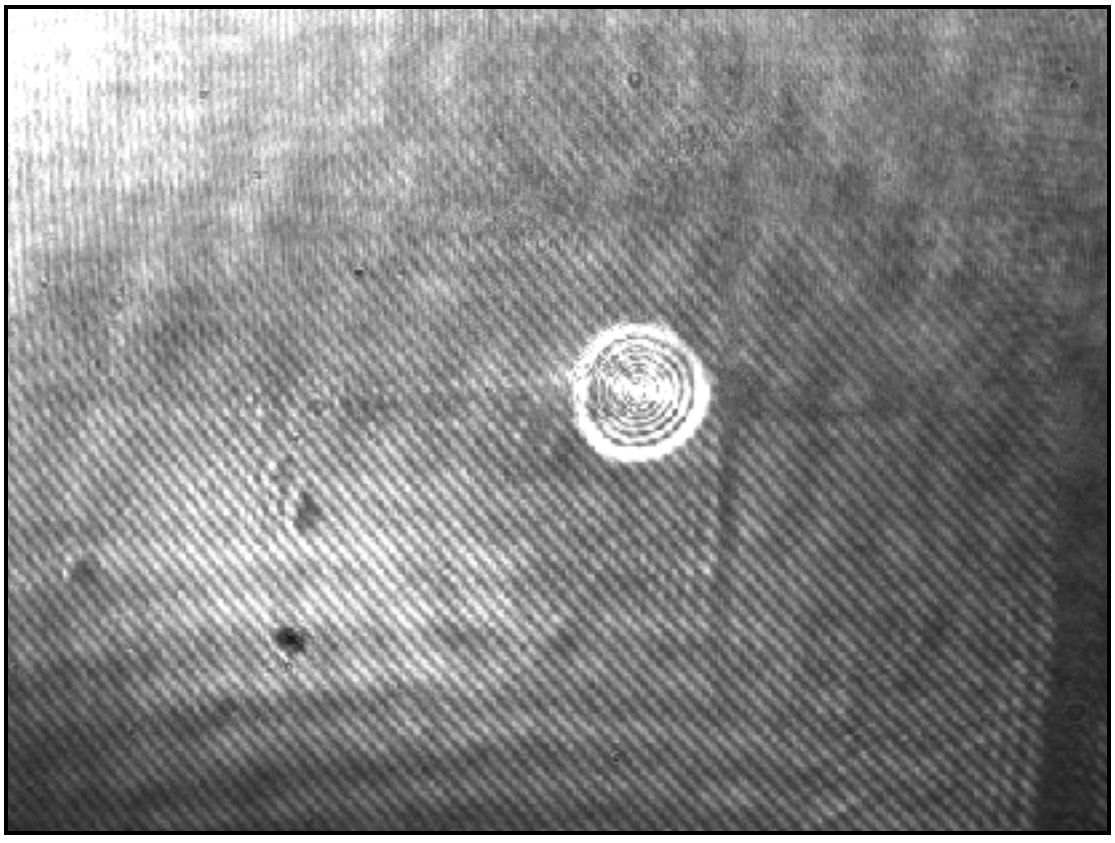
Εικόνα 3.8: *Δοκιμή της διάταξης μεγέθυνσης κάνοντας χρήση απλού φωτός. 1.Pinhole διαμέτρου 200μm (πριν τη μεγέθυνση), 2. Μεγέθυνση της pinhole, 20× (στο καταγεγραμμένο στιγμιότυπο, η οπή έχει διάμετρο 4mm - 620 pixels).*

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η ίδια δοκιμή με παραπάνω, χρησιμοποιώντας τη δέσμη του λέιζερ ως πηγή φωτός, ολοκληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο και τη δοκιμή λειτουργίας όλων των επιμέρους στοιχείων της διάταξης (π.χ. ορθότητα ευθυγραμμίσεων και καταλληλότητα των διάφορων οπτικών). Αμέσως μετά, ακολούθησε η τοποθέτηση του υλικού προς μελέτη στη θέση του ως δείγμα του πειράματος και η εκκίνηση φυσικά, των δοκιμών καταγραφής δεδομένων καθώς η δέσμη λέιζερ ξεκινάει να προκαλεί μεταβολές στην επιφάνεια του υλικού, άνω και κάτω από το κατώφλι εκρηκτικής φωτοαποδόμησης, αυτού.

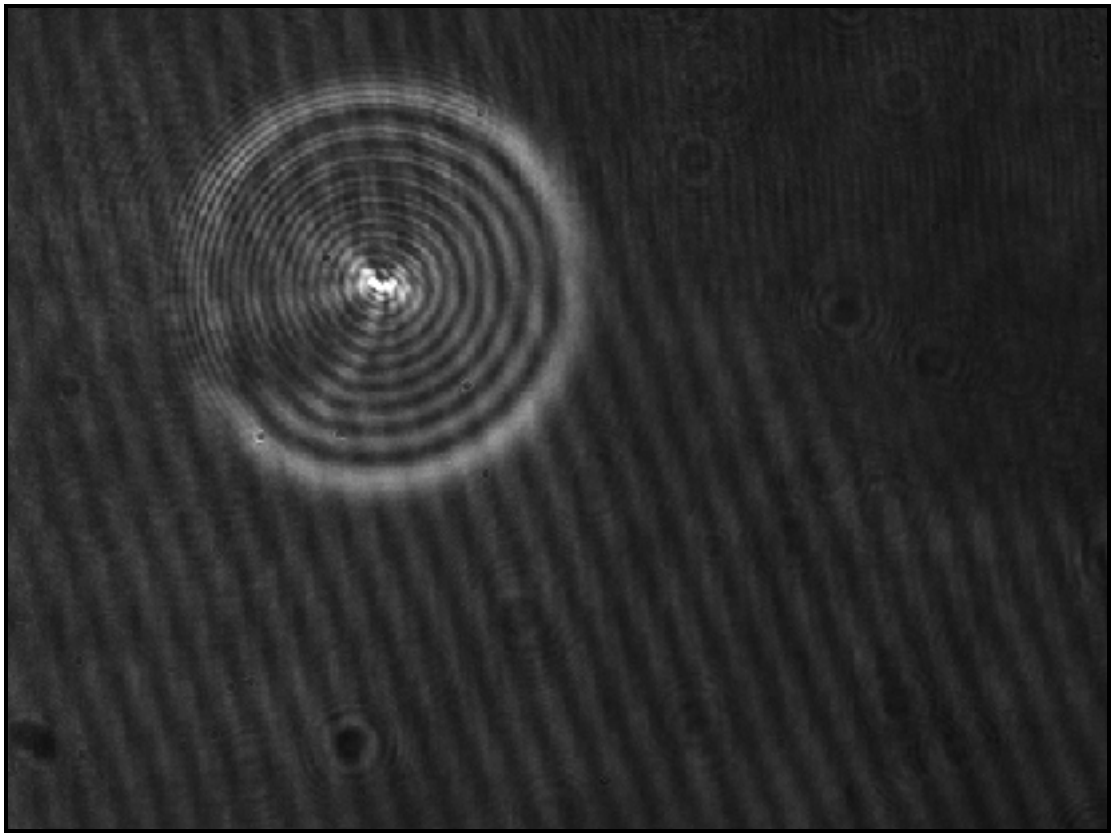
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 – Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Παρακάτω, γίνεται παράθεση των τυπικών καταγεγραμμένων αποτελεσμάτων μέτρησης του πειράματος όπου είναι εμφανής και η παραγωγή του ελαστικού κύματος υπερήχου (*εικόνα 4.1* & *4.2*).

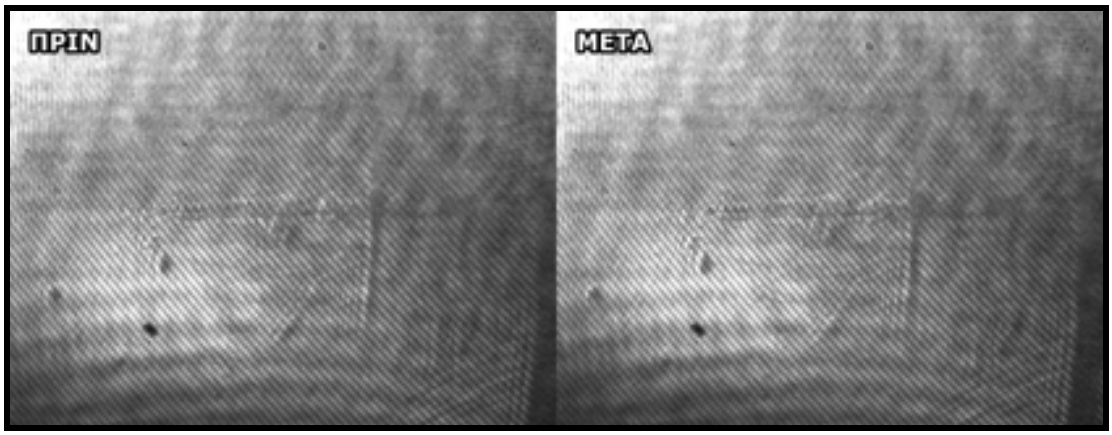


Εικόνα 4.1: *Στιγμιότυπο από την καταγεγραμμένη παραγωγή του ελαστικού υπερηχητικού κύματος σε φιλμ μεταλλικού υλικού (Au - χρυσός) εναποτεθειμένο σε διηλεκτρικό υλικό (BK7 - γυαλί), κάνοντας χρήση της δέσμης λέιζερ του Nd:YAG, BrilliantB (6ns pulse), στα 532nm. Η μεγέθυνση είναι 12×.*

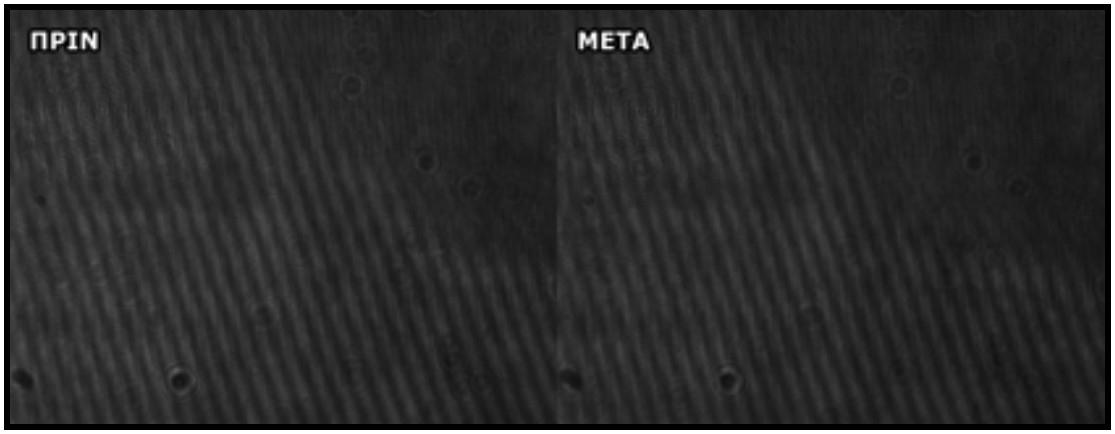


Εικόνα 4.2: *Στιγμιότυπο από μία επιπλέον καταγεγραμμένη παραγωγή του ελαστικού υπερηχητικού κύματος, μετά την τοποθέτηση του φακού L7 μπροστά από το CCD. Η μεγέθυνση είναι 20×.*

Μέσω επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στα ίδια σημεία, παρατηρήθηκε όμοια συμπεριφορά στην εξέλιξη και διάδοση του κύματος υπερήχου και επιβεβαιώθηκε το ότι οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα, κάτω από το κατώφλι αποδόμησης (threshold) του υλικού, όπως φανερώνεται από την επιθεώρηση της επιφάνειας αυτού πριν και μετά τη γένεση και εξασθένιση του παραγόμενου ελαστικού κύματος (βλ. *εικόνα 4.3α, β*).



Εικόνα 4.3α: *Μεγέθυνση της επιφάνειας του υλικού πριν και μετά τη γένεση και εξασθένιση του κύματος.*



Εικόνα 4.3β: *Μεγέθυνση της επιφάνειας του υλικού πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη γένεση και εξασθένιση του κύματος (ομοίως με παραπάνω).*

Από τις παραπάνω εικόνες καθώς και μέσω περαιτέρω επιθεώρησης των περιοχών αυτών με μικροσκόπιο, δεν παρατηρείται μεταβολή, παραμόρφωση ή καταστροφή της επιφάνειας του υλικού στα εν λόγο σημεία γένεσης του κύματος, επιβεβαιώνοντας έτσι το γεγονός ότι δεν έχει ξεπεραστεί το *ablation threshold* του υλικού από την ένταση της δέσμης του λέιζερ.

4.2 – Ανάλυση αποτελεσμάτων

Χρησιμοποιώντας λογισμικό επεξεργασίας εικόνας που διανέμεται δωρεάν (*ImageJ*, ανεπτυγμένο από την αμερικάνικη δημόσια υπηρεσία *National Institutes of Health - NIH*), πραγματοποιήθηκε ανάλυση των μετρήσεων με σκοπό την εξαγωγή του μήκους κύματος άρα και της συχνότητας του παραγόμενου κύματος καθώς επίσης και της ταχύτητας αυτού.

Το μήκος κύματος **λ** υπολογίζεται πραγματοποιώντας *zoom* πάνω στο κύμα με στόχο τη μέτρηση της απόστασης ανάμεσα σε 2 μέγιστά του (σε πλήθος pixel) και στη συνέχεια πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό αυτό (8 pixel στην *εικόνα 4.1* ή 13 pixel στην *εικόνα 4.2*) με το μήκος του pixel της κάμερας (6.45μm) και διαιρώντας τέλος, το αποτέλεσμα, δια της μεγέθυνσης που έχει πραγματοποιηθεί μέσω των αντίστοιχων φακών της πειραματικής διάταξης (12× ή 20×). Άρα, το μήκος κύματος είναι **4.3 μm**. Στη συνέχεια, η συχνότητα του υπέρηχου υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\mathbf{f = c / \lambda} \qquad (4.1)$$

όπου η ταχύτητα του ήχου είναι **c = 3240m/s** (για εξέλιξη ακουστικού κύματος σε υλικό που αποτελείται από χρυσό) και προκύπτει **f = 0.75 GHz**.

Η ταχύτητα του υπέρηχου μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας από την *εικόνα 4.2*, την απόσταση **s** από τη πηγή του κύματος μέχρι το ένα από τα άκρα του (280 pixels × 6.45 μm) και αφού διαιρεθεί με την μεγέθυνση που έχει πραγματοποιηθεί (20×), διαιρείται τέλος με το χρόνο **t** που χρειάστηκε για να εξελιχθεί και να διαδοθεί έως αυτό το σημείο (30ns), βάσει του τύπου:

$$\mathbf{u = s / t} \qquad (4.2)$$

και προκύπτει **u = 3010m/s**. Η τιμή αυτή υπολογίζεται έτσι λόγω σφαιρικής διάδοσης του κύματος και συμφωνεί με την - βάσει βιβλιογραφίας - τιμή της ταχύτητας του ήχου **c** για εξέλιξη ακουστικού κύματος σε υλικό που αποτελείται από χρυσό (Au), η οποία είναι **3240m/s** και η απόκλιση της μετρηθείσας από αυτήν, είναι μόλις **7 %**.

Από τις εικόνες *4.1* και *4.2*, τέλος, είναι φανερό ότι η πηγή του κύματος είναι σημειακή όπως φαίνεται από τη διάδοσή του (σφαιρικό κύμα) και μπορούμε επίσης εύκολα να συμπεράνουμε ότι δεν υπάρχουν ατέλειες στη δομή της επιφάνειας του υλικού στη συγκεκριμένη περιοχή καθώς παρατηρείται ομαλή χρονική εξέλιξη και χωρική διάδοση του ελαστικού υπερηχητικού κύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 – Συμπεράσματα & μελλοντική εργασία

Οι βασικοί στόχοι της πτυχιακής αυτής εργασίας ως προς τη μελέτη ελαστικών κυμάτων υπερήχων με οπτικές απεικονιστικές μεθόδους, εκπληρώθηκαν με επιτυχία. Η πρώτη διερεύνηση των δυνατοτήτων και πλεονεκτημάτων της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε, διεκπεραιώθηκε επίσης επιτυχώς και οι βάσεις για αύξηση της διακριτικής της ικανότητας έχουν πλέον τεθεί.

Το πρώτο βήμα, όσον αφορά στη βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας που παρουσιάστηκε στη πτυχιακή αυτή, είναι η περαιτέρω ανάλυση των εικόνων *4.1* και *4.2* βάσει της διαδικασίας που έχει περιγραφεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 2.2.2 ώστε να πραγματοποιηθεί η τρισδιάστατη απεικόνιση του παραγόμενου κύματος με άμεσο αποτέλεσμα, την εξαγωγή του πλάτους του.

Στη συνέχεια μπορούν να μελετηθούν συστηματικά, διάφορα υλικά όπως μπορεί επίσης να τροποποιηθεί και η πειραματική διάταξη με τέτοιο τρόπο ώστε να δύναται η παρατήρηση και καταγραφή των παραγομένων κυμάτων σε επιπλέον χρονικά παράθυρα (όσο το δυνατόν περισσότερα και πλησιέστερα μεταξύ τους). Μία αρχική ιδέα προς αυτή τη κατεύθυνση, παρουσιάζεται στο *παράρτημα* της εργασίας αυτής, για μελέτη σε τρεις διαφορετικούς χρόνους από την χρονική στιγμή της γένεσης του ελαστικού κύματος.

Τέλος, συνιστάται η χρήση ακόμη στενότερων παλμών (της τάξης των femtosecond), με άμεσο στόχο την επίτευξη δημιουργίας υπερήχων με συχνότητες ανώτερες της τάξεως των Gigahertz, αυξάνοντας έτσι εκθετικά τη διακριτική ικανότητα της όλης αυτής διαδικασίας. Έτσι, θα είναι πλέον εφικτή η εφαρμογή της για παράδειγμα, σε βιολογικές μελέτες κυτταρικού επιπέδου, μελέτες νανοδομών κ.ο.κ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Davies *et al*, *Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms & multifarious applications*. J. Phys. D: Appl. Phys. 26, pp. 329-348 (1993).

[2] C.B. Scruby & L.E. Drain, *Laser Ultrasonics – Techniques and applications*. Bristol: Adam Hilger, N.Y. (1990).

[3] Dewhurst & Shan, *Optical remote measurement of ultrasound*. Meas.Sci.Technol., 10, pp. 139-168 (1999).

[4] Scruby C., *Some applications of laser ultrasound*. Ultrasonics, 27, pp. 195-209 (1989).

[5] R. Huber, D. Chinn, O. Balogun, T. Murray, *High Frequency Laser-Based Ultrasound*. UCRL-PROC-215718 (2005).

[6] Hebert *et al*, *Ultrasound generated by a fs and a ps laser pulse near the ablation threshold*. J. Appl. Phys. 98, pp. 0331041 - 0331047 (2005).

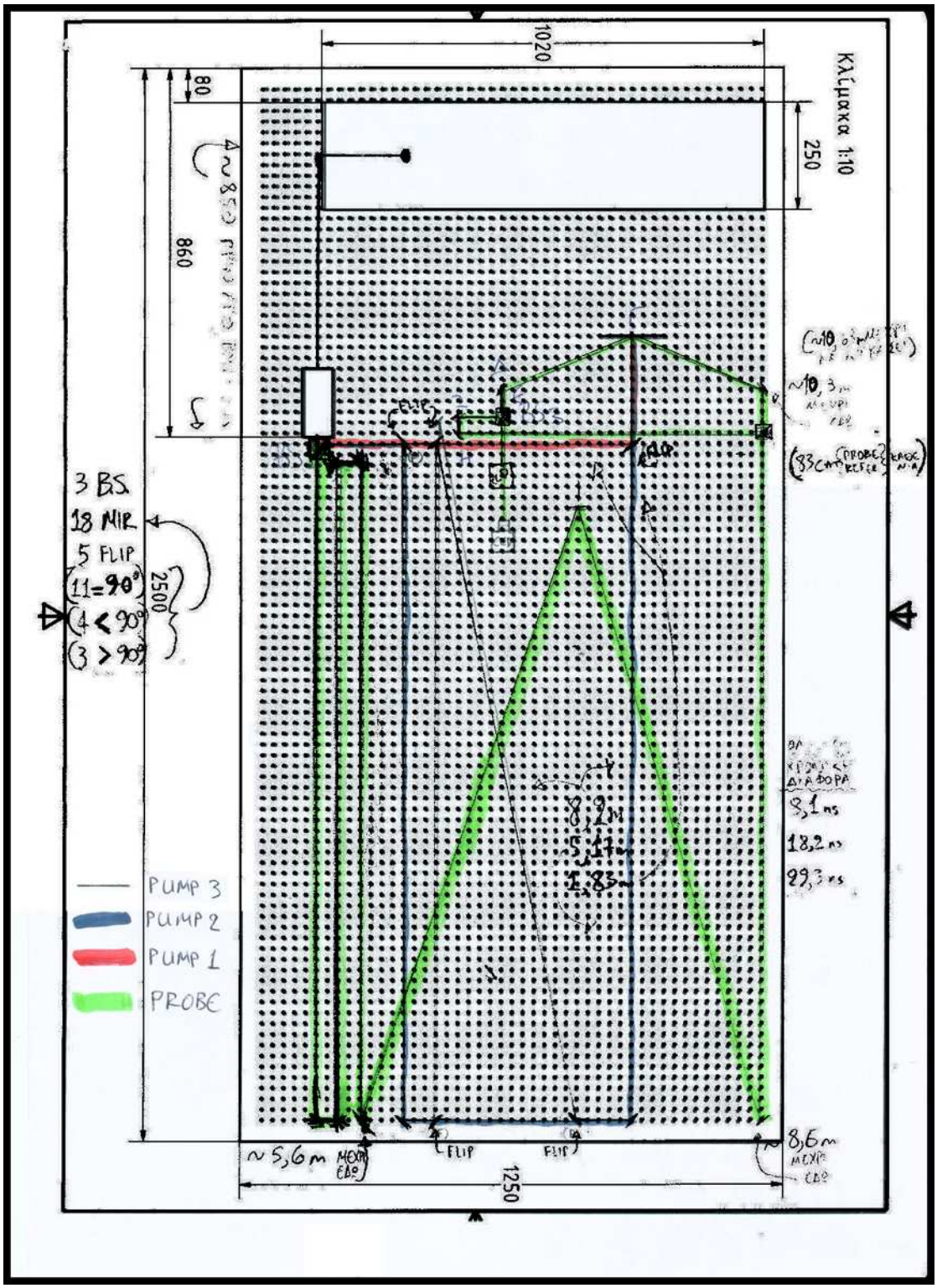
[7] Jennifer Ouellette, *Seeing with Sound*. The Industrial Scientist, June/July, pp. 14-17 (2004).

[8] A. Serway Raymond, *Physics for scientists and engineers – Τόμος III «Θερμοδυναμική, Κυματική, Οπτική»*. Third edition, Αθήνα (1990).

[9] Takeda *et al*, *Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry*. J. Opt. SOC. Am. 72, pp. 156 - 160 (1982).

[10] Greenfield *et al*, *Nanosecond interferometric studies of surface deformations of dielectrics induced by laser irradiation*. W-7405-ENG-36 (2000).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Πρόχειρη σχεδίαση τριών καθυστερήσεων (~ 10, 20, 30 ns) πάνω στην ίδια πειραματική διάταξη, ένα για κάθε μήκος διαδρομής της Δέσμης Παραγωγής (PUMP), αντίστοιχα (~ 8, 5, 2 m). Να σημειωθεί πως η απόσταση από την πηγή του λέιζερ μέχρι το σημείο που ξεκινούν όλες οι υπό-μέρη δέσμες, είναι ~1m.