

Πολυτεχνείο Κρήτης

**Παραγωγή και ανίχνευση ακουστικών
κυμάτων με χρήση τεχνολογίας λέιζερ,
κατασκευή και μετρήσεις:**

(1) Οπτικό μικρόφωνο και

(2) Γραμμικό κοχλία

Κώστας Χατζηγιαννάκης

kostas@iesl.forth.gr

**Διπλωματική Εργασία για την Απόκτηση Μ.Δ.Ε. στην
Εφαρμοσμένη Φυσική και στην Φυσική των Lasers.**

Επιβλέπων Καθηγητής: Σ. Μουσταϊζής

Ιούνιος 2007

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Σταύρο Μουσταϊζή που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το θέμα και με στήριξε επιστημονικά και ηθικά καθόλη την διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Κελεσίδη και τους υπεύθυνους του Φυτώριου Ιδεών γιατί με την ανάληψη του Προγράμματος αυτού δόθηκε η οικονομική δυνατότητα και τέθηκαν οι βάσεις για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Ευχαριστώ την συνάδελφο μου, μεταπτυχιακή φοιτήτρια, κα Ελισάβετ Κεσκυλίδου με την οποία μαζί πραγματοποιήσαμε όλα τα απαιτούμενα στάδια για την επιτυχή υλοποίηση του Φυτώριου Ιδεών.

Ευχαριστώ τους κυρίους Ε. Αποστολάκη, Ε. Βαρδάκη και Ν. Κορτσαλιουδάκη για την συνεχή τεχνική και επιστημονική υποστήριξη τους χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατό να υλοποιηθούν οι διατάξεις που απαιτήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τέλος ευχαριστώ την σύζυγο μου Σοφία και την κόρη μου Μαριάννα για την συμπαράσταση τους και την κατανόηση που έδειξαν σε όλη την διάρκεια της εργασίας αυτής.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	7
1 Θεωρητικό Μέρος	11
1.1 Ιστορική αναδρομή και σύγχρονες εφαρμογές των υπερήχων	13
Αναφορές	15
1.2 Παραγωγή υπερηχητικών κυμάτων.....	17
1.2.1 Transducers	17
1.2.2 Παραγωγή ακουστικών κυμάτων με laser στα υγρά	22
Αναφορές	30
1.3 Οπτική ανίχνευση του υπερήχου.....	33
1.3.1 Φράγμα περίθλασης Bragg σε οπτική (Fibre Bragg grating)	33
1.3.2 Συμβολόμετρο Michelson	34
1.3.3 Συμβολόμετρο ολοκλήρωσης κυματομορφής	34
1.3.4 Σύγκριση μεταξύ των τριών τεχνικών ανίχνευσης	35
1.3.5 Εφαρμογές της οπτικής ανίχνευσης σε υγρά.	35
Αναφορές	35
1.4 Οπτική Συμβολομετρία	37
1.4.1 Εισαγωγή	37
1.4.2 Κύματα και μέτωπα κύματος	37
1.4.3 Μέτωπα κύματος	39
1.4.4 Συμβολή	40
1.4.5 Συμβολόμετρα	47
2 Πειραματικό-Κατασκευαστικό Μέρος	51
2.1 Προκαταρτικές δοκιμές	53
2.1.1 Πειραματική διάταξη	53
2.1.2 Αποτελέσματα	56
2.2 Πρότυπο οπτικό μικρόφωνο	59
2.2.1 Σχεδίαση προτύπου	59
2.2.2 Ανάπτυξη βοηθητικών διατάξεων	61
2.2.3 Μετρήσεις	62
2.2.4 Επανασχεδίαση του οπτικού μικροφώνου	64

2.2.5	Ρεαλιστική καταγραφή ήχων στο ακουστικό φάσμα	66
2.2.6	Καταγραφή κυμάτων πίεσης, που παράγονται από παλμικό laser, με την χρήση οπτικού μικροφώνου.	70
2.2.7	Επανασχεδίαση του πρότυπου οπτικού μικροφώνου	72
2.3	Εργαστηριακές διατάξεις που αναπτύχθηκαν για την χρήση του οπτικού μικροφώνου και της μεμβράνης	75
2.3.1	Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης για την διεξαγωγή πειραμάτων υδροακουστικής	75
2.3.2	Γραμμικός κοχλίας και εφαρμογές	78
2.4	Εφαρμογές της τεχνολογίας και μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε.....	85
2.5	Μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα	86
3	Συμπεράσματα	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι		89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....		95

Εισαγωγή

Οι υπέρηχοι αποτελούν ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο τομέα της σύγχρονης μηχανικής. Μια πληθώρα εφαρμογών στη βιομηχανία, στη υποθαλάσσια ακουστική και κυρίως στην ιατρική έχουν αναπτυχθεί αφού οι υπέρηχοι έχουν το πλεονέκτημα της μη καταστροφικής εξέτασης αντικειμένων γεγονός που δεν συμβαίνει με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Όπως είναι φυσικό οι ολοένα και περισσότερο διευρυνόμενες εφαρμογές των υπερήχων δημιουργούν την ανάγκη για συνεχή έρευνα και ανάπτυξης νέων πομπών και αισθητήρων υπερήχων που θα παράγουν και ανιχνεύουν υψηλές συχνότητες (εκατοντάδες MHz) και θα προσφέρουν υψηλή ευαισθησία και ευκρίνεια χωρική και χρονική.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός πομπού ευρέος φάσματος και ενός αντίστοιχου ανιχνευτή ακουστικών συχνοτήτων που λειτουργούν με οπτικές μεθόδους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε υγρά όσο και σε αέρια μέσα. Συγκρινόμενος με τους υπάρχοντες ανιχνευτές οι οποίοι λειτουργούν σε μια μικρή περιοχή συχνοτήτων και μάλιστα κυρίως σε χαμηλές συχνότητες, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής μπορεί να λειτουργεί σε μια περιοχή συχνοτήτων από λίγα Hz (πολύ χαμηλές) έως μερικά MHz (πολύ υψηλές). Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να δώσει λύσεις στις ανάγκες που αναφέρθηκαν παραπάνω και δίνει νέες δυνατότητες στην ανίχνευση ακουστικών συχνοτήτων.

Η ιδέα είναι καινοτόμα τόσο στην μέθοδο παραγωγής και διάδοσης ακουστικών κυμάτων όσο και στην μέθοδο ανίχνευσης τους. Αν και η παραγωγή ακουστικών συχνοτήτων με laser είναι γνωστή εδώ και χρόνια δεν έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή για την κατασκευή εφαρμοσμένων συστημάτων. Όμοια τα οπτικά συμβολόμετρα αν και έχουν χρησιμοποιηθεί για μια πληθώρα ανιχνευτικών συστημάτων δεν έχουν βρει ευρεία εφαρμογή στην ανίχνευση ακουστικών κυμάτων.

Η δυνατότητα για τις πρώτες εργαστηριακές δοκιμές δόθηκε με την ανάληψη του προγράμματος «Φυτώριο Ιδεών». Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού έγιναν πειράματα για την μελέτη της παραγωγής

ακουστικών κυμάτων με laser και την δυνατότητα ανίχνευσης τους με την χρήση οπτικού συμβολόμετρου.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ο φορητός ανιχνευτής ευρέος φάσματος. Απαιτήθηκαν αρκετές τροποποιήσεις από το αρχικό πρότυπο μέχρι να βελτιστοποιηθεί η ευαισθησία του ανιχνευτή τόσο από πλευράς εύρους «ζώνης» συχνοτήτων όσο και από πλευράς έντασης. Πάντως το τελικό πρότυπο που κατασκευάστηκε δεν ξεπέρασε τις διαστάσεις ενός συνηθισμένου μικροφώνου ή ενός transducer ενώ στο τέλος της εργασίας προτείνεται και μια διαφορετική ακόμα πιο συμπαγής (compact) και μικρότερων διαστάσεων διάταξη.

Ο ανιχνευτής που αναπτύχθηκε αλλά και η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε κατά την προσπάθεια εξέλιξης του μπορούν να βρουν εφαρμογή σε όλους τους τομείς που αναφέρθηκαν στην αρχή της εισαγωγής αλλά και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Από αυτές ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει αυτή της βιο-ιατρικής και βιο-μηχανικής η οποία και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η παραγωγή και ανίχνευση υπερήχων μεγάλων συχνοτήτων της τάξεως του GHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απεικονιστικές εφαρμογές και πιθανά κάποια στιγμή να αντικαταστήσουν σε συγκεκριμένες εφαρμογές το οπτικό μικροσκόπιο λόγω του ότι έχουν διακριτική ικανότητα που πλησιάζει το δέκατο του μικρομέτρου. Επίσης η δημιουργία ωστικών (ή κρουστικών) κυμάτων με λέιζερ μπορεί να έχει εφαρμογή στην έγχυση φαρμάκων και ιδιαίτερα νάνο-δομών που θα μεταφέρουν φάρμακα ή χημικές ουσίες για την καταπολέμηση ασθενειών όπως π.χ. του καρκίνου. Όσο η συχνότητα των αυξάνει τόσο μπορεί να γίνει χρήση τους για την ανίχνευση των μικροόγκων και της έγχυσης των νάνο-δομών για την θεραπεία. Η δυσκολία στην ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων είναι ότι απαιτούνται ηλεκτρονικά με μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα που καταλαμβάνουν μεγάλο σχετικά όγκο (παλμογράφοι κλπ) καθώς και μεγάλη υπολογιστική ισχύς ανάλυσης. Η αναζήτηση τεχνολογιών που θα μπορούσαν να αποτελέσουν νέο τρόπο ανίχνευσης και να εμπλουτίσουν την φασματική ανίχνευση οδήγησε σε πρώτη φάση όσο αφορά την παρούσα εργασία στη αντιγραφή (μίμηση) του γραμμικού κοχλία που προσφέρεται για την μελέτη της φασματικής ανάλυσης των παραγόμενων, διαδιδόμενων και ανακλωμένων κυμάτων αλλά και στη χρήση συστήματος

ανιχνευτών-αναλυτών που δεν χρειάζονται εξειδικευμένα ογκώδη ηλεκτρονικά υποσυστήματα και μπορούν να καταλάβουν μικρό σχετικά όγκο. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε γραμμικός κοχλίας που λειτουργεί στη ακουστική φασματική περιοχή. Προς το τέλος της παρούσης εργασίας έγινε αντιληπτό ότι συνδυασμός των διαφορετικών τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν για παραγωγή και ανίχνευση κυμάτων με χρήση τεχνολογίας λέιζερ μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μικρών σχετικά διαστάσεων και να αποτελέσουν την πρώτη προσπάθεια προσομοιωτή βιονικού αυτιού. Οι εφαρμογές είναι προφανείς τόσο στο ερευνητικό όσο και στο πρακτικό μέρος μελέτης προβλημάτων ακοής.

Η βιο-ιατρική συναντά την βιομηχανική και αντίστροφα δείχνοντας το ενδιαφέρον των κατασκευών και μετρήσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1 Θεωρητικό Μέρος

1.1 Ιστορική αναδρομή και σύγχρονες εφαρμογές των υπερήχων

Ο υπέρηχος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ηχητικά κύματα που διαδίδονται σε συχνότητες πέρα από αυτά που είναι ευδιάκριτα στο ανθρώπινο αυτί. Το ανώτερο όριο συχνοτήτων της ανθρώπινης ακοής διαφέρει από άτομο σε άτομο, αλλά γενικά ο υπέρηχος μπορεί να θεωρηθεί ότι κυμαίνεται από 20 kHz μέχρι 1 GHz.

Ιστορικά η μελέτη του υπερήχου ξεκίνησε παράλληλα με εκείνη της γενικής ακουστικής, αλλά λόγω διάφορων σημαντικών διαφορών που έχουν θεωρούνται χωριστός τομέας.

Η παραγωγή των υπερηχητικών ακουστικών κυμάτων επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε ένα λεπτό κρύσταλλο, ενώ η ακουστική παραγωγή στο ακουστικό φάσμα με την χρήση των ηχείων.

Η πρώτη μελέτη των υπερηχητικών κυμάτων διεξήχθη από τον Galton το 1883. Μελετώντας τα ακουστικά όρια που μπορούν να γίνουν αντιληπτά από τους ανθρώπους ο Galton [1,4] παρήγαγε έναν ειδικό συριγμό. Τώρα είναι γνωστότερος ως συριγμός των σκυλιών. Ιστορικά, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας από τους πρώτους κατασκευασμένους από τον άνθρωπο υπερηχητικούς μετατροπείς (transducers).

Στο τέλος του 19ου αιώνα δύο πολύ σημαντικές ανακαλύψεις πραγματοποιήθηκαν, που και οι δύο έχουν κρίσιμη σημασία για την ανάπτυξη της υπερηχητικής τεχνολογίας. Ήταν, η ανακάλυψη και η πρώτη μελέτη της magnetostriiction από J.P. Joule [5] και η μελέτη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου από τους αδελφούς J.P Curie [3].

Η μελέτη της υποβρύχιας ακουστικής ή ακριβέστερα της ανάπτυξης της υπερηχητικής τεχνολογίας για την ανίχνευση υποβρύχιων αντικειμένων προέκυψε κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκόσμιο Πόλεμου λόγω της ανάπτυξης των υποβρυχίων. Ο Langevin [1,2,3] ερεύνησε τη χρήση των quartz transducers για τη μετάδοση και ανίχνευση των υπερηχητικών κυμάτων, σχετικά χαμηλών συχνοτήτων στο νερό.

Το 1927, οι Richards και Loomis [3] δημοσίευσαν την πρώτη μελέτη των χημικών φαινομένων που προκαλούνται από τον υπέρηχο. Στη δημοσίευση

τους εξήγησαν δύο τύπους διαδικασιών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της εκπομπής υπερήχων. Κατ' αρχάς, την επιτάχυνση των συμβατικών αντιδράσεων και δεύτερον, τις αντιδράσεις μείωση-οξείδωση στα ένυδρα ιοντικά διαλύματα. Επιπλέον, εξήγησαν μερικά φαινόμενα που εμφανίζονται μετά από τη μετάβαση των κυμάτων υπερήχου στα διάφορα υλικά, όπως η θέρμανση των στερεών και υγρών και ο σχηματισμός των γαλακτωμάτων και των υγρών αερολυμάτων (aerosols) στα υγρά.

Οι παρατηρήσεις τους και οι πειραματικές τεχνικές τους άνοιξαν νέα μέτωπα για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς διαφόρων ενδιαφερόντων με συνέπεια την εφαρμογή του υπερήχου στην οργανική χημεία, σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές καθώς επίσης και σε ιατρικές εφαρμογές με χρήση είτε της χαμηλής είτε υψηλής έντασης υπερήχους. Παραδείγματος χάριν, με τη χρησιμοποίηση ενός ακουστικού μικροσκοπίου ανίχνευσης ο χαμηλός υπέρηχος έντασης χρησιμοποιείται για την έρευνα των ιδιοτήτων των υλικών. Στην ιατρική, ο υπέρηχος χρησιμοποιείται συνήθως στη διαγνωστική ανωμαλιών των ανθρώπινων οργάνων καθώς επίσης και την προγεννητική απεικόνιση του εμβρύου. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σημαντικό ότι το δείγμα δεν υφίσταται οποιεσδήποτε μόνιμες αλλαγές στις δομικές και χημικές ιδιότητές του. Επομένως, πολλές ιατρικές εφαρμογές υιοθετούν τους χαμηλής έντασης, πολύ υψηλών συχνοτήτων (MHz) υπερήχους.

Η ακουστική ισχύς που μεταδίδεται υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να κυμανθεί από μερικά microwatts σε μερικές δεκάδες milliwatts. Στις υψηλές εντάσεις, ο υπέρηχος χρησιμοποιείται γενικά για την αλλαγή των ιδιοτήτων του υλικού μέσω του οποίου περνούν. Οι εφαρμογές υψηλής έντασης σχεδόν πάντα χρησιμοποιούν χαμηλές συχνότητες, ακριβώς επάνω από το ακουστικό όριο. Οι ακουστικές ισχύεις που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να κυμανθούν από μερικά milliwatts μέχρι kilowatt.

Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα των υπέρηχων είναι ταχύτεροι ρυθμοί αντίδρασης και υψηλότερες αποδόσεις. Το πιο σημαντικό, δεδομένου ότι η μετάβαση των ηχητικών κυμάτων υψηλής έντασης μέσω των υγρών παράγει τοπικά υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, είναι ότι πειράματα που κανονικά θα πραγματοποιούντουσαν σε υψηλές θερμοκρασίες τώρα γίνονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Για βιομηχανικούς λόγους μεγάλου μεγέθους μονάδες παραγωγής υπερήχων χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες επεξεργασίας υγρών με ρυθμούς 200 L/min. Τέτοιοι τύποι μηχανημάτων χρησιμοποιούνται για την εξαέρωση των υγρών, τη διασπορά των στερεών στα υγρά και τη μετατροπή σε μορφή γαλακτώματος μην αναμίξιμων υγρών.

Αναφορές

1. *Acoustical Physics, Vol. 49, No. 1, 2003, pp. 24–30. Translated from Akusticheski Zhurnal, Vol. 49, No. 1, 2003, pp. 30–37. Features of Underwater Acoustics from Aristotle to Our Time. Leif Bjørnø.*
2. *Phys Educ , VOI 16 1981 Printed In Great Britain, Underwater acoustics D J Creasey*
3. www.ob-ultrasound.net/history
4. *Inquiries into Human Faculty and its development, Francis Galton, 1883, Macmillan (www.galton.org)*
5. *Welcome to magnetostrictive transducers actuators and sensors (www.public.iastate.edu)*

1.2 Παραγωγή υπερηχητικών κυμάτων

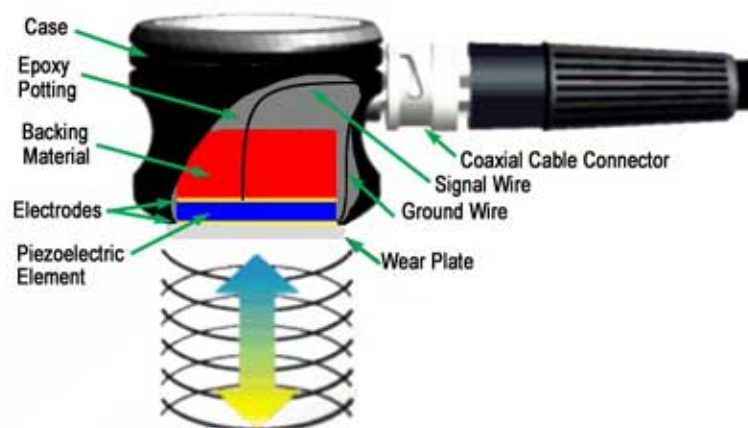
Τα υπερηχητικά ακουστικά κύματα με συχνότητες πάνω από 20 kHz, έχουν βρει πολλές εφαρμογές στον τομέα του μη καταστρεπτικού ελέγχου (non-destructive testing, NDT). Για πολλά χρόνια, μέχρι την ανακάλυψη των λέιζερ στη δεκαετία του '60, ο μόνος τρόπος να παραχθούν και να ανιχνευτούν υπέρηχοι ήταν οι χρήσιμες των transducers. Οι εναλλακτικές τεχνικές οπτικά παραγμένου και ανιχνευόμενου υπερήχου λύνουν πολλών από αυτά τα προβλήματα και ανοίγουν νέες δυνατότητες.

1.2.1 Transducers

1.2.1.1 Περιγραφή των Transducers

Ένας transducer (ηλεκτροακουστικός μετατροπέας) ήχου [12] είναι μια συσκευή που μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική ενέργεια μέσα στο νερό ή αντίστροφα μετατρέπει την ακουστική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Τα κύρια συστατικά είναι το ενεργό στοιχείο (active element), το υποστηρικτικό στοιχείο (**Backing**), και η προστατευτική βάση (**Wear Plate**).



Σχήμα 1.1 Τα βασικά τμήματα ενός transducer [12]

Το ενεργό στοιχείο, είναι πιεζοηλεκτρικό ή σιδηροηλεκτρικό υλικό, που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε υπερηχητική ενέργεια. Τα συνηθέστερα

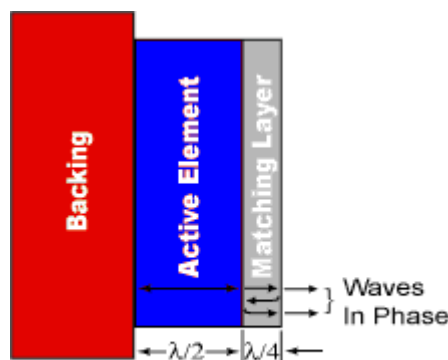
υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολωμένα κεραμικά που μπορούν να κοπούν με ποικίλους τρόπους έτσι ώστε παράγουν τους διαφορετικούς τρόπους (modes) κυμάτων.

Νέα υλικά, όπως πιεζοηλεκτρικά πολυμερή και συνθετικά, έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, όπου παρέχουν υψηλή απόδοση μετατροπής. Ένα τέτοιο υλικό είναι το φθοριούχο πολυβινύλιο (PVF_2) το οποίο κατά την παραγωγή του υποβάλλεται σε μηχανικές και ηλεκτρικές εκτάσεις. Με αυτό τον τρόπο τα τυχαία προσανατολισμένα μόρια του αποκτούν προσανατολισμό με τα μόρια του υδρογόνου στη μια πλευρά του φιλμ και του φθορίου στην άλλη. Έτσι, με την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, δημιουργείται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Το υποστηρικτικό στοιχείο είναι συνήθως φτιαγμένο από μια ιδιαίτερα υψηλής πυκνότητας και υψηλής εξασθένισης υλικό που χρησιμοποιείται για να ελέγξει τη δόνηση του transducer απορροφώντας την ενέργεια που ακτινοβολείται από τη πίσω πλευρά του ενεργού στοιχείου. Όταν η τιμή της σύνθετης ακουστικής αντίστασης (impedance) του υποστηρικτικού στοιχείου είναι ομοίου μεγέθους με την τιμή της σύνθετης αντίστασης του ενεργού στοιχείου, το αποτέλεσμα θα είναι ένας υψηλής εξασθένισης transducer που έχει καλή χωρική ευκρίνεια (resolution) αλλά πιθανά χαμηλότερη απόδοση στο πλάτος του σήματος. Εάν η ακουστική σύνθετη αντίσταση είναι διαφορετική μεταξύ του στοιχείου και της υποστήριξης, περισσότερη ηχητική ενέργεια θα σταλθεί προς το υπό δοκιμή υλικό. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας transducer με χαμηλότερη ευκρίνεια (resolution) λόγω μιας πιο μακρόχρονης διάρκειας του κύματος, αλλά μπορεί να έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στο πλάτος των σημάτων.

Η προστατευτική βάση έχει ως βασικό σκοπό να προστατευθούν οι transducers από το περιβάλλον. Στην περίπτωση των transducers που λειτουργούν εξ επαφής η προστατευτική βάση πρέπει να είναι ανθεκτική στην τριβή και στη διάβρωση. Στην περίπτωση των transducers που χρησιμοποιούνται σε υγρά, των transducers γωνιακής εκπομπής, και των transducers γραμμών καθυστέρησης η προστατευτική βάση έχει ως πρόσθετο σκοπό να λειτουργεί ως ένας ακουστικός μετασχηματιστής μεταξύ της υψηλής

ακουστικής σύνθετης αντίστασης του ενεργού στοιχείου και του νερού, της σφήνας ή της γραμμής καθυστέρησης που έχουν χαμηλότερη ακουστική σύνθετη αντίσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή ενός στρώματος που είναι $1/4$ μήκος κύματος πυκνό και της επιθυμητής ακουστικής σύνθετης αντίστασης (το ενεργό στοιχείο είναι ονομαστικά $1/2$ μήκος κύματος). Η επιλογή του πάχους της επιφάνειας της προστατευτικής βάσης είναι βασισμένη στην ιδέα της υπέρθεσης που επιτρέπει στα κύματα που παράγονται από το ενεργό στοιχείο να είναι σε φάση με το κύμα που αντηχεί στο στρώμα προσαρμογής. Όταν τα σήματα είναι σε φάση, τα πλάτη τους προστίθενται και κατά συνέπεια ένα μεγαλύτερου πλάτους κύμα εισέρχεται στο υπό εξέταση αντικείμενο. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το ενεργό στοιχείο και την προστατευτική βάση όταν αυτά είναι σε φάση. Εάν ο transducer δεν ελέγχεται σωστά ή δεν έχει σχεδιαστεί με προσοχή και με τα κατάλληλα υλικά και τα ηχητικά κύματα δεν είναι στη φάση, τότε προκαλείται διάσπαση της κυματομορφής.



Σχήμα 1.2 Το ενεργό στοιχείο και την προστατευτική βάση όταν αυτά είναι σε φάση [12]

1.2.1.2 Αποδοτικότητα, εύρος ζώνης και συχνότητα των transducers

Μερικοί transducers κατασκευάζονται ειδικά για να είναι αποδοτικότεροι πομποί και άλλοι για να είναι αποδοτικότεροι δέκτες. Ένας transducer που αποδίδει καλά σε μια εφαρμογή θα παραγάγει όχι πάντα τα επιθυμητά αποτελέσματα σε μια διαφορετική εφαρμογή. Παραδείγματος χάριν, η ευαισθησία στις μικρές ατέλειες είναι ανάλογη προς την αποδοτικότητα του

transducer ως πομπού και δέκτη. Η ευκρίνεια και η δυνατότητα να βρεθούν οι ατέλειες κοντά στην επιφάνεια απαιτεί έναν ιδιαίτερα περιορισμένο (damped) transducer.

Είναι επίσης σημαντικό να γίνει κατανοητή η έννοια του εύρους ζώνης, ή του φάσματος συχνοτήτων, που συνδέεται με έναν transducer. Η συχνότητα που αναφέρεται σε έναν transducer είναι η κεντρική συχνότητα και εξαρτάται πρώτιστα από το υποστηρικτικό στοιχείο. Οι ιδιαίτερα περιορισμένοι (damped) transducers θα αποκριθούν στις συχνότητες επάνω και κάτω από την κεντρική συχνότητα. Το ευρύ φάσμα συχνότητας παρέχει σε έναν transducer την υψηλή ισχύ. Οι περιορισμένοι (damped) transducers θα εκπέμπουν ένα στενότερο φάσμα συχνότητας και μια φτωχότερη ισχύ, αλλά με μεγαλύτερη διείσδυση. Η κεντρική συχνότητα θα καθορίσει επίσης τις ικανότητες ενός transducer. Οι χαμηλότερες συχνότητες (0.5MHz-2.25MHz) παρέχουν τη μεγαλύτερη ενέργεια και τη διείσδυση σε ένα υλικό, ενώ οι κρύσταλλοι υψηλής συχνότητας (15.0MHz-25.0MHz) παρέχουν μειωμένη διείσδυση αλλά μεγαλύτερη ευαισθησία. Οι transducers υψηλής συχνότητας, όταν χρησιμοποιούνται με τον κατάλληλο εξοπλισμό, μπορούν να βελτιώσουν την ευκρίνεια μέτρησης ρωγμών και πάχους εντυπωσιακά. Τέλος ευρυζωνικοί transducers με συχνότητες μέχρι 150 MHz είναι εμπορικά διαθέσιμοι.

1.2.1.3 Τύποι Transducer

Οι υπερηχητικοί transducers κατασκευάζονται για ποικίλες εφαρμογές και μπορούν να κατασκευαστούν και κατά παραγγελία όταν χρειάζεται. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή του κατάλληλου transducer ανάλογα την εφαρμογή. Είναι σημαντικό να επιλεγεί ο transducer που έχει την επιθυμητή συχνότητα, το εύρος ζώνης, και την εστίαση για να βελτιστοποιηθεί η δυνατότητα ελέγχου ενός αντικειμένου. Οι transducers είναι ταξινομημένοι σε ομάδες ανάλογα με την εφαρμογή.

- **Οι εξ επαφής transducers** χρησιμοποιούνται για έλεγχο σε απευθείας επαφή με το υπό εξέταση αντικείμενο. Τα στοιχεία τους είναι τοποθετημένα σε μια ανθεκτική θήκη για να αντέχουν την τριβή με διάφορα υλικά. Αυτοί οι transducers έχουν εργονομικό σχεδιασμό και είναι εύκολο να τους κρατήσει χέρι και να μετακινούνται πάνω σε μια

επιφάνεια. Συνήθως έχουν ανταλλακτικές προστατευτικές βάσεις για επιμηκυνθεί ο χρόνος ζωής τους ενώ χρησιμοποιούνται και ενδιάμεσα υλικά σύζευξης όπως νερό, έλαια, γράσα, ή άλλα υλικά του εμπορίου έτσι ώστε να μην υπάρχει αέρας ανάμεσα στον transducer και στο υπό εξέταση υλικό.

- **Οι transducers βύθισης** (σε υγρά) είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν σε υγρό περιβάλλον και φυσικά όλες οι συνδέσεις είναι υδατοστεγείς. Οι transducers βύθισης έχουν ένα στρώμα προσαρμογής που βοηθάει στην καλύτερη απόδοση ηχητικής ενέργειας στο νερό. Οι transducers βύθισης μπορούν να έχουν επίπεδους σφαιρικούς ή κυλινδρικούς φακούς. Ένας εστιασμένος transducer μπορεί να έχει βελτιωμένη ευαισθησία και αξονική ευκρίνεια αφού η ηχητική ενέργεια συγκεντρώνεται σε μικρότερη περιοχή.

1.2.1.4 Περιορισμοί των Transducers

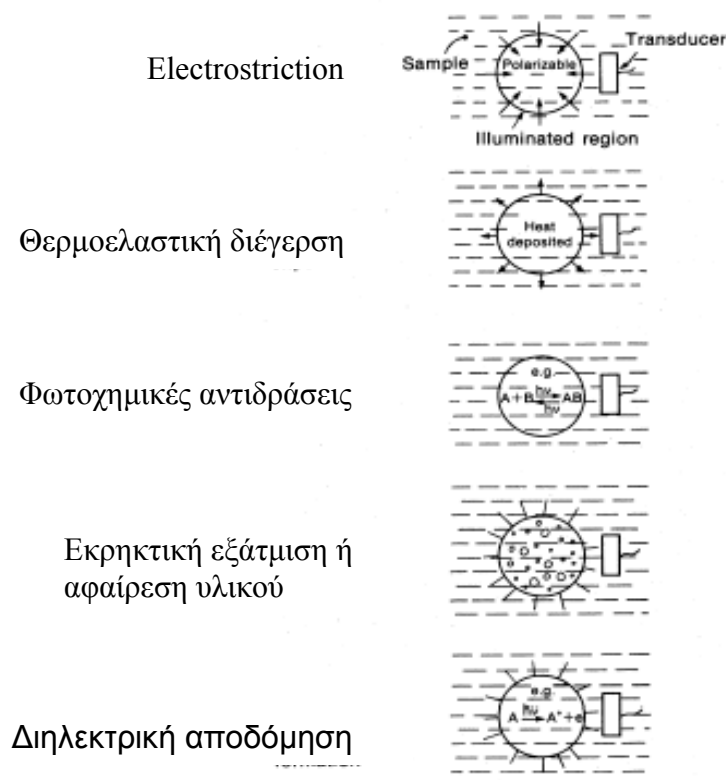
Οι κύριοι περιορισμοί των transducers [10] είναι λόγω της λειτουργίας τους εξ επαφής. Εδώ επισημαίνουμε μερικούς από αυτούς:

- Το στενό εύρος ζώνης του υπερήχου που παράγεται από τους Transducers. Τα εύρη ζώνης δεν είναι μεγαλύτερα από μερικές δεκάδες megahertz.
- Χαμηλή χωρική 'ευκρίνεια' (spatial resolution), λιγότερο από μερικά χιλιοστά που περιορίζονται από το μέγεθος των transducers.
- Περιορισμός θερμοκρασίας, δύσκολο να βρεθεί transducer για τις θερμοκρασίες παραπάνω από 500°. Συν τη πιθανότητα χημικών αντιδράσεων με την επιφάνεια του δείγματος.
- Περιορισμένες ανιχνευτικές ταχύτητες, δύσκολο να κινηθεί ο transducer διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερές τις παραμέτρους του.
- Οι transducers φορτίζουν την επιφάνεια των δειγμάτων, γεγονός που επηρεάζει τη διάδοση του υπερήχου.

1.2.2 Παραγωγή ακουστικών κυμάτων με laser στα υγρά

1.2.2.1 Μηχανισμοί οπτικής παραγωγής υπερήχων

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης laser-ύλης [2,3,7] που είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή των κυμάτων ήχου και υπερήχων στα αέρια, τα υγρά καθώς και τα στερεά. Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί είναι διηλεκτρική αποδόμηση, η electrostriction, η εξάτμιση ή η αφαίρεση υλικού, η θερμοελαστική διαδικασία, η πίεση ακτινοβολίας και επίσης οι διαδικασίες εκείνες σχετικές με μη γραμμικά φαινόμενα.



Σχήμα 1.3 Μερικοί μηχανισμοί παλμικής παραγωγής ακουστικών κυμάτων[5]

Η διηλεκτρική αποδόμηση (electric breakdown) εμφανίζεται σε εντάσεις laser επάνω από 10^{10} W/cm^2 . Το πλάσμα που παράγεται, προκαλεί ένα υπερηχητικό κύμα (shock wave) που διαδίδεται διαμέσου του υλικού και επιβραδύνεται βαθμιαία. Με αυτήν την διαδικασία η αποδοτικότητα μετατροπής

της ενέργειας laser σε ακουστική ενέργεια προσεγγίζει το 30% στα υγρά και επικρατεί στην αλληλεπίδραση laser στις υψηλές ενεργειακές εντάσεις.

Λόγω ηλεκτρικής πολικότητας των μορίων, όταν περνά το laser μέσα τους, τα αναγκάζει να κινηθούν μέσα και έξω από τις περιοχές των υψηλών ηλεκτρικών εντάσεων που δημιουργεί ο παλμός laser, προκαλώντας μια μεταβολή πυκνότητας. Ηχητικά κύματα παράγονται από αυτό το μηχανισμό που ονομάζεται electrostriction.

Ανάλογα με τις θερμικές ιδιότητες του μέσου υπάρχει ένα ελάχιστο (threshold) ενεργειακής πυκνότητας laser, επάνω από το οποίο στα υγρά προκαλείται εκρηκτική εξάτμιση ενώ στα στερεά προκαλείται αποδόμηση και αφαίρεση υλικού λόγω της απότομης ανόδου της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην παραγωγή ακουστικών κυμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση η αποδοτικότητα μετατροπής στα υγρά μπορεί να φθάσει μέχρι 1%.

Η πίεση ακτινοβολίας P_{rad} είναι ένας άλλος μηχανισμός υπεύθυνος για το σχηματισμό κυμάτων. Δεδομένου ότι το P_{rad} δίνεται από την

$$P_{rad}=I/c$$

όπου I είναι η ένταση laser, και c η ταχύτητα του φωτός, για εντάσεις 10^6 Wcm^{-2} προκύπτει ότι η πίεση είναι της τάξης 0,3 mbar. Αυτό είναι μάλλον μικρό έναντι των άλλων μηχανισμών π.χ. η θερμοελαστική παραγωγή ήχου (που οδηγεί σε πίεση μερικών bar υπό ιδανικές συνθήκες και η οποία παρουσιάζεται παρακάτω).

Όταν το laser προσπίπτει σε ένα διάλυμα δύο διαδικασίες υπάρχουν, που μπορούν να προκαλέσουν την παραγωγή κυμάτων, αυτές είναι (I) φωτοχημικά αποτελέσματα όταν η ακτινοβολία laser ενεργεί σε δύο χωριστά στοιχεία A και B για την παραγωγή ενωμένου μορίου AB ή (II) το αντίθετο φαινόμενο, τη μοριακή διάσπαση όπου το laser χωρίζει το μόριο AB στα άτομα A και B, και (III) ο σχηματισμός φυσαλίδων.

Ο σημαντικότερος όμως μηχανισμός για την παραγωγή ήχου, είναι η θερμοελαστική διαδικασία. Κατά τη θέρμανση ενός περιορισμένου όγκου, ενός μέσου που απορροφά, η ενέργεια του laser που απορροφάται προκαλεί μια μεταβολή θερμοκρασίας που προκαλεί ένα ακουστικό κύμα. Λόγω της σημασίας της, αυτή η περίπτωση θα συζητηθεί εκτενέστερα.

Εάν οι οπτικές, μηχανικές, και θερμικές ιδιότητες του ακτινοβολούμενου μέσου καθώς επίσης και οι παράμετροι του παλμού laser είναι γνωστές, η

μορφή και το εύρος του προκύπτοντος κύματος μπορούν να προβλεφθούν ακριβώς. Τα θερμοελαστικά κύματα είναι επομένως ιδανικά για τον έλεγχο της απόκρισης των ευρυζωνικών transducers.

Με τη σειρά τους, εάν ένας αξιόπιστος ανιχνευτής είναι διαθέσιμος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει μερικές από τις ιδιότητες υλικών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο προσδιορισμός των οπτικών ιδιοτήτων από τα θερμοελαστικά κύματα πίεσης είναι δυνατός εάν η διάρκεια του παλμού laser είναι πιο σύντομη από το χρόνο που χρειάζεται ένα ακουστικό κύμα να διαπεράσει την οπτικά θερμασμένη περιοχή. Το μέγεθος της οπτικά θερμασμένης περιοχής εξαρτάται από τη διάμετρο D της δέσμης laser και το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας το οποίο με την σειρά του εξαρτάται από τον συντελεστή απορρόφησης μ_{eff} (cm^{-1}) της ακτινοβολίας laser από το υλικό. Αυτός ο όρος ονομάζεται συνήθως περιορισμός πίεσης και μπορεί να περιγραφεί από τις σχέσεις

$$t_p \prec \frac{1}{c\mu_{eff}} \text{ για } \frac{1}{\mu_{eff}} \prec D \quad (1.2.1)$$

$$t_p \prec \frac{D}{c} \text{ για } \frac{1}{\mu_{eff}} \succ D \quad (1.2.2)$$

όπου t_p είναι η χρονική διάρκεια του παλμού laser και c ταχύτητα του ήχου. Είναι εμφανές από τις παραπάνω σχέσεις ότι ο περιορισμός πίεσης εξαρτάται από την μικρότερη διάσταση της οπτικά θερμασμένης περιοχής.

Προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα ακουστικής διάθλασης, που είναι γνωστά ότι προκαλούν ισχυρές παραμορφώσεις στο κύμα, ο ανιχνευτής πρέπει να τοποθετηθεί κοντά στην ακουστική πηγή σε μια απόσταση όχι μεγαλύτερη από

$$z_f = \frac{D^2}{4\lambda_{ac}} \quad (1.2.3)$$

όπου D η διάμετρος της (θεωρητικά κυκλικής) πηγής και λ_{ac} είναι το ακουστικό μήκος κύματος.

Η στιγμιαία θέρμανση ενός απορροφώντος στόχου με έναν απείρως σύντομο (δέλτα) παλμό λέιζερ οδηγεί σε μια θερμοελαστική πίεση $p(r)$ που είναι ανάλογη προς την απορροφημένη ενεργειακή πυκνότητα E :

$$p(r) = \Gamma E(r) = \Gamma \mu_a \Psi(r) \quad (1.2.4)$$

όπου $p(r)$ είναι η πίεση σε κάποιο σημείο του στόχου μ_a είναι ο συντελεστής απορρόφησης και $\Psi(r)$ είναι η ροή laser και Γ είναι ο συντελεστής Gruneisen που δίνεται από την

$$\Gamma = \frac{\beta}{\rho \kappa_T C_V} \quad (1.2.5)$$

όπου β είναι συντελεστής θερμικής διαστολής, ρ είναι η πυκνότητα, κ_T η ισόθερμη συμπιεστότητα και C_V η ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο. Η τιμή του Γ στο νερό σε θερμοκρασία δωματίου είναι 0.11.

Για ένα υλικό που απορροφά χωρίς σκέδαση, αν υποθέσουμε ότι υπάρχει κυλινδρική συμμετρία, το Γ μπορεί να εκφραστεί από την ακτινοβολία H_0 και το συντελεστή απορρόφησης, χρησιμοποιώντας το νόμο του Beer:

$$\Psi(r, z) = H_0 \exp(-\mu_a z) f(r) \quad (1.2.6)$$

όπου το $f(r)$ είναι το ακτινικό προφίλ των ακτίνων laser. Για τους υπολογισμούς μας, υποθέσαμε μια επίπεδης κορυφής γεωμετρία με

$$f(r) = 1 \quad r \leq a \quad (1.2.7)$$

$$f(r) = \exp\left(-\left(\frac{r-a}{d}\right)^2\right) \quad r > a \quad (1.2.8)$$

όπου το a είναι η ακτίνα του επιπέδου και d είναι το εύρος της πλευρικής Gaussian κατανομής. Η αρχική κατανομή πίεσης που δίνεται από την 1.2.4 είναι η πηγή των κυμάτων πίεσης. Μια λύση για την εξίσωση

ακουστικών κυμάτων για αυτήν την περίπτωση μπορεί να βρεθεί μέσω του τύπου Poisson

$$\varphi(r,t) = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(t \int \varphi_0|_{ct} ds \right) + t \int \frac{\partial \varphi_0}{\partial t} |_{ct} ds \right] \quad (1.2.9)$$

όπου το φ είναι η δυναμικό ταχύτητας [$\varphi(r,t)$ είναι η τιμή του στο σημείο παρατήρησης r , φ_0 είναι η κατανομή σε χρόνο μηδέν] και ds το στοιχείο επιφάνειας σε μια μοναδιαία σφαίρα. Το ct δείχνει ότι η ολοκλήρωση πρέπει να εκτελεσθεί στην επιφάνεια μιας σφαίρας με ακτίνα ct γύρω από το σημείο r . Η σχέση μεταξύ της πίεσης και του δυναμικού ταχύτητας δίνεται από την

$$p = -\frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1.2.10)$$

Για στιγμιαία θέρμανση, η αρχική ταχύτητα είναι μηδέν και το πρώτο ολοκλήρωμα στην εξίσωση μπορεί να παραλειφθεί, δίνοντας με την 1.2.10

$$p_\delta(r,t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{4\pi} \int p_0|_{ct} ds \right] \quad (1.2.11)$$

τη πίεση στο σημείο r για ακτινοβολία με έναν του δέλτα παλμό. Με αυτόν τον τρόπο, το p_0 είναι η αρχική κατανομή της θερμοελαστικής πίεσης. Η λύση για μια πεπερασμένη διάρκεια παλμού είναι η συνέλιξη του p_δ με το χρονικό προφίλ του παλμού λείζερ. Για έναν παλμό Gaussian κατανομής, διάρκειας $1/e$ του t_p , αυτό δίνει

$$p(r,t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\left(2t'/t_p \right)^2 \right] p_\delta(r,t-t') dt'}{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\left(2t'/t_p \right)^2 \right] dt'} \quad (1.2.12)$$

Εάν το p_0 παράγεται σε έναν όγκο δίπλα σε ένα υλικό με μια διαφορετική ακουστική σύνθετη αντίσταση υποθέτοντας μια κατανομή $p_0(r,z)$ στο $z < 0$

$$p'_0(r, z) = R_{ac} p_0(r, -z) \quad (1.2.13)$$

όπου R_{ac} είναι η ακουστική ανακλαστικότητα του ορίου, ανάλογα με τις τιμές των ρ και c των δύο μέσων και τη γωνία πρόσπτωσης θ

$$R_{ac} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta - \rho_1 \sqrt{c_1^2 - c_2^2 \sin^2 \theta}}{\rho_2 c_2 \cos \theta + \rho_1 \sqrt{c_1^2 - c_2^2 \sin^2 \theta}} \quad (1.2.14)$$

Ο δείκτης 1 αντιστοιχεί στο υλικό που απορροφά και ο δείκτης 2 στο παρακείμενο μέσο. Για να υπολογιστεί το $p(r,t)$ για τις δεδομένες παραμέτρους συντελεστή απορρόφησης και laser, η αρχική κατανομή της πίεσης προέρχεται από τις 1.2.4, 1.2.6, και 1.2.13 και τα ολοκληρώματα σε 1.2.11 και 1.2.12 μπορούν να υπολογιστούν αριθμητικά.

Αυτή η μέθοδος, δηλ. η θερμοελαστική διαδικασία, επικρατεί στη διέγερση του ήχου μέσα σε ένα υλικό για εντάσεις laser κάτω από το όριο εξάτμισης. Η αποδοτικότητα μετατροπής είναι μικρότερη από 10^{-4} για τα υγρά αλλά αυτή η διαδικασία έχει βρει πολλές εφαρμογές κυρίως στη φωτοακουστική φασματοσκοπία.

Μεταβολές θερμοκρασίας μπορούν επίσης να προκληθούν από τις ακαθαρσίες, από το σχηματισμό μικροφυσαλίδων, από τη διάσπαση των μορίων του νερού καθώς επίσης και από τις παροδικές διαδικασίες θέρμανσης που βασίζονται στη δομική θεωρία χαλάρωσης Hall.

Η ακουστική ισχύς [1] είναι ανάλογη της ισχύος του παλμού laser. Η ισχύς μειώνεται αναλογικά με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης από το σημείο εστίασης της δέσμης όπως επίσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του βάθους εστίασης της δέσμης μέσα στο υγρό.

1.2.2.2 Εναλλακτική τεχνική για την οπτική παραγωγή του υπερήχου

Δεδομένου ότι για υψηλές εντάσεις laser η διαδικασία αποδόμησης που επικρατεί είναι αρκετά καταστρεπτική ενώ ακόμη και η θερμοελαστική διαδικασία που απαιτεί χαμηλότερες εντάσεις μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στο δείγμα, σε πολλές περιπτώσεις μια χαμηλής ισχύος εναλλακτική λύση για την οπτική παραγωγή του υπερήχου απαιτείται. Για τον σκοπό αυτό laser συνεχούς εκπομπής (CW) με διαμόρφωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υπέρηχων. Εντούτοις, το εύρος των κυμάτων είναι πολύ μικρό και επομένως, ο θερμικός θόρυβος, μέσα στους οπτικούς ανιχνευτές, υπερτερεί του λαμβανόμενου σήματος.

Δεδομένου ότι ο θερμικός θόρυβος είναι συνολικά τυχαίος, μπορούμε να διαχωρίσουμε το κύμα υπερήχου από το θόρυβο με τη διαμόρφωση της οπτικής ακτίνας. Το οπτικό εύρος ζώνης του υπερήχου παραγόμενου με αυτό τον τρόπο δεν είναι, εντούτοις, τόσο μεγάλο όσο αυτό που παράγεται από το υψηλής ισχύος παλμικό laser.

1.2.2.3 Πλεονεκτήματα και πλεονεκτήματα των οπτικά παραγόμενων

Υπερήχων

Τα προβλήματα των transducers που αναφέρθηκαν παραπάνω λύνονται με τους οπτικά παραγόμενους υπερήχους, όντας μια εξ' αποστάσεως τεχνική. Επιπλέον, ο οπτικά παραγόμενος υπέρηχος έχει τα εξής **πλεονεκτήματα** [9,10]:

- Παρέχει ευρυζωνικό υπέρηχο (εκατοντάδες MHz).
- Η συγκέντρωση της ακτίνας παρέχει μεγαλύτερη χωρική ευκρίνεια (spatial resolution) και επιτρέπει την παραγωγή του υπερήχου σε μικρά δείγματα (χρήσιμα για την ακουστική μικροσκοπία).
- Αν συνδυαστεί η οπτική παραγωγή υπέρηχων με μια εξ' αποστάσεως οπτική τεχνική ανίχνευσης παρέχει ένα απολύτως απομακρυσμένο (remote) διαγνωστικό σύστημα το οποίο μπορεί να λειτουργήσει σε διαβρωτικά, υψηλών θερμοκρασιών και ραδιενεργά περιβάλλοντα.
- Επίπεδη φασματική απόκριση. Λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχει η ανάγκη για συντονισμό των υλικών που μετέχουν στη σύζευξη η

φασματική απόκριση των υλικών στην παραγωγή των υπερήχων είναι ομοιόμορφη σε όλο το φάσμα των παραγόμενων υπερήχων.

- Παράγει ταυτόχρονα μαζικά (bulk) και επιφανειακά (surface) κύματα. Μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει όγκο, επιφανειακές και κάτω από την επιφάνεια ατέλειες.
- Οι οπτικές ακτίνες μπορούν να φθάσουν στις περιοχές που είναι δύσκολη η πρόσβαση.
- Προσφέρουν καλή ηλεκτρομαγνητική ανοχή.
- Μεγάλη ταχύτητα ανίχνευσης
- Μπορεί να λειτουργήσει σε γεωμετρικά ακανόνιστα δείγματα. Οι transducers δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε αυτά γιατί πρέπει αναγκαστικά να βρίσκονται σε πλήρη επαφή με το υπό εξέταση αντικείμενο.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημειακή πηγή υπερήχου (και χρονικά και χωρικά).
- Αναπαραγώγιμη πηγή
- Διαμόρφωση των υπερηχητικών κυματομορφών επιφάνειας (με τον έλεγχο της χωρικής κατανομής της πηγής)

Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν

1. Ευαισθησία (οι οπτικές τεχνικές έχουν γενικά χαμηλότερη ευαισθησία από άλλες μεθόδους)
2. Σχετικά ακριβή μέθοδος προς το παρόν
3. Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από τα οπτικά χαρακτηριστικά του υλικού
4. Απαιτεί τις προφυλάξεις ασφάλειας Laser

1.2.2.4 Εφαρμογές των οπτικά διεγερμένων ακουστικών κυμάτων

Η διέγερση ακουστικών κυμάτων στα στερεά [4,5,8] έχει ήδη βρει εφαρμογή στη βιομηχανία σε γραμμές παραγωγής όπου η προσέγγιση με τους κλασικούς transducers είναι δύσκολη. Τέτοιες εφαρμογές αφορούν κυρίως την ανίχνευση δομικών ατελειών σε μέταλλα και συνθετικά πάνω στη γραμμή

παραγωγής τους. Αντιθέτως στα υγρά μόλις τώρα έχουν ξεκινήσει οι πρώτες βιομηχανικές εφαρμογές τους. Επίσης τον τελευταίο καιρό έχει αρχίσει η μελέτη της εφαρμογής των οπτοακουστικών φαινομένων στους βιολογικούς ιστούς [11] όπου αναμένεται να υπάρξουν θεαματικά αποτελέσματα λόγω μεγαλύτερου βάθους διείσδυσης και της δυνατότητας στενότερων χρονικά παλμών. Επίσης λόγω της σχεδόν σημειακής πηγής δίνεται η δυνατότητα της υψηλής χωρικής ευκρίνειας (resolution).

Μια βιομηχανική εφαρμογή των οπτικά διεγερμένων ακουστικών κυμάτων περιγράφεται από τους S.S. Freeborn et al. [6] Στη δημοσίευση τους περιγράφεται η ανάπτυξη ενός παλμικού φωτοακουστικού οργάνου για την ανίχνευση των συγκεντρώσεων αργού πετρελαίου στο νερό. Το όργανο χρησιμοποιεί μια οπτική ίνα για την μετάδοση ενός παλμικού διοδικού laser σε ένα αισθητήρα μέσα στη γραμμή ροής, και ένας πιεζοηλεκτρικός transducer για την ακουστική ανίχνευση. Η δυνατότητα ανίχνευσης συγκέντρωσης ακατέργαστου πετρελαίου μεταβάλλεται σε μια κλίμακα 5-8000 ppm στο νερό. Η ευαισθησία της απόκρισης είναι ανεξάρτητη από τα διάφορα κατάλοιπα, ρυθμούς ροής και μέγεθος σταγονιδίων.

Αναφορές

1. Laser-induced acoustic waves in water, Aijaz Karim-f and PA Matthews, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 7, 1974
2. Laser generation of acoustic waves in liquids and gases, Markus W. Sigirst, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 60, 1986
3. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter, C.K.N Patel and A.C. Tam, Reviews of modern physics Vol 53(3) July 1981.
4. Laser-ultrasound detection systems: a comparative study with Rayleigh waves, A.S. Murfin, R.A. Soden, D. Hatrick and R. J. Dewhurst, Meas Sci. Technol vol11, 1208-1219, 2000.
5. Applications of photoacoustic sensing techniques, A.C. Tam, Reviews of modern physics, Vol 58(2), April 1986.
6. A pulsed photoacoustic instrument for the detection of crude oil concentrations in produced water, S. S. Freeborna, J. Hannigan, F. Greig, R.

A. Suttie, H. A. MacKenzie, Rev. Sci. Instrum., Vol. 69, No. 11, November 1998

7. Pulsed laser induced ablation of absorbing liquids and acoustic transient generation, D.Kim, M.Ye, C.P. Grigoropoulos, Applied Physics A 67, 169-181 1998.

8. Noncontact acoustical techniques for non-destructive techniques characterization of materials and structures, R. E. Green, Jr., International Applied Mechanics, Vol. 38, No. 3, 2002.

9. Laser-Based Ultrasonics: Applications at APL, *David W. Blodgett and Kevin C. Baldwin*, Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 26, N1, 2005.

10. Optical generation and detection of ultrasound, B. Sozaru, G. Thursby, B. Gulshaw, F. Dong, S.G. Pierce, Y. Yang and D. Betz, Strain, v39, 111-114, 2003.

11. Theoretical and experimental studies of ultrasound-modulated optical tomography in biological tissue, Gang Yao and Lihong V. Wang Applied optics 1 February 2000 Vol. 39, No. 4

12. <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics>

1.3 Οπτική ανίχνευση του υπερήχου

1.3.1 Εισαγωγή

Συνδυάζοντας τα μεγάλα πλεονεκτήματα της οπτικής παραγωγής του υπερήχου με τα οπτικά συστήματα ανίχνευσης μπορούμε να πάρουμε ένα πλήρες και ισχυρό οπτικό εργαλείο μελέτης των υλικών. Τρεις μεθόδους για την οπτική ανίχνευση του υπερήχου έχουν ερευνηθεί:

- Φράγμα περίθλασης Bragg σε οπτική ίνα (εξ' επαφής και από σημείο σε σημείο τεχνική ανίχνευσης).
- Τεχνική ολοκλήρωσης κυματομορφής (εξ' επαφής και πολυσημειακή τεχνική ανίχνευσης).
- Συμβολόμετρο Michelson (εξ αποστάσεως και από σημείο σε σημείο τεχνική ανίχνευσης).

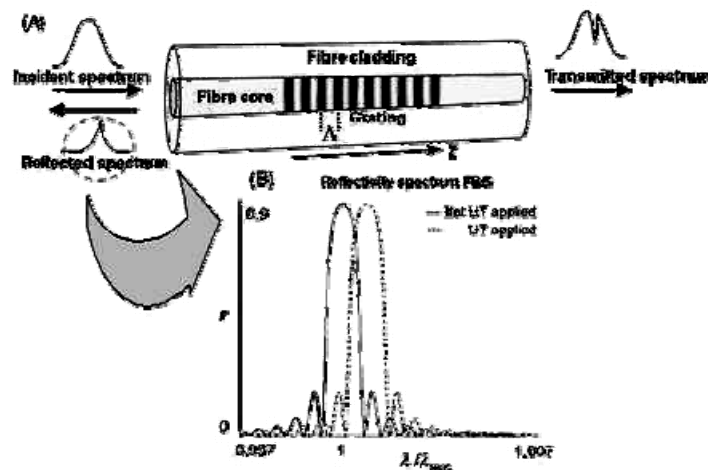
1.3.2 Φράγμα περίθλασης Bragg σε οπτική ίνα (Fibre Bragg grating)

Τα Fibre Bragg gratings (FBG) είναι φράγματα περίθλασης (gratings) που γράφονται στον πυρήνα των οπτικών ινών με παραγωγή περιοδικών μεταβολών στο δείκτη διάθλασης. Μπορούν να συνδεθούν ή να ενσωματωθούν στο δείγμα που ανιχνεύεται για να διαμορφώσουν ένα σύστημα ανίχνευσης εξ επαφής.

Γενικότερα ένα φράγμα περίθλασης είναι ένα οπτικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερες σχισμές. Ανάλογα με το εύρος των σχισμών κάποια μήκη κύματος διαδίδονται και στη συνέχεια συμβάλουν (το φαινόμενο θα εξηγηθεί στο επόμενο κεφάλαιο) και κάποια ανακλώνται. Στις οπτικές ίνες τα φράγματα περίθλασης σχηματίζονται προκαλώντας τοπική μεταβολή στον δείκτη διάθλασης του πυρήνα τους με την χρήση δύο δεσμών laser που προσπίπτουν στην ίνα υπό γωνία μεταξύ τους. Η ανίχνευση του υπερήχου είναι βασισμένη στην μεταβολή ανακλώμενου φάσματος από το Bragg grating αφού τα υπερηχητικά κύματα αλλάζουν τις ιδιότητες του grating όπως η περιοδικότητα του και ο δείκτης διάθλασης του.

Οι αλλαγές αυτές είναι ανάλογες της πίεσης του κύματος και διαμορφώνονται με την ίδια συχνότητα με αυτή του κύματος. Τα FBG

χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μέτρηση πιέσεων κατά μήκος του άξονά της ίνας και δεδομένου ότι οι ίνες είναι γενικά τόσο μικρές σε σύγκριση με το μήκος κύματος του υπερήχου, θεωρούνται ότι είναι αισθητήρες ανίχνευσης από σημείο σε σημείο. Δεδομένου ότι FBGs χαρακτηρίζονται από χαμηλές απώλειες είναι κατάλληλα για τη χρήση πολλών αισθητήρων στη σειρά όπου πολυπλεξία μήκους κύματος και χρονική μπορεί να εφαρμοστεί.



Σχήμα 1.4 Αναπαράσταση των Bragg grating [2]

1.3.3 Συμβολόμετρο Michelson

Το συμβολόμετρο Michelson αποτελεί έναν από σημείο σε σημείο αισθητήρα ανίχνευσης. Ο υπέρηχος προκαλεί μετατοπίσεις στην οπτική πορεία του φωτός στον ένα βραχίονα του συμβολόμετρου. Το συμβολόμετρο αποδιαμορφώνει αυτήν την μετατόπιση φάσης σε μια ορατή αλλαγή στην οπτική ένταση όταν συμβάλει το φως από τον αισθητήρα με αυτό του βραχίονα αναφοράς, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει μερικά επιπλέον οπτικά (π.χ. ελεγκτής πόλωσης, μεταβλητός εξασθενητής και ελεγκτής φάσης) προκειμένου να βελτιωθεί η ευαισθησία του συστήματος. Το φαινόμενο της συμβολής και το συμβολόμετρο Michelson θα περιγραφούν καλύτερα στο επόμενο κεφάλαιο.

1.3.4 Συμβολόμετρο ολοκλήρωσης κυματομορφής

Αυτός ο τύπος συμβολομετρικού συστήματος μετρά την αλλαγή στη φάση του φωτός που διαδίδεται μέσω μιας οπτικής ίνας που συνδέεται με

δείγμα. Η πίεση του ακουστικού κύματος που ενεργεί στην ίνα παράγει την διαμόρφωση φάσης με την αλλαγή του δείκτη διάθλασης της ίνας. Η τεχνική ονομάζεται τεχνική ολοκλήρωσης επειδή το φως στην ενσωματωμένη ή συνδεδεμένη οπτική ίνα διαμορφώνεται από ένα τμήμα της υπερηχητικής κυματομορφής και όχι μόνο ένα σημείο της. Αυτό σημαίνει ότι με τη χρήση μόνο ενός transducer και με μια ακουστική πηγή μια μεγάλη περιοχή μπορεί να καλυφθεί, ενώ οι άλλοι αισθητήρες που περιγράφονται δίνουν σήματα από σημείο σε σημείο.

1.3.5 Σύγκριση μεταξύ των τριών τεχνικών ανίχνευσης

Οι τεχνικές ολοκλήρωσης καθώς επίσης και τα FBG έχουν μερικούς περιορισμούς στο χρονικό εύρος ζώνης (bandwidth) λόγω περιορισμών συντονισμού στην ίνα, οι οποίοι θα περιορίσουν την ευαισθησία της (πέρα από μερικές δεκάδες MHz). Από την άλλη μεριά μια σειρά transducers (πηγές και δέκτες) θα απαιτούνταν για να αναλύσουν την ίδια περιοχή που μπορεί να καλυφθεί μόνο από έναν αισθητήρα και μια πηγή. Αλλά το κύριο πρόβλημα με την ολοκλήρωση είναι η πολυπλοκότητα της ανάλυσης κυματομορφής, αφού πρέπει να ληφθούν υπόψη το ακουστικό μήκος κύματος μαζί με την απόσταση και τη γωνία της πηγής σε σχέση με τον αισθητήρα.

Αν και η επιλογή της τεχνικής μπορεί να εξαρτηθεί από την συγκεκριμένη εφαρμογή, εάν θέλουμε ένα απολύτως εξ' αποστάσεως σύστημα για την παραγωγή και την ανίχνευση του υπερήχου το συμβολόμετρο είναι το μοναδικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

1.3.6 Εφαρμογές της οπτικής ανίχνευσης σε υγρά.

Ελάχιστες εφαρμογές οπτικής ανίχνευσης υπερήχου σε υγρά έχουν αναφερθεί. Σε αυτά χρησιμοποιούνται τα FBG για την ανίχνευση υπερήχων. Μια τέτοια εφαρμογή αναφέρεται στη δημοσίευση [4]

Αναφορές

1. Applications of photoacoustic sensing techniques, Andrew C. Tam, Rev. Mod. Phys. 58, 381 - 431 (1986)

2. Optical generation and detection of ultrasound, B. Sozaru, G. Thursby, B. Gulshaw, F. Dong, S.G. Pierce, Y. Yang and D. Betz, Strain v39, 111-114, 2003.
3. A new Bragg reflection detection instrument for ultrasonic measurement based on self-mixing effects for laser diode, Atsushi Yaraia and Takuji Nakanishi, Review of scientific instruments, volume 72, n3, March 2001.
4. Underwater Acoustic Sensor with Fiber Bragg Grating, Nobuaki TAKAHASHI, Akihiro HIROSE and Sumio TAKAHASHI, Optical review, Vol. 4, No. 6 691-694, 1997.

1.4 Οπτική Συμβολομετρία

1.4.1 Εισαγωγή

Η συμβολή προκύπτει από την υπέρθεση δύο ή περισσότερων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η συμβολή προκύπτει από την αλληλεπίδραση φωτός με φως ενώ άλλα οπτικά φαινόμενα προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του φωτός με το περιβάλλον του. Τέτοια φαινόμενα είναι η διάθλαση φαινόμενο κατά το οποίο το φως αλλάζει διεύθυνση καθώς περνά από ένα υλικό σε άλλο, η διάχυση όπου το φως ανακλάται από ένα αντικείμενο προς όλες τις κατευθύνσεις και η περίθλαση που εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η συμβολομετρία χρησιμοποιείται ευρέως σε μετρήσεις φασματοσκοπίας και μετρολογίας.

1.4.2 Κύματα και μέτωπα κύματος

Το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει από ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που υπάρχει σε κάποιο σημείο περιγράφεται από το πλάτος του και τη φάση του.

$$E(x,y,z,t)=A(x,y,z,t)e^{i\varphi(x,y,z,t)} \quad (1.4.1)$$

ή

$$E(r,t)=A(r,t)e^{i\varphi(r,t)} \quad (1.4.2)$$

όπου το r είναι το διάνυσμα θέσης και το πλάτος A όπως και η φάση είναι συναρτήσεις των χωρικών και χρονικών συντεταγμένων.

Η παραπάνω έκφραση μπορεί να γραφεί και ως:

$$E(x,y,z,t)=A(x,y,z)e^{i[\omega t-\varphi(x,y,z)]} \quad (1.4.3)$$

όπου $\omega=2\pi\nu$ είναι γωνιακή συχνότητα (rad/s). Στην παραπάνω έκφραση η φάση έχει χωριστεί σε χωρικούς και χρονικούς όρους.

1.4.2.1 Επίπεδο κύμα

Η απλούστερη μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι το επίπεδο κύμα. Το επίπεδο κύμα παράγεται από σημειακή πηγή που βρίσκεται στο άπειρο και πρόκειται για μια παράλληλη δέσμη φωτός.

Το πλάτος ενός γραμμικά πολωμένου επίπεδου κύματος, δηλαδή ενός κύματος όπου το διάνυσμα της ηλεκτρικής έντασης E και το διάνυσμα διάδοσης του κύματος σχηματίζουν πάντα το ίδιο επίπεδο, δίνεται από:

$$E(x,y,z,t)=E(r,t)=Ae^{i[\omega t - kr]} \quad (1.4.4)$$

Όπου το k είναι ο κυματάριθμος. Ο κυματάριθμος είναι παράλληλος με το διεύθυνση διάδοσης του κύματος και το μέγεθος του δίνεται από την

$$k=2\pi/\lambda \quad (1.4.5)$$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος. Το μήκος κύματος σχετίζεται με την συχνότητα

$$\lambda = \frac{u}{\nu} = 2\pi \frac{u}{\omega} = \frac{c}{n\nu} = 2\pi \frac{c}{n\omega} \quad (1.4.6)$$

όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης και c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Το πλάτος A ενός επίπεδου κύματος είναι σταθερό σε όλο το χώρο.

1.4.2.2 Σφαιρικά κύματα

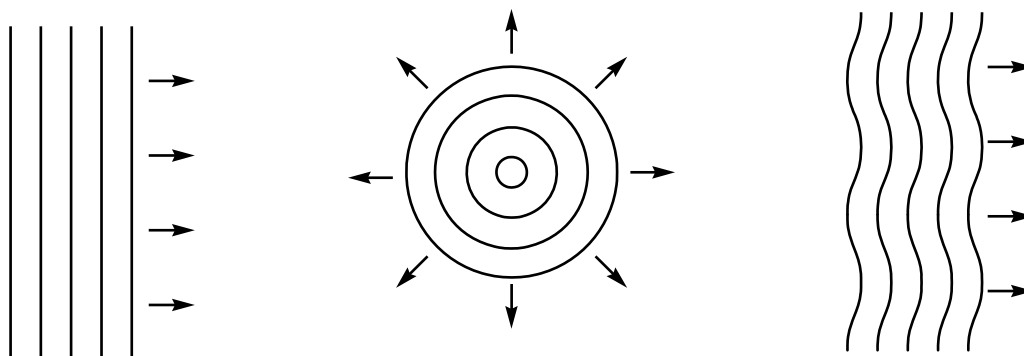
Η δεύτερη περίπτωση ενός ΗΜ κύματος είναι το σφαιρικό κύμα το οποίο εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή. Θεωρώντας ότι η πηγή βρίσκεται στην αρχή το πλάτος δίνεται από την:

$$E(r,t)= (A/r)e^{i[\omega t - kr]} \quad (1.4.7)$$

Όπου $r=(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$. Το πεδίο είναι σφαιρικά συμμετρικό και μεταβάλλεται σφαιρικά με το χρόνο και την ακτινική απόσταση. Η ακτινική

περίοδος είναι το μήκος κύματος. Το πλάτος μειώνεται με το $1/r$.

Σε μεγάλη απόσταση από τη σημειακή πηγή το σφαιρικό κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο.



ΣΧΗΜΑ 1.5 Παραδείγματα των κυματομορφών: (α) επίπεδο κύμα (β) σφαιρικό κύμα και (γ) παραμορφωμένο επίπεδο κύμα.

1.4.3 Μέτωπα κύματος

Τα μέτωπα κύματος εκφράζουν επιφάνειες του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σταθερής φάσης. Εφόσον χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν χωρικές μεταβολές σχεδιάζονται και υπολογίζονται σε συγκεκριμένους χρόνους. Τα μέτωπα κύματος για επίπεδα και σφαιρικά κύματα φαίνονται στην εικόνα 1. Το πεδίο είναι περιοδικό και μια δεδομένη φάση αντιστοιχεί στις πολλαπλές επιφάνειες. Το πλάτος A επίσης αντιστοιχεί σε μια επιφάνεια σταθερού μήκους οπτικής διαδρομής (optical path length, OPL) από την πηγή. Το OPL ορίζεται από την:

$$OPL = \int_S^P n(s) ds \quad (1.4.8)$$

όπου το ολοκλήρωμα ξεκινά από την πηγή S μέχρι το σημείο παρατήρησης P , και $n(s)$ είναι ο δείκτης διάθλασης κατά μήκος της διαδρομής.

Μεταβολές του δείκτη διάθλασης ή της διαδρομής μπορούν να οδηγήσουν σε ανωμαλίες ή παραμορφώσεις του μετώπου. Ένα παραμορφωμένο μέτωπο κύματος φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Σε κάθε

περίπτωση τα μέτωπα απέχουν ένα μήκος κύματος. Τοπικά η κάθετη στα μέτωπα αντιστοιχεί στη διεύθυνση διάδοσης του πεδίου. Αυτό το γεγονός αποτελεί και την αντιστοιχία μεταξύ της κυματικής και τη ακτινικής οπτικής.

1.4.4 Συμβολή

1.4.4.1 Η βασική εξίσωση

Το καθαρό σύνθετο πλάτος είναι το άθροισμα όλων των συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου

$$E(x, y, z, t) = \sum_i E_i(x, y, z, t) \quad (1.4.9)$$

όπου $i=1,2,\dots,n$ οι συνιστώσες του πεδίου. Η ένταση του πεδίου που προκύπτει είναι η μέση τιμή του τετραγώνου του

$$I(x, y, z, t) = \langle |E(x, y, z, t)|^2 \rangle \quad (1.4.10)$$

Αν περιοριστούμε σε δύο κύματα τότε η παραπάνω σχέση γίνεται

$$I(x, y, z, t) = \langle |E_1|^2 \rangle + \langle |E_2|^2 \rangle + \langle E_1 E_2^* \rangle + \langle E_1^* E_2 \rangle \quad (1.4.11)$$

Ή

$$I(x, y, z, t) = I_1 + I_2 + \langle E_1 E_2^* \rangle + \langle E_1^* E_2 \rangle \quad (1.4.12)$$

όπου I_1 και I_2 είναι οι εντάσεις των δύο δεσμών χωριστά.

Στην περίπτωση των γραμμικά πολωμένων μονοχρωματικών κυμάτων που περιγράφονται από την:

$$E_i(x, y, z, t) = A_i(x, y, z) e^{i[\omega t - \phi_i(x, y, z)]} \quad (1.4.13)$$

Τότε η ένταση του πεδίου δίνεται από την

$$I(x,y,z,t) = I_1 + I_2 + 2(A_1 A_2) \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - (\phi_1(x,y,z) - \phi_2(x,y,z))] \quad (1.4.14)$$

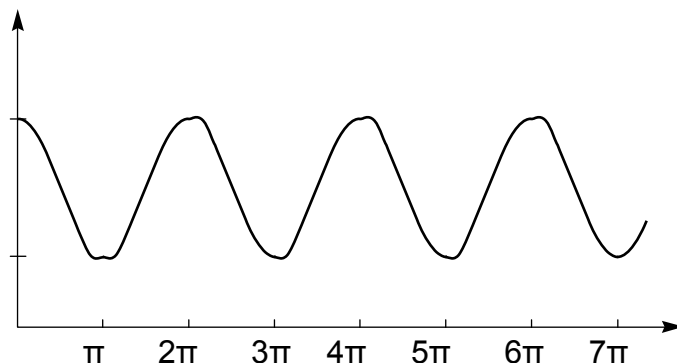
Τα φαινόμενα συμβολής περιέχονται στο τρίτο όρο και αν τα κύματα έχουν διαφορετικές συχνότητες τότε η συμβολή θα διαμορφώνεται από μια χρονικά μεταβαλλόμενη συχνότητα διακροτήματος.

1.4.4.2 Κροσσοί συμβολής

Στην περίπτωση που η συχνότητα των δύο συμβαλλόντων κυμάτων είναι ίδια τότε η έκφραση και την ένταση γίνεται:

$$I(x,y,z) = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos[\Delta\phi(x,y,z)] \quad (1.4.15)$$

όπου $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ είναι η διαφορά φάσης. Αυτή είναι η βασική εξίσωση που περιγράφει τη συμβολή. Η ένταση μεταβάλλεται συνημιτονικά συναρτήσει της διαφοράς φάσης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



ΣΧΗΜΑ 1.6 Η αλλαγή στην ένταση ως συνάρτηση της διαφοράς φάσης μεταξύ δύο συμβαλλόντων κυμάτων

Αυτές οι εναλλασσόμενες σκοτεινές και φωτεινές περιοχές ονομάζονται κροσσοί συμβολής. Κατά μήκος ενός κροσσού η διαφορά φάσης είναι σταθερή.

Η διαφορά φάσης συνδέεται με την διαφορά των οπτικών δρόμων μεταξύ της πηγής και του σημείου παρατήρησης. Η διαφορά οπτικού δρόμου (optical path difference, OPD) είναι:

$$OPD = OPL_1 - OPL_2 = (\lambda/2\pi)\Delta\phi \quad (1.4.16)$$

Και συνεπώς

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)OPD \quad (1.4.17)$$

Η διαφορά φάσης αλλάζει κατά 2π κάθε φορά που το OPD αυξάνει κατά 1 μήκος κύματος. Άρα το OPD είναι κατά συνέπεια σταθερό κατά μήκος ενός κροσσού.

Δημιουργική συμβολή συμβαίνει όταν τα δύο κύματα είναι σε συμφωνία φάσης και ένας φωτεινός κροσσός δημιουργείται, δηλαδή υπάρχει μέγιστη ένταση. Αυτό αντιστοιχεί σε μια διαφορά φάσης 2π και σε ένα OPD πολλαπλάσιο του μήκους κύματος. Ένας σκοτεινός κροσσός ή ελάχιστο έντασης αντιστοιχεί σε καταστροφική συμβολή και προκύπτει όταν δύο κύματα έχουν διαφορά φάσης π ή αλλιώς όταν το OPD είναι μονό πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος.

Καθώς μετακινούμαστε από ένα φωτεινό κροσσό σε ένα γειτονικό φωτεινό κροσσό η διαφορά φάσης αλλάζει κατά 2π . Κάθε περίοδος κροσσών αντιστοιχεί σε διάφορα οπτικού δρόμου ενός μήκος κύματος. Αυτή η ακρίβεια κάνει τη συμβολομετρία ένα πολύτιμο εργαλείο για την μετρολογία. Το μήκος κύματος του φωτός χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης και τα συμβολόμετρα μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να μπορούν να μετρούν πολύ μικρές αλλαγές του δείκτη διάθλασης ή του μήκους κύματος.

1.4.4.3 Ευκρίνεια Κροσσών

Συχνά η εξίσωση συμβολής γράφεται ως εξής

$$I(x,y) = I_0(x,y) \{1 + \gamma(x,y) \cos[\Delta\phi(x,y,z)]\} \quad (1.4.18)$$

ή

$$I(x,y) = I_0(x,y) \{1 + \gamma(x,y) \cos[2\pi OPD(x,y)/\lambda]\} \quad (1.4.19)$$

όπου $I_0 = I_1(x,y) + I_2(x,y)$ και

$$\gamma(x, y) = \frac{2[I_1(x, y)I_2(x, y)]^{\frac{1}{2}}}{I_1(x, y) + I_2(x, y)} \quad (1.4.20)$$

Το $I_0(x, y)$ αντιστοιχεί στη μέση ένταση και το $\gamma(x, y)$ ονομάζεται τοπική αντίθεση κροσσών (contrast) ή ευκρίνεια (visibility). Η ευκρίνεια επίσης υπολογίζεται και από την

$$\gamma(x, y) = \frac{I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)}{I_{\max}(x, y) + I_{\min}(x, y)} \quad (1.4.21)$$

όπου I_{\max} , I_{\min} είναι οι μέγιστες και οι ελάχιστες εντάσεις των κροσσών.

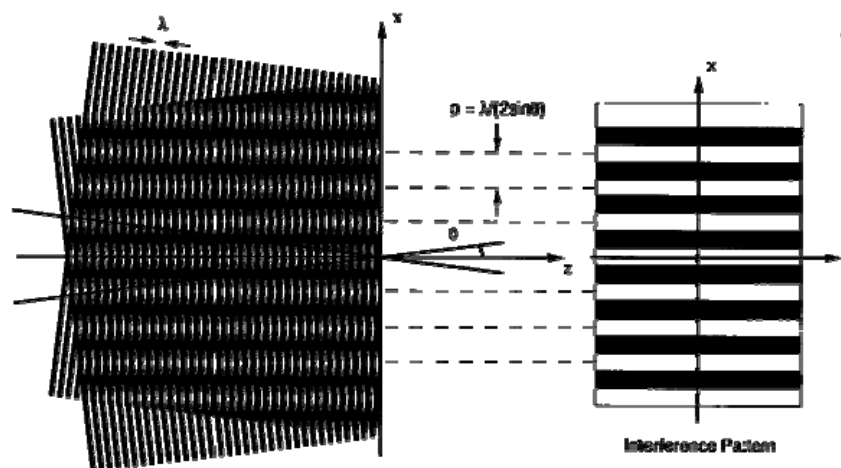
Η ευκρίνεια παίρνει μια τιμή μεταξύ 0 και 1. Το 1 πραγματοποιείται όταν τα δύο κύματα έχουν ίση ένταση και γίνεται 0 όταν τα κύματα έχουν μηδενική ένταση.

1.4.4.4 Συμβολή δύο επίπεδων κυμάτων

Η πρώτη περίπτωση συμβολής είναι η συμβολή δύο επίπεδων κυμάτων ίσης έντασης. Αυτά προσπίπτουν στο επίπεδο παρατήρησης με γωνίες θ_1 και θ_2 . Το επίπεδο παρατήρησης είναι το x-z όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το πλάτος του κάθε κύματος θα δίνεται από την

$$E_i(x, y, z, t) = Ae^{i(\omega t - kz \cos \theta_i - kx \sin \theta_i)} \quad (1.4.22)$$



ΣΧΗΜΑ 1.7 Η γεωμετρία για την συμβολή δύο επίπεδων κυμάτων. Τα δύο επίπεδα κύματα συμβάλουν υπό γωνία θ στο $z=0$ (αριστερά) και σχηματίζονται στο επίπεδο x-y ευθύγραμμοι κροσσοί συμβολής που απέχουν $p=\lambda/(2\sin\theta)$ (δεξιά) [1]

Αν θεωρήσουμε για ότι το επίπεδο παρατήρησης είναι στο $z=0$ τότε η διαφορά φάσης είναι

$$\Delta\phi(x,y)=kx(\sin\theta_1-\sin\theta_2)=(2\pi x/\lambda)(\sin\theta_1-\sin\theta_2) \quad (1.4.23)$$

Τότε η ένταση γράφεται ως

$$I(x,y)=I_0\{1+\cos[(2\pi x/\lambda)(\sin\theta_1-\sin\theta_2)]\} \quad (1.4.24)$$

όπου $I_0=2A^2$. Οι κροσσοί που δημιουργούνται είναι ευθύγραμμοι παράλληλοι στο άξονα y και ισαπέχουν μεταξύ τους. Η περίοδος των κροσσών εξαρτάται από τη γωνία που συμβάλλουν οι δύο δέσμες και δίνεται από την

$$p = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 - \sin\theta_2} \quad (1.4.25)$$

1.4.4.5 Συμβολή ενός επίπεδου κύματος και ενός σφαιρικού κύματος

Μια άλλη μορφή συμβολής είναι αυτή μεταξύ ενός επίπεδου κύματος και ενός σφαιρικού κύματος. Τα κύματα και σε αυτή την περίπτωση έχουν ίδια συχνότητα. Το επίπεδο παρατήρησης βρίσκεται στο $z=R$. Το πλάτος του σφαιρικού κύματος θα δίνεται από την

$$E(\rho,t) = (A/R)e^{i[\omega t - k(R^2 + \rho^2)^{1/2}]} \approx (A/R)e^{i[\omega t - k(R + \rho^2/2R)]} \quad (1.4.26)$$

όπου το $\rho=(x^2+y^2)^{1/2}$ και η τετραγωνική ρίζα έχουν αναπτυχθεί στην δεύτερη μορφή. Το ανάπτυγμα αυτό προσεγγίζει το σφαιρικό κύμα σαν ένα παραβολικό κύμα με την ίδια ακτίνα. Επίσης μια ακόμη υπόθεση είναι ότι Το πεδίο το πλάτος A/R είναι σταθερό σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος.

Η εξίσωση του επίπεδου κύματος δίνεται από την 1.4.22 αν θεωρήσουμε ότι το κύμα διαδίδεται κατά τον άξονα z και αν θέσουμε σε αυτή $z=R$ και $\theta=0$. Η διαφορά φάσης των δύο κυμάτων είναι

$$\Delta\phi(\rho) = \frac{\pi\rho^2}{\lambda R} \quad (1.4.27)$$

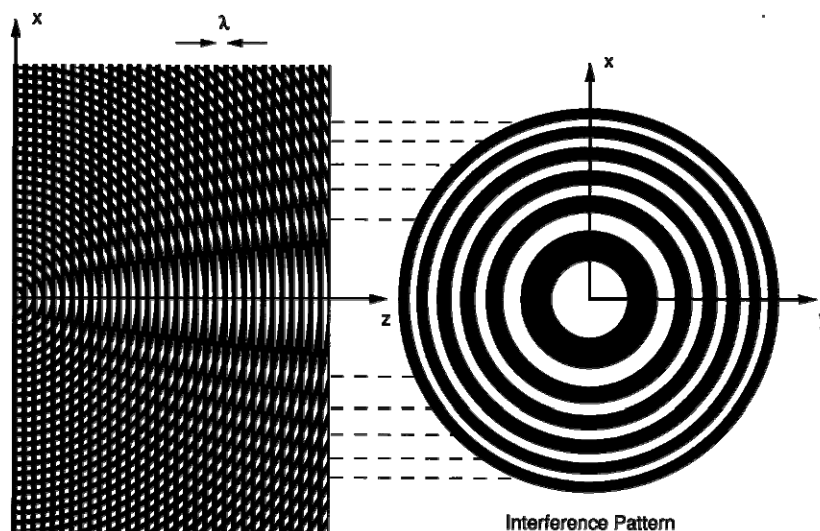
και τελικά η ένταση δίνεται από την

$$I(\rho) = I_0 \left[1 + \cos \frac{\pi \rho^2}{\lambda R} \right] \quad (1.4.28)$$

Η μορφή των κροσσών είναι ομόκεντροι κύκλοι και η ακτινική απόσταση αυξάνει με το ρ . Να σημειωθεί ότι η εντάσεις των δύο κυμάτων έχουν θεωρηθεί ίσες στο σημείο παρατήρησης.

Η ακτίνα του m φωτεινού κροσσού μπορεί να υπολογιστεί αν θέσουμε $\Delta\phi = 2\pi m$ και είναι

$$\rho_m = \sqrt{2m\lambda R} \quad (1.4.29)$$



ΣΧΗΜΑ 1.8 Η συμβολή ενός επίπεδου κύματος και ενός σφαιρικού κύματος. Το επίπεδο κύμα διαδίδεται κατά μήκος του z (αριστερά) και δημιουργούνται κυκλικοί κροσσοί στο επίπεδο x - y (δεξιά) [1]

1.4.4.6 Δύο σφαιρικά κύματα.

Στη περίπτωση των δύο σφαιρικών κυμάτων υπάρχουν δύο διαφορετικές γεωμετρίες που μπορούν εξεταστούν. Στην πρώτη το επίπεδο παρατήρησης τοποθετείται κάθετα σε μια γραμμή που ενώνει τις δύο πηγές ενώ στη δεύτερη το επίπεδο παρατήρησης είναι παράλληλο σε αυτό. Και σε αυτές τις περιπτώσεις η συχνότητα είναι κοινή.

Στην πρώτη περίπτωση αν θέσουμε $d = R_1 - R_2$ η απόσταση των δύο πηγών και επίσης ότι η ένταση είναι ίση για τα δύο κύματα τότε η διαφορά

φάσης είναι

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\pi\rho^2}{\lambda} \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{2\pi d}{\lambda} \approx \frac{2\pi d}{\lambda} - \left(\frac{\pi\rho^2}{\lambda} \right) \left(\frac{d}{R^2} \right) \quad (1.4.30)$$

όπου έχουμε θέσει $R_1 R_2 \approx R^2$. Υπάρχουν δύο όροι στην παραπάνω έκφραση. Ο δεύτερος όρος έχει την ίδια μορφή με το αποτέλεσμα που προκύπτει από την συμβολή σφαιρικού κα επίπεδου κύματος. Η μορφή των κροσσών θα είναι συμμετρική γύρω από την γραμμή που ενώνει τις δύο γραμμές. Ο πρώτος όρος είναι μια σταθερή διαφορά φάσης που σχετίζεται με την απόσταση των δύο κροσσών. Αν αυτός ο όρος δεν είναι ζυγό πολλαπλάσιο του π τότε ο κεντρικός κροσσός δεν φωτεινός. Η ένταση των κροσσών δίνεται και πάλι από την 1.4.28.

Στην περίπτωση που το επίπεδο παρατήρησης είναι παράλληλο στη γραμμή που ενώνει τις δύο πηγές μια μέθοδος ανάλυσης της μορφής των κροσσών είναι να συγκρίνουμε τα μέτωπα κύματος στο επίπεδο παρατήρησης. Τότε το OPD μετά από απλουστεύσεις δίνεται από την

$$OPD(x, y) = \frac{\pi d}{L} \quad (1.4.31)$$

όπου L είναι η απόσταση ανάμεσα στις πηγές και το επίπεδο παρατήρησης. Επίσης έχουμε

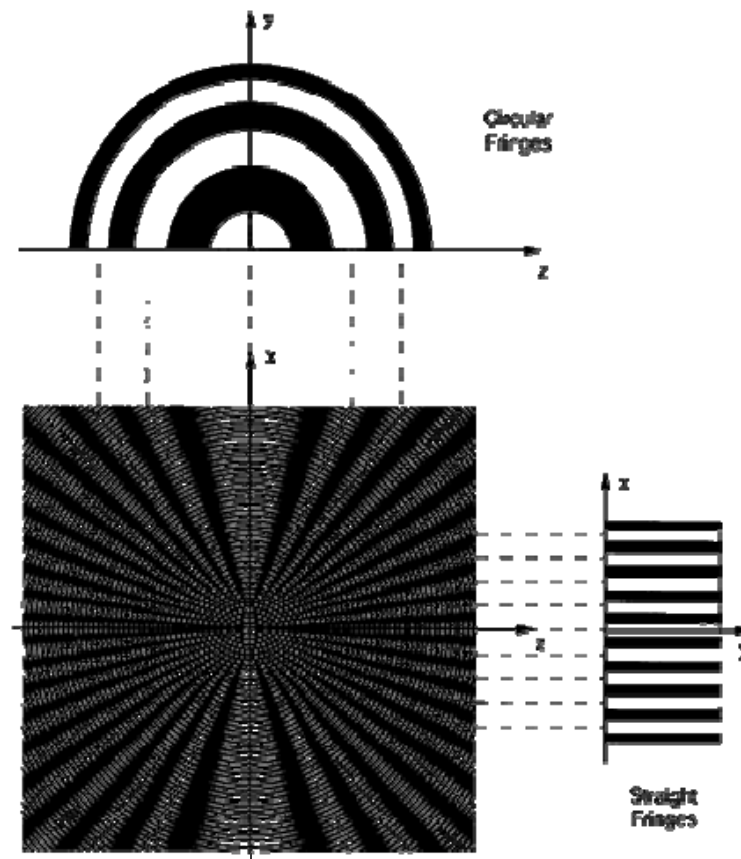
$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi x d}{\lambda L} \quad (1.4.32)$$

Ευθύγραμμοι ισαπέχοντες κύκλοι σχηματίζονται. Η περίοδος των κροσσών είναι $\lambda L/d$ και η μορφή τους είναι παρόμοια με αυτή που σχηματίζεται από δύο ευθύγραμμα κύματα.

1.4.4.7 Παραμορφωμένα μέτωπα κύματος

Όταν ένα παραμορφωμένο (aberrated) ή ανώμαλα διαμορφωμένο μέτωπο κύματος συμβάλει με ένα μέτωπο κύματος αναφοράς μια ανώμαλα διαμορφωμένη μορφή κροσσών σχηματίζεται. Και σε αυτή την περίπτωση

όμως η μελέτη των κροσσών μπορεί να γίνει όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Ένας δεδομένος κροσσός αντιστοιχεί σε σταθερό OPD ή αντίστοιχα διαφορά φάσης μεταξύ δύο κυμάτων. Οι γειτονικοί κροσσοί διαφέρουν κατά ένα μήκος κύματος και συνεπώς σε διαφορά φάσης 2π . Αν το κύμα αναφοράς είναι ένα επίπεδο κύμα τότε το σχήμα του ανώμαλα σχηματισμένου κύματος προκύπτει ενώ αν το κύμα αναφοράς είναι σφαιρικό ή άλλο ανώμαλα σχηματισμένο κύμα τότε το OPD ή η διαφορά φάσης αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ των δύο μετώπων.



ΣΧΗΜΑ 1.9 Η συμβολή δύο σφαιρικών κυμάτων. Οι δύο πηγές βρίσκονται πάνω άξονα x . Αν το επίπεδο παρατήρησης είναι κάθετο στο x (y - z) κυκλικοί κροσσοί σχηματίζονται (πάνω). Αν το επίπεδο παρατήρησης είναι παράλληλο με το x (x - y) ευθύγραμμοι κροσσοί σχηματίζονται (δεξιά). [1]

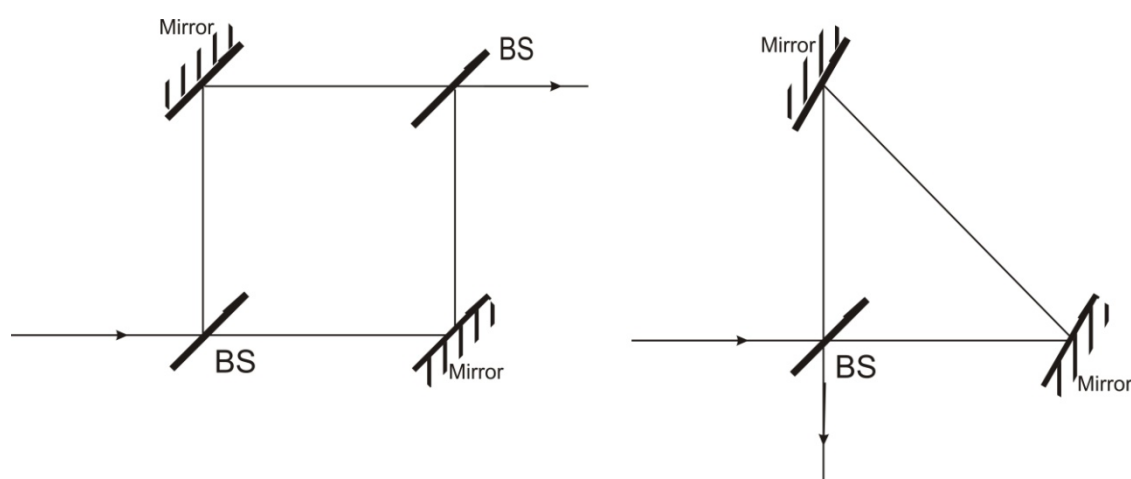
1.4.5 Συμβολόμετρα

Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για να προκύψουν δύο ακτίνες από μια κοινή πηγή. Στη διαίρεση του μετώπου κύματος, δύο ακτίνες απομονώνονται από χωριστά τμήματα της αρχικής κυματομορφής. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα Young και στο συμβολόμετρο Rayleigh.

Συχνότερα όμως, δύο ακτίνες προέρχονται από το ίδιο τμήμα (πλάτους) της αρχικής κυματομορφής χρησιμοποιώντας έναν διαιρέτη ακτίνων (beamsplitter) δηλαδή ένα διαφανές πλακίδιο ή κύβος που επιστρώνεται με ένα φιλμ μερικώς διαπερατό ή ένα φράγμα διάθλασης ή ένα πρίσμα πόλωσης.

1.4.5.1 Το συμβολόμετρο Mach–Zehnder

Όπως φαίνεται το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI) χρησιμοποιεί δύο beamsplitters για να διαιρέσουν και να επανασυνδυάσουν τις ακτίνες. Το MZI έχει το πλεονέκτημα ότι κάθε οπτική πορεία διαπερνιέται μόνο μια φορά. Το MZI έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να χαρτογραφήσει τις τοπικές παραλλαγές του δείκτη διάθλασης στις σήραγγες αέρα, τις φλόγες, και στη μελέτη πλάσματος.



ΣΧΗΜΑ 1.10 α) το συμβολόμετρο Mach-Zehnder και β) το συμβολόμετρο Sagnac

1.4.5.2 Το συμβολόμετρο Sagnac

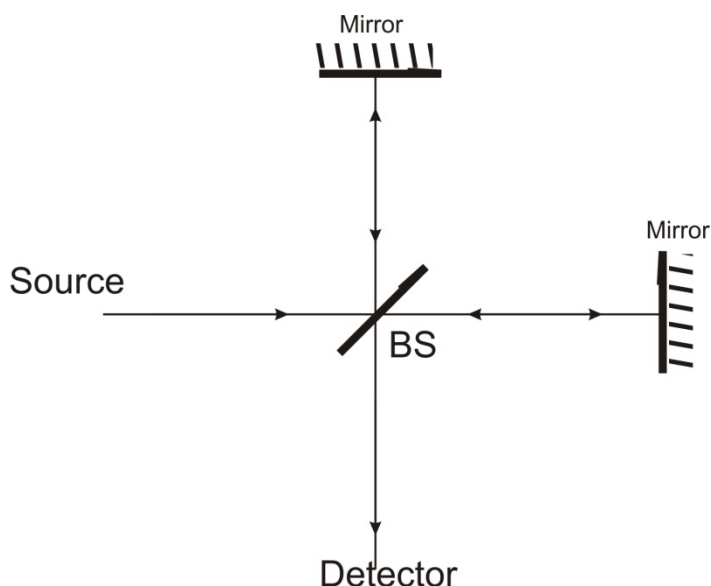
Με μια μορφή του συμβολόμετρου Sagnac οι δύο ακτίνες εκτελούν ακριβώς την ίδια πορεία προς αντίθετες κατευθύνσεις. Εντούτοις, για έναν μονό αριθμό ανακλάσεων, τα μέτωπα κύματος είναι ανεστραμμένα το ένα σε σχέση με το άλλο.

Δεδομένου ότι οι οπτικές πορείες από τις δύο ακτίνες είναι πάντα σχεδόν ίσες, κροσσοί μπορούν να ληφθούν εύκολα με μια εκτεταμένη πηγή

λευκού φωτός. Τροποποιημένες μορφές του συμβολόμετρου Sagnac χρησιμοποιούνται για την καταγραφή περιστροφής, δεδομένου ότι η περιστροφή του συμβολόμετρου γύρω από έναν άξονα με μια γωνιακή ταχύτητα που κάνει μια γωνία θ σε σχέση με την κάθετη στο επίπεδο εισάγει μια διαφορά δρόμου μεταξύ των δύο ακτίνων.

1.4.5.3 Το συμβολόμετρο Michelson

Στο συμβολόμετρο Michelson τα δύο μέτωπα παράγονται από ένα beamsplitter και ανακλώνται από δύο καθρέφτες. Η δέσμη που εκπέμπεται από την πηγή προσπίπτει στο beamsplitter και χωρίζεται σε δύο τμήματα που διαδίδονται κάθετα μεταξύ τους. Συνήθως τα δύο τμήματα είναι ίσης έντασης αλλά, ανάλογα και με την εφαρμογή και διαφορετικές αναλογίες μεταξύ των δύο τμημάτων είναι εφικτές. Το κάθε τμήμα προσπίπτει σε ένα καθρέπτη του οποίου το επίπεδο είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα κύματα ανακλώνται στην ίδια διεύθυνση και επιστρέφουν προς τον beamsplitter. Τα δύο κύματα διαχωρίζονται εκ νέου μέρος του καθενός επιστρέφει προς την πηγή ενώ το άλλο διαδίδεται προς τον ανιχνευτή. Τα δυο κύματα συμβάλλουν και κροσσοί συμβολής δημιουργούνται.



ΣΧΗΜΑ 1.11 Το συμβολόμετρο Michelson

Η διαφορά του οπτικού δρόμου (OPD) που ακολούθησαν τα δύο αρχικά

κύματα εξαρτάται είναι ανάλογη του διπλάσιου της διαφοράς της απόστασης των δύο καθρεπτών από τον beamsplitter. Για να υπάρχει συμβολή πρέπει το μήκος συμφωνίας την πηγής να είναι μεγαλύτερο από τον οπτικό δρόμο που διένυσα τα κύματα. Αυτό εξαρτάται από το είδος της πηγής. Όσο πιο στενό είναι το φάσμα που εκπέμπει η πηγή τόσο το μήκος συμφωνίας αυξάνει.

Όταν χρησιμοποιείται μια μονοχρωματική σημειακή πηγή, δύο είδωλα παράγονται και οι κροσσοί ομοιάζουν με αυτούς δυο σφαιρικών κυμάτων. Αν οι καθρέφτες είναι παράλληλοι κυκλικοί κροσσοί με κέντρο τον κάθετο στους δύο καθρέφτες άξονα θα σχηματιστούν. Αν οι καθρέφτες έχουν μια σχετική κλίση τότε οι πηγές φαίνονται να είναι μετατοπισμένες και οι κροσσοί έχουν σχήμα υπερβολής. Τέλος κατά μήκος του επιπέδου που τέμνει τις δύο πηγές ευθύγραμμοι ισαπέχοντες κροσσοί σχηματίζονται.

Αναφορές

1. Handbook of Optics Vol. 1, Fundamentals, techniques and design, second edition, Michael Bass.

2 Πειραματικό-Κατασκευαστικό Μέρος

2.1 Προκαταρτικές δοκιμές

2.1.1 Πειραματική διάταξη οπτικής ανίχνευσης ακουστικών κυμάτων

Οι πρώτες πειραματικές δοκιμές για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της οπτικής μεθόδου δημιουργίας και ανίχνευσης των ακουστικών κυμάτων έγιναν στα πλαίσια του προγράμματος του Φυτωρίου Ιδεών. Το πρόγραμμα αυτό έδωσε την ευκαιρία για την αγορά του βασικού οπτικού, οπτομηχανικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που δεν υπήρχε στο εργαστήριο και ήταν απαραίτητος για την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών.

Μια μικρή δεξαμενή κατασκευάστηκε για τους σκοπούς του πειράματος. Η δεξαμενή κατασκευάστηκε από πλεξιγκλάς προκειμένου να είναι οπτικά διαπερατή. Επιπλέον το πλεξιγκλάς έναντι του γυαλιού είναι ελαφρύτερο και μπορούν να γίνουν ευκολότερα μηχανουργικές εργασίες σ' αυτό. Η δεξαμενή είχε διαστάσεις 30X4X4 εκ. Η δεξαμενή ήταν ανοικτή στην πάνω πλευρά της. Μια μικρή οπή δημιουργήθηκε στη μια στενή πλευρά της που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία διαταραχών στο νερό της δεξαμενής με τη χρήση εξωτερικών συμβατικών πηγών ήχου.

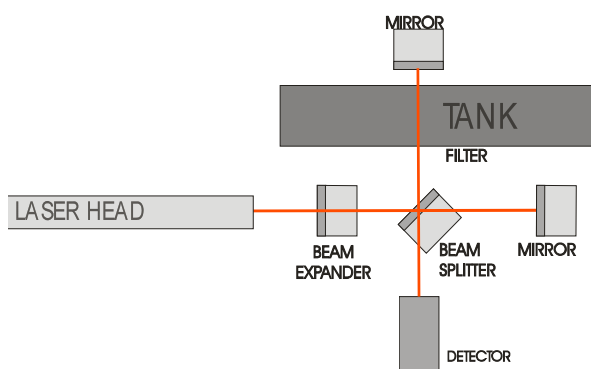
Μια γεννήτρια συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε για τη παραγωγή της επιθυμητής συχνότητας η οποία συνδέθηκε με ένα ηχείο μικρού μεγέθους για την παραγωγή των ακουστικών κυμάτων το οποίο διαμέσου της οπής μετέδιδε ακουστικές διαταραχές μέσα στη δεξαμενή. Τα κύματα πίεσης δεν ήταν δυνατό να ανιχνευτούν λόγω της χαμηλής παραγομένης ακουστικής ισχύος και έτσι αντικαταστάθηκε από ένα μεγαλύτερο. Επίσης ένας ενισχυτής χρησιμοποιήθηκε για να ενισχύσει το σήμα γεννητριών συχνοτήτων. Επιπλέον το εύρος ζώνης των παραγόμενων συχνοτήτων μπορούσε να είναι μεγαλύτερο με αυτό το ηχείο. Λόγω του μεγάλου μεγέθους του ηχείου έναντι των διαστάσεων δεξαμενών ήταν αδύνατο να τοποθετηθεί το ηχείο άμεσα στη δεξαμενή. Ένα ειδικό έμβολο κατασκευάστηκε το οποίο συνέδεε το ηχείο με μια μεμβράνη η οποία χρησιμοποιήθηκε, από τη μια πλευρά για να μην επιτρέπει την διαρροή του νερού από την οπή και από την άλλη για να μεταφέρει την εξωτερική διέγερση στο νερό.

Όταν ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται στο νερό μεταβάλλει τοπικά το δείκτη διάθλασης του. Κατά συνέπεια η διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε ένα υγρό μπορεί να ανιχνευθεί με την διάδοση μιας ακτίνας στο υγρό και τον έλεγχο των διακυμάνσεων της στην διάδοση της. Η καλύτερη μέθοδος για αυτό το είδος ανίχνευσης είναι

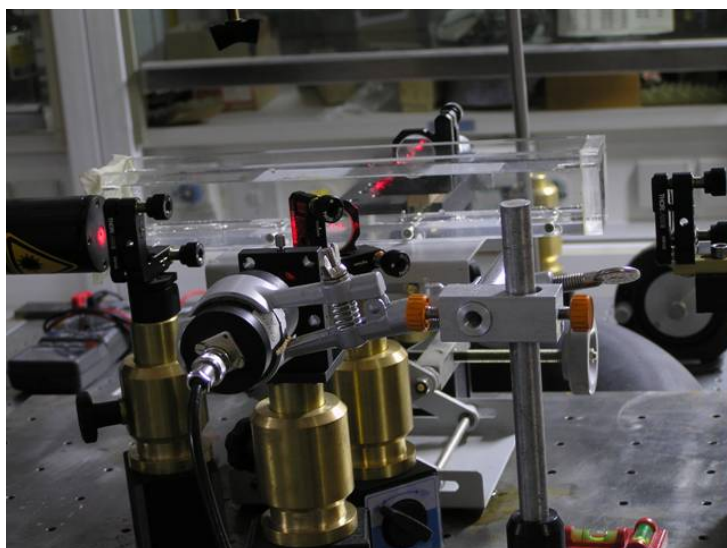
συμβολομετρία. Η συμβολομετρία παρέχει την εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία στις αλλαγές δεικτών διάθλασης και την απαιτούμενη υψηλή ανάλυση.

Επιλέχθηκε να γίνει χρήση ενός συμβολόμετρου Michelson το οποίο έχει το πλεονέκτημα ότι η ακτίνα λέιζερ περνά δύο φορές μέσω του υγρού, έτσι η δέσμη επηρεάζεται διπλά από την μεταβολή του δείκτη διάθλασης και κατά συνέπεια αναμενόταν ότι τα κύματα πίεσης θα ήταν ευκολότερα ανιχνεύσιμα. Η πηγή λέιζερ ήταν ένα He-Ne laser που εκπέμπει στα 633nm (κόκκινο). Όλα τα οπτικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το πείραμα παρείχαν τη βέλτιστη απόδοση τους σε αυτό το μήκος κύματος.

Η δεξαμενή και ολόκληρη οπτική διάταξη τοποθετήθηκαν σε ειδική διάτρητη μεταλλική πλάκα (breadboard) κατάλληλη για την σωστή στήριξη των οπτικών η οποία τοποθετήθηκε πάνω σε φουσκωμένες σαμπρέλες που παρέχουν πολύ καλή μόνωση σε δονήσεις. Το ηχείο δεν τοποθετήθηκε σε αυτό το breadboard προκειμένου να απομονωθεί το σύστημα ανίχνευσης από τη μηχανική δόνηση που προέρχεται από το ηχείο.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης



Για

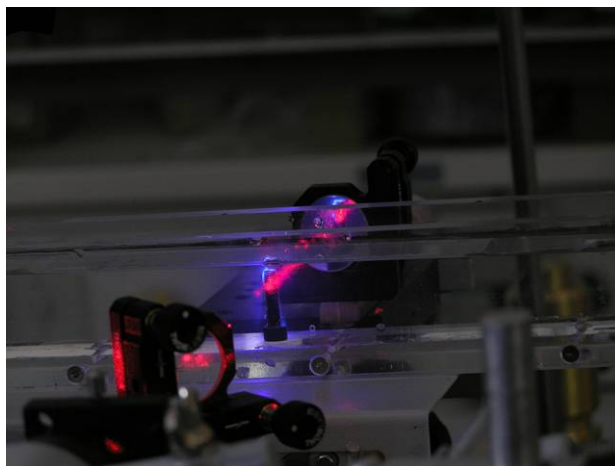
την

Εικόνα 2.2 Η πειραματική διάταξη

ανίχνευση του σήματος από το συμβολόμετρο μια φωτοδίοδος χρησιμοποιήθηκε. Η φωτοδίοδος συνδέθηκε με έναν παλμογράφο με τη δυνατότητα της καταγραφής στοιχείων. Τα στοιχεία μπορούσαν να μεταφερθούν σε ένα Η/Υ για την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Μετρήσεις έγιναν για διάφορες συχνότητες στο ακουστικό φάσμα των συχνοτήτων. Από 0-10.000 Hz οι μετρούμενες κυματομορφές βρέθηκαν σε πλήρη συμφωνία με τα σήματα που παρήχθησαν από τη γεννήτρια. Μετά τα 10 KHz η απόκριση του συμβολόμετρου έπεφτε κατακόρυφα και το ανιχνευόμενο σήμα ήταν μέσα στα όρια του θορύβου. Παρόλα αυτά επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι μια συμβολομετρική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ακουστικών κυμάτων.

Μετά τα πειράματα που επιβεβαίωσαν την σωστή λειτουργία της πειραματικής διάταξης, έγιναν πειράματα για την επιβεβαίωση και της παραγωγής κυμάτων με οπτικό τρόπο. Ένα παλμικό excimer laser XeCl 308nm (UV) χρησιμοποιήθηκε για αυτόν τον σκοπό. Όπως αναφέραμε στη θεωρία τα παλμικά laser μπορούν προκαλέσουν πιο ισχυρά ακουστικά κύματα. Η συχνότητα παραγωγής παλμών του laser μπορούσε να διαμορφωθεί από 1-10 Hz. Η ακτίνα laser εστιάστηκε στην ελεύθερη επιφάνεια ύδατος με τη χρήση ενός 25cm επιπεδό-κυρτού φακού.



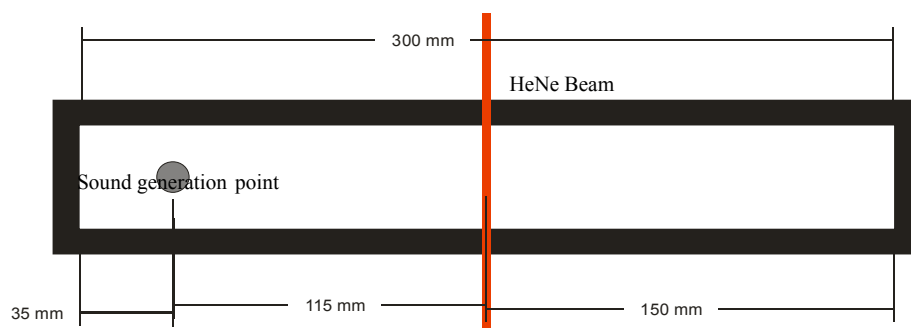
Εικόνα 2.3 Η χρήση του υπεριώδους παλμικού laser προκαλεί δευτερογενή ιώδη ακτινοβολία μετά την πρόσπτωση της στο μεταλλικό αντικείμενο

Τα ακουστικά κύματα που παρήχθησαν με αυτήν την μέθοδο είχαν πολύ χαμηλή ένταση και μπορούσαν δύσκολα να ανιχνευθούν από το συμβολόμετρο. Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερης έντασης ηχητικά κύματα ένα μικρό μεταλλικό κομμάτι τοποθετήθηκε στη δεξαμενή και η ακτίνα laser εστιάστηκε σε αυτό. Με τον τρόπο αυτό υψηλότερης έντασης ακουστικά κύματα παρήχθησαν. Για να

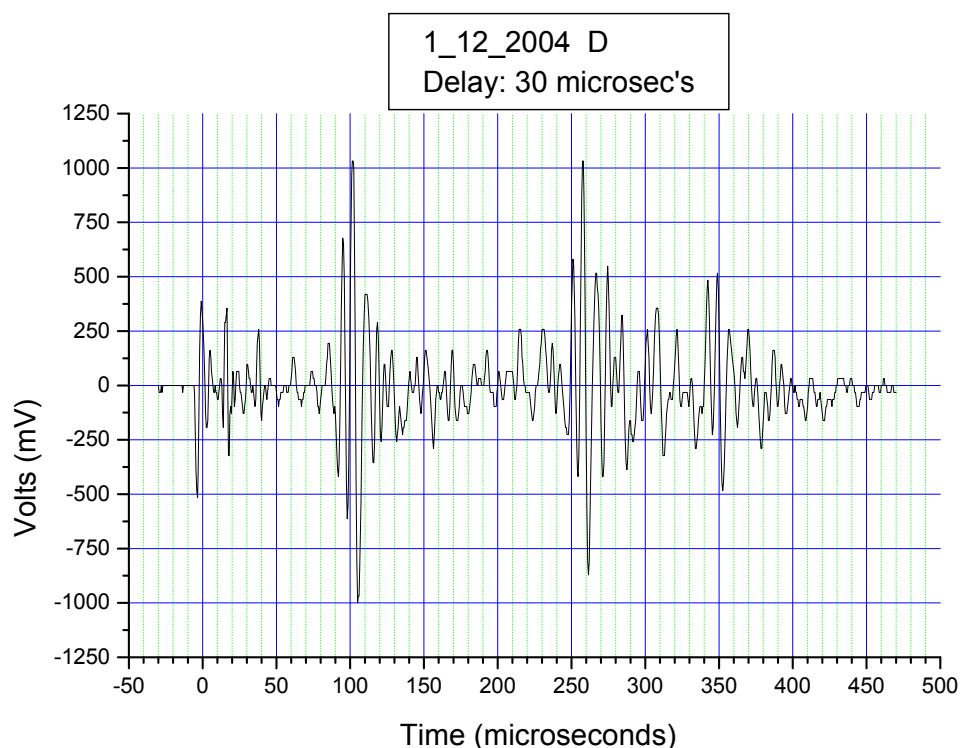
βελτιωθεί και η ανίχνευση του σήματος της φωτοδιόδου, ενισχύθηκε το σήμα της. Αν και ο διαθέσιμος ενισχυτής δεν ήταν ο καταλληλότερος για την συγκεκριμένη εφαρμογή εντούτοις υπήρξε βελτιωμένη απόδοση του συστήματος.

2.1.2 Αποτελέσματα

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η ακτίνα laser εστιάστηκε σε ένα μεταλλικό αντικείμενο τοποθετημένο κάτω από την επιφάνεια του νερού και 3,5cm μακριά από το ένα άκρο της δεξαμενής ενώ η ακτίνα HeNe πέρασε μέσω της δεξαμενής στο κέντρο της που είναι 15cm μακριά από κάθε πλευρά. Αυτό οδήγησε σε μια απόσταση μεταξύ της ακτίνας laser και του σημείου παραγωγής κυμάτων πίεσης 11,5cm. Αυτό φαίνεται στην ακόλουθη σχηματική αναπαράσταση



Εικόνα 2.4 Οι θέσεις του μεταλλικού αντικειμένου και της δέσμης στη δεξαμενή.



Εικόνα 2.5 Γραφική παράσταση των σημάτων που καταγράφονται από τη φωτοδίοδο

Όπως φαίνεται από την παραπάνω γραφική παράσταση η οποία προέκυψε από την καταγραφή των σημάτων της φωτοδιόδου μετά από την παραγωγή ακουστικών κυμάτων με παλμικό laser μια ταλάντωση εύρους 10μs διαδίδεται μέσα στο νερό. Τα 10μs αντιστοιχούν σε μια διαταραχή συχνότητας 100KHz. Αυτή είναι η κεντρική συχνότητα του διαδιδόμενου κύματος πίεσης. 3 κορυφές παράγονται μετά τον αρχικό παλμό ο οποίος είναι τοποθετημένος στο χρόνο 0.

Οι τρεις κορυφές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Χρόνος εμφάνισης της κορυφής (μsec)	Εύρος κορυφής (μsec)	Υπολογιζόμενη απόσταση (cm)	Υπολογιζόμενο εύρος απόστασης (cm)
100	70-140	15	10.5-21
260	230-280	39	34.5-42
360	330-380	54	49.5-57

Η υπολογιζόμενη απόσταση σχετίζεται με την απόσταση που έχει ταξιδέψει το ηχητικό κύμα αν λάβουμε υπόψη την ταχύτητα 1480 m/sec που είναι η ταχύτητα του ήχου στο νερό.

Η πρώτη κορυφή σχετίζεται με την απόσταση που το κύμα πίεσης ταξιδεύει δεξιά από το σημείο παραγωγής του. Όταν συναντά την ακτίνα laser έχει ταξιδέψει μια απόσταση 11,5 εκατ. όπως αναφέρθηκε ήδη. Αυτή η απόσταση είναι ήδη μέσα στο πλάτος απόστασης (10,5-21 εκατ.) στην πρώτη περίπτωση.

Επιπλέον ηχητικό κύμα ταξιδεύει προς τα αριστερά και έπειτα ανακλάται από το τοίχωμα της δεξαμενής ταξιδεύοντας μια απόσταση 18,5 εκατ. πριν αυτό συναντήσει ξανά την ακτίνα του συμβολόμετρου. Αυτή η απόσταση συμπεριλαμβάνεται επίσης στην πρώτη περίπτωση. Αυτό σημαίνει ότι οι κορυφές που παράγονται από τα δύο κύματα δεν μπορούν να διαχωριστούν με τη δεδομένη ευκρίνεια και υπάρχει αλληλοκάλυψη της μιας με την άλλη με συνέπεια να εμφανίζονται σαν μια κορυφή.

Τα ηχητικά κύματα που ταξιδεύουν προς τα δεξιά ανακλώνται από τα τοιχώματα της δεξαμενής και συναντούν πάλι την ακτίνα laser μετά από μια συνολική απόσταση 41,5 εκ. Αυτή η περίπτωση περιγράφεται από τη δεύτερη γραμμή του πίνακα.

Τέλος εάν ένα ηχητικό κύμα που ταξιδεύει αρχικά προς τα αριστερά ανακλάται αρχικά από το αριστερό τοίχωμα και στη συνέχεια από το δεξιό τοίχωμα της δεξαμενής έχει ταξιδέψει μια συνολική απόσταση 48,5 εκατ. προτού να ανιχνευθεί από το συμβολόμετρο. Αυτή η απόσταση, αν και δεν συμπεριλαμβάνεται πραγματικά στο πλάτος απόστασης στην τρίτη γραμμή του πίνακα, είναι πολύ κοντά σε αυτό και είναι λογικό να σχετίζεται με αυτήν.

Μπορεί να συναχθεί λοιπόν το συμπέρασμα ότι το παλμικό laser δημιουργεί κύματα πίεσης που διαδίδονται στο υγρό και ανιχνεύονται εύκολα σχετικά με συμβολομετρικά μέσα. Αναμένεται ότι εάν η μεγαλύτερη χρονική διάρκεια ανίχνευσης ήταν δυνατή περισσότερες κορυφές θα παρατηρούνταν. Κάθε κορυφή θα πρέπει να έχει χαμηλότερη ένταση σε σχέση με τις προηγούμενες μέχρι που πλέον δεν θα ανιχνεύονται από το συμβολόμετρο.

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα στην ανίχνευση των κυμάτων πίεσης στη συγκεκριμένη διάταξη. Εκτός από τη διαμήκη διάδοση, τα ηχητικά κύματα διαδίδονται και εγκάρσια ή ακόμα και διαγώνια μέσα στη δεξαμενή. Αυτά τα κύματα ταξιδεύουν μικρές αποστάσεις που αντιστοιχούν σε χρονικά διαστήματα που δεν μπορούν εύκολα να διακριθούν με τη υπάρχουσα ευκρίνεια του συστήματος καταγραφής. Επιπλέον αυτά τα κύματα μπορεί να συμβάλουν δημιουργικά ή καταστροφικά γεγονός που μπορεί να έχει επιπτώσεις στις παραγόμενες κορυφές. Άλλα προβλήματα που χρειάζεται να αντιμετωπιστούν στην δεδομένη διάταξη είναι ο δονητικός και ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος.

2.2 Πρότυπο οπτικό μικρόφωνο

2.2.1 Σχεδίαση προτύπου

Με βάση τα θετικά αποτελέσματα από τις προκαταρκτικές δοκιμές σχεδιάστηκε ένα μικρών διαστάσεων φορητό συμβολόμετρο που θα είχε τη δυνατότητα να λειτουργήσει σαν ένα μικρόφωνο ευρέος φάσματος. Το μικρόφωνο αυτό θα είχε την δυνατότητα τόσο στον αέρα όσο και μέσα σε υγρά (υδρόφωνο) σε διάφορα βάθη. Πέρα από τη διττή λειτουργία του σε αέρα και νερό το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του θα είναι ότι η αναμενόμενη ευρυφασματική του απόκριση λόγω του γεγονότος ότι η απόκριση ενός οπτικού συστήματος δεν έχει τους μηχανικούς ή ηλεκτρομαγνητικούς περιορισμούς που αντιμετωπίζουν τα συμβατικά συστήματα.

Ο περιοριστικός παράγοντας στην σχεδίαση του οπτικού μικροφώνου ήταν το laser που θα έπρεπε να είναι εξαιρετικά μικρών διαστάσεων αλλά ταυτόχρονα να έχει χαρακτηριστικά ποιότητας δέσμης ανάλογα με ένα μεγάλων σχετικά διαστάσεων laser. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι το μήκος συμφωνίας και οι τρόποι (modes) διάδοσης της δέσμης. Για τη σωστή λειτουργία του συμβολόμετρου ήταν απαραίτητο το laser να είναι μονότροπο (single mode) ενώ για την συγκεκριμένη εφαρμογή το μήκος συμφωνίας του laser (που εξαρτάται από το μήκος των βραχιόνων του συμβολόμετρου) να είναι της τάξης του μισού μέτρου τουλάχιστον. Laser πολύ μικρών διαστάσεων είναι μόνο τα διοδικά laser τα οποία όμως στην συντριπτική πλειοψηφία τους δεν διαθέτουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά λόγω του ότι δεν είναι κατασκευασμένα για τέτοια χρήση. Απαιτήθηκε εκτεταμένη αναζήτηση για να βρεθεί το κατάλληλο laser. Το laser αυτό έχει χαρακτηριστικά 532nm μήκος κύματος και ισχύ 15mW. Οι διαστάσεις είναι $\varnothing 5.6$ x μήκος 8.95 mm διαστάσεις που είναι εξαιρετικά μικρές. Για λόγους όμως προστασίας του από την υπερθέρμανση προστέθηκε μια στρογγυλή ψήκτρα διαμέτρου 25 mm που το περιέβαλε. Μειονέκτημα του συγκεκριμένου laser ήταν η έντονα αποκλίνουσα δέσμη του που είναι της τάξης των 6,5 mrad, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα σε μεγάλες αποστάσεις.

Ένας ακόμη περιοριστικός παράγοντας ήταν η σχεδίαση των οπτομηχανικών εξαρτημάτων τα οποία έπρεπε να έχουν το ελάχιστο δυνατό

μέγεθος αλλά ταυτόχρονα να δίνουν τη δυνατότητα για μικρορυθμίσεις ανάλογες με εκείνες των μεγαλύτερων οπτομηχανικών εξαρτημάτων. Οι μικρορυθμίσεις αυτές είναι απαραίτητες σε ένα πρότυπο σύστημα για την σωστή ευθυγράμμιση της διάταξης και βέλτιστη λειτουργία της συμβολομετρικής διάταξης.

Το οπτικό μικρόφωνο αρχικά σχεδιάστηκε με την χρήση προγράμματος τρισδιάστατου μηχανολογικού σχεδιασμού (AutoCAD) και κατόπιν ο σχεδιασμός υλοποιήθηκε σε εξειδικευμένο μηχανουργείο. Κατά την κατασκευή έγιναν κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό. Τα κατασκευαστικά σχέδια καθώς και φωτογραφίες από οπτικό μικρόφωνο παρατίθενται στο παράρτημα Ι.

Το οπτικό μικρόφωνο αποτελείται από τρία τμήματα: Το άνω τμήμα, το κάτω τμήμα και το «λαιμό». Το οπτικό μικρόφωνο φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 2.6 Το πρότυπο οπτικό μικρόφωνο όπως αρχικά κατασκευάστηκε

Στο άνω τμήμα που είναι ένας κύβος με διαστάσεις 50X50X50mm με κενό το εσωτερικό του για να διαδίδεται η δέσμη είναι τοποθετημένα περιμετρικά και εσωτερικά του το laser και η πλειοψηφία των οπτικών του συμβολόμετρου. Πιο συγκεκριμένα το άνω τμήμα περιλαμβάνονται οι τρεις από τους τέσσερις βραχίονες ενός συμβολόμετρου Michelson δηλαδή ο βραχίονας του laser που είναι τοποθετημένο εξωτερικά του κύβου με ένα σταθερό στήριγμα, ο βραχίονας που περιλαμβάνει τον ένα καθρέφτη μαζί με το οπτομηχανικό του στήριγμα το επιτρέπει ρυθμίσεις κατά γωνία (θ, φ) μέσω δύο μικρών κοχλιών και ο βραχίονας στον οποίο συμβάλουν οι δύο δέσμες και στον οποίο μπορεί να τοποθετηθεί η φωτοδίοδος που καταγράφει τις μεταβολές στους κροσσούς συμβολής. Επίσης ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να

τοποθετηθεί και ένας τελικός φακός για να διαστέλλονται οι κροσσοί συμβολής για μεγαλύτερη ευκρίνεια. Στη μέση του κύβου είναι τοποθετημένος ο beamsplitter (διαχωριστής δέσμης) που είναι κυκλικός διαμέτρου 25 mm και πάχους 3mm.

Το κάτω τμήμα είναι ένας δεύτερος κύβος διαστάσεων 30X30X30mm που μαζί με το λαιμό αποτελούν τον τέταρτο βραχίονα του συμβολόμετρου και σε αυτό είναι τοποθετημένος ο δεύτερος καθρέφτης τοποθετημένος πάνω σε ένα οπτομηχανικό στήριγμα το οποίο επιτρέπει ρυθμίσεις κατά γωνία (θ, ϕ) μέσω δύο μικρών κοχλιών που βρίσκονται στο κάτω μέρος του κύβου. Στην ουσία παίζει το ρόλο τον υποδοχέα των ηχητικών κυμάτων καθώς σε αυτό δημιουργήθηκε μια οπή από την οποία τα ηχητικά κύματα εισέρχονται στο συμβολόμετρο παρεμβάλλονται στην πορεία της δέσμης και την μεταβάλλουν.

Ο «λαιμός» συνδέει τα δύο προηγούμενα τμήματα. Στην ουσία πρόκειται για ένα λεπτό αλλά άκαμπτο σωλήνα που επιτρέπει την διάδοση της δέσμης διαμέσου του. Τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω τμήμα έχουν γίνει ειδικές υποδοχές μέσα στις οποίες εισέρχεται ο λαιμός ενώ η στερέωση επιτυγχάνεται με ειδικούς ελαστικούς δακτυλίους (o-rings) οι οποίοι επιτυγχάνουν από τη μία πλευρά την απόλυτα σταθερή σύνδεση των τμημάτων και από την άλλη μηχανική απομόνωση των τριών τμημάτων με στόχο την αποφυγή της διάδοσης τυχόν εξωτερικών δονήσεων σε όλο το συμβολόμετρο γεγονός που θα μπορούσε να επηρεάσει την απόδοσή του.

Τα τρία αυτά τμήματα μπορούν εύκολα να αποσπαστούν μεταξύ τους για να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις ή προσαρμογές αλλά κυρίως για να αντικατασταθεί ο λαιμός έναν άλλο διαφορετικού μήκους. Η εύκολη αντικατάσταση του λαιμού δίνει την δυνατότητα μιας εξαιρετικά μικρής κατασκευής αν χρησιμοποιηθεί κοντός λαιμός ή της χρήσης του συμβολόμετρου σε δυσπρόσιτα σημεία στον αέρα καθώς και σε μεγάλα βάθη μέσα σε υγρά με τη χρήση μακρύτερων λαιμών.

2.2.2 Ανάπτυξη βοηθητικών διατάξεων

Παράλληλα με την ανάπτυξη του οπτικού μικρόφωνου αναπτύχθηκαν δύο διατάξεις που κάνουν χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων (transducers) τόσο για την παραγωγή (πομπός) όσο και για την ανίχνευση ηχητικών

κυμάτων (δέκτης). Το εύρος εκπεμπόμενων και αντίστοιχα ανιχνευόμενων συχνοτήτων των δύο διατάξεων ήταν 0-40000 Hz. Έτσι κατέστη δυνατή η παραγωγή υπερηχητικών κυμάτων για να ελεγχθεί αν η συμβολομετρική μέθοδος και κατά συνέπεια το οπτικό μικρόφωνο μπορεί να βρει εφαρμογή και στην περιοχή των υπερήχων. Επίσης ήταν δυνατή η σύγκριση και η βαθμονόμηση του οπτικού συστήματος σε σχέση με μια πιο συμβατική μέθοδο. Οι transducers ελέγχονται από μικρού μεγέθους πλακέτες ελέγχου που σχεδιάστηκαν από τους ηλεκτρονικούς του εργαστηρίου ώστε η λειτουργία τους αλλά ακόμη και το σχήμα τους και οι διαστάσεις να είναι προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι πλακέτες αυτές κλείστηκαν σε υδατοστεγή μεταλλικά κελύφη ενώ και στην περίπτωση αυτή ένας μεταλλικός σωλήνας-λαιμός στερεωμένος με o-rings στο μεταλλικό κέλυφος προστάτευε τα καλώδια τροφοδοσίας και οδήγησης των transducers και τους επέτρεπε να βυθιστούν στο νερό. Η απαιτούμενη τροφοδοσία λειτουργίας και για τα δύο κυκλώματα είναι 12VDC. Ο πομπός εκπέμπει ένα φέρον σήμα 40KHz το οποίο μπορεί να διαμορφωθεί μέσω εξωτερικής γεννήτριας. Ο δέκτης συνδέεται με παλμογράφο για την απεικόνιση του ανιχνευόμενου σήματος ενώ το σήμα δεν χρειάζεται περαιτέρω ενίσχυση πέραν της παρεχόμενης ενίσχυσης πάνω στην πλακέτα οδήγησης.

Στα πειράματα έγινε επίσης χρήση πηγών ήχου στο ακουστικό φάσμα δηλαδή κοινών ηχείων διαφόρων διαστάσεων και τύπων έτσι ώστε ανάλογα με την συχνότητα να έχουμε πάντα τη βέλτιστη απόκριση του ηχείου. Το σήμα έφτανε στα ηχεία μέσω ενός ενισχυτή όπως και στα προκαταρκτικά πειράματα. Επίσης έγινε χρήση μικροφώνου για την ανίχνευση των ακουστικών κυμάτων. Στην περίπτωση των πειραμάτων μέσα σε νερό απαιτήθηκε η κατάλληλη υγρομόνωση των ηχείων για να μην καταστραφούν ενώ δεν έγινε χρήση του μικροφώνου.

2.2.3 Μετρήσεις

Με την χρήση αυτού συμβολόμετρου έγιναν μετρήσεις απόκρισης του στις διάφορες συχνότητες τόσο στον αέρα όσο και στο νερό. Οι μετρήσεις στο νερό έγιναν σε μια δεξαμενή διαστάσεων 300X90X160mm κατασκευασμένη και αυτή από διαφανές plexiglass.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων το συμβολόμετρο δεν ερχόταν καθόλου σε επαφή τόσο με τα τοιχώματα της δεξαμενής όσο και με τις πηγές ήχου καθώς όλα είχαν τοποθετηθεί σε ξεχωριστές βάσεις ενώ ειδικά ηχοαπορροφητικά υλικά είχαν τοποθετηθεί μεταξύ των βάσεων και της τράπεζας όπου διεξάγονταν τα πειράματα.

Παρόλο που είχε προβλεφθεί να υπάρχει η δυνατότητα μικρορυθμίσεων στα οπτικά, εντούτοις όπως συμβαίνει πάντα στις συμπαγείς κατασκευές, η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συμβολόμετρου ήταν δύσκολη και απαίτησε πολύ χρόνο και υπομονή. Σε αρκετά σημεία έγιναν τροποποιήσεις τμημάτων για την ευκολότερη και ακριβέστερη ρύθμιση του συμβολόμετρου.

Όπως και στην περίπτωση των προκαταρκτικών δοκιμών το οπτικό μικρόφωνο είχε πολύ καλή απόκριση σε μια περιοχή συχνοτήτων από 0-10000 Hz στον αέρα με την χρήση ηχείων ως πηγές ήχου. Η ανιχνευόμενη ισχύς μειωνόταν αναλογικά με την αύξηση της απόστασης πηγή-οπτικό μικρόφωνο. Για συχνότητες μεγαλύτερες των 10 KHz η απόκριση ήταν πολύ χαμηλή και σχεδόν στα όρια του θορύβου.

Ομοίως στην περίπτωση της χρήσης του transducer ως πηγή ήχου η απόκριση ήταν πολύ χαμηλή ενώ η απόσταση ανίχνευσης έφτανε μόλις τα μερικά εκατοστά από τον transducer. Συγκρινόμενο με την απόκριση του δέκτη transducer το οπτικό μικρόφωνο είχε πολύ μικρότερο πλάτος ανιχνευόμενου παλμού και φυσικά ο transducer είχε ικανοποιητική απόκριση σε απόσταση μερικών δεκάδων εκατοστών.

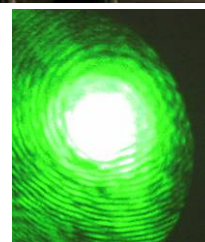
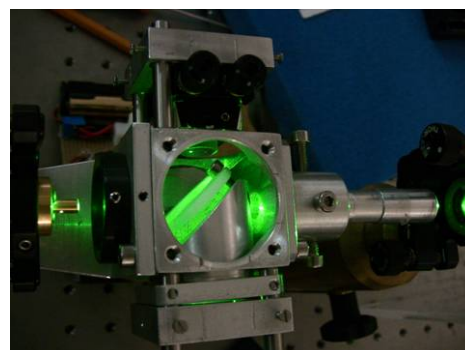
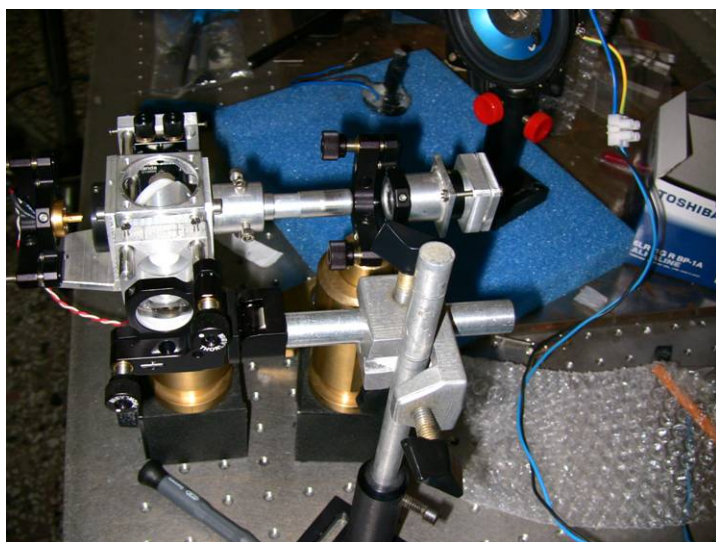
Προβληματική αποδείχτηκε η χρήση του συμβολόμετρου μέσα στο νερό γιατί το νερό που εισερχόταν στο εσωτερικό του κάτω τμήματος δημιουργούσε «λεκέδες» πάνω στον καθρέφτη η οποίοι δεν επέτρεπαν την περαιτέρω χρήση του αν δεν καθαριζόταν. Επιπλέον η μετάβαση του κάτω μέρους του συμβολόμετρου από τον αέρα στο νερό απαιτούσε εκ νέου ρυθμίσεις καθώς η διαφορά του δείκτη διάθλασης μεταξύ αέρα και νερού αντιστοιχούσε σε μεταβολή του οπτικού δρόμου της δέσμης που είχε ως συνέπεια το να μην υπάρχει συμβολή. Όπως είναι κατανοητό οι ρυθμίσεις μέσα στο νερό ήταν εξαιρετικά δύσκολες και λόγω του ότι το οπτομηχανικό στήριγμα ήταν δύσκολα προσβάσιμο μέσα στην δεξαμενή αλλά κυρίως γιατί κατά την διάρκεια των ρυθμίσεων προκαλούνταν στο νερό κυματώσεις από την κίνηση του

χειριού που επηρέαζαν τη λειτουργία του συμβολόμετρου με αποτέλεσμα να καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη η ρύθμιση του.

2.2.4 Επανασχεδίαση του οπτικού μικροφώνου

Το γεγονός της χαμηλής ευαισθησίας της διάταξης σε συχνότητες πάνω από 10KHz όσο και η προβληματική χρήση της μέσα στο νερό επέβαλαν την ανάγκη για τροποποιήσεις στη σχεδίαση του συμβολόμετρου.

Η λύση δόθηκε με τη χρήση μια μεμβράνης η οποία είναι επιστρωμένη με αλουμίνιο. Η μεμβράνη αυτή μπορεί να ανακλάσει ένα μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας δέσμης. Το ποσοστό που τελικά επιστρέφει προς τον beamsplitter γίνεται ακόμα μικρότερο λόγω της διάχυσης (diffusion) της ανακλώμενης από τη μεμβράνη. Λύση στο πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να δοθεί με τη χρήση ενός beamsplitter του οποίου το ποσοστό της διαδιδόμενης δέσμης θα ήταν πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της ανακλώμενης. Τέτοιος beamsplitter δεν υπήρχε στο εργαστήριο και ούτε κατέστη δυνατό να αγοραστεί μέχρι το τέλος της παρούσας εργασίας.

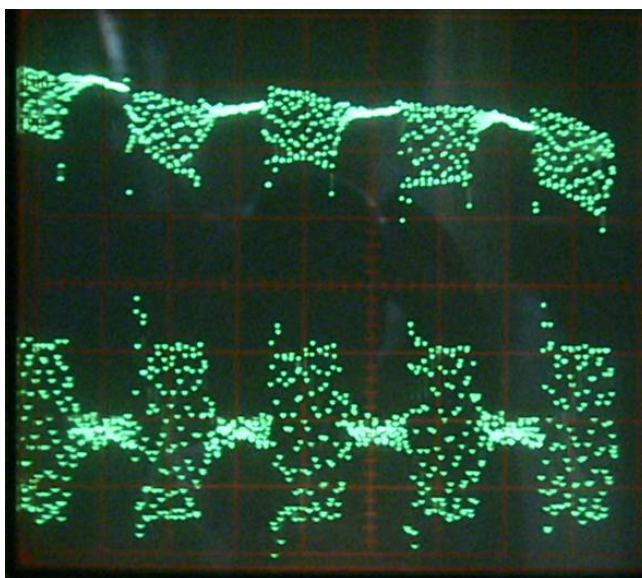


Εικόνα 2.7 α) Η πειραματική διάταξη με την χρήση της μεμβράνης, β) Το άνω τμήμα του οπτικού μικρόφωνου μετά τις μετατροπές και γ) οι κροσσοί συμβολής που δημιουργούνται.

Εντούτοις προκαταρκτικές δοκιμές που έγιναν με την μεμβράνη αυτή έδειξαν ότι το ανακλώμενο ποσοστό της δέσμης ήταν ικανοποιητικό για τη

δημιουργία κροσσών συμβολής. Έτσι η μεμβράνη αυτή μπορούσε να αντικαταστήσει τον καθρέφτη στο κάτω τμήμα. Έτσι αντί τα κύματα πίεσης να επηρεάζουν άμεσα την δέσμη επηρεάζουν την ανακλαστική επιφάνεια. Όταν τα κύματα πίεσης προσπίπτουν στην μεμβράνη, αυτή ταλαντώνεται με αποτέλεσμα τη μεταβολή του οπτικού δρόμου της δέσμης και κατά συνέπεια μεταβολή των κροσσών συμβολής.

Με τη χρήση της μεμβράνης αυτής η απόκριση του οπτικού μικροφώνου αυξήθηκε σημαντικά ενώ το εύρος των ανιχνευόμενων συχνοτήτων έφτασε μέχρι και τα 40 KHz τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Αναμένεται ότι η απόκριση του θα είναι πολύ μεγαλύτερη αλλά αυτό δεν ήταν δυνατό να διερευνηθεί με τον υπάρχον εξοπλισμό του εργαστηρίου αφού δεν υπάρχει προς το παρόν διαθέσιμη πηγή ήχου για συχνότητα μεγαλύτερη των 40 KHz.



Εικόνα 2.8 Η απεικόνιση της καταγραφής των ηχητικών κυμάτων στον παλμογράφο. Πάνω με οπτικό τρόπο, κάτω με transducer.

Τέλος με την λύση αυτή δεν υπήρχε η ανάγκη για την οπή στο κάτω τμήμα έτσι ώστε να εισέρχονται τα κύματα πίεσης στο εσωτερικό του. Η μεμβράνη έδωσε την δυνατότητα για μια κλειστή κατασκευή όπου τα κύματα πίεσης «χτυπούσαν» εξωτερικά την μεμβράνη.

Επειδή η δέσμη του laser είναι έντονα αποκλίνουσα και προσπίπτει σε ένα μεγάλο τμήμα της μεμβράνης ανακλάται ανομοιόμορφα από αυτήν με συνέπεια την χαμηλή ευκρίνεια των κροσσών συμβολής. Για την βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών τοποθετήθηκε ένας συγκεντρωτικός φακός στο κάτω

μέρος του οπτικού μικροφώνου οποίος εστιάζει την αποκλίνουσα του laser πάνω στη μεμβράνη. Αν και η ανάκλαση της δέσμης από την μεμβράνη είναι και πάλι αποκλίνουσα το γεγονός ότι δέσμη προσπίπτει σε ένα σημείο της μεμβράνης κάνει την δέσμη να ανακλάται ομοιόμορφα και κατά συνέπεια βελτιώνει την ευκρίνεια των κροσσών.

Μειονέκτημα αποτελούσε το γεγονός ότι με την αντικατάσταση του καθρέφτη δεν υπήρχε πια η δυνατότητα για μικρορυθμίσεις στο κάτω τμήμα έτσι ώστε να ανακλάται σωστά η δέσμη πίσω. Το γεγονός αυτό έπρεπε να αντισταθμιστεί από βελτίωση και του άνω μέρους έτσι ώστε και να αναβαθμιστεί η ακρίβεια των ρυθμίσεων αλλά και να υπάρχουν περισσότερες δυνατότητες ρυθμίσεων σ' αυτό.

Έτσι με βάση το νέο σχεδιασμό ο καθρέφτης του άνω μέρους τοποθετήθηκε σε νέο οπτομηχανικό στήριγμα το οποίο αν και ήταν σχετικά ογκωδέστερο με το προηγούμενο έδινε δυνατότητες λεπτομερέστατης ρυθμίσεις. Τόσο ο καθρέφτης όσο και ο beamsplitter είχαν την δυνατότητα να μετατοπίζονται παράλληλα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ορθογωνιότητα της διάταξης. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνταν τα προβλήματα από την αδυναμία ρυθμίσεων στο κάτω μέρος.

Στο σχεδιασμό του κάτω μέρους, έμφαση δόθηκε στη στεγανοποίηση του και στην όσο το δυνατόν καλύτερη και ομοιόμορφη τάνυση της μεμβράνης. Οι διαστάσεις του κάτω μέρους παρέμειναν ίδιες ενώ υπήρξε και η πρόβλεψη για την τοποθέτηση ενός συγκεντρωτικού φακού κοντά στη μεμβράνη που έδωσε τη δυνατότητα για μείωση του φαινομένου της διάχυσης της ανακλώμενης.

Αφού υλοποιήθηκε ο νέος σχεδιασμός έγιναν εκ νέου μετρήσεις για να δοκιμαστεί η τελική μορφή του πρωτότυπου οπτικού μικροφώνου. Παρά την πρόβλεψη για πολλές μικρορυθμίσεις υπήρξε αρκετή δυσκολία στην ευθυγράμμιση του. Μετρήσεις έγιναν τόσο σε αέρα όσο και σε νερό. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν ικανοποιητικά και αντίστοιχα με αυτά των προκαταρκτικών δοκιμών.

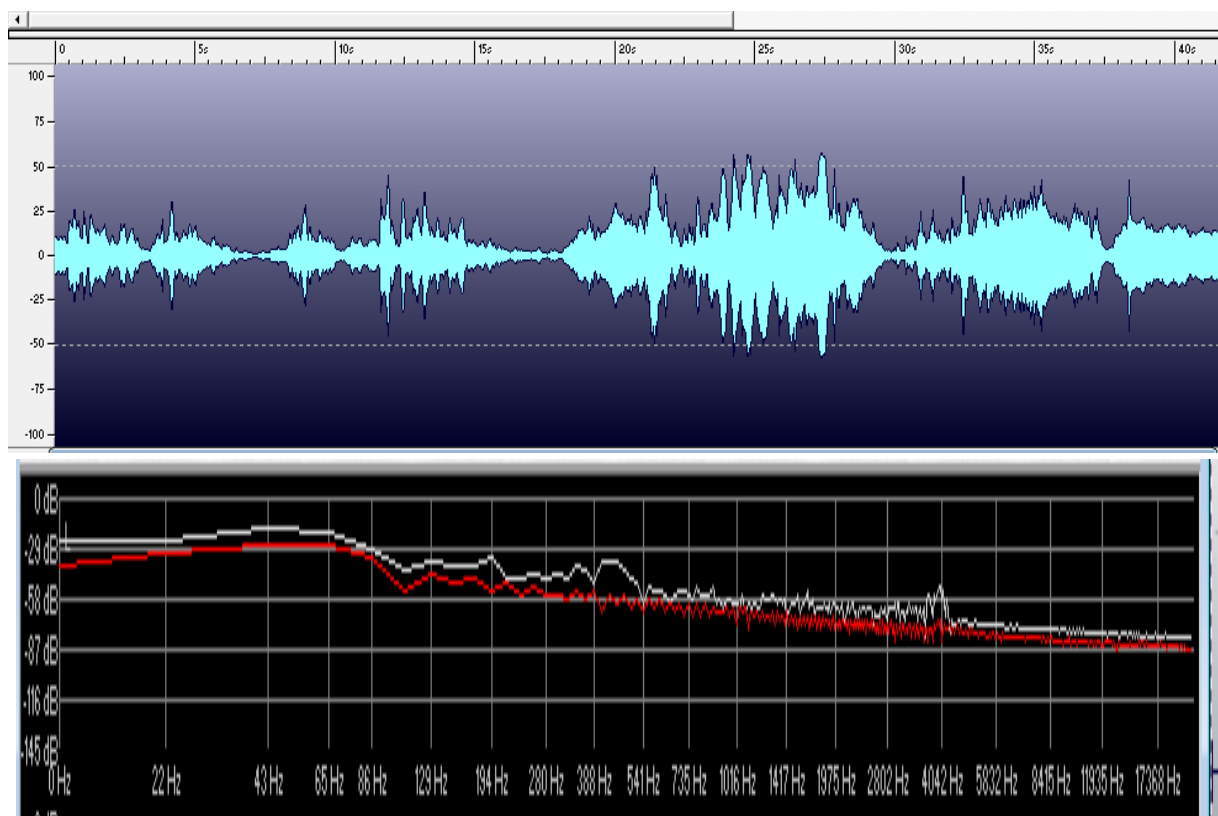
2.2.5 Ρεαλιστική καταγραφή ήχων στο ακουστικό φάσμα

Για τον έλεγχο της απόδοσης του οπτικού μικρόφωνου απαραίτητη ήταν και η χρήση του για την καταγραφή ήχου μιας μόνο συχνότητας αλλά και

σύνθετων ευρυφασματικών ήχων. Αυτό κατέστη δυνατό μόνο στο ακουστικό φάσμα αφού όλες οι πηγές ήχου είναι ευρέος φάσματος. Επίσης στο ακουστικό φάσμα υπάρχει η δυνατότητα της ποιοτικής αξιολόγησης του με απλή χρήση της ανθρώπινης ακοής αλλά και βρίσκονται εύκολα εργαλεία καταγραφής και ανάλυσης του καταγραφόμενου ήχου.

Έτσι το σήμα που ανιχνεύεται από την φωτοδίοδο συνδέθηκε απευθείας, χωρίς ενδιάμεσα ηλεκτρονικά ενίσχυσης και φίλτρα, στην κάρτα ήχου ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Με τον τρόπο αυτό το σήμα από την φωτοδίοδο μπορούσε να καταγραφεί ψηφιακά και στη συνέχεια να αναλυθεί υπολογιστικά εργαλεία. Να σημειωθεί ότι για την ορθή καταγραφή των ήχων θα έπρεπε να υπάρχει ειδικά μονωμένος χώρος-studio.

Ήχοι που καταγράφηκαν είναι η ανθρώπινη φωνή, μουσική, χτύποι, θόρυβος από μηχανές κ.α. Παρακάτω παρατίθεται η κυματομορφή από την καταγραφή ανθρώπινης φωνής και το αντίστοιχο φάσμα των συχνοτήτων των καταγραμμένων ήχων. Η ποιότητα του καταγραφόμενου ήχου είναι άριστη και

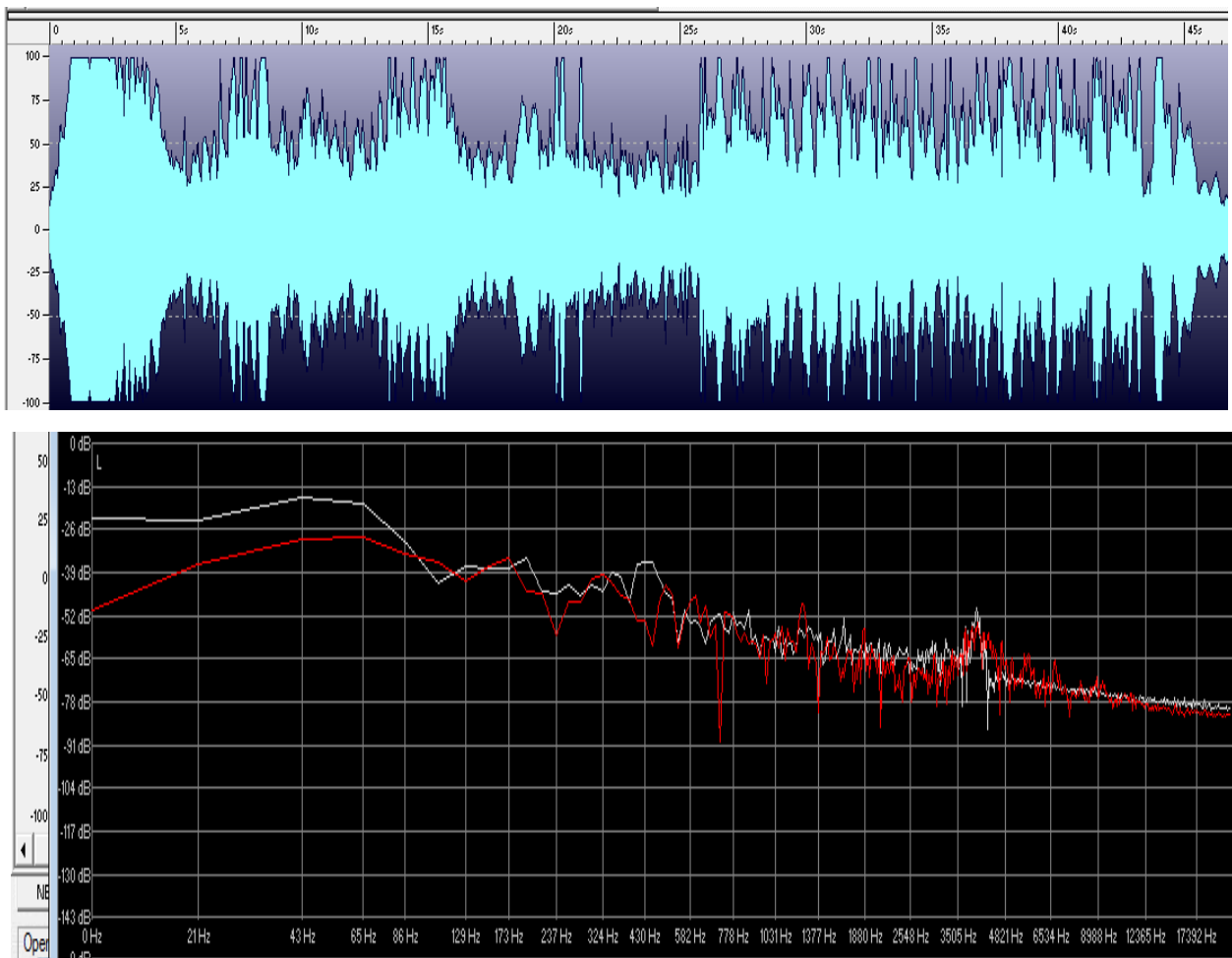


Εικόνα 2.9 Καταγραφή ανθρώπινης φωνής και η ανάλυση της στο φάσμα των συχνοτήτων

σε τίποτα δεν διαφέρει με την καταγραφή από ένα συμβατικό μικρόφωνο ή από τον ήχο που ακούει το ανθρώπινο αυτί. Ενώ δε το συμβατικό μικρόφωνο

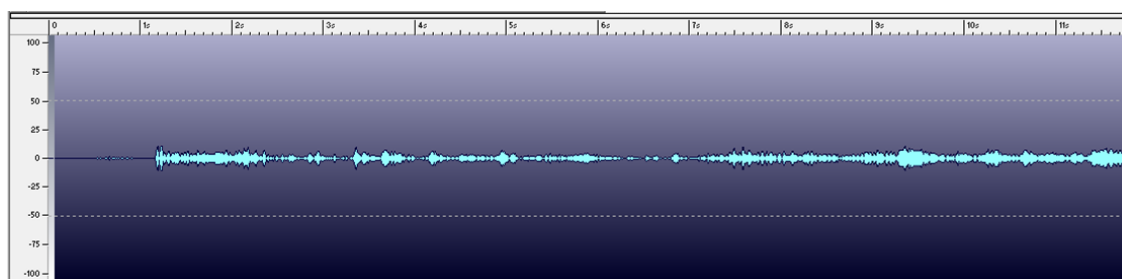
μπορεί να καταγράψει ήχους μόνο πολύ κοντά σε αυτό το οπτικό μπορεί να καταγράψει ήχους σε μεγάλη απόσταση από την πηγή. Έτσι επειδή όπως προαναφέρθηκε ο χώρος δεν ηχητικά μονωμένος παράλληλα με την φωνή έχουν καταγραφεί και θόρυβοι από το εξωτερικό περιβάλλον όπως ο ήχος μηχανών αυτοκινήτων και δονήσεις από την λειτουργία μηχανημάτων γεγονός που είναι ορατό στο φάσμα των συχνοτήτων από την ύπαρξη του υπόβαθρου στις χαμηλές συχνότητες. Λόγω της ύπαρξης των εξωτερικών θορύβων και του συντονισμού των στηριγμάτων του οπτικού μικροφώνου με αυτούς τους θορύβους σε κάποιες στιγμές η απόκριση στην ανθρώπινη φωνή ήταν χαμηλή η δημιουργούνταν παραμορφώσεις.

Παρόμοια αποτελέσματα υπήρχαν και στην περίπτωση καταγραφής ήχου από ραδιόφωνο όπου καταγράφηκε και ανθρώπινη φωνή και μουσική που αντιστοιχεί σε ακόμη ευρύτερο φάσμα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



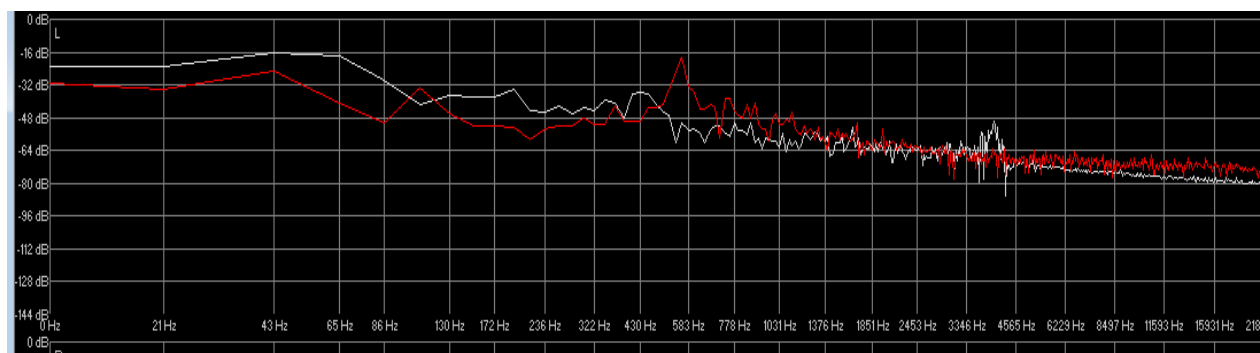
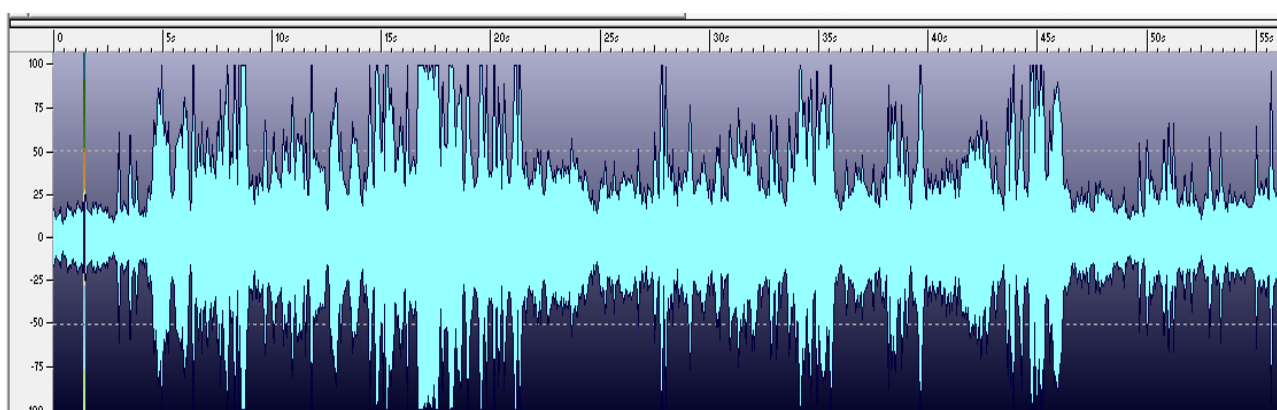
Εικόνα 2.10 Η κυματομορφή μουσικής καταγραμμένη από ραδιόφωνο με το οπτικό μικρόφωνο και η ανάλυση της στο φάσμα των συχνοτήτων

Για τον περαιτέρω έλεγχο της απόκρισης του οπτικού μικροφώνου και την επιβεβαίωση του γεγονότος της ανίχνευσης των ηχητικών κυμάτων από την ταλάντωση της μεμβράνης έγινε αντικατάσταση της από άλλη μεμβράνη σκληρότερη. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα η απόκριση της νέας μεμβράνης ήταν κατά πολύ χαμηλότερη σε σχέση με τις προηγούμενες καταγραφές παρόλο που ένταση της φωνής ήταν κατά πολύ υψηλότερη.



Εικόνα 2.11 Η κυματομορφή που καταγράφηκε με την χρήση σκληρότερης μεμβράνης

Τέλος μετρήσεις έγιναν για τον έλεγχο της διάδοσης του ήχου όχι από τον αέρα αλλά μέσω των υλικών. Για τον έλεγχο αυτό τοποθετήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πάνω στην οπτική τράπεζα. Η κυματομορφή που καταγράφηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

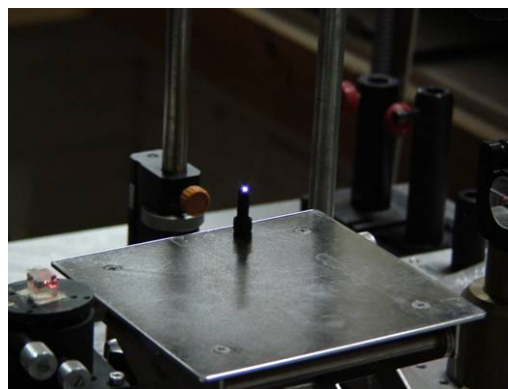
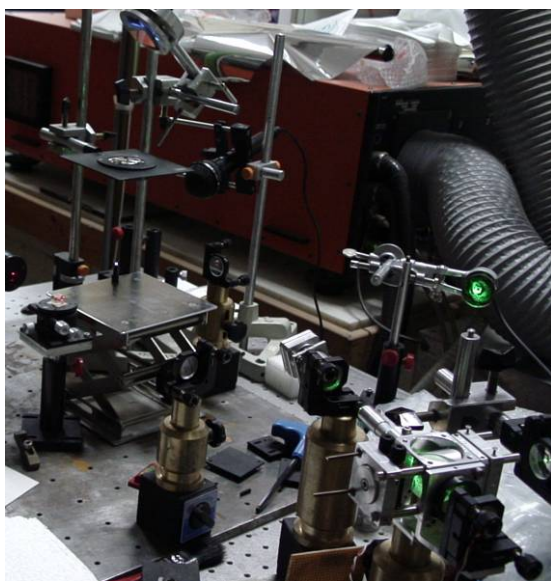


Εικόνα 2.12 Καταγραφή ήχου με πιεζοηλεκτρικά και η φασματική του ανάλυση

Ο ήχος που ανιχνεύεται με τα πιεζοηλεκτρικά είναι ανάλογης έντασης με αυτή του οπτικού μικροφώνου. Η απόκριση όμως των πιεζοηλεκτρικών είναι ικανοποιητική μόνο στις χαμηλές συχνότητες ενώ μειώνεται με αύξηση της συχνότητας. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς μόνο οι χαμηλές συχνότητες δεν διαθέτουν κατευθυντικότητα και διαδίδονται από τα υλικά ενώ οι υψηλότερες διαδίδονται μόνο στον αέρα λόγω της κατευθυντικότητάς τους.

2.2.6 Καταγραφή κυμάτων πίεσης, που παράγονται από παλμικό laser, με την χρήση οπτικού μικροφώνου.

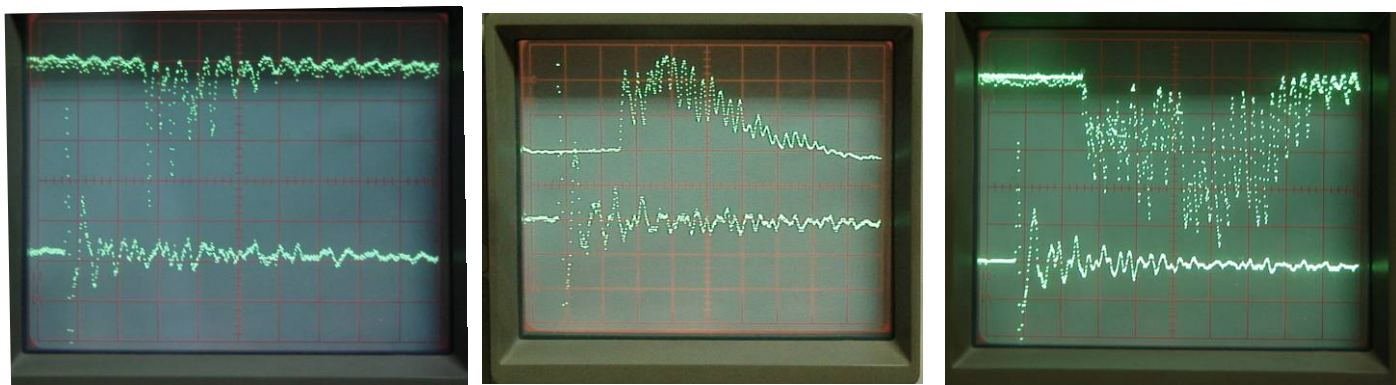
Με την χρήση του οπτικού μικροφώνου έγινε καταγραφή των κυμάτων πίεσης που παράγονται με την χρήση ενός παλμικού laser. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι όμοια με αυτή του πρώτου μέρους των εργαστηριακών πειραμάτων όπου έγινε και πάλι χρήση παλμικού laser. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα 2.10α



Εικόνα 2.13 α) Η πειραματική διάταξη για την παραγωγή των υπερήχων με παλμικό laser και την ανίχνευση τους με οπτικό μικρόφωνο. β) Ο φθορισμός που προκαλείται από την πρόσπτωση της εστιασμένης δέσμης laser πάνω σε μεταλλικό αντικείμενο

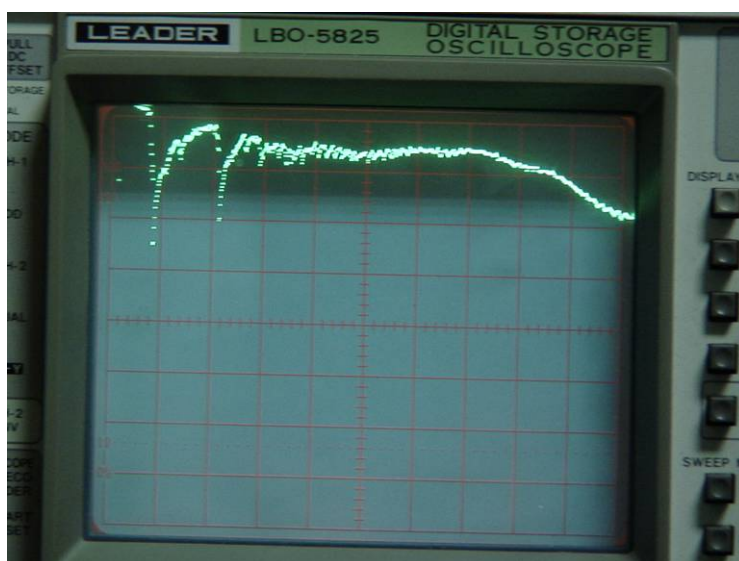
Η δέσμη του παλμικού laser οδηγείται προς ένα μεταλλικό αντικείμενο με ένα σύστημα καθρεπτών και ένα φακό που εστιάζει την δέσμη πάνω σε αυτό. Το κύμα πίεσης που δημιουργείται ανιχνεύεται από το οπτικό μικρόφωνο που βρίσκεται στο κάτω δεξιά μέρος της εικόνας 12α. Τα κύματα πίεσης

ανιχνεύονται επίσης από ένα συμβατικό μικρόφωνο. Αρχικά τα πειράματα έγιναν στον αέρα. Οι μετρήσεις φαίνονται στην εικόνα 13.



Εικόνα 2.14 Τα ακουστικά κύματα που παράχθηκαν στον αέρα όπως ανιχνεύτηκαν με το οπτικό μικρόφωνο (πάνω) και με το συμβατικό μικρόφωνο κάτω α) Σε χαμηλή ένταση laser, β) σε μέτρια ένταση και γ) Σε υψηλή ένταση

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες το οπτικό μικρόφωνο επιδεικνύει μεγάλη ευαισθησία στην ανίχνευση των ακουστικών κυμάτων. Στις προκαταρκτικές δοκιμές που είχαν γίνει στο πρώτο μέρος των πειραματικών είχε απαιτηθεί μέγιστη ένταση laser και ενίσχυση του σήματος για την καταγραφή των παραγόμενων κυμάτων πίεσης με οπτικό τρόπο ενώ τώρα με την χρήση της μεμβράνης το οπτικό μικρόφωνο εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία από το συμβατικό μικρόφωνο χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε ενίσχυση. Επίσης η κυματομορφή όπως ανιχνεύεται από το συμβατικό μικρόφωνο φαίνεται να αποσβένει γρήγορα ενώ η καταγραφή της από το



Εικόνα 2.15 Η κυματομορφή που καταγράφεται στο νερό με την χρήση του οπτικού μικροφώνου.

οπτικό μικρόφωνο δείχνει ότι η κυματομορφή αποσβένει πολύ πιο αργά. Τέλος να σημειωθεί ότι η διαφορά στο χρόνο ανίχνευσης οφείλεται στην διαφορά θέσης των δύο μικροφώνων.

Αντίστοιχη καταγραφή ακουστικών κυμάτων με την χρήση του οπτικού μικροφώνου έγινε στο νερό. Η κυματομορφή απεικονίζεται στην εικόνα 2.14

2.2.7 Επανασχεδίαση του πρότυπου οπτικού μικροφώνου

Όπως αποδείχτηκε στα παραπάνω πειράματα η χρήση της μεμβράνης σε συνδυασμό με την ευαισθησία της συμβολομετρίας προσφέρουν υψηλή απόδοση σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Το εύρος αυτό ενδεχόμενα είναι πολύ μεγαλύτερο πράγμα, που πρόκειται να αποδειχτεί με την απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού. Όμως κάθε συμβολομετρική διάταξη απαιτεί ακριβέστατη ευθυγράμμιση έτσι ώστε να δημιουργηθούν κροσσοί συμβολής οι οποίοι θα έχουν και τη μέγιστη δυνατή ευαισθησία. Η υλοποίηση του οπτικού μικρόφωνου με βάση το συμβολόμετρο Michelson που περιγράφηκε παραπάνω αν και είχε την επιθυμητή απόδοση εντούτοις παρουσίασε εξαιρετική δυσκολία στην σωστή ευθυγράμμιση του. Τρεις ήταν οι παράμετροι που συνέβαλαν σε αυτό το γεγονός. α) Η έντονα αποκλίνουσα δέσμη του laser. β) Η χρήση της μεμβράνης που προκαλούσε τα φαινόμενα διάχυσης και δεν επέτρεπε την χρήση ενός οπτομηχανικού στηρίγματος και γ) Η μεγάλη διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ των δύο βραχιόνων του συμβολόμετρου η οποία σε συνδυασμό με την χαμηλή ανακλαστικότητα της μεμβράνης είχε ως αποτέλεσμα την μεγάλη διαφορά έντασης στους δύο βραχίονες. Όλα τα παραπάνω απαιτούσαν τέλεια ευθυγράμμιση για να λειτουργεί σωστά το οπτικό μικρόφωνο πράγμα που με δυσκολία υλοποιήθηκε.

Έτσι επιβάλλεται ο ανασχεδιασμός του οπτικού μικροφώνου για να υπάρχει βελτιωμένη απόδοση και ευκολία ρυθμίσεων. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι αν και το νέο εργαστηριακό πρότυπο βρίσκεται κοντύτερα σε ένα προβιομηχανικό πρωτότυπο εντούτοις αναμένεται ότι στο βιομηχανικό πρωτότυπο δεν θα απαιτούνται καθόλου ρυθμίσεις και κατά συνέπεια το μέγεθος του θα είναι σημαντικά μικρότερο οπότε στην περίπτωση θα μπορούμε να ομιλούμε για ένα μικρόφωνο ευρέος φάσματος με υψηλή ευαισθησία και με μικροσκοπικές διαστάσεις.

Ο νέος σχεδιασμός έγινε με βάση το υπάρχον laser γιατί αν και η τεχνολογία των διοδικών laser εξελίσσεται γρήγορα και σύντομα θα υπάρχει η δυνατότητα για περισσότερες επιλογές σε μικρών διαστάσεων laser με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά το κόστος παραμένει σχετικά υψηλό και κατά συνέπεια είναι δύσκολο να αντικατασταθούν άμεσα. Έτσι για να μειωθούν τα προβλήματα από την αποκλίνουσα δέσμη σχεδιάστηκε μια μικρών διαστάσεων διάταξη που είχε όλα τα απαιτούμενα εξαρτήματα τοποθετημένα όσο το δυνατόν πλησιέστερα μεταξύ τους. Η διάταξη είχε τη γεωμετρία ενός κλασικού συμβολόμετρου Michelson αλλά όπως είναι κατανοητό ο ένας καθρέφτης έχει αντικατασταθεί από τη μεμβράνη. Όλα τα εξαρτήματα έχουν τοποθετηθεί πάνω σε μια λεπτή πλάκα έτσι ώστε η κατασκευή να είναι εξαιρετικά συμπαγής και σταθερή. Το laser και ο καθρέφτης μπορούν να ρυθμίζονται μικρομετρικά με την χρήση οπτομηχανικών στηριγμάτων ενώ όλα τα στηρίγματα των οπτικών μπορούν να μετατοπίζονται ελαφρά έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευκολία στη ευθυγράμμιση τους. Φυσικά υπάρχει ενσωματωμένη φωτοδίοδος για την ανίχνευση του σήματος το οποίο εκτρέπεται προς τη φωτοδίοδο με την χρήση ενός καθρέφτη ο οποίος μπορεί να είναι και αποκλίνων για μεγαλύτερη ευκρίνεια. Τέλος έχουν προβλεφθεί δύο στηρίγματα που μπορούν να τοποθετηθούν δύο συγκεντρωτικοί φακοί ένας αμέσως μετά το laser που θα κάνει την αποκλίνουσα δέσμη παράλληλη και ένας που θα εστιάζει τη δέσμη πάνω στη μεμβράνη.

Η διάταξη αφού ρυθμιστεί σωστά τοποθετείται μέσα σε ένας στεγανό κουτί στο οποίο υπάρχει μια οπή μπροστά στη μεμβράνη και άλλη μια οπή στην αντίθετη πλευρά από την οποία περνούν τα καλώδια που μεταφέρουν τροφοδοσία και σήματα από και προς το μικρόφωνο. Το νέο οπτικό μικρόφωνο έχει διαστάσεις 92X71X60mm οι οποίες αντιστοιχούν περίπου στο διπλάσιο του άνω τμήματος της προηγούμενης υλοποίησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στον αέρα όσο και στο νερό χωρίς καμιά διαφοροποίηση στις μετρήσεις. Βέβαια στη περίπτωση που κάτι απορυθμιστεί, γεγονός μάλλον απίθανο, δεν είναι δυνατό να επαναρυθμιστεί εξωτερικά όπως στην προηγούμενη υλοποίηση αλλά σε κάθε περίπτωση ο παρών σχεδιασμός προσομοιάζει περισσότερο στο σχεδιασμό ενός τελικού προϊόντος όπου φυσικά δε θα δίνεται καμία δυνατότητα ρύθμισης στο τελικό χρήστη. Τα

κατασκευαστικά σχέδια του προτεινόμενου οπτικού μικροφώνου παρατίθενται στο παράρτημα II.

2.3 Εργαστηριακές διατάξεις που αναπτύχθηκαν για την χρήση του οπτικού μικροφώνου και της μεμβράνης

2.3.1 Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης για την διεξαγωγή πειραμάτων υδροακουστικής

Μια χρήση του οπτικού μικροφώνου μπορεί να είναι η χρήση του σε πειράματα μέσα στο νερό αφού παγκοσμίως υπάρχει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον στην υποθαλάσσια ακουστική. Με τον όρο υποθαλάσσια ακουστική εννοούμε την ανίχνευση ακουστικών κυμάτων που διαδίδονται στο νερό και μια πληθώρα εφαρμογών που προκύπτουν από αυτήν και αφορούν την κατά γραφή θαλάσσιων φαινομένων όπως τα θαλάσσια ρεύματα, την απεικόνιση του βυθού, την παρακολούθηση και μελέτη έμβιων όντων (π.χ. φάλαινες) κ.α. Τέτοιες εφαρμογές μπορούν αρχικά να προσομοιωθούν σε μια μικρή σχετικά δεξαμενή προτού εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες.

Για την πραγματοποίηση λοιπόν τέτοιων πειραμάτων μέσα στο νερό σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια ειδική δεξαμενή διαστάσεων 130X70X70 cm. Η δεξαμενή αυτή φτιάχτηκε από plexiglass γιατί όπως και στις μικρότερες δεξαμενές έπρεπε το υλικό κατασκευής της να είναι οπτικά διαφανές και μηχανουργικά κατεργάσιμο. Το πάχος του plexiglass ήταν 2,5 cm για να αντέχει τις πιέσεις λόγω του μεγάλου όγκου του νερού. Η μηχανουργική κατεργασία των τοιχωμάτων και του πάτου της δεξαμενής απαίτησε μεγάλη προσοχή έτσι η συνένωση τους να επιτρέπει την στεγανοποίηση της δεξαμενής.

Επίσης κατασκευάστηκε μια ειδική άκαμπτη τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετήθηκε η δεξαμενή. Ανάμεσα στην τράπεζα και την δεξαμενή τοποθετήθηκε άμμος, υλικό που αποσβένει σε μεγάλο βαθμό τις εξωτερικές δονήσεις. Περιμετρικά του χώρου της άμμου φτιάχτηκε μεταλλική επιφάνεια πάχους 30cm πάνω στην οποία μπορούν στηριχθούν οπτικά με την βοήθεια μαγνητικών βάσεων.

Μετά το πέρας της παρούσας εργασίας το οπτικό μικρόφωνο ή καλύτερα το υδρόφωνο για τα πειράματα στο νερό θα βαθμονομηθεί σωστά, θα δοκιμαστεί ως προς την απόδοση του σε μεγαλύτερης κλίμακας πειράματα

μέσα στη μεγάλη δεξαμενή και τέλος θα γίνει σύγκριση του με συμβατικές ανιχνευτικές διατάξεις. Στη συνέχεια μια πληθώρα πειραμάτων υδροακουστικής μπορούν να γίνουν με την υπάρχουσα εγκατάσταση.

Πολύ σημαντικά είναι τα πειράματα που θα γίνουν με χρήση παλμικού laser για την παραγωγή ακουστικών κυμάτων στο χώρο της δεξαμενής.

Λόγω του μεγάλου όγκου και ύψους της δεξαμενής σε συνδυασμό με την τράπεζα που είναι τοποθετημένη η πρόσβαση στο χώρο της δεξαμενής είναι δύσκολη. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ακρίβεια που απαιτείται στην εκτέλεση των πειραμάτων επέβαλε τη χρήση ενός συστήματος κίνησης X-Y-Z για τη μετακίνηση του οπτικού υδρόφωνου όπως και των οπτικών και των άλλων βοηθητικών διατάξεων. Στο σύστημα αυτό προσαρμόστηκαν βηματικά μοτέρ (step motors) τα οποία ελέγχονται από μια ηλεκτρονική διάταξη που αναπτύχθηκε από τους ηλεκτρονικούς του εργαστηρίου. Τα μοτέρ μεταδίδουν μέσω ενός ιμάντα την κίνηση στους 3 άξονες. Ο συνολικός μηχανισμός μοτέρ-ιμάντες-τροχαλίες προσφέρει μια ελάχιστη μετακίνηση της τάξης 0,5mm με ακρίβεια $\pm 100\mu\text{m}$.

Παράλληλα σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ειδικά στηρίγματα που θα συγκρατήσουν τα οπτικά υδρόφωνα, τους transducers που χρησιμοποιήθηκαν και στα προηγούμενα πειράματα ενώ υπήρξε πρόβλεψη και για άλλα εξαρτήματα όπως υδρόφωνο αναφοράς που έχει ήδη επιλεγεί και παραγγελθεί.



Εικόνα 2.16 Απόψεις τις δεξαμενής και του αυτοματοποιημένου συστήματος μετακίνησης

Εξωτερικά και περιμετρικά της δεξαμενής μπορούν να τοποθετηθούν και άλλες οπτικές διατάξεις όπως μια συμβολομετρική διάταξη Michelson η οποία μαζί με το υδρόφωνο αναφοράς θα συνεισφέρουν στην σωστή βαθμονόμηση του οπτικού υδρόφωνου. Έτσι με την κατασκευή αυτή είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν πειράματα ελέγχου και βαθμονόμησης διαφόρων αισθητήρων ήχου οπτικών και μη αλλά και να διεξαχθούν μια πληθώρα πειραμάτων υποθαλάσσιας ακουστικής.

Η ανάπτυξη των παραπάνω διατάξεων ξεκίνησε παράλληλα με την ανάπτυξη του οπτικού μικροφώνου. Όμως λόγω των νέων δυνατοτήτων που έδωσε η χρήση της μεμβράνης το ενδιαφέρον στράφηκε προς την ανάπτυξη του γραμμικού κοχλία που αναλύεται παρακάτω και κατά συνέπεια δεν έγιναν πειράματα υποθαλάσσιας ακουστικής κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας όπως είχε αρχικά σχεδιαστεί. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη της παραπάνω διάταξης σε συνδυασμό με την χρήση του οπτικού μικροφώνου δίνει την δυνατότητα πολλών μελλοντικών δραστηριοτήτων.

2.4 Γραμμικός κοχλίας και εφαρμογές

2.4.1 Γενική περιγραφή

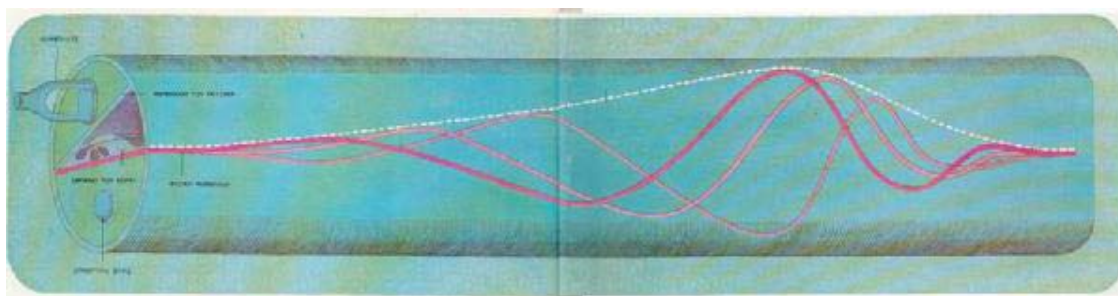
Στη συνέχεια θα περιοριστούμε σε μια πολύ σύντομη περιγραφή για τον κοχλία του αυτιού και την λειτουργία του. Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία και δεν θεωρείται απαραίτητο για την παρούσα μελέτη μας η μεταφορά της βιβλιογραφίας. Η βασική παρατήρηση είναι ότι ο κοχλίας λειτουργεί κατά τρόπο που κάνει ανάλυση φάσματος των ακουστικών συχνοτήτων που προσπίπτουν στο αισθητήριο της ακοής. Ένα είδος μετασχηματισμού Fourier πριν την μεταφορά των σημάτων στον εγκέφαλο για περαιτέρω επεξεργασία, αναγνώριση και καταγραφή. Στη πράξη για πολύπλοκα ηχητικά σήματα πρόκειται για περισσότερη και πληρέστερη πληροφορία που δίδει ένας απλός μετασχηματισμός Fourier, γι αυτό και το ενδιαφέρον της ανάπτυξης τεχνολογίας προσομοίωσης κοχλίας με τεχνολογία λείζερ.



Εικόνα 2.17 α) Το έξω αυτί β) Το έσω αυτί

Η διαδικασία της ακοής αρχίζει με την είσοδο των ηχητικών κυμάτων στο ακουστικό πόρο του «έξω αυτιού» (βλ εικ 2.15α). Ο πόρος τα μεταφέρει στο τύμπανο που τίθεται σε δόνηση. Αυτό είναι το ορατό μέρος του αυτιού. Στη συνέχεια η παλινδρομική δόνηση θέτει σε κίνηση μια σειρά από τρία οστάρια που ονομάζονται σφύρα, άκμων και αναβολέας. Τα οστάρια αυτά αποτελούν μια κινητή γέφυρα για την μεταφορά των δονήσεων στο «έσω αυτί» (βλ εικ 2.15β). Άλλη σημαντική συνεισφορά τους είναι η ενίσχυση του πλάτους των δονήσεων. Ο κοχλίας αποτελείται από τον αιθουσαίο και τον τυμπανικό σωλήνα. Ένα από τα δύο τοιχώματα του κοχλιακού πόρου είναι η παλλόμενη

βασική μεμβράνη που είναι υπεύθυνη για την «φασματική ανάλυση» των ηχητικών δονήσεων που μεταφέρει ο αναβολέας. Οι διαστάσεις της βασικής μεμβράνης δεν είναι σταθερές καθ' όλο το μήκος της αλλά έχει μικρότερο πλάτος στην περιοχή κοντά στον αναβολέα και μεγαλύτερο στην άλλη πλευρά. Αυτή η ιδιαιτερότητα είναι υπεύθυνη για την ανάλυση των χαρακτηριστικών συχνοτήτων με την δημιουργία ρυτιδώσεων στην επιφάνεια της βασικής μεμβράνης. Ο κοχλίας των θηλαστικών είναι σπειροειδής και σχετικά δύσκολος για κατασκευή και προσαρμογή μεμβράνης. Αντίθετα ο κοχλίας π.χ. των πτηνών είναι γραμμικός και προσομοιώνεται ευκολότερα σε μια μηχανική κατασκευή. Επίσης τα πουλιά μπορούν να παράγουν και να ακούσουν ήχους στην ίδια περιοχή συχνοτήτων με τον άνθρωπο και για ορισμένα είδη είναι περίπου 10 φορές πιο ευαίσθητη η ακοή.

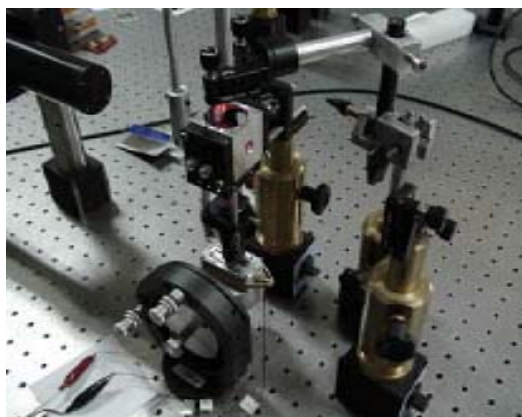
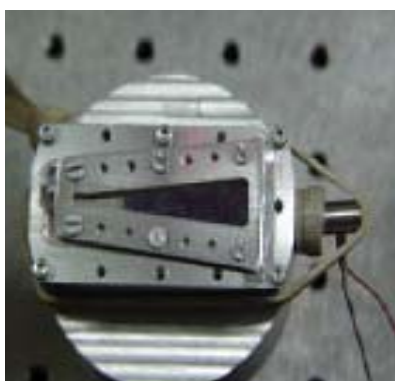


Εικόνα 2.18 Ο γραμμικός κοχλίας

Για τις ανάγκες της πειραματικού μέρους της εργασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε γραμμικός κοχλίας που μπορεί να ανταποκριθεί στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων. Ο γραμμικός κοχλίας θα προσαρμοστεί σε πειραματική διάταξη όπως έγινε στη προηγούμενη σειρά πειραμάτων σ' ένα συμβολόμετρο που ο ένας καθρέπτης του θα είναι η βασική μεμβράνη. Τον ρόλο των οσταρίων σ' αυτή την φάση των πειραμάτων παίζει ένα μικρών διαστάσεων πιεζο-ηλεκτρικό στοιχείο που ανταποκρίνεται σε πολύ μεγαλύτερο από το ακουστικό φάσμα συχνοτήτων. Αντίστοιχο χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενο πείραμα που περιγράψαμε για την μέτρηση της κίνησης της επιφάνειας οπτικής τράπεζας. Η εικόνα 2.17α δείχνει τον γραμμικό κοχλία και η εικόνα 2.17β την πειραματική διάταξη. Με την γεννήτρια συχνοτήτων

παράγονται χαρακτηριστικές συχνότητες μέχρι 25 kHz που ανιχνεύονται σε χαρακτηριστικές θέσεις στη βασική μεμβράνη του κοχλίου.

Από όσο γνωρίζουμε αν και υπάρχει αρκετά μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων για την θεωρητική εξήγηση των φαινομένων της λειτουργίας του μόνο μια πειραματική εργασία υπάρχει η οποία έχει γίνει από τους White και Grosh Microengineered hydromechanical cochlear model, Robert D. White and Karl Grosh, 1296–1301, PNAS, vol.102, no. 5. February 1 2005. Στην εργασία αυτή ένα μηχανο-υδραυλικό ανάλογο του κοχλίου έχει κατασκευαστεί. Έτσι ακουστικά κύματα που δημιουργούνται διαδίδονται μέσα σε υγρό μεταφέρονται σε μια μεμβράνη που έχει τις διαστάσεις ενός γραμμικού κοχλίου σαν και αυτόν που απαντάται στα έμβια όντα. Για την ανίχνευση των ταλαντώσεων μια σύνθετη και ογκώδης εμπορική συσκευή καταγραφής δονήσεων με οπτική μέθοδο (vibrometer) χρησιμοποιείται.



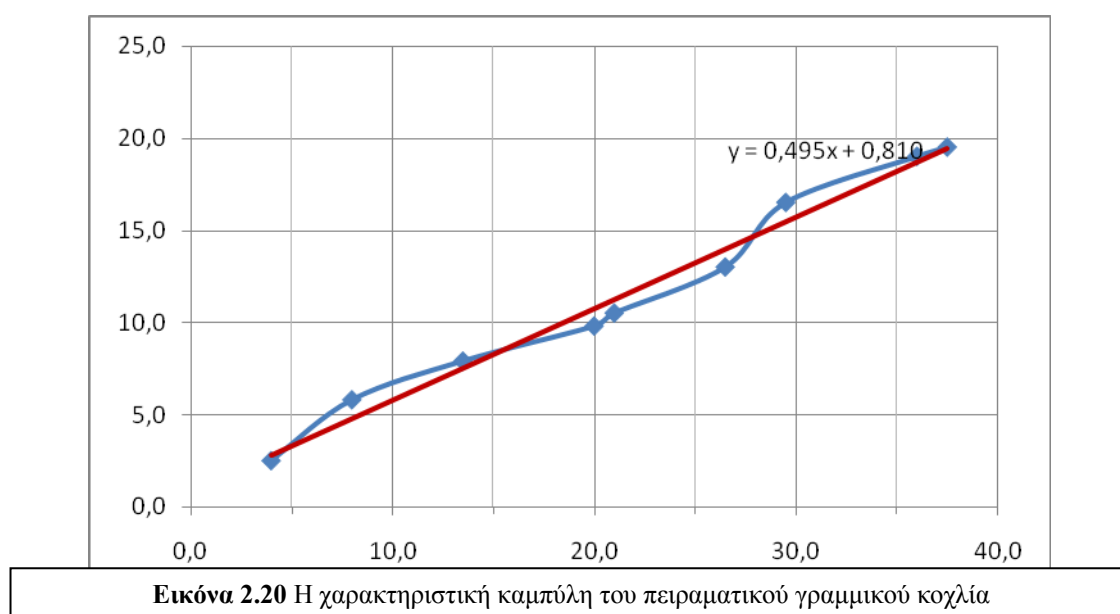
Εικόνα 2.19 α) Ο πειραματικός γραμμικός κοχλίας β) Η πειραματική διάταξη του γραμμικού κοχλίου

Με την παρούσα πειραματική δραστηριότητα γίνεται μια προσπάθεια να αποκτηθεί η τεχνογνωσία και η τεχνολογία ανίχνευσης και ανάλυσης ηχητικών και υπερήχων με την χρήση απλούστερων οπτικών διατάξεων και γραμμικού κοχλίου.

2.4.2 Μετρήσεις – Χαρακτηριστική καμπύλη

Για τις ανάγκες των πειραματικών μετρήσεων στη θέση της βασικής μεμβράνης τοποθετήθηκε μεμβράνη όμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο οπτικό μικρόφωνο λόγω των πολύ καλών μηχανικών και οπτικών ιδιοτήτων

που παρουσίασε στις προηγούμενες μετρήσεις. Επίσης στη θέση της ωοειδούς θυρίδας τοποθετήθηκε μεμβράνη που στερεώθηκε με ειδικά κατασκευασμένο δακτυλίδι που σχηματίζει κυλινδρική εσοχή η οποία μπορεί ταυτόχρονα να βοηθήσει στη προσαρμογή πίεζο-ηλεκτρικού στοιχείου που προσομοιάζει την κίνηση των οσταρίων στο μέσο αυτό και ουσιαστικά του τελευταίου του αναβολέα. Το πιεζο-ηλεκτρικό στοιχείο μπορεί να οδηγηθεί με ηλεκτρικά σήματα που η χρονική τους εξάρτηση είναι γνωστές περιοδικές συναρτήσεις χαρακτηριστικής συχνότητας που παράγονται από γεννήτρια. Η γεννήτρια επιτρέπει την αλλαγή των συχνοτήτων κατά συνεχή τρόπο.



Στη συνέχεια ο γραμμικός κοχλίας τοποθετείται στον ένα βραχίονα οπτικού συμβολόμετρου. Ως πηγή φωτός χρησιμοποιείται ένα laser όμοιο με αυτό του οπτικού μικροφώνου. Με την χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας όπως αυτή περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο γίνεται καταγραφή της κίνησης της βασικής μεμβράνης για όλο το μήκος της. Με τον τρόπο αυτό βρίσκουμε το μέγιστο της περιβάλλουσας σε πιο σημείο της βασικής μεμβράνης συμβαίνει για κάθε συχνότητα. Η καμπύλη της εικόνας 2.20 παριστάνει τις μετρήσεις αυτές. Η καμπύλη αυτή μπορεί να θεωρηθεί σαν η χαρακτηριστική καμπύλη του γραμμικού κοχλίου, για τις διαστάσεις που έχει και τα συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά που έχει η μεμβράνη που χρησιμοποιήσαμε. Για τον συγκεκριμένο αυτό γραμμικό κοχλίο που κατασκευάσαμε η καμπύλη απόκρισης δείχνει ότι μπορεί να λειτουργεί σε

συχνότητες που είναι στο διάστημα από 2.6 KHz μέχρι 19.5 KHz. Υπερβαίνει τις χαρακτηριστικές συχνότητες της ανθρώπινης φωνής αλλά μπορεί να αναλύσει σε μεγαλύτερες συχνότητες.

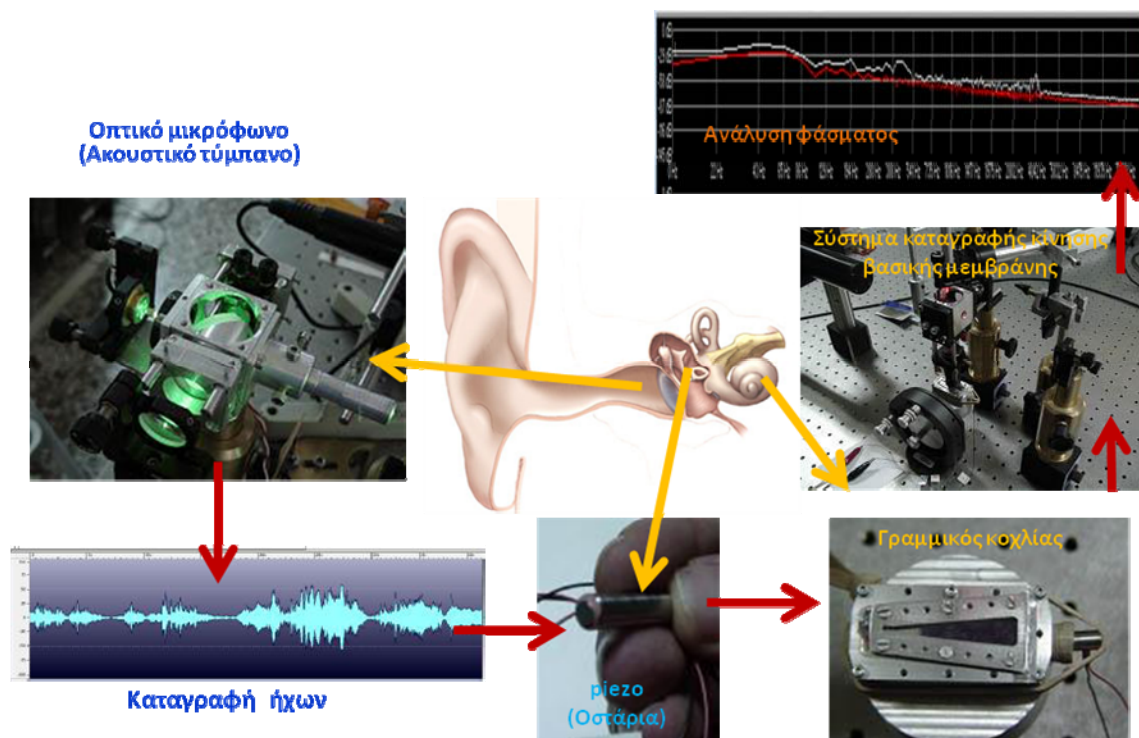
Η επέκταση ανίχνευσης του γραμμικού κοχλίου σε χαμηλές συχνότητες (100 Hz – 2000 Hz) είναι σχετικά εύκολη διαδικασία και μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση του πλάτους της μεμβράνης και της αντίστοιχης υποδοχής στήριξης της. Αντίθετα για τις μεγαλύτερες συχνότητες και ιδιαίτερα για την ανίχνευση συχνοτήτων που εκπέμπονται από έμβια όντα όπως τα δελφίνια, που αντιστοιχεί σε συχνότητες της τάξεως των 150 KHz, το πλάτος της μεμβράνης θα πρέπει να είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων μικρομέτρων αν χρησιμοποιηθεί αυτή η μεμβράνη με τα συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Για τον σκοπό αυτό έχει ξεκινήσει μελέτη προς δύο κατευθύνσεις (1) κατασκευή μεμβράνης μεταβλητού πλάτους και δυνατότητα ρύθμισης 100 μικρομέτρων και (2) μελέτη μεμβρανών διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα θα δείξουν τα όρια αυτής της τεχνολογίας, με στόχο στο άμεσο μέλλον να κατασκευαστεί γραμμικός κοχλίας με δυνατότητα ανίχνευσης μέχρι 150 KHz, συχνότητα που θεωρείται η υψηλότερη στα θηλαστικά.

2.4.3 Σύνθεση και μεθοδολογία για ανάπτυξη βιονικού αυτιού

Η αλλαγή στην πίεση που προκαλούν τα ακουστικά κύματα όπως περιγράψαμε προηγουμένως καταγράφεται από το οπτικό μικρόφωνο που θα μπορούσε να προσομοιάσει το ακουστικό τύμπανο. Αν το οπτικό μικρόφωνο λειτουργεί σε κανονική διαδικασία τότε η καταγραφή γίνεται από φωτοδίοδο που μετρά τις αλλαγές της έντασης των κροσσών.

Στην περίπτωση που θα θέλαμε να προσομοιάσει το τύμπανο τότε μπορεί να συνδεθεί με πιεζο-ηλεκτρικό στοιχείο που με τη σειρά του θα προσομοιάζει τα οστάρια στο μέσο αυτί. Τα τρία οστάρια βέβαια λειτουργούν σαν μοχλός ενισχύοντας τις δυνάμεις που εφαρμόζονται στο τύμπανο. Αν θέλουμε να ενισχύσουμε το σήμα από το O-M πριν την σύνδεση του με το πιεζο-ηλεκτρικό μπορεί να γίνει χρήση ακουστικού ηλεκτρονικού ενισχυτή μικρών διαστάσεων. Το επιθυμητό βέβαια είναι να χρησιμοποιηθεί ένας ενισχυτής ευρέος φάσματος διότι θέλουμε να είναι δυνατή η χρήση του

ολοκληρωμένου προσομοιωτή (βιονικό αυτί) σε μεγάλο φάσμα συχνοτήτων και όχι μόνο για τις ακουστικές.



Εικόνα 2.21 Η σύνθεση του βιονικού αυτιού

Στη συνέχεια το πιεζο-ηλεκτρικό στοιχείο μπορεί να προσαρμοστεί κατ' αναλογία με τον αναβολέα στον γραμμικό κοχλία. Η θέση που εξασκεί την πίεση αποτελείται από μια μεμβράνη κατ' αναλογία με ωειδή θυρίδα. Η μηχανική κίνηση θα μεταδοθεί στη μεμβράνη της ωειδούς θυρίδας μετατρέποντας την παλινδρομική κίνηση του πιεζο-ηλεκτρικού στοιχείου σε υδραυλική πίεση στο εσωτερικό του κοχλίου που γίνεται αντιληπτή με τις κυματοειδείς ρυτιδώσεις της βασικής μεμβράνης που είναι στερεωμένη στο πάνω μέρος του γραμμικού κοχλίου. Η καταγραφή της κίνησης της βασικής μεμβράνης για διαφορετικές θέσεις στο γραμμικό κοχλία επιτρέπει την καταγραφή τμημάτων του φάσματος χαρακτηριστικών συχνοτήτων που αποτελείται το αρχικό σήμα που κατέγραψε το οπτικό μικρόφωνο. Η σύνθεση των επιμέρους φασμάτων δίνει το ολικό χαρακτηριστικό φάσμα ακριβώς όπως καταγράφεται από τον κοχλία των έμβιων όντων. Με μια διαφορά το ακουστικό

νεύρο των θηλαστικών περιέχει περισσότερα από 25000 νεύρα που καταγράφουν την κίνηση της βασικής μεμβράνης σε όλο το μήκος της.

2.5 Εφαρμογές της τεχνολογίας και μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε

Η σύντομη αυτή ανάλυση δείχνει ότι η βασική ιδέα για χρήση οπτικών συμβολομετρικών μεθόδων επιτρέπει την προσομοίωση σε πρωταρχικό στάδιο του γραμμικού κοχλία και η σύνδεση και συνδυασμός με το οπτικό μικρόφωνο μπορούν να οδηγήσουν σε πειράματα ανίχνευσης, μέτρησης και ανάλυσης ηχητικών και κρουστικών κυμάτων σε ένα πολύ ευρύ φάσμα συχνοτήτων με πληθώρα εφαρμογών στη ιατρική και την ακουστική φυσιολογία

- Μελέτη κρουστικών κυμάτων και εφαρμογή τους στην ιατρική για την διοχέτευση φαρμάκων και άλλων θεραπευτικών νανο-δομών μέσω του δέρματος.
- Νέα γενιά υπερηχογράφων, όπου η παραγωγή, μέτρηση και ανίχνευση θα γίνεται με την χρήση τεχνολογίας λέιζερ, τα βασικά στοιχεία έχουν περιγραφεί στη παρούσα εργασία
- Απ ευθείας μετατροπή κυματο-μορφών σε φωτεινά κύματα και μετάδοση τους σε απόσταση χωρίς την χρήση ηλεκτρονικών με την βοήθεια οπτικών ινών που μεταφέρουν το διαμορφωμένο σήμα χωρίς απώλειες
- Παραγωγή κυμάτων υψηλών συχνοτήτων για την χρήση σε απεικονιστικά συστήματα με αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας
- Μη επεμβατικά διαγνωστικά στην Ιατρική

Εν κατακλείδι ο συνδυασμός αυτός μας επέτρεψε να αποκτήσουμε την υποδομή για μελλοντική μελέτη βιονικού αυτιού που προσομοιώνει τον κοχλία για ρομποτικές εφαρμογές και εφαρμογές αναγνώρισης ήχων και πιθανώς φωνής μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας καταγραφής και φασματικής ανάλυσης.

2.6 Μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα

Με την περιγραφή που πραγματοποιήθηκε στις προηγούμενες ενότητες μπορούμε να συνοψίσουμε μελλοντικές ερευνητικές δραστηριότητες και εφαρμογές ως εξής

- Παραγωγή υπερήχων μεγάλης συχνότητας με την χρήση τεχνολογίας λέιζερ, καταγραφή με την χρήση του οπτικού μικροφώνου και ανάλυση (φάσμα συχνοτήτων) με γραμμικού κοχλία.
- Μελέτη και κατασκευή μικρών διαστάσεων, συμπαγούς σε μια μοναδική δομή οπτικού μικροφώνου και γραμμικού κοχλία. Μετρήσεις λειτουργίας σε αέριο και υγρό μέσον για χρήση σαν υδρόφωνο καταγραφής και ανάλυση υπήσυχων κυματο-μορφών.
- Συνδυασμός των δύο μαζί (οπτικού μικροφώνου και γραμμικού κοχλία) για ιατρικές εφαρμογές και μελέτη των ακουστικών συστημάτων έμβιων όντων με παραλλαγές που αντιστοιχούν στη φυσιολογία τους. Μελέτη κατασκευής συμπαγούς και μικρών διαστάσεων βιονικού ακουστικού συστήματος θηλαστικών
- Μεταφορά διαμορφωμένου σήματος από βιονικό σύστημα στο ακουστικό νεύρο με την χρήση τεχνολογίας λέιζερ. Υπάρχουν πολύ περιορισμένα πειραματικά δεδομένα που δείχνουν ότι τα νεύρα μπορούν να διεγερθούν όταν αλληλεπιδράσουν με δέσμη λέιζερ.

3 Συμπεράσματα

Οι τεχνολογία των υπερήχων αποτελεί ένα ταχύτατα αναπτυσσόμενο τομέα. Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και αυξανόμενη χρήση τους σε εφαρμογές όπως η υποθαλάσσια ακουστική και απεικόνιση, ο μη καταστροφικός έλεγχος σε γραμμές παραγωγής και στην ιατρική. Παρουσιάζεται λοιπόν η ανάγκη για υπερηχητικές πηγές και υπερηχητικούς ανιχνευτές ευρέος φάσματος και κυρίως πολύ υψηλών συχνοτήτων (GHz) γιατί με την χρήση αυξάνεται η διεισδυτικότητα και η ευκρίνεια του ανιχνευτικού συστήματος.

Στη διάρκεια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκαν οι δυνατότητες της χρήσης ενός οπτικού συστήματος για την ανίχνευση ηχητικών και υπερηχητικών κυμάτων. Με τα πειράματα που έγιναν αποδείχτηκε όχι μόνο ότι η απόδοση μιας οπτικής μεθόδου ήταν ικανοποιητική αλλά κυρίως αποδείχτηκε ότι έχει το μοναδικό πλεονέκτημα της ευρύτατης φασματικής απόκρισης.

Ομοίως αποδείχτηκε ότι με την χρήση ενός παλμικού laser παράγονται ηχητικά κύματα τα οποία επίσης μπορούν να ανιχνευτούν με την χρήση της οπτικής συμβολομετρικής διάταξης.

Με βάση τα επιτυχή αποτελέσματα της πρώτης φάσης αποφασίστηκε να αναπτυχθεί ένας ανιχνευτής ακουστικών κυμάτων με οπτική μέθοδο. Ο ανιχνευτής έπρεπε να έχει τις ελάχιστες δυνατές διατάσεις και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στον αέρα όσο και στο νερό.

Μετά από πολλαπλές τροποποιήσεις του αρχικού σχεδιασμού κατασκευάστηκε ένας ανιχνευτής που είχε πολύ καλή απόκριση σε όλο το εύρος των συχνοτήτων που ήταν δυνατόν να παραχθούν με τον υπάρχον εξοπλισμό του εργαστηρίου (μέχρι 40 KHz) ενώ αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερο. Η δε ευαισθησία του αποδείχτηκε ότι είναι εξαιρετικά υψηλή και στο φάσμα των ακουστικών κυμάτων ήταν κατά πολύ υψηλότερη από ένα μικρόφωνο.

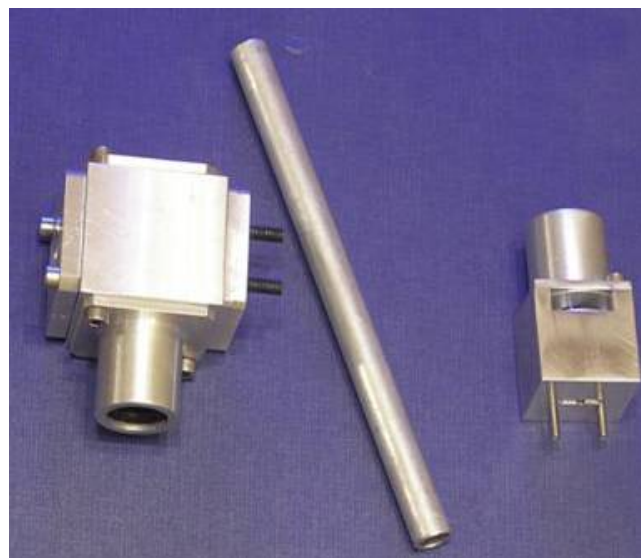
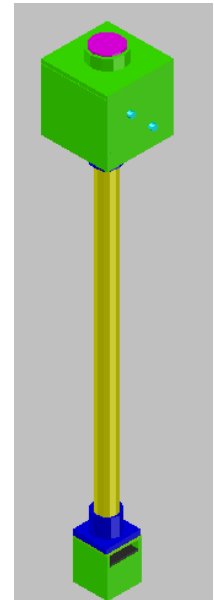
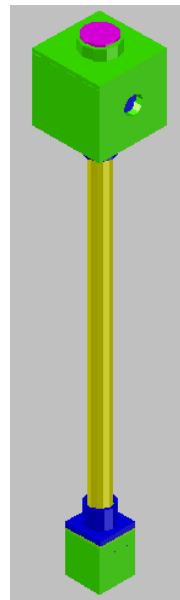
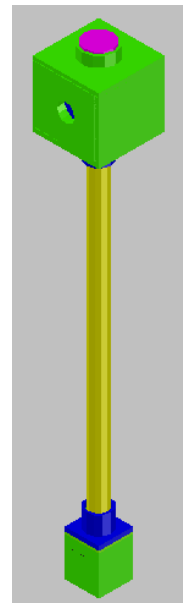
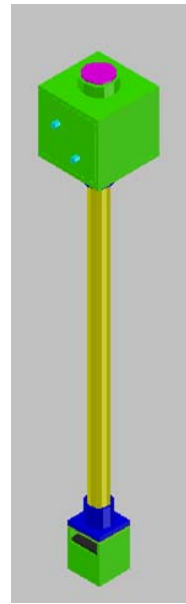
Η χρήση της μεμβράνης για την ανίχνευση των ακουστικών κυμάτων έδωσε την δυνατότητα για την κατασκευή του ηλεκτρο-οπτικού ανάλογου του

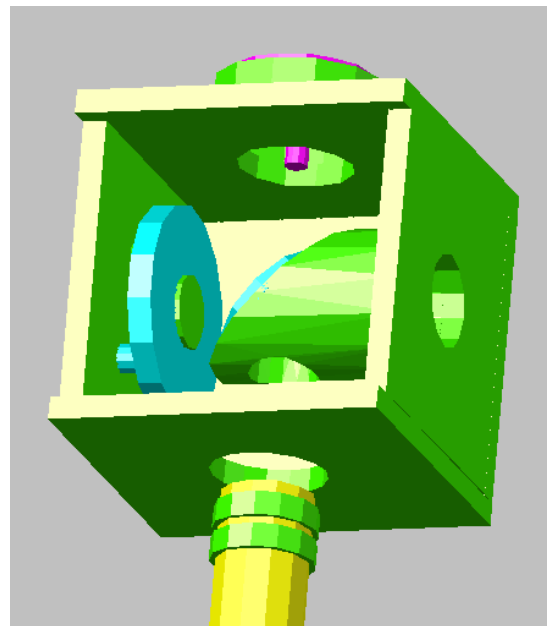
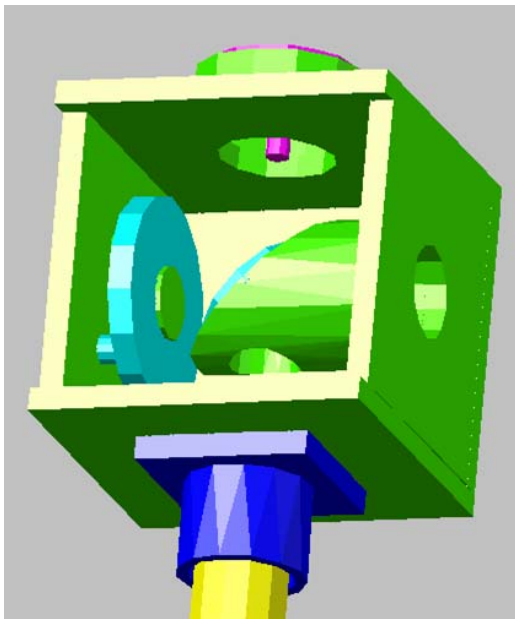
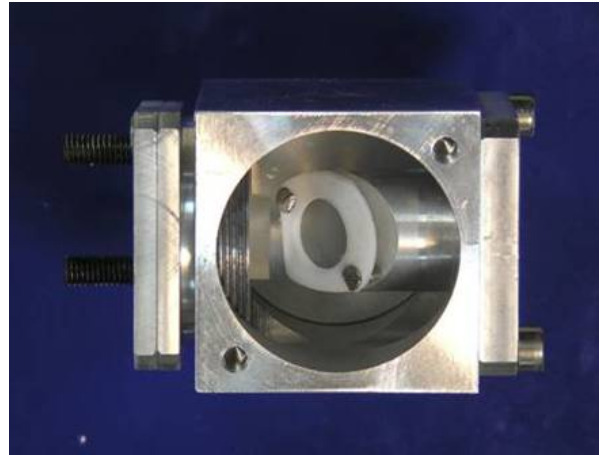
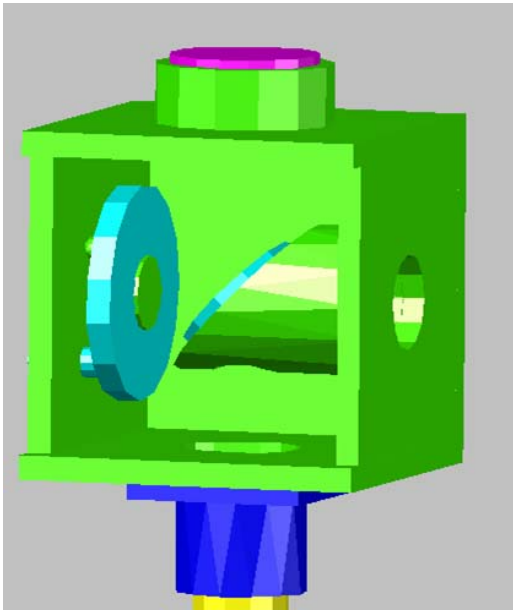
αυτιού. Με βάση τις πειραματικές δοκιμές που έγιναν προτείνεται μια ολοκληρωμένη διάταξη που περιλαμβάνει οπτικό μικρόφωνο, ενισχυτή και πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και γραμμικό κοχλία. Η διάταξη αυτή μπορεί να ανιχνεύσει να ενισχύσει και να αναλύσει ένα κύμα πίεσης στις συχνότητες που αποτελείται όπως ακριβώς κάνει και ένα αυτί στο φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων.

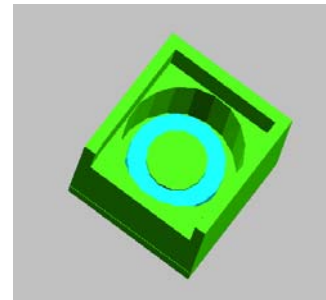
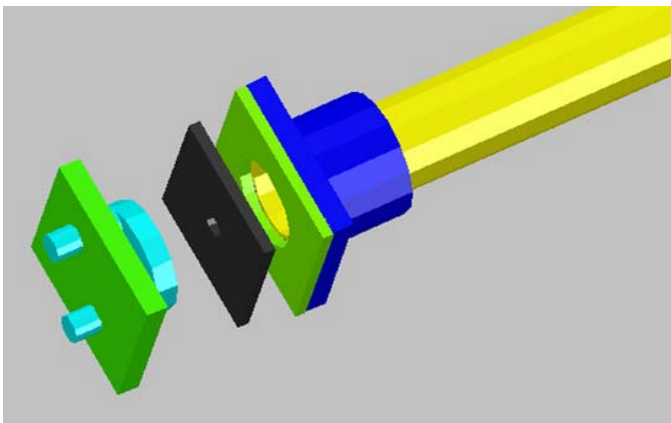
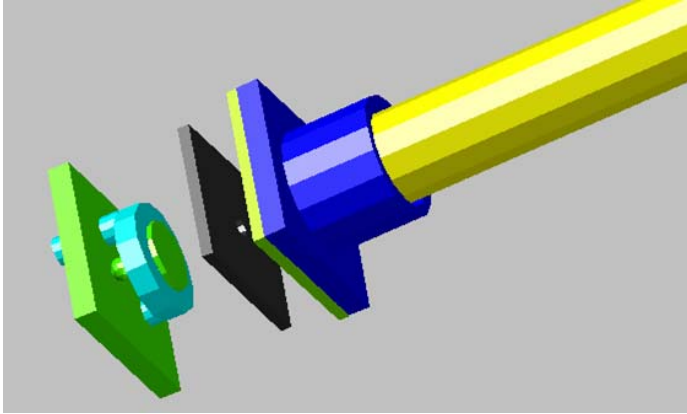
Τόσο η παραγωγή των κυμάτων πίεσης με οπτικό τρόπο όσο και ανίχνευση τους και η ανάλυση τους με συμβολομετρικές μεθόδους δίνουν νέες δυνατότητες σε μια πληθώρα εφαρμογών που αφορούν κυρίως την ιατρική και βιο-μηχανική, τομείς που χρησιμοποιούν ήδη ευρέως την ακουστική, κυρίως στο φάσμα των υπερήχων, αλλά υπάρχει ανάγκη για καλύτερη χωρική και χρονική ευκρίνεια και αυξημένη ευαισθησία πράγμα που προσφέρουν οι οπτικές μέθοδοι.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

**Τα κατασκευαστικά σχέδια και
φωτογραφίες του αρχικού
εργαστηριακού προτύπου**







ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

**Ο σχεδιασμός του προτεινόμενου
τελικού εργαστηριακού προτύπου.**

