



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ $\lambda/2$
ΓΙΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΩΝ**

Δημήτριος Κ. Φελέκης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2007

Περίληψη

Η παγκόσμια κοινότητα της ρομποτικής άρχισε να στρέφει το ενδιαφέρον της στη μικροκλίμακα στις αρχές του 1990. Τη δεκαετία που ακολούθησε, σημειώθηκε ταχύτατη πρόοδος αλλά όπως φαίνεται είμαστε μόλις στο ξεκίνημα. Με τον όρο μικρορομποτική, εννοούμε το ρομποτικό χειρισμό αντικειμένων με διαστάσεις από χιλιοστά έως μικρόμετρα καθώς και το σχεδιασμό και την κατασκευή ρομποτικών αντικειμένων παρόμοιου μεγέθους. Αυτός ο τομέας της ρομποτικής βρίσκει εφαρμογή στο χειρισμό βιολογικών κυττάρων και στη συναρμολόγηση κομματιών μεγέθους μικρόμετρων.

Καθώς μετακινούμαστε σε διαστάσεις μικρότερες από τα μικρόμετρα περνάμε στην περιοχή της νανορομποτικής. Στην περίφημη ομιλία του το 1959 στο Caltech, με τίτλο "There is plenty of room at the bottom", ο R. Feynman είχε προβλέψει τη δημιουργία μινιατούρων. Η επιστήμη στην οποία αναφερόταν τότε ο R. Feynman δεν είναι άλλη από τη νανοτεχνολογία. Κάτι που εκείνη την εποχή φάνταζε δύσκολο έως απίθανο άρχισε να υλοποιείται στις αρχές του 1980 με την εφεύρεση των μικροσκοπίων STM (Scanning Tunneling Microscope) και SPM (Scanning Probe Microscope). Με τον όρο νανορομποτική εννοούμε είτε τα ρομπότ που έχουν διαστάσεις νανόμετρα είτε τα ρομπότ με μεγαλύτερες διαστάσεις που εκτελούν χειρισμούς με ακρίβεια νανόμετρων. Για τη δεύτερη περίπτωση έχουν προταθεί αρκετές εργασίες.

Συχνά σε μικρορομποτικές και νανορομποτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές. Ο λόγος είναι η ικανότητά τους να εκτελούν μετατοπίσεις, με θεωρητικά, με άπειρη ανάλυση.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται οπτικό σύστημα μέτρησης μετατοπίσεων, ακρίβειας νανόμετρων, βασισμένο στο φαινόμενο της συμβολής. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε, συναρμολογήθηκε και ευθυγραμμίστηκε συμβολόμετρο Michelson με πολύ χαμηλό κόστος, το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση μετατοπίσεων πιεζοηλεκτρικών επενεργητών τύπου στοίβας.

Σχεδιάστηκε κύκλωμα για τη μετατροπή του ρεύματος της φωτοδιόδου σε τάση, την ενίσχυση και το φιλτράρισμά του. Μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε στην απομάκρυνση του θορύβου από το σήμα της φωτοδιόδου παρά στη λειτουργία των επενεργητών σε υψηλές συχνότητες, έτσι ώστε να κατανοηθεί πλήρως η λειτουργία του μετρητικού και η χρήση της πληροφορίας που προκύπτει για τη μέτρηση μετατοπίσεων.

Υλοποιήθηκε λογισμικό σε περιβάλλον LabVIEW για την ανάκτηση σε H/Y του σήματος της φωτοδιόδου, στο οποίο ενσωματώθηκε υπολογιστικό φίλτρο εξομάλυνσης με τη μέθοδο Savitzky-Golay.

Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε συμβολομετρική παλμογεννήτρια για την αναγνώριση φοράς κίνησης του πιεζοηλεκτρικού επενεργητή. Με τη χρήση δύο απλών φωτοδιόδων

πυριτίου που βρίσκονται στην επιφάνεια συμβολής δίνεται η δυνατότητα αναγνώρισης της φοράς κίνησης του επενεργητή μέσω της κίνησης των κροσσών.

Σχεδιάστηκαν αλγόριθμοι καταμέτρησης των κροσσών με τη χρήση μίας φωτοδιόδου και συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και αλγόριθμος για την μέτρηση μετατόπισης και αλγόριθμος αναγνώρισης φοράς κίνησης για τη συμβολομετρική παλμογεννήτρια.

Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε κύκλωμα που περιλαμβάνει γέφυρα Wheatstone, ενίσχυση και φίλτρο για τη μέτρηση μετατόπισης πιεζοηλεκτρικών επενεργητών με τη χρήση επιμηκυνσιόμετρου.

Η συμβολομετρική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση νανομετρικών μετατοπίσεων συστημάτων που κινούνται σε περισσότερους του ενός άξονες.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	5
Ευχαριστίες.....	9
1 Εισαγωγή	10
1.1 Σκοπός Εργασίας	11
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	11
1.3 Δομή Εργασίας.....	12
2 Οπτική Συμβολή	14
2.1 Εισαγωγή	14
2.2 Θεωρία Συμβολής	15
2.3 Συμβολόμετρα και εφαρμογές	21
2.4 Συμβολόμετρο Michelson	24
2.5 Αισθητήρες καταμέτρησης κροσσών	31
3 Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές	41
3.1 Εισαγωγή	41
3.2 Θεωρία πιεζοηλεκτρισμού	42
3.3 Τύποι επενεργητών και μετρολογία.....	49
3.4 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών επενεργητών	60
4 Μελέτη μετατόπισης πιεζοηλεκτρικών επενεργητών	66
4.1 Συμβολόμετρο Michelson με μια φωτοδίοδο	66
4.2 Συμβολόμετρο Michelson με συμβολομετρική παλμογεννήτρια	81
4.3 Επιμηκυνσιόμετρο	90
5 Συμπεράσματα και Μελλοντική εργασία	97
5.1 Συμπεράσματα	97
5.2 Μελλοντική εργασία.....	98
Βιβλιογραφία	99
Παράρτημα.....	101

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Χρωματισμοί που δημιουργούνται από το φως της ημέρας λόγω του φαινομένου της συμβολής πάνω σε λεπτή επιφάνεια πετρελαίου.....	14
Σχήμα 2-2. (α) Τρεις διαταραχές στην επιφάνεια του νερού που αλληλεπιδρούν. (β) Κυματισμοί από δύο πηγές και δημιουργία καταστροφικής και εποικοδομητικής συμβολής.....	15
Σχήμα 2-3. Αρχή της υπέρθεσης κυμάτων. (αριστερά) τα κύματα A,B είναι σε φάση, (δεξιά) τα κύματα A,B έχουν διαφορά φάσης π.	16
Σχήμα 2-4. Το πείραμα του Young με τη διπλή σχισμή αποτελεί το πρώτο συμβολόμετρο διαίρεσης μετώπου. Στο δεξί άκρο φαίνονται οι κροσσοί που δημιουργούνται.....	22
Σχήμα 2-5 (α) Διπλό πρίσμα Fresnel, (β) διπλοί καθρέφτες Fresnel και (γ) καθρέφτης Lloyd	23
Σχήμα 2-6. Συμβολόμετρο Michelson.....	25
Σχήμα 2-7. (α) Σχηματική απεικόνιση απλού συμβολόμετρου Michelson, (β) Οπτικό γραμμικό ισοδύναμο συμβολόμετρου Michelson.	26
Σχήμα 2-8. Υπερβολοειδή που σχηματίζονται από δύο διαταραχές S_1, S_2	29
Σχήμα 2-9. Δημιουργία πραγματικών εντοπισμένων κροσσών στο σημείο Γ ύστερα από αντανάκλαση στις δύο επιφάνειες που σχηματίζουν σφηνοειδή μορφή.....	29
Σχήμα 2-10. Δημιουργία κροσσών Haidinger από την αντανάκλαση της πηγής S στους καθρέφτες M_2 και M'_1	30
Σχήμα 2-11. Δημιουργία εικονικών εντοπισμένων κροσσών στο σημείο Δ ύστερα από αντανάκλαση στις δύο επιφάνειες που σχηματίζουν σφηνοειδή μορφή.	30
Σχήμα 2-12. (α) Κυκλικοί κροσσοί ίσης κλίσης (κροσσοί Haidinger) που δημιουργούνται από παράλληλους καθρέφτες, (β) παράλληλοι κροσσοί που δημιουργούνται από καθρέφτες υπό κλίση.	31
Σχήμα 2-13. Αντιστοιχία συνισταμένης ακτινοβολίας με τους κροσσούς που σχηματίζονται.	32
Σχήμα 2-14. Σχηματική αναπαράσταση φωτοδιόδου.	34
Σχήμα 2-15. Μοντελοποίηση φωτοδιόδου με ηλεκτρικά στοιχεία.....	36
Σχήμα 2-16. Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος φωτοδιόδου.....	37
Σχήμα 3-1. (α) Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, (β) ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.....	41
Σχήμα 3-2. (α) Κρύσταλλος με απλή κυβική συμμετρία χωρίς διπολική ροπή, (β) Κρύσταλλος με τετραγωνική συμμετρία και διπολική ροπή.....	42
Σχήμα 3-3. (α) Μη-πολωμένο φεροηλεκτρικό υλικό, (β) διαδικασία πόλωσης και (γ) μόνιμη πόλωση και επιμήκυνση.....	43
Σχήμα 3-4. Βρόχος υστέρησης, έντασης ηλεκτρικού πεδίου - πόλωσης για πιεζοηλεκτρικό κεραμικό.	45
Σχήμα 3-5. Ισοδυναμία δεικτών με το ορθοκανονικό σύστημα αξόνων.	48
Σχήμα 3-6. (α)πιεζοηλεκτρικό σε θέση ισορροπίας, (β-γ)ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και (δ-ε) αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	49
Σχήμα 3-7. Δομή πιεζοηλεκτρικού επενεργητή τύπου στοίβας.	50
Σχήμα 3-8. (α) Επενεργητές τύπου στοίβας με επίχρισμα και (β) τελικά σημεία δράσης.	51
Σχήμα 3-9. Επενεργητής τύπου ελάσματος.	52
Σχήμα 3-10. (α) Σχήμα πιεζοηλεκτρικού κυλίνδρου και (β) κύλινδρος με πολικότητα των ηλεκτροδίων.	52
Σχήμα 3-11. Σειριακός διμορφικός επενεργητής.	54
Σχήμα 3-12. Παράλληλος διμορφικός επενεργητής.	54

Σχήμα 3-13. Ολοκληρωμένο σύστημα επενεργητή τύπου στοίβας με μοχλό. ...	55
Σχήμα 3-14. Ολοκληρωμένο σύστημα επενεργητή τύπου στοίβας με καμπτικές δοκούς.	56
Σχήμα 3-15. Αρχή λειτουργίας κινητήρα inchworm.	57
Σχήμα 3-16. Αρχή λειτουργίας επενεργητή προσκόλλησης – ολίσθησης [23]. ...	58
Σχήμα 3-17. Αρχή λειτουργίας κινητήρα κρουστικής οδήγησης.	58
Σχήμα 3-18. (α) Σύγκριση Nanowalker με το ανθρώπινο χέρι, (β) τρεις ρομποτικές πλατφόρμες σε ενεργειακό πάτωμα, (γ) σχέδιο CAD.	61
Σχήμα 3-19. (α) Τοποθέτηση μικροφακών, (β) συναρμολόγηση μικρομηχανισμού σε θάλαμο μικροσκοπίου ηλεκτρονικής σάρωσης, (γ) χειρισμός βιολογικών κυττάρων.	62
Σχήμα 3-20. Μικρορομπότ MINIMAN.	62
Σχήμα 3-21. (α) μικροαρπάγη με αισθητήρα δύναμης, (β) μικροσύριγγα γ)ατομικό μικροσκόπιο.	63
Σχήμα 3-22. Τελική πλατφόρμα MiCRoN.	63
Σχήμα 3-23. (α) αρπάγη караβίδας, (β) απλοποιημένος μηχανισμός με ένα γραμμικό επενεργητή, (γ) απλοποιημένος μηχανισμός με δύο γραμμικούς επενεργητές.	64
Σχήμα 3-24. (α) μηχανισμός με ένα γραμμικό επενεργητή, (β) μηχανισμός με δύο γραμμικούς επενεργητές.	65
Σχήμα 4-1. Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης με συμβολόμετρο και μια φωτοδιόδο.	67
Σχήμα 4-2. Πειραματική διάταξη συμβολόμετρου για τη μέτρηση μετατόπισης πιεζοηλεκτρικών.	67
Σχήμα 4-3. Συμβολόμετρο Michelson.	68
Σχήμα 4-4. (α) Τάση εισόδου – εξόδου ενισχυτή πιεζοηλεκτρικών χωρίς offset, (β) με offset.	69
Σχήμα 4-5. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας για φωτοδιόδο PIN-3CD. ...	71
Σχήμα 4-6. Τάση εισόδου 60V στον επενεργητή και τάση εξόδου από το κύκλωμα της φωτοδιόδου.	72
Σχήμα 4-7. Τάση εισόδου 150V στον επενεργητή και τάση εξόδου από το κύκλωμα της φωτοδιόδου.	73
Σχήμα 4-8. Έξοδος κυκλώματος φωτοδιόδου για τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικού πλάτους και ίδιας συχνότητας σήματος εισόδου.	74
Σχήμα 4-9. Πριονωτή κυματομορφή εισόδου πλάτους 120V (διακεκομμένη γραμμή) και σήμα εξόδου κυκλώματος φωτοδιόδου.	75
Σχήμα 4-10. Έξοδος κυκλώματος φωτοδιόδου σε τρεις περιπτώσεις πριονωτής εισόδου ίδιας συχνότητας και διαφορετικού πλάτους.	76
Σχήμα 4-11. Σήμα εισόδου γραμμικής ανύψωσης για τρεις περιπτώσεις πλάτους εισόδου και τάση εξόδου κυκλώματος φωτοδιόδου.	76
Σχήμα 4-12. Είσοδος και έξοδος του αλγόριθμου καταμέτρησης κροσσών.	78
Σχήμα 4-13. Σήμα φωτοδιόδου και παλμοί schmitt.	79
Σχήμα 4-14. Σήμα φωτοδιόδου και παλμοί schmitt όπου φαίνεται η διάρκεια των παλμών και η συσχέτιση με την αλλαγή φοράς.	80
Σχήμα 4-15 Μεθοδολογία εύρεσης της φοράς κίνησης του επενεργητή.	80
Σχήμα 4-16. Σχέδιο CAD της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας.	81
Σχήμα 4-17. Συμβολομετρική παλμογεννήτρια.	82
Σχήμα 4-18 Βασικός οπτικός κωδικοποιητής.	83
Σχήμα 4-19. Τοποθέτηση φωτοδιόδων ώστε να προκύπτει αναγνώριση φοράς.	84
Σχήμα 4-20. Σήμα από τις δύο φωτοδιόδους της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και τάση εισόδου.	85
Σχήμα 4-21. Σήμα συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και τάσης εισόδου για είσοδο γραμμικής ανύψωσης.	86

Σχήμα 4-22. Σήμα συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και τάσης εισόδου για πριονωτή είσοδο.....	86
Σχήμα 4-23. Παλμοί από συμβολομετρική παλμογεννήτρια και τάση εισόδου...	87
Σχήμα 4-24. Εύρεση σημείων ενδιαφέροντος για τη δημιουργία κυματομορφής κίνησης.....	89
Σχήμα 4-25. Σχηματιζόμενη κυματομορφή μετατόπισης και σήμα μίας εκ των δύο φωτοδιόδων.....	89
Σχήμα 4-26. Κυματομορφή μετατόπισης για ολόκληρο πείραμα διάρκειας 40 δευτερολέπτων.....	90
Σχήμα 4-27. Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης με επιμηκυνσιόμετρο.....	91
Σχήμα 4-28. Κύκλωμα με γέφυρα Wheatstone, κύκλωμα ενίσχυσης και βαθυπερατό φίλτρο για το επιμηκυνσιόμετρο.....	91
Σχήμα 4-29. Τάση εισόδου στον επενεργητή διαιρεμένη με 1000 και τάση εξόδου κυκλώματος γέφυρας Wheatstone.....	93
Σχήμα 4-30 Μετατόπιση πιεζοηλεκτρικού επενεργητή για είσοδο 0-150V. Παρατηρείται μέγιστη μετατόπιση 4.34 μm και υστέρηση.....	93
Σχήμα 4-31. Βρόχος υστέρησης μεταξύ τάσης εισόδου και μετατόπισης του πιεζοηλεκτρικού επενεργητή.	94
Σχήμα 4-32. Βρόχος υστέρησης για δύο πλήρεις κύκλους λειτουργίας του επενεργητή.	94
Σχήμα 4-33. Μετατόπιση επενεργητή συνάρτηση του χρόνου και βρόχος υστέρησης για είσοδο 30V και 1Hz.....	95
Σχήμα 4-34. Μετατόπιση σε συνάρτηση με το χρόνο για 30 V, 60 V και 120V. .	95
Σχήμα 4-35. Βρόχος υστέρησης για 30 V, 60 V και 120V.	96

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Μορφές καταστατικών εξισώσεων.....	46
Πίνακας 3-2 Μετασχηματισμοί για εναλλαγή της μορφής των καταστατικών εξισώσεων	47
Πίνακας 4-1 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά πηγής laser.....	68

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή της μεταπτυχιακής εργασίας, Ευάγγελο Παπαδόπουλο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να έρθω σε επαφή με την επιστήμη της ρομποτικής. Επίσης τον ευχαριστώ, για τη υπομονετική στήριξη, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της μεταπτυχιακής εργασίας.

Ευχαριστώ τα άλλα μέλη της τριμελούς επιτροπής Καθηγητές Ν. Κρικέλη και Κ. Κυριακόπουλο.

Θέλω να ευχαριστήσω πολύ τον Δρ. Π. Βαρθολομαίο για την βοήθεια και τις συμβουλές του σε θέματα που αφορούν την εργασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Π. Χατζάκο για τη βοήθεια του στο σχεδιασμό, σε Η/Υ, της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας καθώς και τον Γ. Κοντολάτη για τις ώρες που αφιέρωσε, παρά τον περιορισμένο χρόνο του, για την κατασκευή αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Τους Κ. Βλάχο, Π. Βαρθολομαίο και Ν. Χερουβείμ με τους οποίους μοιραστήκαμε αρμονικά τον ίδιο χώρο για ένα χρόνο καθώς και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου για την πολύ καλή συνεργασία και φιλία που αναπτύξαμε εντός και εκτός του Εργαστηρίου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους Λέττα και Γιώργο, Παναγιώτη Α. και Δημήτρη Μπ. για τις φιλικές συμβουλές που με έβγαλαν πολλές φορές από τη δύσκολη θέση.

Επίσης, ευχαριστώ τους γονείς μου για την οικονομική και ψυχολογική στήριξη καθώς και τα αδέρφια μου για την καθημερινή συμβίωση και στήριξη.

1 Εισαγωγή

Η στροφή της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας στη βιοτεχνολογία έχει δώσει ώθηση και στον τομέα της μικρο/νανο-ρομποτικής. Την τελευταία δεκαετία σχεδιάζονται μηχανισμοί είτε για τη σύλληψη κυττάρων και ιστών είτε για τη συναρμολόγηση μικρομηχανισμών. Διεργασίες που πριν χρόνια επιτελούνταν από στατικούς βραχίονες τείνουν να αντικατασταθούν από βραχίονες προσαρτημένους σε κινούμενα ρομπότ.

Όλο και περισσότερες προσπάθειες γίνονται για κατασκευή ρομπότ με διαστάσεις της τάξης μερικών εκατοστών, χιλιοστών ή ακόμα και μικρόμετρων τα οποία θα εκτελούν κινήσεις και θα κάνουν χειρισμούς στο μικρόκοσμο με μεγάλη ακρίβεια. Μια τέτοια αξιόλογη προσπάθεια έγινε από τον Π. Βαρθολομαίο στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής, υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή Ε. Παπαδόπουλου [23]. Άλλα τρία παρόμοια έργα περιγράφονται στην εργασία, κοινός παρονομαστής των οποίων είναι η πιεζοηλεκτρική επενέργηση.

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία χρησιμοποιούνται όχι μόνο για την κίνηση της πλατφόρμας αλλά και των βραχιόνων των ρομπότ. Επίσης, εργαλεία που χρησιμοποιούνται για μικροχειρισμούς και νανοχειρισμούς συνήθως αποτελούνται από εύκαμπτες αρθρώσεις που επενεργούνται από πιεζοηλεκτρικά. Όπως γίνεται φανερό τα εν λόγω υλικά αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο τέτοιων συστημάτων.

Για τον προσδιορισμό της μετατόπισής τους με ακρίβεια της τάξης των μικρόμετρων και νανόμετρων απαιτείται μετρητικό σύστημα αντίστοιχης ακρίβειας. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι επιμηκυνσιόμετρα, χωρητικοί αισθητήρες, LVDT και οπτικά συστήματα μέτρησης.

Οι τρεις πρώτοι πρέπει να έρθουν σε επαφή με το μετρούμενο σύστημα ενώ οι τελευταίοι ανήκουν στην κατηγορία χωρίς επαφή. Τα επιμηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε πιεζοηλεκτρικά, έχουν καλή ανάλυση αλλά απαιτούν προσεκτική επικόλληση. Οι χωρητικοί αισθητήρες έχουν ανάλυση που φτάνει και 0.1nm αλλά λόγω μεγάλου μεγέθους επηρεάζουν την αδράνεια του συστήματος που μετρούν. Οι LVDT, εκτός του μεγάλου μεγέθους, εισάγουν και τριβή μεταξύ αυτών και του προς μέτρηση αντικειμένου.

Τέλος οι οπτικοί αισθητήρες δεν έρχονται σε επαφή με το αντικείμενο του οποίου μετρούν τη μετατόπιση. Τα συμβολόμετρα Michelson αποτελούν το πιο διαδεδομένο μετρητικό όργανο και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια της τάξης των νανόμετρων. Τυπική φωτεινή πηγή που χρησιμοποιείται είναι το λέιζερ HeNe. Άλλοι τύποι οπτικών διατάξεων που έχουν παρουσιαστεί είναι Fabry-Perot ικανού να ανιχνεύει την φορά της κίνησης και τύπου Fizeau.

1.1 Σκοπός Εργασίας

Όπως φανερώνει ο τίτλος της εργασίας, σκοπός είναι η επεξεργασία σήματος που προκύπτει από συμβολομετρική διάταξη για την μελλοντική αναγνώριση της δυναμικής συμπεριφοράς πιεζοηλεκτρικών επενεργητών.

Ουσιαστικά σκοπεύουμε στη συναρμολόγηση ενός συμβολόμετρου Michelson το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως μετρητικό όργανο καταρχήν, για την μετατόπιση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Επίσης, επιθυμούμε να συναρμολογήσουμε ένα συμβολόμετρο με μικρό κόστος, σε σχέση με αυτά του εμπορίου, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση μετατοπίσεων συστημάτων που εκτελούν μικροκινήσεις. Πιο συγκεκριμένα, επιθυμούμε να χρησιμοποιήσουμε μελλοντικά, το συμβολόμετρο για τη μέτρηση μετατοπίσεων μικροσυστημάτων.

Στη συνέχεια θα γίνει προσπάθεια μέσω της επιλογής κατάλληλων αισθητηρίων να ανακτήσουμε την πληροφορία που προκύπτει από το συμβολόμετρο και με τη βοήθεια εξοπλισμού και λογισμικού να αποθηκεύσουμε τα πειραματικά δεδομένα. Αφού έχουμε τα παραπάνω δεδομένα σε ψηφιακή μορφή, με τη δημιουργία αλγορίθμου σκοπεύουμε στον υπολογισμό της μετατόπισης και στην ανάδειξη της συμπεριφοράς τους στις διάφορες μορφές εισόδου.

Όλα τα παραπάνω εκτός από τη δημιουργία μετρητικού συστήματος, αποσκοπούν στην αναγνώριση της δυναμικής συμπεριφοράς πιεζοηλεκτρικών επενεργητών. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί μοντέλα για τη δυναμική συμπεριφορά πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Η συγκεκριμένη εργασία αποσκοπεί στη δημιουργία δυναμικού μοντέλου, με τη χρήση διαφορετικού πειραματικού υποβάθρου από ότι έχει γίνει μέχρι σήμερα.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η φύση της παρούσας εργασίας προϋποθέτει αρχικά καλή γνώση οπτικής για την κατανόηση του φαινομένου της συμβολής. Η πληροφορία αυτή αποκτήθηκε από συγγράμματα οπτικής φυσικής [3,8-10,22] καθώς και από πληροφορίες στο διαδίκτυο σχετικά με συμβολή και το συμβολόμετρο Michelson. Σημαντική είναι επίσης η μελέτη και ο σχεδιασμός των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που συνοδεύουν τη φωτοδίοδο [7,14]. Όσο αφορά το συμβολόμετρο Michelson ως μετρητικό όργανο, αρκετές εργασίες έχουν δημοσιευτεί στις οποίες μετράται μετατόπιση [2,11,12,16]. Σε άλλες περιπτώσεις, για την αναγνώριση φοράς κίνησης και μέτρηση μετατοπίσεων χρησιμοποιείται συμβολόμετρο Fabry-Perot [18]. Προσπάθειες γίνονται για τη χρήση λέιζερ από διόδους ως πηγή στο συμβολόμετρο κάτι που θα μειώσει το κόστος και το μέγεθος των διατάξεων [4,21].

Το άλλο σκέλος της εργασίας περιλαμβάνει τους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Κατανόηση της δομής και λειτουργίας τους προήλθε από βιβλία της επιστήμης των

υλικών και από το διαδίκτυο [19]. Όσο αφορά τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των πιεζοηλεκτρικών κεραμικών και των μη-γραμμικοτήτων τους, αρκετές εργασίες έχουν δημοσιευθεί σχετικά. Τα πρώτα πιεζοηλεκτρικά μοντέλα ήταν βασισμένα στις γραμμικοποιημένες καταστατικές εξισώσεις οι οποίες δημοσιεύτηκαν από την επιτροπή προτύπων της IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Society το 1987 [13]. Για την περιγραφή της υστέρησης των πιεζοηλεκτρικών οι Ping Ge και Musa Jouaneh χρησιμοποιούν το μοντέλο Preisach [5].

Στην εργασία των Adriaens, de Koning και Banning παρουσιάζεται ένα ηλεκτρομηχανικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί μια πρώτου βαθμού διαφορική εξίσωση για την περιγραφή της υστέρησης και μια μερική διαφορική για το μηχανικό σύστημα [1]. Παρόλα αυτά δεν γίνεται επαλήθευση των αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις.

Οι M. Goldfrab και N. Celanovic ανέπτυξαν ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί το μοντέλο του Maxwell για την μοντελοποίηση της υστέρησης [6]. Όσο αφορά το μηχανικό μέρος του επενεργητή, αυτό μοντελοποιείται από ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα. Επίσης γίνεται επαλήθευση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις.

Άλλο ένα μοντέλο για τη συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών έχει προταθεί από τους Saoulli, H. M., και Ben Mrad, R. [20]. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρομηχανικό μοντέλο για τις ιδιότητες του επενεργητή που λαμβάνει υπόψη διεγέρσεις από εξωτερικό μηχανικό φορτίο. Για τη μοντελοποίηση της υστέρησης χρησιμοποιείται το μοντέλο του Maxwell, όπως και στο [6]. Για τη σύζευξη του ηλεκτρικού και του μηχανικού μέρους χρησιμοποιούνται πειραματικές τεχνικές αναγνώρισης συστημάτων.

1.3 Δομή Εργασίας

Στα πέντε κεφάλαια της εργασίας αυτής έγινε η προσπάθεια να προκύψει ένα σύγγραμμα στο οποίο θα παρουσιάζεται η διαδικασία και το αποτελέσματά της γύρω από το συγκεκριμένο θέμα. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην αποφυγή μεταφοράς αυτούσιας της θεωρίας από βιβλία και στη συγγραφή περιεκτικού κειμένου που θα χρησιμεύσει για μελλοντική εργασία.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η εισαγωγή, η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η περιγραφή της δομής της εργασίας. Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην οπτική. Περιλαμβάνει μια σύντομη περιγραφή του φαινομένου και της θεωρίας της οπτικής συμβολής. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στους τύπους των συμβολόμετρων καθώς και σε ενδεικτικές εφαρμογές τους. Περιγράφεται λεπτομερώς η αρχή λειτουργίας του συμβολόμετρου Michelson και ο τρόπος με τον οποίο αυτό χρησιμοποιείται στην

παρούσα εργασία για τη μέτρηση μετατοπίσεων πιεζοηλεκτρικών επενεργητών. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά οι τύποι φωτοαισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε συμβολομετρικές εφαρμογές και γίνεται λεπτομερέστερη αναφορά στις φωτοδιόδους και στον τρόπο λειτουργίας τους, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Το τρίτο κεφάλαιο πραγματεύεται το θέμα των πιεζοηλεκτρικών επενεργητών. Αρχικά παρουσιάζονται η αρχή λειτουργίας, με απλή αναφορά στη μαθηματική περιγραφή, του φαινομένου και τα μη-γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζουν τέτοιου τύπου υλικά. Παρουσιάζονται οι τύποι πιεζοηλεκτρικών επενεργητών και οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των μετατοπίσεών τους. Τέλος, υπάρχουν κάποιες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται επενεργητές για την κίνηση είτε κάποια πλατφόρμας είτε βραχίονα ή αρπάγης.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει το κύριο μέρος της εργασίας το οποίο αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο μέρος περιγράφει την πειραματική διαδικασία με τη χρήση συμβολόμετρου Michelson και μίας φωτοδιόδου. Στο δεύτερο μέρος γίνεται σχεδιασμός και υλοποίηση της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας για την αναγνώριση φοράς κίνησης μελετάται. Στο τρίτο μέρος μελετάται η μετατόπιση και η υστέρηση των επενεργητών με τη χρήση επιμηκυνσιόμετρου. Σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχουν ενδεικτικά πειράματα για διάφορες τιμές πλάτους και συχνότητας της τάσης εισόδου. Επίσης γίνεται περιγραφή του αλγόριθμου καταμέτρησης κροσσών και αναγνώρισης της φοράς κίνησης που σχεδιάστηκε.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων που προκύπτουν και προτείνεται μελλοντική εργασία.

2 Οπτική Συμβολή

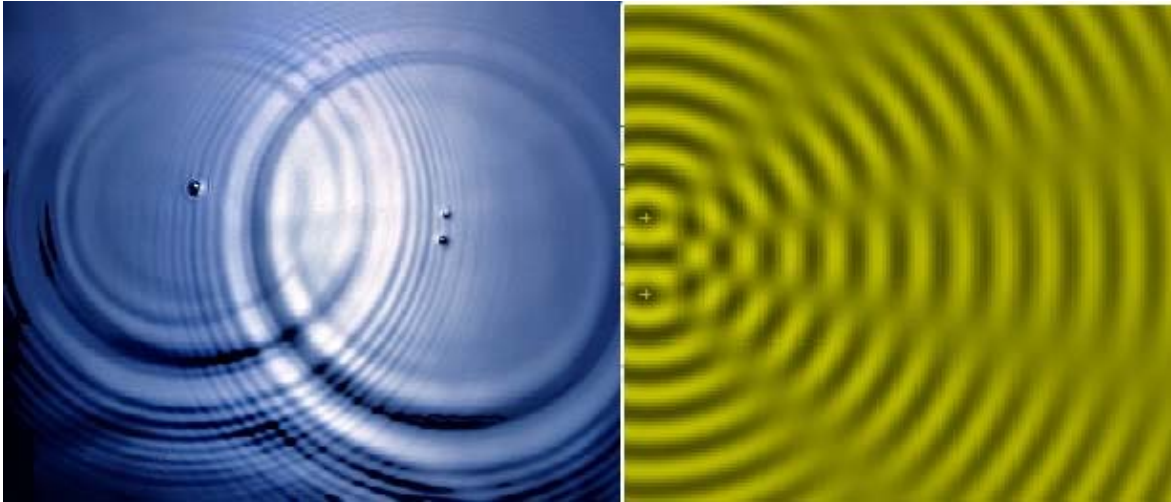
2.1 Εισαγωγή

Καθημερινά ερχόμαστε, εν αγνοία μας, σε επαφή με το φαινόμενο της συμβολής. Μία πολύπλοκη έκφασή του αποτελούν οι χρωματισμοί που δημιουργούνται από το φως της ημέρας πάνω σε ένα λεπτό στρώμα πετρελαίου Σχήμα 2-1. Σε μακροσκοπική κλίμακα το συναντούμε ως την αλληλεπίδραση των κυματισμών που δημιουργούνται από δύο ή περισσότερες διαταραχές στην επιφάνεια του νερού Σχήμα 2-2α. Την τελευταία περίπτωση συμβολής την αντιλαμβανόμαστε οπτικά ως μια πολύπλοκη κατανομή διαταραχών πάνω στο νερό Σχήμα 2-2β.



Σχήμα 2-1. Χρωματισμοί που δημιουργούνται από το φως της ημέρας λόγω του φαινομένου της συμβολής πάνω σε λεπτή επιφάνεια πετρελαίου.

Θα μπορούσαμε απλοϊκά να περιγράψουμε το πολύπλοκο αυτό φαινόμενο διακρίνοντας τις περιοχές τις οποίες το χαρακτηρίζουν. Αυτές είναι περιοχές στις οποίες το ένα κύμα επικαλύπτει το άλλο πλήρως ή μερικώς (καταστροφική συμβολή), οπότε η συνολική ένταση του κύματος παίρνει την ελάχιστη τιμή ή λίγο μεγαλύτερη της μέσης τιμή της αντίστοιχα. Επίσης διακρίνουμε περιοχές όπου η ένταση στα σημεία αλληλεπίδρασης είναι μεγαλύτερη από αυτή των επιμέρους κυμάτων (επικοδομητική συμβολή). Η περίπτωση η οποία λαμβάνει χώρα σε κάθε σημείο συνάντησης των κυμάτων εξαρτάται από τη διαφορά φάσης στην οποία βρίσκονται. Με το πέρας της αλληλεπίδρασής, τα κύματα διαχωρίζονται και συνεχίζουν την εξάπλωση τους χωρίς να έχουν επηρεαστεί από το προηγούμενο φαινόμενο.



Σχήμα 2-2. (α) Τρεις διαταραχές στην επιφάνεια του νερού που αλληλεπιδρούν. (β) Κυματισμοί από δύο πηγές και δημιουργία καταστροφικής και εποικοδομητικής συμβολής.

2.2 Θεωρία Συμβολής

Για την περιγραφή του φαινομένου της συμβολής θα χρησιμοποιηθεί η κυματική θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής φύσης του φωτός. Σύμφωνα με την εξίσωση του Maxwell σε διαφορική μορφή, Εξ. (2.1), η διάδοση μίας οπτικής διαταραχής στο κενό περιγράφεται από τη σχέση,

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

όπου \mathbf{E} είναι η ένταση ηλεκτρικού πεδίου, ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού και μ_0 είναι η διαπερατότητα του κενού. Σε καρτεσιανές συντεταγμένες η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}$$

και χρησιμοποιείται για την περιγραφή κυματικών φαινομένων. Για κάθε συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ($E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z$) ισχύει η διαφορική κυματική εξίσωση

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

όπου

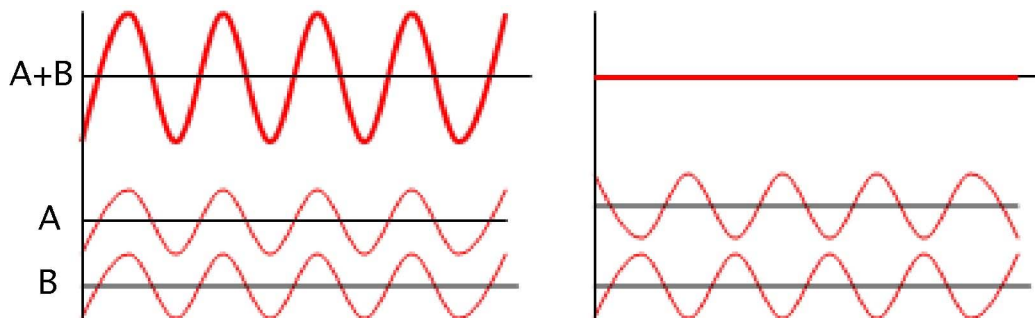
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Παρατηρούμε ότι η Εξ. (2.3) είναι γραμμική. Άρα αν $\psi_1(r,t)$, $\psi_2(r,t)$, ..., $\psi_n(r,t)$ είναι λύσεις της εξίσωσης τότε κάθε γραμμικός τους συνδυασμός είναι επίσης λύση της εξίσωσης

$$\psi(r,t) = \sum_{i=1}^n C_i \psi_i(r,t) \quad (2.4)$$

όπου C είναι αυθαίρετες σταθερές. Η παραπάνω είναι γνωστή ως αρχή της υπέρθεσης. Σύμφωνα με την αρχή αυτή η συνιστάμενη διαταραχή σε κάθε σημείο του μέσου διάδοσης είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους διαταραχών, όσων αφορά το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, Σχήμα 2-3.

Χρησιμοποιώντας την αρχή της υπέρθεσης σε συνδυασμό με τα όσα αναφέραμε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, όπου χωρίσαμε το φαινόμενο σε περιοχές, μπορούμε να δώσουμε έναν αρχικό ορισμό για την οπτική συμβολή. Συμβολή είναι η αλληλεπίδραση δύο ή περισσότερων κυμάτων φωτός από την οποία προκύπτει μια συνιστάμενη ακτινοβολία, A+B, που αποκλίνει από το άθροισμα των επιμέρους ακτινοβολιών και η οποία εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των επιμέρους κυμάτων, Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3. Αρχή της υπέρθεσης κυμάτων. (αριστερά) τα κύματα A,B είναι σε φάση, (δεξιά) τα κύματα A,B έχουν διαφορά φάσης π.

Η αρχή της υπέρθεσης αποτελεί τη βάση των φαινομένων της πόλωσης, συμβολής και διάθλασης και οι ειδικές συνθήκες που επικρατούν τη στιγμή της αλληλεπίδρασης καθορίζουν τελικά το φαινόμενο που επικρατεί. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο και θα αναφερθούν οι απαραίτητες συνθήκες για τη δημιουργία οπτικής συμβολής.

2.2.1 Μαθηματική περιγραφή συμβολής

Σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης η συνολική ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου, σε ένα σημείο του χώρου, που προκύπτει από τα μεμονωμένα πεδία E_1, E_2, \dots είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους διαταραχών.

Λόγω της μεγάλης συχνότητας μεταβολής του πεδίου E , η οποία κυμαίνεται από 4.3×10^4 Hz έως 7.5×10^4 Hz, είναι πρακτικά αδύνατο να εντοπιστεί. Για το λόγο αυτό όταν μιλάμε για συμβολή χρησιμοποιούμε την ποσότητα της ακτινοβολίας I η οποία μπορεί να μετρηθεί με πληθώρα αισθητήρων.

Για λόγους απλότητας θεωρούμε ότι έχουμε δύο σημειακές πηγές οι οποίες εκπέμπουν μονοχρωματικά κύματα φωτός ίσης συχνότητας, σε ομογενές μέσο. Επίσης, θεωρούμε γραμμικώς πολωμένα κύματα της μορφής

$$E_1(r, t) = E_{01} \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \varepsilon_1) \quad (2.5).$$

$$E_2(r, t) = E_{02} \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \varepsilon_2)$$

Η ακτινοβολία σε κάποιο σημείο του χώρου δίνεται από τη σχέση,

$$I = \varepsilon v \langle E^2 \rangle \quad (2.6)$$

όπου $\langle E^2 \rangle$ είναι μέση χρονική τιμή του τετραγώνου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Έχουμε

$$E^2 = E \cdot E$$

για δύο πηγές παίρνουμε

$$E^2 = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)$$

και κάνοντας πράξεις καταλήγουμε ότι

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \quad (2.7).$$

Παίρνοντας το χρονικό μέσο όρο και για τα δύο μέλη της παραπάνω εξίσωσης καταλήγουμε στη σχέση

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2.8)$$

όπου

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle$$

και

$$I_{12} = 2 \langle E_1 \cdot E_2 \rangle \quad (2.9)$$

Ο όρος I_{12} ονομάζεται όρος συμβολής και είναι αυτός που καθορίζει την ένταση της συμβολής για κάθε μια από τις περιοχές που αναφέραμε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου. Για τον υπολογισμό του I_{12} στην περίπτωση μας αντικαθιστούμε τις Εξ. (2.5) στην Εξ. (2.9) και παίρνουμε

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \varepsilon_1) \times \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \varepsilon_2).$$

Εφαρμόζοντας τριγωνομετρικές ιδιότητες καταλήγουμε στη σχέση

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cdot [\cos(k_1 \cdot r + \varepsilon_1) \times \cos(\omega t) + \sin(k_1 \cdot r + \varepsilon_1) \times \sin(\omega t)] \times [\cos(k_2 \cdot r + \varepsilon_2) \times \cos(\omega t) + \sin(k_2 \cdot r + \varepsilon_2) \times \sin(\omega t)] \quad (2.10)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που δίνει τη χρονική μέση τιμή μιας συνάρτησης $f(t)$ σε ένα διάστημα T

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t') dt' \quad (2.11),$$

κάνοντας χρήση των

$$\begin{aligned} \langle \cos^2 \omega t \rangle &= \frac{1}{2} \\ \langle \sin^2 \omega t \rangle &= \frac{1}{2} \\ \langle \cos \omega t \cdot \sin \omega t \rangle &= 0 \end{aligned}$$

και εκτελώντας τις πράξεις στην Εξ. (2.10) καταλήγουμε στη σχέση

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos(k_1 \cdot r + \varepsilon_1 - k_2 \cdot r - \varepsilon_2) \quad (2.12).$$

Συνεπώς, αντικαθιστώντας στην Εξ. (2.9) ο όρος της συμβολής γίνεται

$$I_{12} = E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos(\delta) \quad (2.13)$$

όπου

$$\delta = (k_1 \cdot r - k_2 \cdot r + \varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

είναι η διαφορά φάσης που προκύπτει από τη διαφορά των μηκών διαδρομής και τη διαφορά των αρχικών φάσεων. Παρατηρούμε ότι εάν E_{01} και E_{02} είναι κάθετες τότε

$$I_{12} = 0$$

και από Εξ. (2.8)

$$I = I_1 + I_2$$

Η περίπτωση με την οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία είναι όταν οι E_{01} και E_{02} είναι παράλληλες, όπου ισχύει η Εξ. (2.13). Από την Εξ. (2.12) μπορούμε να καταλήξουμε στις παρακάτω σχέσεις για τις I_1 και I_2

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{01}^2$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{02}^2$$

με αποτέλεσμα ο όρος της συμβολής να γράφεται ως

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

και η συνολική τιμή της ακτινοβολίας από την Εξ. (2.8) να γίνεται

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.14)$$

Από την Εξ. (2.14) παρατηρούμε ότι η συνολική τιμή της ακτινοβολίας I σε κάποιο σημείο του χώρου εξαρτάται από τη διαφορά φάσης δ και μπορεί να είναι μεγαλύτερη, μικρότερη ή ίση του αθροίσματος των επιμέρους ακτινοβολιών $I_1 + I_2$. Θα εξετάσουμε τέσσερις περιπτώσεις για τη συνολική τιμή της ακτινοβολίας.

- *Πλήρως εποικοδομητική συμβολή*

Αυτό συμβαίνει όταν

$$\cos \delta = 1 \Rightarrow \delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$$

Στην περίπτωση αυτή η διαφορά φάσης των δύο κυμάτων είναι ίση με το μηδέν και η συνολική ακτινοβολία είναι

$$I = I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

- *Εποικοδομητική συμβολή*

Αυτό συμβαίνει όταν

$$0 < \cos \delta < 1$$

Στην περίπτωση αυτή τα δύο κύματα βρίσκονται εκτός φάσης και η συνολική ακτινοβολία είναι

$$I_1 + I_2 < I < I_{\max}.$$

Στην περίπτωση που

$$\delta = \pi / 2 \Rightarrow \cos \delta = 0$$

τα κύματα έχουν διαφορά φάσης 90° και

$$I = I_1 + I_2.$$

- *Καταστροφική συμβολή*

Αυτό συμβαίνει όταν

$$0 > \cos \delta > -1$$

Στην περίπτωση αυτή η συνολική ακτινοβολία είναι

$$I_1 + I_2 > I > I_{\min} .$$

- Πλήρως καταστροφική συμβολή

Αυτό συμβαίνει όταν

$$\cos \delta = -1 \Rightarrow \delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \dots$$

Στην περίπτωση αυτή η διαφορά φάσης των δύο κυμάτων είναι ίση με 180° και η συνολική ακτινοβολία είναι

$$I = I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} .$$

Μια άλλη περίπτωση για την οποία πρέπει να γίνει αναφορά είναι όταν το πλάτος των δύο κυμάτων είναι ίσο, δηλαδή

$$E_{01} = E_{02}$$

Συνεπώς οι δύο πηγές συνεισφέρουν εξίσου στη συνολική ακτινοβολία,

$$I_1 = I_2 = I_0$$

και κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής ιδιότητας

$$1 + \cos \delta = 2 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

η Εξ. (2.14) γίνεται

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2.15).$$

Από την Εξ. (2.15) παρατηρούμε ότι

$$I_{\min} = 0$$

και

$$I_{\max} = 4I_0 .$$

Κατά συνέπεια, υπό αυτές τις συνθήκες έχουμε τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ I_{\min} και I_{\max} ή αλλιώς, τη μεγαλύτερη αντίθεση μεταξύ φωτεινού και σκοτεινού κροσσού.

2.2.2 Απαραίτητες προϋποθέσεις

Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε τη συμβολή μεταξύ δυο φωτεινών πηγών θα πρέπει αυτή να είναι ορατή. Ορατή συμβολή προκύπτει όταν οι ακτίνες οι οποίες αλληλεπιδρούν έχουν σταθερή διαφορά φάσης στο χρόνο. Οι παραπάνω πηγές ονομάζονται σύμφωνες.

Μια τυπική πηγή περιέχει μεγάλο αριθμό ατόμων καθένα από τα οποία είναι ικανό να ακτινοβολεί ένα σύνολο κυμάτων για 10^{-8} s. Συνεπώς οι τυπικές πηγές μπορούν στην καλύτερη περίπτωση να διατηρήσουν σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ τους για 10^{-8} sec. Κατά συνέπεια οι κροσσοί συμβολής θα είναι ορατοί για το μικρό αυτό χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό για τη δημιουργία κροσσών συμβολής χρησιμοποιούνται πηγές laser, των οποίων οι δέσμες είναι σύμφωνες. Η παραπάνω ιδιότητα σε συνδυασμό με τη σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία των laser έχει δημιουργήσει μια ώθηση στη χρήση των φαινομένων της οπτικής στον τομέα της μετρολογίας.

Εκτός από τη συμφωνία των ακτίνων, απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία σταθερών κροσσών συμβολής είναι η ίδια, ή σχεδόν ίδια, συχνότητα των ακτίνων που αλληλεπιδρούν. Μια σημαντική διαφορά συχνότητας θα δημιουργούσε μια γρήγορη χρονική μεταβολή στη διαφορά φάσης η οποία θα είχε ως αποτέλεσμα η μέση τιμή του όρου I_{12} να είναι μηδέν στο διάστημα που θα προσπαθούσαμε να εντοπίσουμε τη συμβολή (δες κεφ. 7.1 Hecht).

Για την επίτευξη ξεκάθαρης συμβολής θα πρέπει οι συμβαλλόμενες ακτίνες να έχουν ίσα ή σχεδόν ίσα πλάτη, Εξ (2.15). Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι σκοτεινοί και φωτεινοί κροσσοί να αντιστοιχούν σε πλήρη καταστροφική και πλήρη εποικοδομητική συμβολή αντίστοιχα και να δημιουργείται η μέγιστη αντίθεση μεταξύ των δύο καταστάσεων.

Στην περίπτωση μας οι οπτικές διαταραχές είναι γραμμικά πολωμένες και παράλληλες. Παρόλ' αυτά η μαθηματική περιγραφή της προηγούμενης ενότητας ισχύει και για πιο πολύπλοκες περιπτώσεις πόλωσης. Οι απαραίτητες προϋποθέσεις για συμβολή διαφέρουν για κάθε περίπτωση και περιγράφονται από τους νόμους Fresnel – Arago (δες Κεφ. 9.3 Hecht).

2.3 Συμβολόμετρα και εφαρμογές

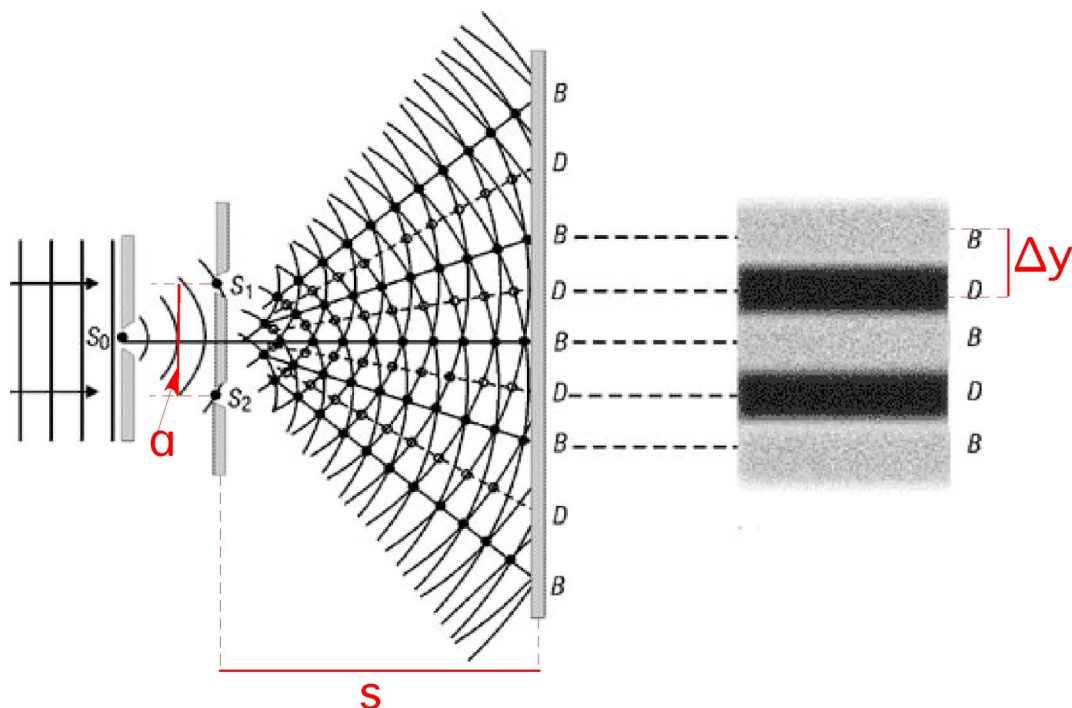
Τα συμβολόμετρα είναι οπτικές συσκευές στις οποίες μια αρχική ακτίνα χωρίζεται σε δυο μέρη. Αυτά διανύουν διαφορετικά μονοπάτια και ενώνονται για να σχηματίσουν κροσσούς συμβολής. Χρησιμοποιούνται για την μέτρηση μεγεθών όπως :

- Τραχύτητα
- Επιπεδότητα / σχήμα
- Βάθος
- Όγκος
- Μήκος
- Μετατόπιση.

Βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας για τη μέτρηση και επιθεώρηση κατά την κατασκευή αντικειμένων όπως:

- Οπτικά (καθρέφτες, πρίσματα, σφαίρες)
- Ημιαγωγούς (MEMS, NEMS, δίσκους πυριτίου)
- Προϊόντα αποθήκευσης δεδομένων (κεφαλές σκληρών δίσκων, δίσκοι)
- Τρόφιμα (σοκολάτες, δημητριακά)
- Φάρμακα (ταμπλέτες, χάπια)
- Μηχανικά μέρη ακριβείας (πτερύγια αεροπλάνων, έδρανα αέρα, ψεκαστήρες καύσιμου).

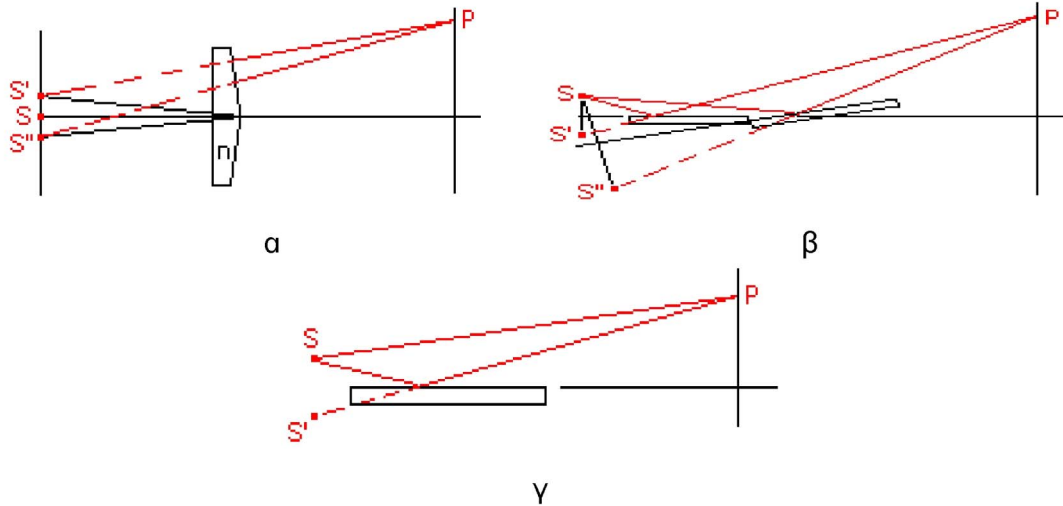
Η ακρίβεια τους είναι κλάσμα του μήκους κύματος της φωτεινής πηγής που χρησιμοποιείται. Υπάρχουν πολλές οπτικές συσκευές οι οποίες προκαλούν συμβολή και θα διαχωριστούν σε συμβολόμετρα διαίρεσης μετώπου (wavefront splitting), βλ. Σχήμα 2-4, και διαίρεσης πλάτους (amplitude splitting), βλ. Σχήμα 2-6. Στην πρώτη περίπτωση, ποσότητες του αρχικού κύματος χρησιμοποιούνται ως πηγές εκπομπής δευτερευόντων κυμάτων είτε άμεσα, είτε σε συνδυασμό με οπτικές συσκευές (ανακλαστικοί φακοί, διαχωριστές κ.α.) όπου παράγουν εικονικές πηγές. Στη συνέχεια, οι δευτερεύουσες πηγές ενώνονται εκ νέου για να δημιουργήσουν συμβολή. Στη δεύτερη περίπτωση, το πρωταρχικό κύμα φως διαχωρίζεται, με οπτικές συσκευές, σε δύο μέρη τα οποία ακολουθούν διαφορετικό δρόμο και στη συνέχεια ενώνονται και συμβάλλουν.



Σχήμα 2-4. Το πείραμα του Young με τη διπλή σχισμή αποτελεί το πρώτο συμβολόμετρο διαίρεσης μετώπου. Στο δεξί άκρο φαίνονται οι κροσσοί που δημιουργούνται.

2.3.1 Συμβολόμετρα διαίρεσης μετώπου

Τα πιο γνωστά συμβολόμετρα διαίρεσης μετώπου είναι το πείραμα του Young, Σχήμα 2-4, ο διπλός καθρέφτης του Fresnel, Σχήμα 2-5α, το διπλό πρίσμα του Fresnel, Σχήμα 2-5β, και οι καθρέφτες του Lloyd, Σχήμα 2-5γ.



Σχήμα 2-5 (α) Διπλό πρίσμα Fresnel, (β) διπλοί καθρέφτες Fresnel και (γ) καθρέφτης Lloyd

Για όλες τις περιπτώσεις, ύστερα από πράξεις, αποδεικνύεται ότι ισχύει η

$$\Delta y = \frac{s}{a} \cdot \lambda \quad (2.16)$$

όπου Δy , βλ. Σχήμα 2-4, είναι η απόσταση μεταξύ κάθε φωτεινού και σκοτεινού κροσσού πάνω στην οθόνη, s , βλ. Σχήμα 2-4, είναι η απόσταση μεταξύ του διαχωριστή και της οθόνης όπου σχηματίζονται οι κροσσοί, a , βλ. Σχήμα 2-4, η κάθετη απόσταση μεταξύ των εικονικών πηγών και λ το μήκος κύματος της φωτεινής πηγής που χρησιμοποιείται.

Συνεπώς γνωρίζοντας τα Δy , s , a , μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος λ οποιασδήποτε φωτεινής πηγής. Αυτή είναι η κύρια εφαρμογή των παραπάνω συμβολόμετρων. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του καθρέφτη του Lloyd είναι ότι εισάγει μια αλλαγή 180° στην ανακλώμενη ακτίνα. Αποτέλεσμα της διαφοράς φάσης είναι ο σχηματισμός των κροσσών της συσκευής του Lloyd να είναι συμπληρωματικός του σχηματισμού της συσκευής του Young. Πιο συγκεκριμένα, στα φωτεινά σημεία της οθόνης του πρώτου εμφανίζονται σκοτεινά στη συσκευή του δεύτερου.

2.3.2 Συμβολόμετρα διαίρεσης πλάτους

Η αρχή λειτουργίας των συμβολόμετρων αυτής της κατηγορίας είναι ο διαχωρισμός της αρχικής ακτίνας φωτός σε δύο μέρη και η ένωση τους εκ νέου αφού έχουν διανύσει διαφορετικούς οπτικούς δρόμους. Έχοντας δυο ακτίνες από την ίδια πηγή πετυχαίνουμε σταθερή διαφορά φάσης με αποτέλεσμα να τηρείται η προϋπόθεση της συμφωνίας που είναι απαραίτητη για τη δημιουργία κροσσών. Μεταβάλλοντας τον οπτικό δρόμο της μιας εκ των δύο ακτίνων μπορούμε να μετράμε διάφορα μεγέθη. Υπάρχουν πολλοί τύποι συμβολόμετρων διαίρεσης πλάτους που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν αλλά και σε σύγχρονες εφαρμογές. Η αρχή λειτουργίας τους έγκειται στην παρεμβολή κάποιου αντικειμένου στη διαδρομή της μίας ακτίνας με αποτέλεσμα να αλλάζει ο οπτικός δρόμος και κατά συνέπεια οι κροσσοί, τους οποίους παρατηρούμε.

Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder ανήκει στην κατηγορία αυτή και αποτελείται από μια πηγή, έναν αισθητήρα, δύο διαχωριστές ακτίνων και δύο καθρέφτες. Έχει το μειονέκτημα της δυσκολίας στην ευθυγράμμιση λόγω των διαχωρισμένων οπτικών δρόμων αλλά βρίσκει πολλές εφαρμογές. Μια συνηθισμένη εφαρμογή του είναι η παρατήρηση της μεταβολής της πυκνότητας ροής αερίων σε εργαστηριακούς θαλάμους. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το συμβολόμετρο που τοποθετήθηκε στον πυρηνικό αντιδραστήρα Scylla IV για να την ανίχνευση του πλάσματος. Άλλοι τύποι συμβολόμετρων αυτής της κατηγορίας είναι το συμβολόμετρο Pohl και το συμβολόμετρο Sagnac. Μια εφαρμογή του τελευταίου είναι η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής με το περιστροφικό συμβολόμετρο Sagnac. Εξίσου σημαντική εφαρμογή είναι το γυροσκόπιο ring laser το οποίο βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του Sagnac και έχει αντικαταστήσει τα μηχανικά αδρανειακά συστήματα οδήγησης σε πλοία, πυραύλους και δορυφόρους.

Ίσως το πιο γνωστό συμβολόμετρο της κατηγορίας το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι το συμβολόμετρο Michelson, Σχήμα 2-6. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη μέτρηση μήκους με μεγάλη ακρίβεια. Σημαντικό πλεονέκτημα εκτός από την ακρίβειά του είναι ότι αποτελεί μέθοδο εξ αποστάσεως μέτρησης. Αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του θα γίνει στην παράγραφο που ακολουθεί.

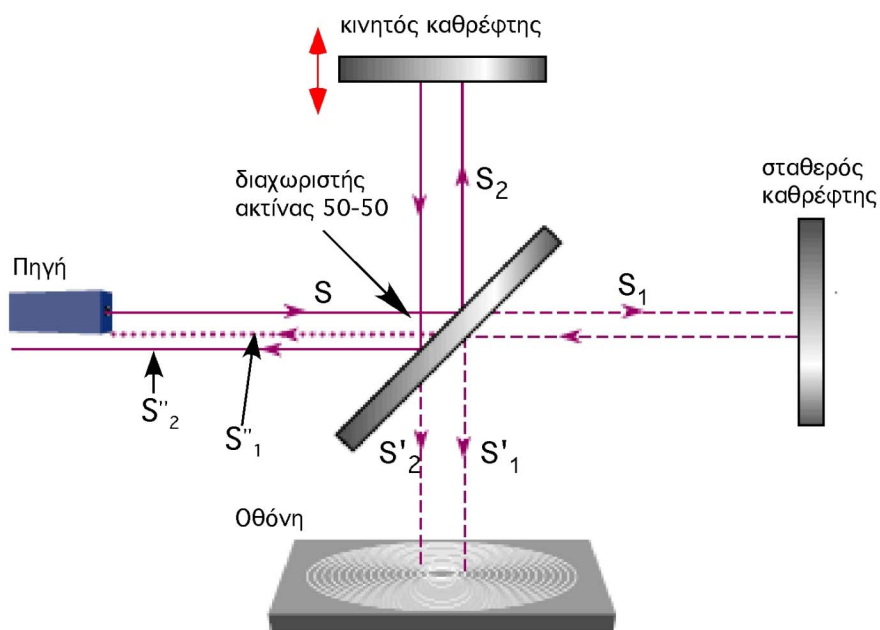
2.4 Συμβολόμετρο Michelson

Ένα από τα πιο γνωστά συμβολόμετρα κυρίως λόγω της ιστορικής του σημασίας. Συχνά αναφέρεται ως το πιο γνωστό αποτυχημένο πείραμα επειδή έδωσε το έναυσμα για τη διατύπωση της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας. Το 1881 χρησιμοποιήθηκε, αρχικά από τον Michelson και στη συνέχεια σε συνεργασία με τον Morley, για την απόδειξη της

ύπαρξης του αιθέρα. Αντί να εξάγουν συμπεράσματα για τις ιδιότητες του αιθέρα, μέσω της μέτρησης της ταχύτητας της Γης, κατέληξαν ότι η τελευταία κινείται με σχεδόν μηδενική ταχύτητα [17]. Παρόλο που έγιναν αρκετές προσπάθειες και από μεταγενέστερους φυσικούς, Kennedy, Illingworth και Miller, δεν αποδείχθηκε η ύπαρξη του αιθέρα. Εκτός από τα ενδιαφέροντα συμπεράσματα που προέκυψαν, μία εξίσου σημαντική συνεισφορά του πειράματος είναι η συσκευή του Michelson, Σχήμα 2-6, η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή στον τομέα της μετρολογίας.

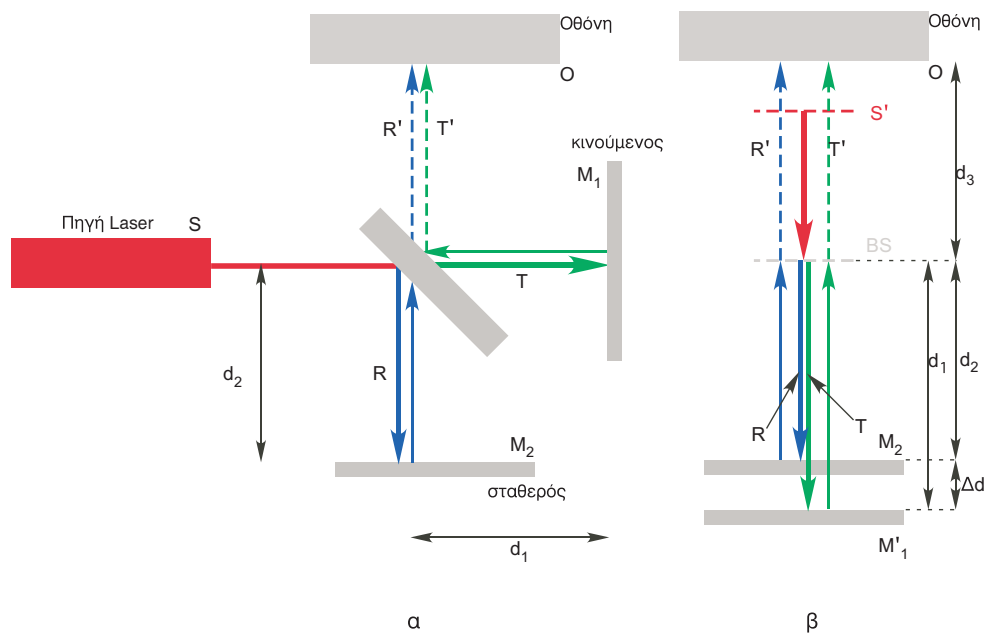
2.4.1 Αρχή λειτουργίας

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-6, από την πηγή εκπέμπεται μια ακτίνα φωτός S η οποία κινείται προς τα δεξιά. Στη συνέχεια προσκρούει σε διαχωριστή ακτίνας 50/50 (beam splitter) και χωρίζεται σε δύο μέρη, S_1 και S_2 , καθένα από τα οποία είναι το 50% της αρχικής, ως προς την ισχύ. Η νέα ακτίνα S_1 κινείται προς τα δεξιά στον σταθερό καθρέφτη και η S_2 κινείται προς τον κινητό καθρέφτη. Αφού οι S_1 και S_2 προσκρούσουν στους καθρέφτες ανακλώνται πλήρως και επιστρέφουν στον διαχωριστή. Ένα μέρος τους, S'_1 και S'_2 , επιστρέφει στην πηγή και το υπόλοιπο μισό, S''_1 και S''_2 , προσπίπτει στην οθόνη και συμβάλλει. Σύμφωνα με τη διαφορά φάσης που έχουν οι δυο ακτίνες, η οποία μεταβάλλεται από τον οπτικό δρόμο τον οποίο διανύουν, δημιουργείται και ο αντίστοιχος σχηματισμός κροσσών.



Σχήμα 2-6. Συμβολόμετρο Michelson.

Για την κατανόηση της επίδρασης του οπτικού δρόμου στο μοτίβο των κροσσών χρησιμοποιούμε το οπτικό γραμμικό ισοδύναμο ενός συμβολόμετρου Michelson, βλ. Σχήμα 2-7. Αντικαθιστούμε τον καθρέφτη M_1 με το είδωλό του M'_1 , το οποίο προκύπτει κοιτάζοντας μέσα στο διαχωριστή από το σημείο που βρίσκεται η πηγή laser στο Σχήμα 2-7α. Η πηγή S αντικαθίσταται με το είδωλο της S' , το οποίο προκύπτει κοιτάζοντας μέσα στο διαχωριστή από τη θέση του M_2 . Οι κροσσοί που σχηματίζονται στην οθόνη, Σχήμα 2-7β, προκύπτουν όταν η κύρια ακτίνα φωτός (κόκκινο χρώμα) που εκπέμπεται στο S' διασπάται στο σημείο του διαχωριστή BS και αντανακλάται στις επιφάνειες M_2 και M'_1 .



Σχήμα 2-7. (α) Σχηματική απεικόνιση απλού συμβολόμετρου Michelson, β) Οπτικό γραμμικό ισοδύναμο συμβολόμετρου Michelson.

Θεωρούμε την περίπτωση επίπεδων κυμάτων ίσου πλάτους,

$$E_{01} = E_{02} = E_0,$$

τα οποία συναντώνται στην Οθόνη Ο, όπως στο Σχήμα 2-7. Η ένταση των επίπεδων κυμάτων, στην περίπτωση αυτή, δίνεται από τη σχέση

$$E_1 = E_0 \cos(k \cdot r_1 - \omega t + \varepsilon_1) \tag{2.17},$$

$$E_2 = E_0 \cos(k \cdot r_2 - \omega t + \varepsilon_2)$$

όπου $r_i, i = (1,2)$ είναι ο οπτικός δρόμος που διανύει κάθε ακτίνα μέχρι να συμβάλει στην οθόνη. Άρα αν θεωρήσουμε ως E_1 την ένταση της μεταδιδόμενης ακτίνας

Τ και E_2 την ένταση της ανακλώμενης R τότε οι οπτικοί δρόμοι γίνονται, σύμφωνα με το Σχήμα 2-7β,

$$r_1 = 2d_1 + d_3 + (S'BS) \quad (2.18)$$

$$r_2 = 2d_2 + d_3 + (S'BS)$$

Επειδή οι δύο ακτίνες που χρησιμοποιούμε εκπέμπονται από την ίδια πηγή δεν έχουν αρχική διαφορά φάσης, δηλαδή

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0.$$

Επίσης έχοντας θεωρήσει ότι το πλάτος των δύο κυμάτων είναι ίσο, οι δύο πηγές συνεισφέρουν εξίσου στη συνολική ακτινοβολία,

$$I_1 = I_2 = I_0.$$

Εργαζόμενοι όπως και στην Εξ. (2.13) και χρησιμοποιώντας την Εξ. (2.15), που μας δίνει την ακτινοβολία για την περίπτωση μας έχουμε,

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2.19)$$

όπου

$$\delta = k(r_1 - r_2)$$

Από την Εξ. (2.18) και το Σχήμα 2-7, καταλήγουμε ύστερα από πράξεις στη σχέση

$$\delta = k \cdot 2\Delta d \quad (2.20)$$

Για να έχουμε μέγιστη ακτινοβολία, που αντιστοιχεί σε φωτεινό κροσσό, θα πρέπει ο όρος δ , τη στιγμή που συμβάλλουν οι ακτίνες, να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, βλ. Σχήμα 2-3. Δηλαδή,

$$\delta = 2\pi m \Leftrightarrow 2\Delta d = \lambda m \quad (2.21)$$

το οποίο σημαίνει ότι η διαφορά οπτικού δρόμου, $2\Delta d$, πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος. Αντίστοιχα, για να έχουμε ελάχιστη ακτινοβολία, που αντιστοιχεί σε σκοτεινό κροσσό, θα πρέπει

$$\delta = \pi(2m + 1) \Leftrightarrow 2\Delta d = \lambda(m + \frac{1}{2}) \quad (2.22)$$

όπου $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Αφαιρώντας την Εξ. (2.21) από την Εξ. (2.22) βρίσκουμε ότι

$$2\Delta d = \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \Delta d = \frac{\lambda}{4} \quad (2.23)$$

που σημαίνει ότι για να αντικατασταθεί ένας σκοτεινός από τον διπλανό φωτεινό κροσσό και αντίστροφα, θα πρέπει ο οπτικός δρόμος να μεταβληθεί κατά $\lambda / 2$. Η αλλιώς

να μετατοπιστεί ο κινούμενος καθρέφτης, M_1 $\lambda/4$. Επομένως, η συνολική μετατόπιση βρίσκεται από το σύνολο των κροσσών από τη σχέση

$$d = N \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (2.24)$$

όπου N είναι ο αριθμός των κροσσών που διασχίζουν ένα σταθερό σημείο στην οθόνη συμβολής.

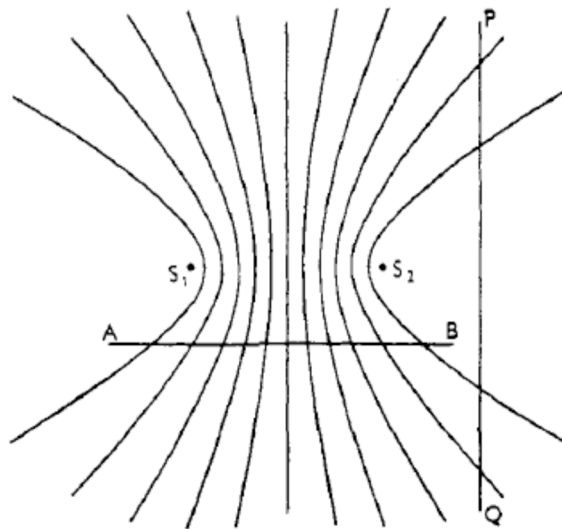
2.4.2 Τύποι κροσσών συμβολής

Είναι μεγάλης σημασίας να γνωρίζουμε το σημείο όπου θα γίνεται εμφανής η συμβολή ώστε να τοποθετήσουμε κατάλληλα τον αισθητήρα ή την οθόνη. Το σημείο εντοπισμού της συμβολής είναι μοναδικό για την κάθε οπτική διάταξη.

Οι τύποι κροσσών συμβολής εξαρτώνται από την εκάστοτε οπτική διάταξη, τις ρυθμίσεις της και τον τύπο της πηγής που χρησιμοποιείται. Θα μπορούσαμε χάρin ευκολίας να τους κατατάξουμε σε εικονικούς και πραγματικούς και σε εντοπισμένους (localized) ή μη εντοπισμένους (nonlocalized). Πραγματικοί ονομάζονται οι κροσσοί που δημιουργούνται από ακτίνες οι οποίες συγκλίνουν στο σημείο που παρατηρείται η συμβολή χωρίς τη χρήση κάποιου μέσου εστίασης. Εικονικοί είναι οι κροσσοί των οποίων ο εντοπισμός απαιτεί χρήση μέσου εστίασης όπως κάποιο φακό. Αυτό γίνεται διότι οι ακτίνες που δημιουργούν τη συμβολή δεν συγκλίνουν μόνες τους.

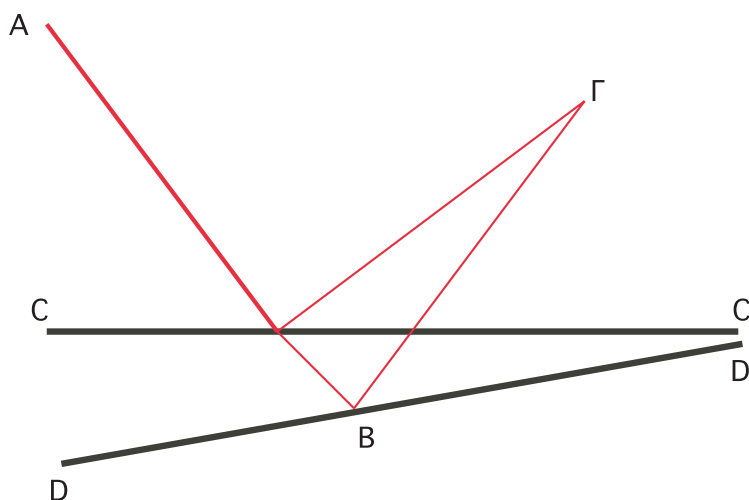
Οι μη εντοπισμένοι κροσσοί είναι πραγματικοί και εκτείνονται στον τρισδιάστατο χώρο. Ονομάζονται έτσι διότι δεν εντοπίζονται μόνο σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια αλλά σε όλο το χώρο. Στο παρατηρούμε ότι ο σχηματισμός των κυμάτων που προκύπτουν από τις δύο πηγές, S_1 και S_2 , αποτελούν τα υπερβολοειδή που δημιουργούνται περιστρέφοντας το σχηματισμό των κυμάτων γύρω από τον άξονα που συνδέει τις δυο πηγές, βλ Σχήμα 2-8.

Αν τοποθετήσουμε μια οθόνη στην ευθεία AB τότε παίρνουμε ένα συνδυασμό ευθειών και καμπυλωτών κροσσών. Αν τοποθετήσουμε την οθόνη στην ημιευθεία PQ οι κροσσοί που σχηματίζονται είναι κυκλικοί λόγω της τομής με τα υπερβολοειδή. Παρατηρούμε ότι δύο πηγές οι οποίες συμβάλλουν και βρίσκονται σε ευθεία οπτικής επαφής σχηματίζουν κυκλικούς κροσσούς. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ της οθόνης και της θέσης των πηγών μεγαλώνουν και οι κροσσοί.



Σχήμα 2-8. Υπερβολοειδή που σχηματίζονται από δύο διαταραχές S_1, S_2 .

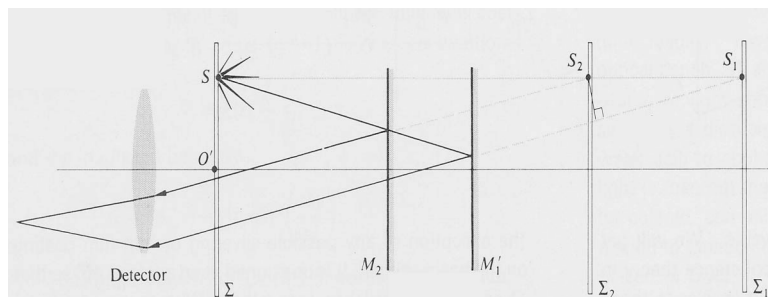
Αντιθέτως, οι εντοπισμένοι κροσσοί είναι πλήρως παρατηρήσιμοι πάνω σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια ή στο άπειρο. Οι κροσσοί που είναι εντοπισμένοι σε συγκεκριμένη επιφάνεια μπορεί να είναι πραγματικοί είτε εικονικοί. Στο Σχήμα 2-9 παρατηρούμε μια ακτίνα να προσπίπτει σε ένα πρίσμα που σχηματίζεται από τις πλευρές CC' και DD' . Ένα μέρος της αντανακλάται στην πάνω επιφάνεια και το υπόλοιπο διαδίδεται αρχικά και στη συνέχεια αντανακλάται στην κάτω επιφάνεια. Οι δύο νέες ακτίνες συναντώνται εκ νέου στο σημείο Γ όπου και συμβάλλουν. Οι κροσσοί που δημιουργούνται σε αυτή την περίπτωση είναι πραγματικοί και εντοπισμένοι στο σημείο Γ γιατί οι ακτίνες συμβάλλουν χωρίς τη χρήση φακού.



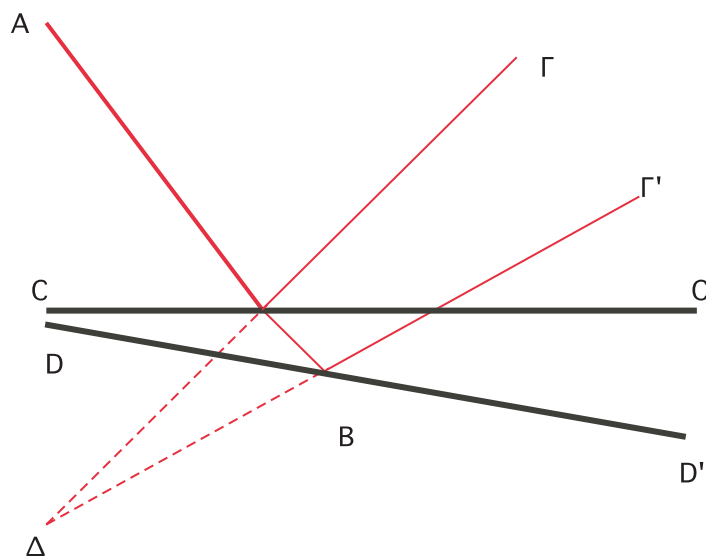
Σχήμα 2-9. Δημιουργία πραγματικών εντοπισμένων κροσσών στο σημείο Γ ύστερα από αντανάκλαση στις δύο επιφάνειες που σχηματίζουν σφηνοειδή μορφή.

Μία περίπτωση είναι αυτή των εντοπισμένων κροσσών στο άπειρο, όπου οι ακτίνες δεν συγκλίνουν λόγω παραλληλίας. Στο Σχήμα 2-10 παρουσιάζεται το γραμμικό ισοδύναμο ενός συμβολόμετρου στο οποίο έχουμε δημιουργία τέτοιου τύπου κροσσών. Αυτοί είναι εικονικοί γιατί χρειάζεται συγκεντρωτικός φακός για να φανούν και ονομάζονται κροσσοί ίσης κλίσης ή κροσσοί Haidinger [10].

Για να έχουμε εικονικούς εντοπισμένους, σε συγκεκριμένο σημείο ή επιφάνεια, κροσσούς θα πρέπει οι ακτίνες να αποκλίνουν. Στο Σχήμα 2-11 η κάτω επιφάνεια του πρίσματος έχει αντίθετη κλίση. Ακολουθείται το ίδιο φαινόμενο με την προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά ότι λόγω της αντανάκλασης στην κάτω επιφάνεια η ακτίνα Γ αποκλίνει με αποτέλεσμα να μην συμβάλλει με την ακτίνα Γ' και έχουμε εικονικό κροσσό εντοπισμένο στο σημείο Δ. Επομένως για να μπορέσουμε να δούμε τη συμβολή θα πρέπει να κάνουμε χρήση συγκεντρωτικού φακού.

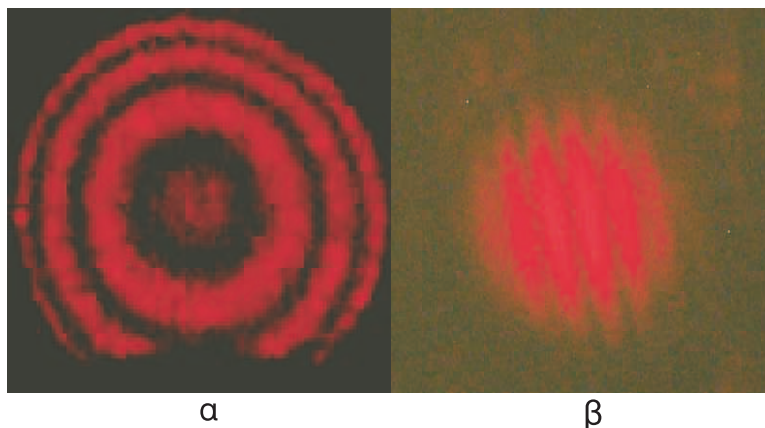


Σχήμα 2-10. Δημιουργία κροσσών Haidinger από την αντανάκλαση της πηγής S στους καθρέφτες M_2 και M'_1 .



Σχήμα 2-11. Δημιουργία εικονικών εντοπισμένων κροσσών στο σημείο Δ ύστερα από αντανάκλαση στις δύο επιφάνειες που σχηματίζουν σφηνοειδή μορφή.

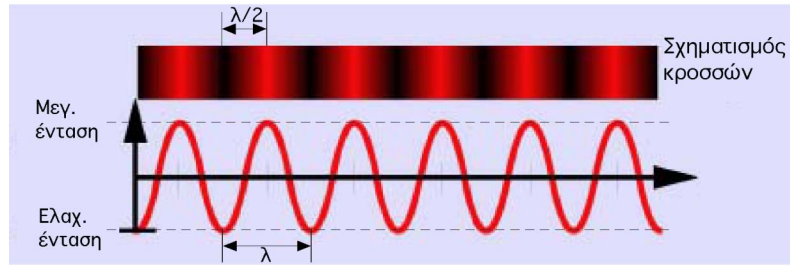
Στην περίπτωση του απλού συμβολόμετρου Michelson που μελετάμε διακρίνουμε δύο τύπους κροσσών αναλόγως της γωνίας που σχηματίζουν οι καθρέφτες M_1 και M_2 , Σχήμα 2-7. Όταν αυτοί είναι παράλληλοι τότε σχηματίζονται εικονικοί κυκλικοί κροσσοί ίσης κλίσης (κροσσοί Haidinger), βλ. Σχήμα 2-12α. Ενώ όταν έχουν μεταξύ τους μια μικρή γωνία, δημιουργούνται πραγματικοί παράλληλοι κροσσοί οι οποίοι ονομάζονται κροσσοί Fizeau, Σχήμα 2-12β.



Σχήμα 2-12. (α) Κυκλικοί κροσσοί ίσης κλίσης (κροσσοί Haidinger) που δημιουργούνται από παράλληλους καθρέφτες, (β) παράλληλοι κροσσοί που δημιουργούνται από καθρέφτες υπό κλίση.

2.5 Αισθητήρες καταμέτρησης κροσσών

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκε η αρχή λειτουργίας των συμβολόμετρων και ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι κροσσοί συμβολής. Για να μπορέσουμε να ερμηνεύσουμε τους κροσσούς σε μετατόπιση θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο είδος ανιχνευτή. Σκοπός κάθε φωτοανιχνευτή είναι να μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα. Για παράδειγμα στην περίπτωση μια απλής φωτοδιόδου, τοποθετείται σε ένα σταθερό σημείο πάνω στην επιφάνεια που εντοπίζονται οι κροσσοί και μετρούμε τους φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς που περνάνε πάνω της μέσω της εναλλαγής της ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, το σταθερό σημείο θα μπορούσε να είναι εκεί που έχουμε φωτεινό κροσσό, Σχήμα 2-13. Γνωρίζοντας από τη θεωρία ότι μέχρι τον επόμενο σκοτεινό κροσσό είναι μεταβολή $\lambda/2$ του οπτικού δρόμου μπορούμε να μετρήσουμε τη μετατόπιση του κινούμενου καθρέφτη.



Σχήμα 2-13. Αντιστοιχία συνισταμένης ακτινοβολίας με τους κροσσούς που σχηματίζονται.

Αναφορικά, οι συνήθεις ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται σε συμβολόμετρα είναι:

- φωτοπολλαπλασιαστές
- φωτοδίοδοι
- διατάξεις αισθητήρων σύζευξης φορτίου(CCD)
- φωτοαγωγιμοί
- πυροηλεκτρικοί.

2.5.1 Φωτοπολλαπλασιαστές

Σε ένα φωτοπολλαπλασιαστή, η ακτίνα φωτός προσπίπτει στην κάθοδο σε μια γυάλινη λυχνία κενού η οποία περιέχει ένα σύνολο ηλεκτροδίων. Τα παραπάνω ηλεκτρόδια βρίσκονται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου και το καθένα βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό από το προηγούμενό του. Όταν εκπέμπονται ηλεκτρόνια από την κάθοδο, λόγω της πρόσπτωσης φωτός, κατευθύνονται στο πρώτο ηλεκτρόδιο όπου παράγονται πολύ περισσότερα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μεταξύ των διαδοχικών ηλεκτροδίων μέχρι τα ηλεκτρόνια να φτάσουν στην άνοδο. Συνήθως η πτώση τάσης μεταξύ ανόδου και καθόδου φτάνει από μερικές εκατοντάδες V έως μερικά kV και το συνολικό κέρδος φτάνει έως και 10^8 . Η απόκριση συχνότητας ενός φωτοπολλαπλασιαστή περιορίζεται από το χρόνο διάδοσης των ηλεκτρονίων. Είναι πολύ ευαίσθητοι στις υπεριώδεις και ορατές ακτίνες αλλά δεν συμβαίνει το ίδιο με την υπέρυθρη περιοχή. Για τη καλή λειτουργία τους απαιτούν 1000 με 2000 V.

2.5.2 Φωτοαγωγιμοί ανιχνευτές

Αισθητήρες τέτοιου τύπου κατασκευάζονται από υλικά όπως HgCdTe και χρησιμοποιούνται κυρίως για υπέρυθρες ακτίνες. Η απορρόφηση υπέρυθρων φωτονίων παράγει φορείς ελεύθερων φορτίων οι οποίοι αλλάζουν τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Ένας συνηθισμένος ανιχνευτής αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα HgCdTe με μεταλλικές επαφές. Η φασματική απόκριση εξαρτάται από το ενεργειακό κενό μεταξύ

ζώνης σθένους και αγωγιμότητας, η οποία ελέγχεται από το λόγο HgTe προς CdTe στο υλικό. Το εύρος μηκών κύματος που καλύπτουν είναι από 2 μm έως 20 μm.

2.5.3 Πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές

Χρησιμοποιούν φεροηλεκτρικό υλικό, όπως ζirkονικό μόλυβδο, ή πλαστικό, όπως πολυφθοριούχο βινυλιδένιο, τα οποία είναι ηλεκτρικά πολωμένα. Αν το υλικό τοποθετηθεί μεταξύ δύο ηλεκτροδίων τότε οποιαδήποτε αλλαγή στη θερμοκρασία του εξαιτίας της απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας δημιουργεί ένα ρεύμα το οποίο διαρρέει κάποιο ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι ευαίσθητοι σε όλη την υπέρυθρη περιοχή αλλά ανταποκρίνονται σε αλλαγές ακτινοβολίας.

2.5.4 Διατάξεις αισθητήρων σύζευξης φορτίου(CCD)

Μια συσκευή σύζευξης φορτίου είναι ένας αναλογικός καταχωρητής ολίσθησης ο οποίος επιτρέπει τα αναλογικά σήματα (ηλεκτρικά φορτία) να μεταφέρονται μεταξύ διαδοχικών επιπέδων (πυκνωτές) υπό τον έλεγχο παλμού χρονισμού. Με τον όρο αισθητήρας σύζευξης φορτίου έχει επικρατήσει, λανθασμένα, να λέμε τις διατάξεις εκείνες που έχουν αισθητήρες φωτός το σήμα των οποίων μεταφέρεται με την τεχνολογία CCD. Τους διακρίνουμε σε:

- γραμμικούς
- επιφανείας
- μεταφοράς πλαισίου.

Γραμμικοί αισθητήρες σύζευξης φορτίου

Αποτελούνται από μια γραμμική διάταξη φωτοανιχνευτών και μια αντίστοιχη διάταξη αναλογικών καταχωρητών σύζευξης φορτίου οι οποίοι χωρίζονται με ένα ηλεκτρόδιο που ονομάζεται πύλη μεταφοράς. Οι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες οι οποίες μεταφέρονται στους αντίστοιχους καταχωρητές κατά τη διάρκεια ενός ορισμένου κύκλου. Από εκεί οι πληροφορίες μεταφέρονται στην έξοδο και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για την επόμενη χρονική περίοδο.

Αισθητήρες σύζευξης φορτίου επιφανείας

Σε αυτή την περίπτωση τα φορτία αποθηκεύονται στα σε κάθε στήλη του φωτοανιχνευτή και στο τέλος κάθε χρονικής περιόδου μεταφέρονται στις διπλανές στήλες των καταχωρητών. Το περιεχόμενο των τελευταίων μεταφέρεται στον οριζόντιο καταχωρητή,

ανά πακέτο. Κάθε μεταφορά από τους κάθετους στον οριζόντιο καταχωρητή οδηγείται στην έξοδο για να δημιουργήσει ένα σήμα βίντεο.

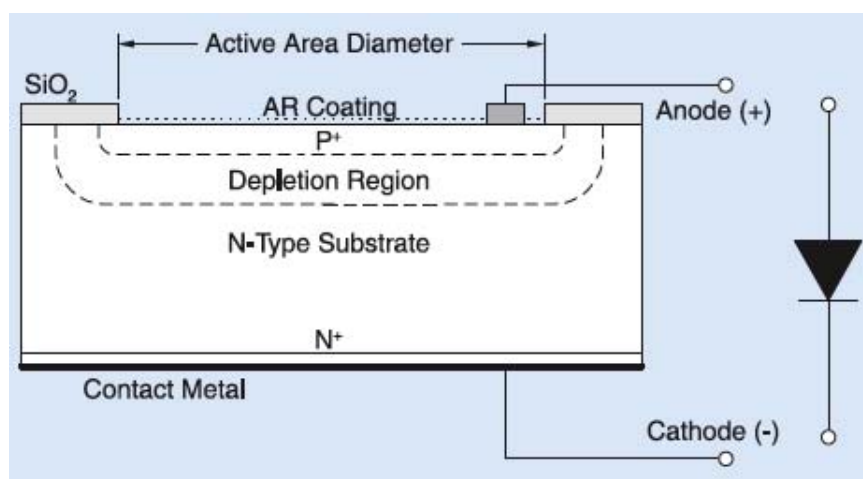
Αισθητήρες σύζευξης φορτίου μεταφοράς πλαισίου

Στην αρχιτεκτονική του τύπου μεταφοράς πλαισίου η περιοχή της διάταξης χωρίζεται σε δύο μέρη. Η μια είναι η περιοχή του αισθητήρα, στην προσπίπτει το φως και η άλλη είναι η περιοχή αποθήκευσης. Στο τέλος κάθε χρονικής περιόδου τα φορτία μεταφέρονται από κάθε στήλη της πρώτης περιοχής στην αντίστοιχη της δεύτερης. Κατά την επόμενη περίοδο τα δεδομένα που βρίσκονται στην περιοχή αποθήκευσης μεταφέρονται στην έξοδο.

2.5.5 Φωτοдиодος

Το μικρό μέγεθος, το μεγάλο εύρος εφαρμογών και η δυνατότητα παραγωγής μεγάλου όγκου με μικρό κόστος έχουν κάνει τις φωτοδιόδους το πιο διαδεδομένο είδος φωτοανιχνευτή.

Κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά όπως πυρίτιο (Si), Σχήμα 2-14, αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), αντιμονιούχο ίνδιο (InSb), αρσένιο του ινδίου (InAs), σεληνιούχο μόλυβδο (PbSe) και θειούχο μόλυβδο (PbS). Κάθε ένα από τα παραπάνω υλικά απορροφά φως σε ένα συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος. Για παράδειγμα, το πυρίτιο από 250-1100 nm και το αρσενικούχο γάλλιο από 800 nm έως 2μm.



Σχήμα 2-14. Σχηματική αναπαράσταση φωτοδιόδου.

Όταν απορροφάται ένα φωτόνιο διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο και παράγει ένα ζεύγος φορέων φορτίου. Το ζεύγος αποτελείται από ηλεκτρόνιο και μια οπή, η οποία είναι η απουσία ηλεκτρονίου στο πλέγμα του ημιαγωγού. Το ρεύμα διαρρέει ένα ημιαγωγό όταν

τα ζεύγη διασπώνται και μετακινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Εκείνο που έχει μεγάλη σημασία είναι να συλληχθούν τα διασπασμένα ζεύγη, στα άκρα της φωτοδιόδου με τη μορφή ρεύματος ή τάσης, πριν επανενωθούν. Αυτό επιτυγχάνεται με τις δομές p-n και p-i-n που θα περιγραφούν παρακάτω.

Λειτουργία φωτοδιόδου τύπου p-n

Ένα στρώμα ημιαγωγού τύπου n, το οποίο έχει περίσσεια ηλεκτρονίων, ενώνεται με ένα στρώμα τύπου p, το οποίο έχει περίσσεια οπών ή αλλιώς έλλειψη ηλεκτρονίων. Το στρώμα n θεωρείται η κάθοδος ενώ το στρώμα p είναι η άνοδος της διόδου. Η παραπάνω ανισότητα δημιουργεί, στο σημείο ένωσης των δύο στρωμάτων (p-n junction), κλίση συγκεντρώσεων (concentration gradient) η οποία ωθεί τα ηλεκτρόνια να διαχυθούν στο p στρώμα και τις οπές στο n στρώμα. Η διάχυση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών της φωτοδιόδου το οποίο ονομάζεται εσωτερική πόλωση (internal bias). Το δυναμικό αυτό ασκεί μια ηλεκτρική δύναμη στα ζεύγη φορέων φορτίου, όταν βρεθούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή γύρω από το σημείο ένωσης των στρωμάτων (p-n junction). Η παραπάνω δύναμη ωθεί ταχύτατα τα ηλεκτρόνια στην p περιοχή και τις οπές στην n περιοχή. Επειδή τα ζεύγη δεν μπορούν να παραμείνουν στην παραπάνω περιοχή ονομάζεται περιοχή μετάβασης ή ζώνη διέλευσης (depletion region).

Σε μια τυπική p-n φωτοδίοδο, το φως εισέρχεται από το στρώμα p. Λόγω της απορρόφησης, η ένταση του φωτός μειώνεται εκθετικά με το βάθος διείσδυσης. Όταν φωτόνια απορροφώνται στην περιοχή μετάβασης, παράγουν μεταφορείς οι οποίοι διασπώνται άμεσα και οδηγούνται στο αντίστοιχο στρώμα από την εσωτερική πόλωση. Όσοι μεταφορείς παράγονται εκτός, κινούνται τυχαία και μερικοί από αυτούς εισέρχονται στην περιοχή μετάβασης και διαχωρίζονται. Οι υπόλοιποι επανενώνονται και εξαφανίζονται χωρίς να περάσουν τη ζώνη διέλευσης. Η κίνηση των ηλεκτρονίων διαμέσου της ένωσης των δύο στρωμάτων διαταράσσει την ηλεκτρική ισορροπία και παράγει φωτόρρευμα μεταξύ των ηλεκτροδίων της φωτοδιόδου.

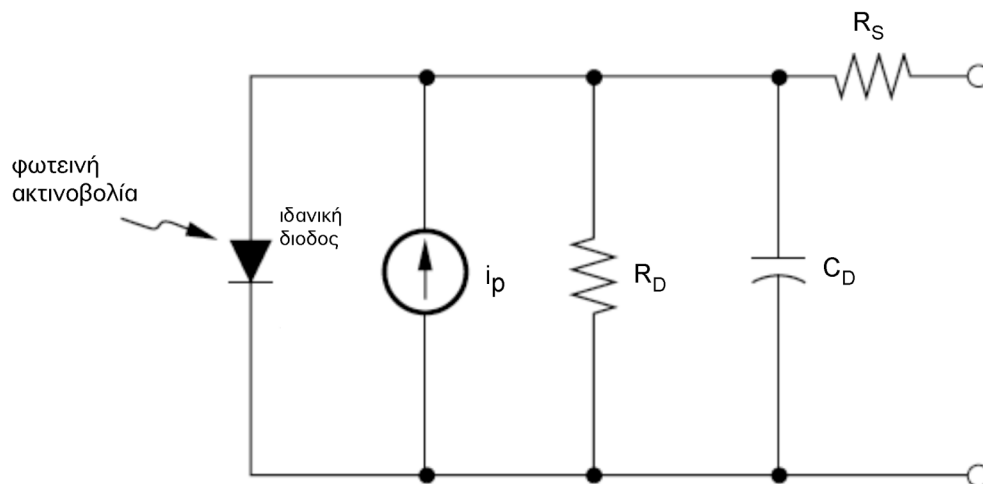
Σε πολλές εφαρμογές θέλουμε να έχουμε ταχύτερη απόκριση, το οποίο επιτυγχάνεται όταν οι περισσότεροι μεταφορείς δημιουργούνται μέσα στη ζώνη διέλευσης. Επίσης καλύτερη κβαντική απόδοση επιτυγχάνεται στην παραπάνω περίπτωση. Η κβαντική απόδοση ορίζεται ως η αποτελεσματικότητα μετατροπής των φωτονίων που προσπίπτουν σε μια φωτοδίοδο σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω αρκεί να διευρυνθεί η περιοχή μετάβασης. Αυτό γίνεται είτε μεταβάλλοντας τις προσμίξεις των στρωμάτων p-n είτε εφαρμόζοντας εξωτερική τάση στα άκρα της φωτοδιόδου. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται *κατάσταση πόλωσης* και διακρίνουμε τις περιπτώσεις της ορθής (forward biased) και της αντίστροφης πόλωσης (reverse biased). Επίσης υπάρχει η κατάσταση *μηδενικής πόλωσης* όπου δεν

έχουμε εφαρμόσει εξωτερική τάση στα άκρα της φωτοδιόδου (unbiased/zero biased) και χρησιμοποιείται περισσότερο σε περιπτώσεις μεγάλης φωτεινότητας και χαμηλού θορύβου. Σε επόμενη παράγραφο θα γίνει λεπτομερέστερη περιγραφή των καταστάσεων λειτουργίας.

Ισοδύναμο μοντέλο φωτοδιόδου

Στο Σχήμα 2-15 φαίνεται το μοντέλο της φωτοδιόδου. Αποτελείται από μια ιδανική φωτοδίοδο και μια πηγή ρεύματος i_p η οποία αντιπροσωπεύει το σήμα λόγω φωτεινής ακτινοβολίας και την τάση της διόδου στην περίπτωση ορθής πόλωσης. Μια παράλληλη αντίσταση διακλάδωσης R_D η οποία αντιπροσωπεύει την αντίσταση της διόδου σε μηδενική πόλωση και μια εν σειρά αντίσταση R_S η οποία μοντελοποιεί την αντίσταση του ημιαγωγικού υλικού.



Σχήμα 2-15. Μοντελοποίηση φωτοδιόδου με ηλεκτρικά στοιχεία.

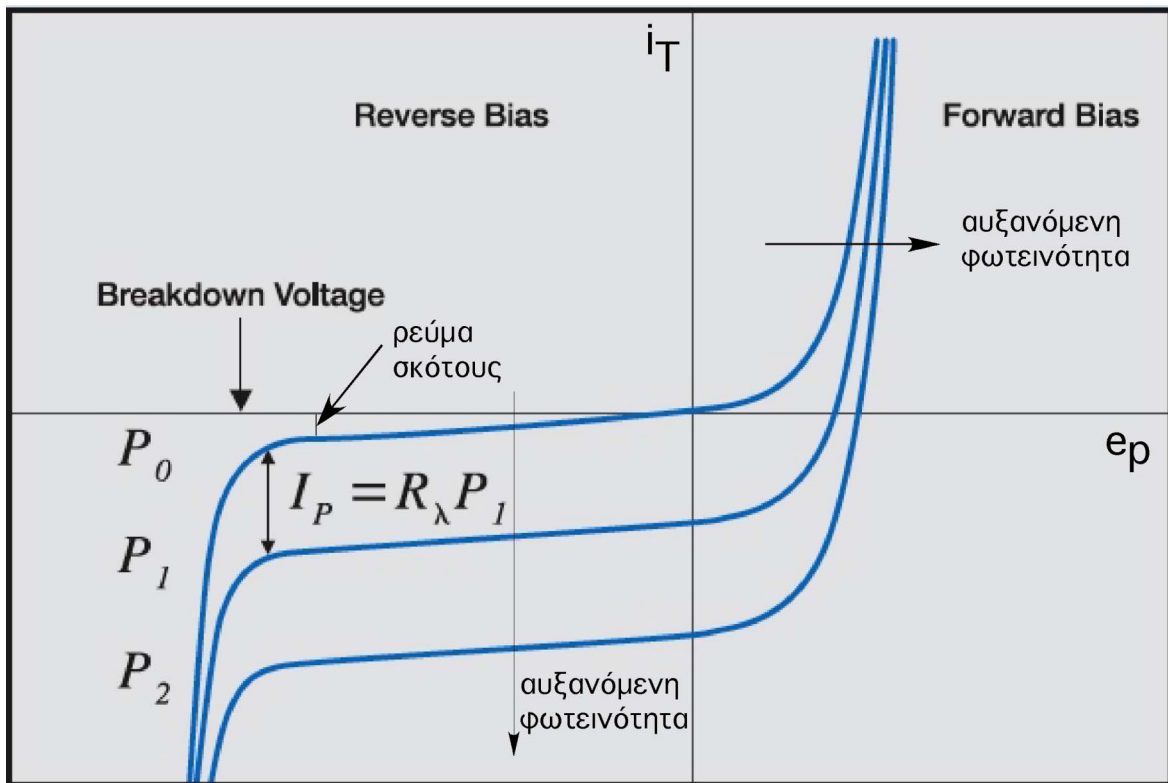
Τέλος, μια χωρητικότητα C_D η οποία αντιπροσωπεύει το αποθηκευμένο φορτίο και μεταβάλλεται με την ενεργή επιφάνεια της φωτοδιόδου και την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα της. Πλάκες του πυκνωτή C_D θεωρούνται τα άκρα της περιοχής μετάβασης. Μεγαλύτερη ενεργή επιφάνεια σημαίνει μεγαλύτερες πλάκες πυκνωτή και συνεπώς περισσότερο αποθηκευμένο φορτίο και μεγαλύτερη τιμή για τη χωρητικότητα C_D . Εφαρμόζοντας αντίστροφη πόλωση στη φωτοδίοδο, αυξάνεται το πλάτος της περιοχής μετάβασης, το οποίο ισοδυναμεί με την απόσταση των πλακών του πυκνωτή με αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή της C_D . Το παραπάνω φαινόμενο περιγράφεται από τη σχέση

$$C_D = \frac{C_{D0}}{\sqrt{1 + V_R / \phi_B}} \quad (2.25)$$

όπου C_{D0} είναι η χωρητικότητα χωρίς εφαρμογή πόλωσης V_R η εφαρμοζόμενη τάση και ϕ_B είναι η εσωτερική τάση του αγωγού.

Για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης-ρεύματος μιας φωτοδιόδου, Σχήμα 2-16, χρησιμοποιείται μια απλουστευμένη μορφή του παραπάνω μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα δεν λαμβάνονται υπόψη οι δύο αντιστάσεις οι οποίες δεν έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη συνολική λειτουργία. Επίσης παραλείπεται η χωρητικότητα C_D λόγω της μικρής συχνότητας στην οποία λαμβάνονται οι μετρήσεις. Για την αξιολόγηση της αποδοτικότητάς, θα πρέπει να διακρίνουμε το ρεύμα που μετράται στα άκρα της φωτοδιόδου από εκείνο που παράγεται λόγω φωτός. Εφαρμόζοντας μια τάση e_p προκύπτει το μετρούμενο ρεύμα i_T το οποίο είναι ίσο με τη διαφορά του ρεύματος i_d που διαρρέει τη δίοδο από το ρεύμα i_p που παράγεται λόγω φωτός.

$$i_T = i_d - i_p \quad (2.26)$$



Σχήμα 2-16. Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος φωτοδιόδου.

Στο Σχήμα 2-16 απεικονίζονται οι καμπύλες τάσης-ρεύματος μιας τυπικής φωτοδιόδου για μηδενική φωτεινότητα, καμπύλη P_0 , και για διάφορες φωτεινότητες $P_1 < P_2$. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι αρνητική, τεταρτημόρια 2-3, έχουμε αντίστροφη πόλωση και το μετρούμενο ρεύμα είναι αρνητικό και ίσο με το ρεύμα που παράγεται λόγω φωτεινής ακτινοβολίας $i_T = -i_p$ σύμφωνα με την Εξ.(2.26). Στην περίπτωση μηδενικής

ακτινοβολίας P_0 , η τιμή του ρεύματος ισούται με το λεγόμενο *ρεύμα σκότους* (dark current). Καθώς αυξάνεται η φωτεινότητα, το ρεύμα αυξάνεται γραμμικά. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών αντικατοπτρίζει το κέρδος που προκύπτει από την ακτινοβολία και τον παράγοντα απόκρισης (responsivity) της φωτοδιόδου

$$R = \frac{i_p}{P} \quad (2.27)$$

Επίσης, στην ίδια περιοχή, παρατηρούμε από την κλίση μίας από τις καμπύλες ότι καθώς μετακινούμαστε σε πιο αρνητικές τιμές τάσης, ο παράγοντας απόκρισης μεγαλώνει. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της περιοχής μετάβασης στο εσωτερικό του ημιαγωγού με την αύξηση της αντίστροφης πόλωσης. Η παραπάνω περιοχή αντιπροσωπεύει τη *φωτοαγωγή λειτουργία* της φωτοδιόδου στην οποία έχουμε ως έξοδο το ρεύμα. Επίσης παρατηρούμε ότι η αρνητική τάση τροφοδοσίας έχει κάποιο όριο το οποίο ονομάζεται τάση κατάρρευσης (breakdown voltage). Χρησιμοποιούμε τον συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας όταν θέλουμε να μειώσουμε το χρόνο ανύψωσης και το θόρυβο.

Στη περίπτωση που έχουμε θετική εφαρμοζόμενη τάση, η διόδος στο μοντέλο διαρρέεται από ρεύμα και επηρεάζει την τιμή του i_T το οποίο αυξάνεται όπως φαίνεται και στην Εξ.(2.26). Η περιοχή αυτή, πρώτο τεταρτημόριο, ονομάζεται *φωτοβολταϊκή λειτουργία* και έχουμε ως έξοδο τάση. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, οι αποστάσεις μεταξύ των καμπυλών δημιουργούνται από την αύξηση φωτεινότητας αλλά δεν αντικατοπτρίζουν μόνο την απόκριση λόγω φωτός. Προτιμάται όταν η εφαρμογή απαιτεί μικρές συχνότητες λειτουργίας και το επίπεδο φωτεινότητας είναι χαμηλό.

Στην φωτοβολταϊκή περιοχή λειτουργούν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες. Η διαφορά σε σχέση με τα παραπάνω είναι ότι το κύκλωμα δεν οδηγείται από μια τάση. Αντιθέτως, το ρεύμα που διαρρέει τη διόδο προέρχεται εξ'ολοκλήρου από το φωτόρευμα που παράγεται και η τάση e_p προκύπτει ως έξοδος από το κύκλωμα. Η τάση δίνεται από τη σχέση

$$e_p = V_t \ln \frac{i_p}{i_D} \quad (2.28)$$

όπου $V_t = KT / q$ είναι η θερμική τάση της ένωσης των στρωμάτων του ημιαγωγού και i_D είναι το ρεύμα σκότους ή αντίστροφου κορεσμού.

Θόρυβος

Σε μια φωτοδίοδο υπάρχουν δύο πηγές θορύβου, ο θόρυβος βολής (shot noise) και ο θερμικός, ή θόρυβος Johnson.

Ο πρώτος οφείλεται στη στατιστική διακύμανση του φωτορεύματος και του ρεύματος σκότους. Το πλάτος του θορύβου βολής εκφράζεται ως η ενεργός τιμή (rms) του ρεύματος θορύβου.

$$I_{sn} = \sqrt{2q(i_D + i_p)\Delta f} \quad (2.29)$$

όπου $q=1.6 \times 10^{-19}$ C και Δf είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων της μέτρησης του θορύβου. Η συγκεκριμένη πηγή θορύβου επικρατεί στη φωτοαγώγιμη λειτουργία.

Η δεύτερη πηγή θορύβου είναι ο θόρυβος Johnson ο οποίος δημιουργείται από την παράλληλη αντίσταση στο μοντέλο τη φωτοδιόδου λόγω της θερμικής παραγωγής μεταφορέων φορτίου. Το πλάτος του δίνεται από τη σχέση

$$I_{jn} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R_D}} \quad (2.30)$$

όπου k η σταθερά του Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin και Δf είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων της μέτρησης του θορύβου. Αυτή η πηγή θορύβου επικρατεί στη φωτοβολταϊκή λειτουργία. Ο συνολικός θόρυβος δίνεται από τη σχέση

$$I_{tn} = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{jn}^2} \quad (2.31)$$

Μια ακόμα χαρακτηριστική ποσότητα των φωτοδίοδων είναι η ισοδύναμη ισχύς θορύβου. Ορίζεται ως η ποσότητα ισχύος του φωτός που παράγει φωτόρευμα ίσο με το ρεύμα λόγω θορύβου και ισούται με

$$NEP = \frac{I_{tn}}{R} \quad (2.32)$$

όπου R ο παράγοντας απόκρισης και I_{tn} είναι ο συνολικός θόρυβος της φωτοδιόδου.

Κυκλώματα ενίσχυσης

Εκτός από την κατανόηση της αρχής λειτουργίας της φωτοδιόδου μεγάλη σημασία έχει και ο τρόπος λειτουργίας της. Οι απαιτήσεις κάθε εφαρμογής καθορίζουν την επιλογή της φωτοδιόδου αλλά και τον τρόπο λειτουργίας, ο οποίος μπορεί να είναι φωτοαγώγιμος ή φωτοβολταϊκός.

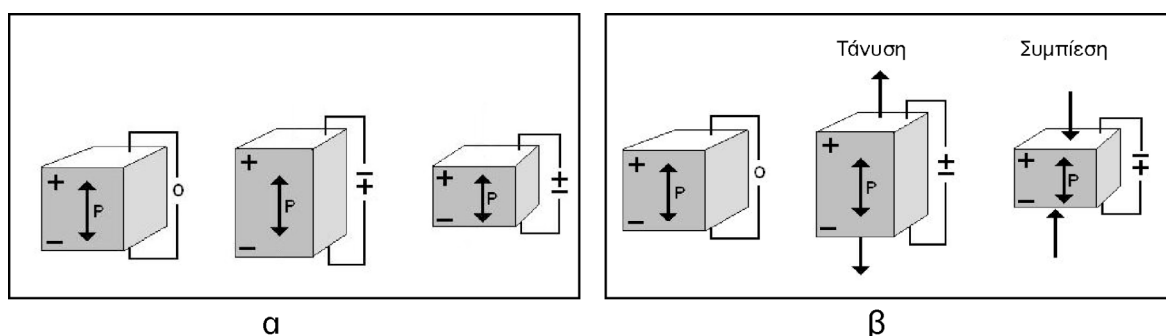
Σε γενικές γραμμές, όταν θέλουμε μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης και καλύτερη γραμμικότητα λειτουργούμε στην φωτοαγώγιμη περιοχή εφαρμόζοντας τάση στα άκρα της φωτοδιόδου. Παρόλα αυτά, με τον τρόπο αυτό αυξάνονται τα ρεύματα σκότους και θορύβου. Ο φωτοβολταϊκός τρόπος χρησιμοποιείται όταν η εφαρμογή απαιτεί χαμηλές συχνότητες λειτουργίας, έως 350 kHz, καθώς και χαμηλή φωτεινότητα. Στην περίπτωση αυτή η έξοδος είναι ρεύμα, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση έχουμε ως έξοδο τάση.

Λόγω της ευρείας χρήσης των φωτοδιόδων, το πεδίο των κυκλωμάτων ενίσχυσής τους έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία 20 χρόνια. Θα ήταν αδύνατο να αναλυθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τα θέματα που αφορούν την κατασκευή κυκλωμάτων όπως αύξηση κέρδους και χρόνου απόκρισης καθώς και μείωση όλων των πηγών θορύβου. Ο λόγος είναι ότι η επιθυμητή συμπεριφορά του κυκλώματος διαφέρει σε κάθε εφαρμογή. Τέλος, υπάρχουν αρκετές τεχνικές αντιμετώπισης των επιμέρους θεμάτων που αφορούν τα κυκλώματα ενίσχυσης λεπτομερής περιγραφή των οποίων μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία [7].

3 Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές

3.1 Εισαγωγή

Πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα που έχουν κάποια υλικά, κυρίως κρύσταλλοι και κεραμικά, να αναπτύσσουν ηλεκτρικό δυναμικό όταν ασκείται στα άκρα τους δύναμη. Για να υπάρξουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες χρειάζεται ανισοτροπία στην κρυσταλλική δομή του κεραμικού. Σε μερικές τάξεις κρυστάλλων το ηλεκτρικό δυναμικό μεταφράζεται ως ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου σε όλο το κρυσταλλικό πλέγμα. Εάν τα άκρα του υλικού στο οποίο εφαρμόζεται η δύναμη δεν είναι βραχυκυκλωμένα τότε το φορτίο που δημιουργείται προκαλεί μια τάση στα άκρα του. Υπάρχει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, βλ. Σχήμα 3-1β, κατά το οποίο έχουμε δημιουργία φορτίου λόγω της εφαρμογής δύναμης και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, βλ. Σχήμα 3-1α, κατά το οποίο έχουμε τη δημιουργία δύναμης λόγω της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 3-1. (α) Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, (β) ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

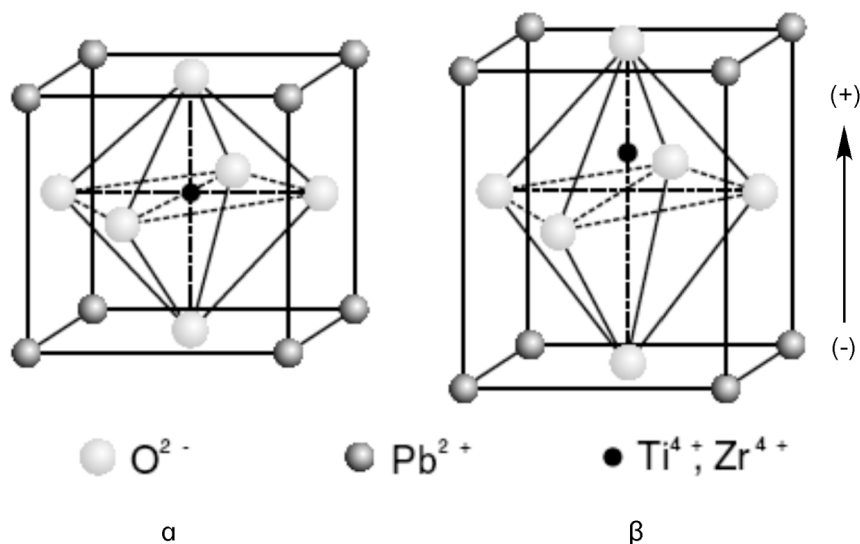
Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τους αδερφούς Curie το 1880. Η πειραματική τους επίδειξη περιελάμβανε τη μέτρηση του ηλεκτρικού φορτίου που δημιουργούνται σε ειδικά διαμορφωμένους κρυστάλλους ύστερα από εφαρμογή δύναμης πάνω τους. Το 1881 ο Gabriel Lippmann κατέληξε, με τη χρήση μαθηματικών, στο αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Την πρόταση του Lippmann επιβεβαίωσαν πειραματικά οι αδερφοί Curie. Τα επόμενα χρόνια προσδιορίστηκαν οι είκοσι τάξεις κρυστάλλων οι οποίες εμφανίζουν πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά.

Ο πιεζοηλεκτρισμός διαφέρει από τον φεροηλεκτρισμό ο οποίος ανακαλύφθηκε το 1920 και είναι η ιδιότητα αυθόρμητης ηλεκτρικής διπολικής ροπής. Όλα τα φεροηλεκτρικά υλικά είναι πιεζοηλεκτρικά αλλά το αντίθετο δεν είναι ισχύει πάντα. Τα φεροηλεκτρικά μετατρέπονται σε πιεζοηλεκτρικά όταν εφαρμοστεί ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Το πρώτο

φεροηλεκτρικό κεραμικό υλικό ήταν το υλικό το οποίο ανακαλύφθηκε το 1943 και οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητές του εντοπίστηκαν από τον S. Roberts το 1947. Ο B. Jaffe ανακάλυψε το 1954 το πιεζοηλεκτρικό κεραμικό ζιρκο-κυανικός μόλυβδος (PZT), το οποίο αποτέλεσε το κύριο συστατικό στη αντίστοιχη βιομηχανία της εποχής. Το PZT αποτελεί μέχρι και στις μέρες μας το πιο διαδεδομένο κεραμικό με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες.

3.2 Θεωρία πιεζοηλεκτρισμού

Στην παρούσα παράγραφο θα αναφερθούν κάποιες από τις βασικές έννοιες που διέπουν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά με σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στη μικρο/νανο-ρομποτική.

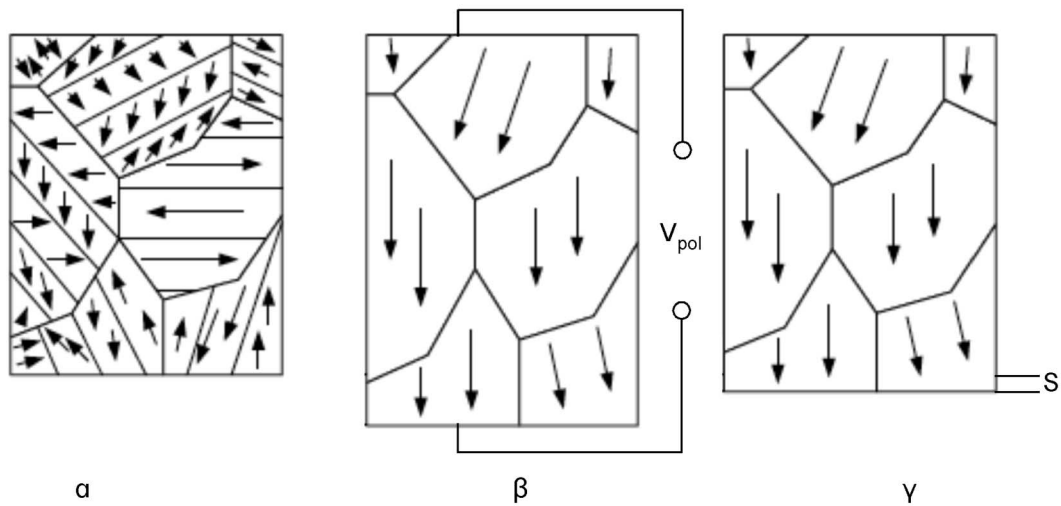


Σχήμα 3-2. (α) Κρύσταλλος με απλή κυβική συμμετρία χωρίς διπολική ροπή, (β) Κρύσταλλος με τετραγωνική συμμετρία και διπολική ροπή.

3.2.1 Πόλωση

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κάθε φεροηλεκτρικό υλικό δεν έχει εξ' αρχής πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Πάνω από μια κρίσιμη τιμή θερμοκρασίας, το σημείο Curie, ο κρύσταλλος του κεραμικού υλικού έχει απλή κυβική συμμετρία χωρίς διπολική ροπή, βλ. Σχήμα 3-2α. Σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο Curie ο κρύσταλλος έχει τετραγωνική ή ρομβοειδή συμμετρία καθώς και διπολική ροπή, βλ. Σχήμα 3-2β. Τα γειτονικά δίπολα σχηματίζουν περιοχές ομοιόμορφης τοπικής ευθυγράμμισης (domains). Λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των κόκκων του υλικού και της ύπαρξης των περιοχών δεν υπάρχει καθαρή πόλωση, βλ. Σχήμα 3-3α.

Για να πολωθεί το κεραμικό και να αποκτήσει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες πρέπει να εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα του. Εφαρμόζοντας συνεχή τάση στο υλικό, κάτω από το σημείο Curie, ευθυγραμμίζονται οι φεροηλεκτρικές περιοχές, με τη φορά του ηλεκτρικού πεδίου, καταλήγοντας σε καθαρή πόλωση, βλ. Σχήμα 3-3β. Κάποιες περιοχές ευθυγραμμίζονται μερικώς και άλλες καθόλου. Ο αριθμός αυτών των περιοχών εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, τη θερμοκρασία του υλικού και το χρόνο εφαρμογής του πεδίου. Εκτός από την μόνιμη πόλωση, το κεραμικό αποκτά και μόνιμη επιμήκυνση S , βλ. Σχήμα 3-3γ. Για την αλλαγή της πολικότητας αρκεί να εφαρμόσουμε ηλεκτρικό πεδίο αντίστροφης πολικότητας αυξάνοντας τη θερμοκρασία πάνω από το σημείο Curie ή να ασκήσουμε μηχανική τάση.



Σχήμα 3-3. (α) Μη-πολωμένο φεροηλεκτρικό υλικό, (β) διαδικασία πόλωσης και (γ) μόνιμη πόλωση και επιμήκυνση

3.2.2 Μη γραμμικότητες

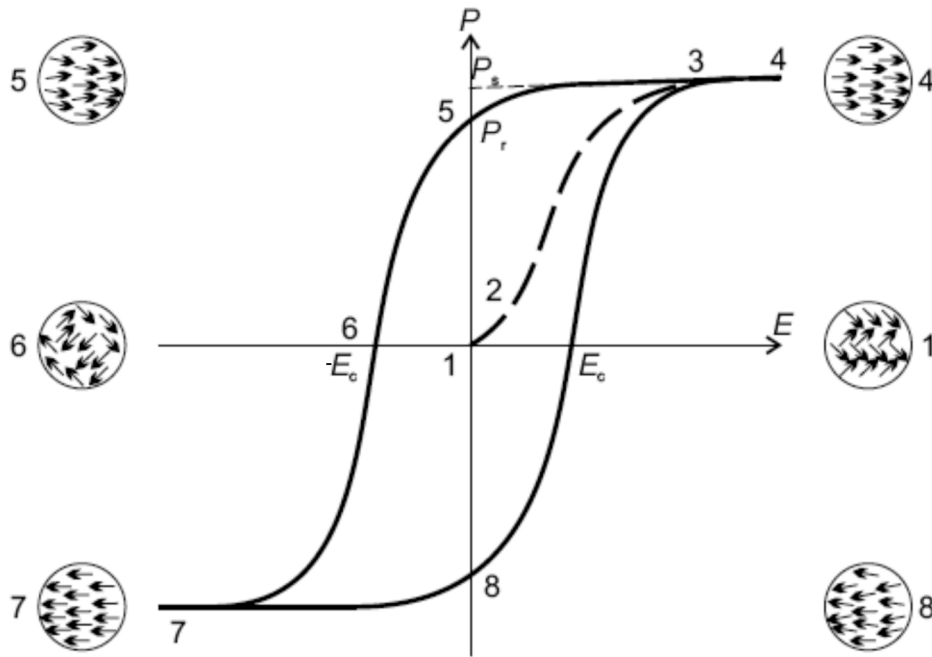
Τα πιεζοηλεκτρικά εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζουν υστέρηση η οποία είναι έμφυτη στα διηλεκτρικά και είναι ανάλογη της αντίστοιχης ιδιότητας των φερομαγνητικών υλικών. Στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών, υστέρηση έχουμε όταν σε μια τιμή της τάσης εισόδου αντιστοιχούν πολλές τιμές στην μεταβλητή εξόδου που είναι η μετατόπιση. Ένα σύστημα με υστέρηση εμφανίζει μνήμη, δηλαδή για να βρούμε την τιμή της εξόδου θα πρέπει να γνωρίζουμε προηγούμενες τιμές της εισόδου. Η παραπάνω ιδιότητα αποτελεί ένα από το μεγαλύτερα μειονεκτήματα λόγω της χρήσης τους στην περιοχή της μικρορομποτικής και σε περιοχές όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και κατά συνέπεια ακριβής πρόβλεψη της εξόδου.

Ο βρόχος υστέρησης στα πιεζοηλεκτρικά υλικά παρίσταται με η γραφική παράσταση της πόλωσης ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου σε μια συγκεκριμένη τιμή συχνότητας, βλ. Σχήμα 3-4. Έστω ότι ξεκινάμε από το σημείο 1 και εφαρμόζουμε μικρό ηλεκτρικό πεδίο έως το σημείο 2. Παρατηρούμε ότι στην περιοχή 1→2 έχουμε γραμμική σχέση μεταξύ πόλωσης P και ηλεκτρικού πεδίου E. Αυτό συμβαίνει επειδή το πεδίο δεν είναι αρκετά υψηλό ώστε να προσανατολίσει κάποια από τις περιοχές με αποτέλεσμα το κεραμικό να συμπεριφέρεται ως απλό διηλεκτρικό υλικό. Καθώς το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνεται, 2→3, ένας αριθμός των περιοχών που είναι πολωμένες αντίθετα από τη φορά το εφαρμοζόμενου πεδίου θα προσανατολιστεί θετικά και η τιμή της πόλωσης θα αυξηθεί ραγδαία έως ότου προσανατολιστούν όλες οι περιοχές στη φορά του πεδίου, σημείο 4. Καθώς μειώνεται, η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου καταλήγει στο μηδέν. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην πόλωση με αποτέλεσμα κάποιες περιοχές να παραμένουν προσανατολισμένες προς τη θετική διεύθυνση και το υλικό να εμφανίζει παραμένουσα πόλωση P_r η οποία αντιστοιχεί και σε παραμένουσα μετατόπιση. Για να αφαιρεθεί η παραμένουσα τάση, θα πρέπει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου να αρχίσει να παίρνει αρνητικές τιμές, 5→6, μέχρι να φτάσει την τιμή $-E_c$ -στο φερομαγνητισμό αποκαλείται απομαγνητίζουσα ένταση πεδίου- όπου μηδενίζεται η πόλωση. Αν συνεχίζουμε να αυξάνουμε προς τα αρνητικά την τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, 6→7, φθάνουμε στο σημείο όπου όλα τα δίπολα προσανατολίζονται στην αντίθετη με προηγούμενως διεύθυνση. Αντιστρέφοντας την πολικότητα του ηλεκτρικού πεδίου, 7→8, και αυξάνοντας μέχρι την τιμή E_c ολοκληρώνεται ο βρόχος υστέρησης.

Μια άλλη μη γραμμικότητα, η οποία οφείλεται στον ίδιο λόγο με την υστέρηση, είναι ο ερπυσμός (creep/drift). Παρατηρείται στο αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και είναι η μεταβολή του μήκους του επενεργητή με το χρόνο χωρίς να αυξάνεται η τάση εισόδου. Δίνεται από τη σχέση

$$\Delta L(t) = \Delta L_{t=0.1} [1 + \gamma \cdot \log\left(\frac{t}{0.1}\right)] \quad (3.1)$$

όπου $\Delta L_{t=0.1}$ είναι η μετατόπιση 0.1 δευτερόλεπτα μετά την ολοκλήρωση στη μεταβολή της τάσης εισόδου και γ είναι ο συντελεστής ερπυσμού.



Σχήμα 3-4. Βρόχος υστέρησης, έντασης ηλεκτρικού πεδίου - πόλωσης για πιεζοηλεκτρικό κεραμικό.

3.2.3 Μαθηματική περιγραφή

Για πιο λεπτομερή περιγραφή του πιεζοηλεκτρισμού θα κάνουμε χρήση των καταστατικών εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει μια σύντομη αναφορά στη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου. Για περισσότερες πληροφορίες κανείς μπορεί να ανατρέξει σε συγγράμματα επιστήμης των υλικών.

Όσο αφορά τη μηχανική πλευρά, χρησιμοποιούμε το νόμο του Hooke ο οποίος συνδέει την τάση με την παραμόρφωση σε ένα υλικό

$$S = sT \quad (3.2)$$

όπου S είναι η παραμόρφωση και T η τάση. Το s είναι η ελαστικότητα του υλικού η οποία είναι ίση με E^{-1} , όπου E είναι το μέτρο του Young. Τα πιεζοηλεκτρικά, είναι υλικά στα οποία λαμβάνουν χώρα και ηλεκτρικά φαινόμενα. Συνεπώς θα ισχύει και η καταστατική εξίσωση του ηλεκτρισμού η οποία περιγράφει την κίνηση ενός ηλεκτρικού φορτίου όταν κάποιο διηλεκτρικό υποβάλλεται σε ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή για κάποιο διηλεκτρικό δίνεται από τον τύπο

$$D = \epsilon E \quad (3.3)$$

όπου D είναι η ηλεκτρική μετατόπιση, ϵ η ηλεκτρική διαπερατότητα και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Ύστερα από πράξεις καταλήγουμε στις γραμμικοποιημένες

καταστατικές εξισώσεις του πιεζοηλεκτρισμού οι οποίες δημοσιεύτηκαν αρχικά από την επιτροπή προτύπων της IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Society το 1966 και αναθεωρήθηκαν το 1987 [13].

$$S = s_E \cdot T + d \cdot E \quad (3.4)$$

$$D = d \cdot T + \varepsilon_T \cdot E \quad (3.5)$$

όπου s_E είναι η μήτρα της ελαστικότητας του υλικού όταν υποβάλλεται σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο, ε_T είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα μετρημένη υπό σταθερή τάση και d είναι η μήτρα των πιεζοηλεκτρικών σταθερών σε C/N . Οι παραπάνω εξισώσεις δηλώνουν ότι η παραμόρφωση και η ηλεκτρική μετατόπιση του υλικού έχουν γραμμική εξάρτηση από τη μηχανική τάση και το ηλεκτρικό πεδίο στο οποίο υποβάλλονται. Εκτός από τον πολύπλοκο συμβολισμό τους οι καταστατικές εξισώσεις δεν μπορούν να περιγράψουν τις μη γραμμικότητες των πιεζοηλεκτρικών.

Κάνοντας κατάλληλους μετασχηματισμούς μπορούμε να γράψουμε τις καταστατικές εξισώσεις σε διαφορετικές μορφές. Για παράδειγμα η μορφή των Εξ. (3.4) και (3.5) λέγεται μορφή παραμόρφωσης-φορτίου. Ο Πίνακας 3-1 περιέχει όλους τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να τις παρουσιάσουμε. Όσο αφορά τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται :

- c περιέχει τη στιβαρότητα του υλικού
- e είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά σύζευξης για τη μορφή (2) σε C/m^2
- g είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά σύζευξης για τη μορφή (3) σε m^2/C και
- q είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά σύζευξης για τη μορφή (4) σε N/C .

Πίνακας 3-1 Μορφές καταστατικών εξισώσεων

<p>1)Μορφή παραμόρφωσης-φορτίου</p> $S = s_E \cdot T + d \cdot E$ $D = d \cdot T + \varepsilon_T \cdot E$	<p>2)Μορφή μηχ. τάσης-φορτίου</p> $T = c_E \cdot S - e \cdot E \quad (3.6)$ $D = e \cdot S + \varepsilon_S \cdot E \quad (3.7)$
<p>3)Μορφή παραμόρφωσης-ηλ. τάσης</p> $S = s_D \cdot T + g \cdot D \quad (3.8)$ $E = -g \cdot T + \varepsilon_T \cdot D \quad (3.9)$	<p>4)Μορφή μηχ. τάσης-ηλ. τάσης</p> $T = c_D \cdot S - q \cdot D \quad (3.10)$ $E = -g \cdot S + \varepsilon_S \cdot D \quad (3.11)$

Ο Πίνακας 3-2 περιέχει τους απαραίτητους μετασχηματισμούς για να μεταβούμε από κάποια μορφή σε κάποια άλλη. Επίσης θα μπορούσαμε να κατατάξουμε τις καταστατικές εξισώσεις σύμφωνα με το φαινόμενο για το οποίο ισχύουν. Πιο συγκεκριμένα οι Εξ. (3.5), (3.7), (3.9) και (3.11) ισχύουν για το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ενώ οι Εξ. (3.4), (3.6), (3.8) και (3.10) ισχύουν για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Πίνακας 3-2 Μετασχηματισμοί για εναλλαγή της μορφής των καταστατικών εξισώσεων

<p>Μορφή 1→ Μορφή 2</p> $c_E = s_E^{-1}$ $e = d \cdot s_E^{-1}$ $\varepsilon_S = \varepsilon_T - d \cdot s_E^{-1} \cdot d^T$	<p>Μορφή 1→ Μορφή 3</p> $s_D = s_E - d \cdot \varepsilon_T^{-1} \cdot d^T$ $g = \varepsilon_T^{-1} \cdot d$
<p>Μορφή 2→ Μορφή 4</p> $c_D = c_E - e \cdot \varepsilon_S^{-1} \cdot e^T$ $q = \varepsilon_S^{-1} \cdot e$	<p>Μορφή 3→ Μορφή 4</p> $c_D = s_D^{-1}$ $q = g \cdot s_D^{-1}$ $\varepsilon_S^{-1} = \varepsilon_T^{-1} - g \cdot s_D^{-1} \cdot g^T$

3.2.4 Πιεζοηλεκτρικές σταθερές

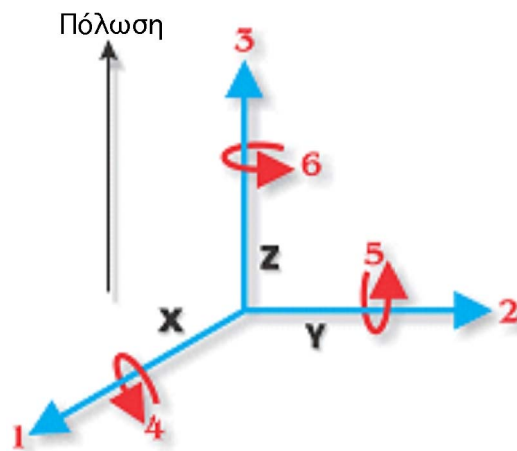
Επειδή τα πιεζοηλεκτρικά είναι ανισοτροπικά υλικά το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα εξαρτάται από την διεύθυνση. Κάθε φυσική σταθερά που χρησιμοποιείται στις καταστατικές εξισώσεις έχει δύο δείκτες που υποδηλώνουν την κατεύθυνση κάποιων ποσοτήτων, όπως φαίνεται παρακάτω. Οι δείκτες 1, 2, 3 υποδηλώνουν κατεύθυνση X, Y, Z αντίστοιχα και οι δείκτες 4, 5 και 6 διάτμηση περί τους άξονες X, Y και Z αντίστοιχα.

Πιεζοηλεκτρική σταθερά παραμόρφωσης ή φορτίου εξόδου d_{ij}

Για το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, η σταθερά αυτή υποδηλώνει την πόλωση ανά μονάδα εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης. Ο πρώτος δείκτης συμβολίζει τη διεύθυνση πόλωση όταν το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν και ο δεύτερος τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης.

Για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, η σταθερά υποδηλώνει τη μηχανική παραμόρφωση ανά μονάδα εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Ο πρώτος δείκτης

συμβολίζει τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου και ο δεύτερος τη διεύθυνση της παραμόρφωσης που προκύπτει.



Σχήμα 3-5. Ισοδυναμία δεικτών με το ορθοκανονικό σύστημα αξόνων.

Πιεζοηλεκτρική σταθερά ηλεκτρικής τάσης ή πεδίου εξόδου g_{ij}

Για το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, η σταθερά αυτή υποδηλώνει το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται ανά μονάδα εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης. Ο πρώτος δείκτης συμβολίζει τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται και ο δεύτερος τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης.

Για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, η σταθερά υποδηλώνει τη μηχανική παραμόρφωση ανά μονάδα εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής μετατόπισης. Ο πρώτος δείκτης συμβολίζει τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής μετατόπισης και ο δεύτερος τη διεύθυνση της παραμόρφωσης που προκύπτει.

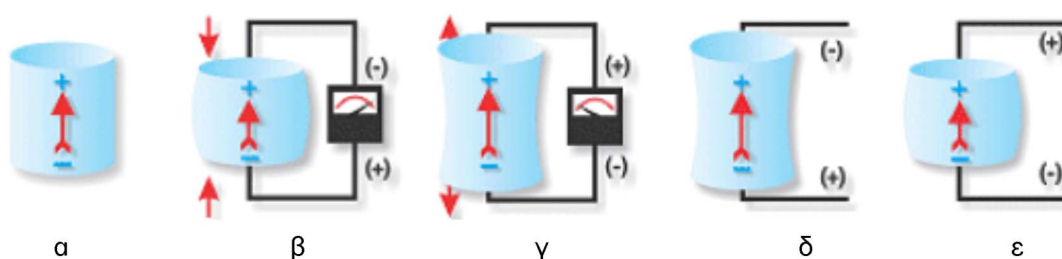
Πιεζοηλεκτρική σταθερά ηλεκτρομηχανικής σύζευξης k_{ij}

Υποδηλώνει την απόδοση μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, για το ευθύ πιεζοηλεκτρικό. Ενώ για το αντίστροφο υποδηλώνει την απόδοση του κεραμικού να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Ο πρώτος δείκτης συμβολίζει την διεύθυνση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται ή εφαρμόζεται και ο δεύτερος δείκτης συμβολίζει την αντίστοιχη μηχανική ενέργεια.

3.3 Τύποι επενεργητών και μετρολογία

3.3.1 Εισαγωγή

Κάθε διηλεκτρικό υλικό με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες μπορεί να λειτουργήσει είτε ως αισθητήρας (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) είτε ως επενεργητής (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Στο Σχήμα 3-6α φαίνεται ένα πολωμένο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο.



Σχήμα 3-6. (α)πιεζοηλεκτρικό σε θέση ισορροπίας, (β-γ)ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και (δ-ε) αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Συμπίεση κατά τη διεύθυνση της πόλωσης ή τάνυση κάθετη στη διεύθυνση της πόλωσης δημιουργεί ηλεκτρική τάση ίδια πολικότητας με την αρχική πόλωση, Σχήμα 3-6β. Τάνυση κατά τη διεύθυνση της πόλωσης ή συμπίεση κάθετη στη διεύθυνση της πόλωσης, δημιουργεί ηλεκτρική τάση αντίθετης πολικότητας με την αρχική πόλωση, Σχήμα 3-6γ. Η παραπάνω λειτουργία παρατηρείται στους αισθητήρες, όπου παράγεται ηλεκτρική τάση με τιμή ανάλογη της τιμή συμπίεσης ή τάνυσης.

Το φαινόμενο που επικρατεί στους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές φαίνεται στο Σχήμα 3-6δ-ε. Αν εφαρμοστεί μια ηλεκτρική τάση ίδιας πολικότητας με την αρχική πόλωση επιμηκύνεται το πιεζοηλεκτρικό στην διεύθυνση της πόλωσης και ταυτόχρονα μειώνεται η διάμετρος του επενεργητή, Σχήμα 3-6δ. Αν αντιστραφεί η πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης ο επενεργητής συρρικνώνεται και μεγαλώνει η διάμετρός του, Σχήμα 3-6ε.

3.3.2 Τύποι πιεζοηλεκτρικών επενεργητών

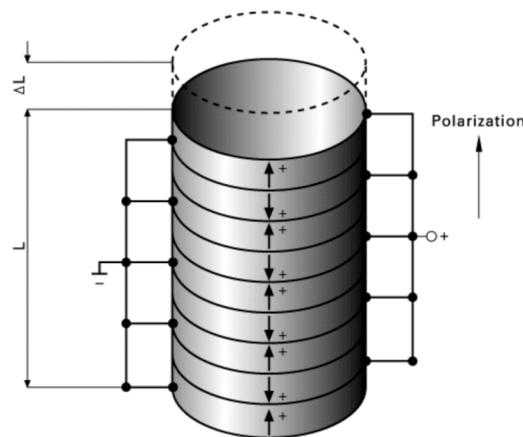
Η απλότητα στην κατασκευή των πιεζοηλεκτρικών κεραμικών σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό της έρευνας των συστημάτων και της ρομποτικής στη μικρο/νάνο κλίμακα έδωσαν ώθηση στην ανάπτυξη διάφορων τύπων πιεζοηλεκτρικών επενεργητών.

Εκτός από την απλή κατασκευή, πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη ακρίβεια μετατόπισης, ο μικρός χρόνος απόκρισης, η ικανότητα να αναπτύσσονται αλλά και να αντέχουν μεγάλες δυνάμεις σε σχέση με το μέγεθός τους και η ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα μειονεκτήματά τους είναι η μικρή επιμήκυνση, η οποία ανέρχεται στο 0.1 – 0.2 % του αρχικού τους μήκους, οι υψηλές τάσεις λειτουργίας και η εμφάνιση υστέρησης και ολίσθησης.

Μια καλή περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών που αφορούν τους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές υπάρχει στη μεταπτυχιακή εργασία [24]. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν βασικοί τύποι επενεργητών και θα περιγραφεί ο τρόπος λειτουργίας τους.

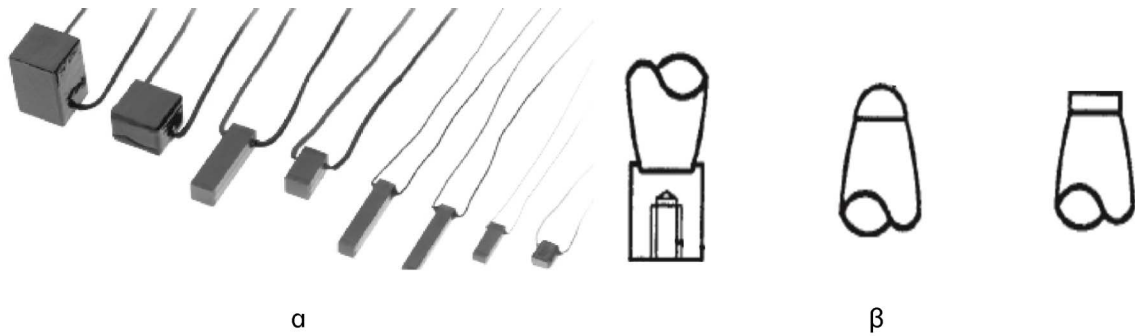
Τύπου στοίβας

Ο πιο διαδεδομένος τύπος πιεζοηλεκτρικού επενεργητή για την δημιουργία γραμμικής κίνησης είναι ο επενεργητής τύπου στοίβας, Σχήμα 3-8α. Ονομάζεται έτσι επειδή αποτελείται από πολλά πιεζοηλεκτρικά επίπεδα συνδεδεμένα με ηλεκτρόδια ώστε να σχηματίζουν στοίβα όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-7.



Σχήμα 3-7. Δομή πιεζοηλεκτρικού επενεργητή τύπου στοίβας.

Οι διαστάσεις του καθορίζονται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Το ύψος έχει να κάνει με την επιθυμητή μέγιστη μετατόπιση και το πλάτος με την επιθυμητή δύναμη εξόδου. Η μέγιστη τάση λειτουργίας είναι ανάλογη με το πάχος κάθε επιπέδου. Οι επενεργητές μπορούν να βρεθούν στο εμπόριο με ή χωρίς επίχρισμα, το οποίο συνήθως είναι κάποιο μονωτικό υλικό ή ακόμα και με μεταλλικό περίβλημα. Επίσης μπορούμε στο ελεύθερο άκρο τους να προσαρμόσουμε κάποιο τελικό σημείο δράσης όπως πλαστική ή μεταλλική σφαίρα, Σχήμα 3-8β.



Σχήμα 3-8. (α) Επενεργητές τύπου στοίβας με επίχρισμα και (β) τελικά σημεία δράσης.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-8α, προεξέχουν δυο καλώδια από τα οποία τροφοδοτείται ένα κομμάτι του επενεργητή και μέσω των ηλεκτροδίων η τάση τροφοδοσίας μεταφέρεται στα υπόλοιπα. Η ολική μετατόπιση είναι το άθροισμα των μετατοπίσεων κάθε επιπέδου και δίνεται από τον τύπο

$$\Delta L = d_{33} \cdot n \cdot V \quad (3.12)$$

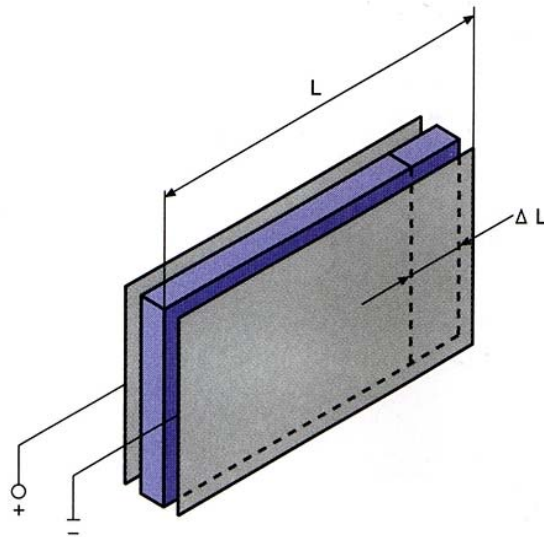
όπου n είναι ο αριθμός των επιπέδων που συνθέτουν τον επενεργητή, V είναι η τάση λειτουργίας και d_{33} είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά με τον πρώτο και δεύτερο δείκτη να υποδηλώνουν τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου στον άξονα 3 (άξονας Z – παράλληλος στην διεύθυνση πόλωσης) και την προκύπτουσα μετατόπιση στον ίδιο άξονα αντίστοιχα.

Τύπου ελάσματος

Το ενεργό υλικό στο συγκεκριμένο τύπο επενεργητή αποτελείται από λεπτές κεραμικές λωρίδες. Η μετατόπιση η οποία προκύπτει είναι κάθετη στη διεύθυνση της πόλωσης και του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, Σχήμα 3-9. Καθώς η τάση τροφοδοσίας αυξάνει, το κεραμικό συστέλλεται. Η πιεζοηλεκτρική σταθερά η οποία περιγράφει τη μετατόπιση είναι η d_{31} και είναι σχεδόν το 50% της σταθεράς d_{33} . Ο δείκτης 1 υποδηλώνει μετατόπιση στον άξονα X, Σχήμα 3-5, και ο δείκτης 3 υποδηλώνει την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου στον άξονα της πόλωσης Z. Ο τύπος που δίνει τη μετατόπιση στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$\Delta L = d_{31} \cdot \frac{L}{d} \cdot V \quad (3.13)$$

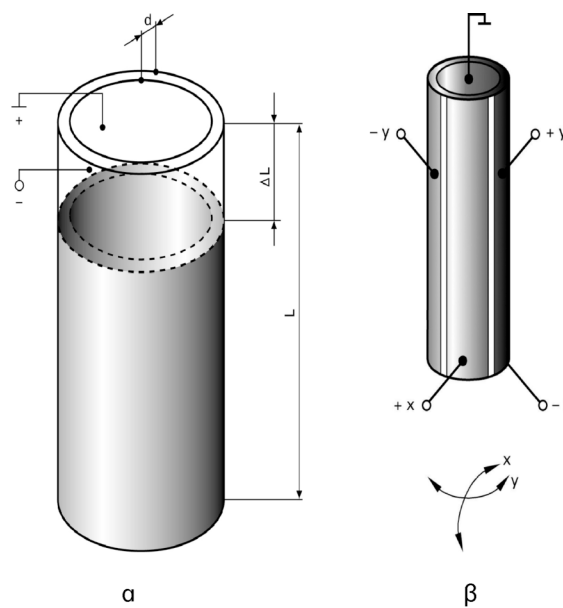
όπου L είναι το μήκος του επενεργητή, d είναι το πάχος μίας λωρίδας, V είναι η τάση λειτουργίας και d_{31} η πιεζοηλεκτρική σταθερά.



Σχήμα 3-9. Επενεργητής τύπου ελάσματος.

Τύπου κυλίνδρου

Οι επενεργητές τύπου κυλίνδρου χρησιμοποιούνται για γραμμική και ακτινική μετατόπιση. Όπως και στην περίπτωση επενεργητών στοιβάς σχηματίζονται από συνένωση πολλών κεραμικών κυλίνδρων. Κάθε πιεζοηλεκτρικός κύλινδρος χωρίζεται σε τέσσερα ηλεκτρόδια στην εσωτερική επιφάνεια και τέσσερα στην εξωτερική, τα οποία ονομάζονται τεταρτημόρια. Αναλόγως με τα ηλεκτρόδια που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική τάση δημιουργείται και η αντίστοιχη μετατόπιση στο x-y επίπεδο, βλ. Σχήμα 3-10β.



Σχήμα 3-10. (α) Σχήμα πιεζοηλεκτρικού κυλίνδρου και (β) κύλινδρος με πολικότητα των ηλεκτροδίων.

Η μετατόπιση κατά την αξονική διεύθυνση δίνεται όπως και στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών ελασμάτων από τον τύπο (3.13), όπου L είναι το μήκος του κυλίνδρου, d είναι το πάχος του τοιχώματος, V είναι η τάση λειτουργίας και d_{31} η πιεζοηλεκτρική σταθερά.

Η ακτινική μετατόπιση που προκύπτει όταν μεταβάλλεται το μήκος του κυλίνδρου δίνεται από τον τύπο

$$\Delta r = d_{31} \cdot \frac{r}{d} \cdot V \quad (3.14)$$

όπου r είναι η ακτίνα του κυλίνδρου και οι υπόλοιπες μεταβλητές όπως και παραπάνω. Τέλος η μεταβολή στο πάχος του κυλίνδρου δίνεται από τη σχέση

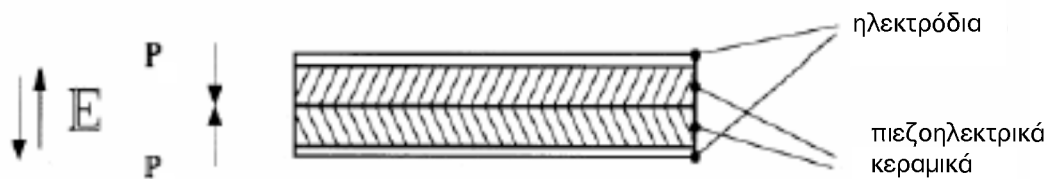
$$\Delta d = d_{33} \cdot V \quad (3.15).$$

Καμπτικού Τύπου (bender)

Οι καμπτικοί επενεργητές μοιάζουν με τις καμπτικές δοκούς. Με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης το ένα επίπεδο διαστέλλεται και το άλλο συστέλλεται. Το αποτέλεσμα είναι μια καμπύλη μεγαλύτερη από το μήκος ή το πάχος των επιμέρους επιπέδων. Με τους επενεργητές αυτής της κατηγορίας επιτυγχάνονται μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις όχι όμως δυνάμεις και ταχύτητες.

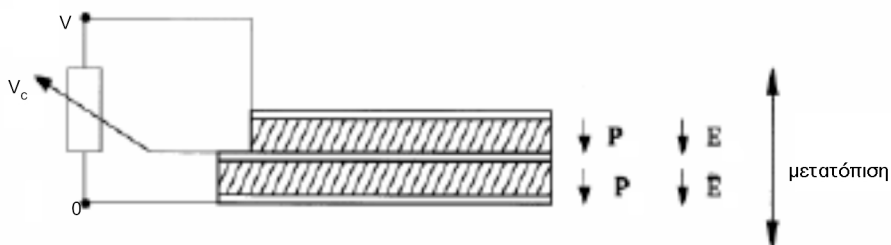
Ο απλός καμπτικός αποτελείται από ένα στρώμα πιεζοηλεκτρικής λωρίδας κολλημένης πάνω σε ένα κομμάτι μετάλλου και ονομάζεται μονομορφικός. Εάν το κομμάτι μετάλλου αντικατασταθεί με μια δεύτερη λωρίδα πιεζοηλεκτρικού, προκύπτει διμορφικός επενεργητής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται διπλάσια μετατόπιση σε σχέση με το μονομορφικό τύπο. Υπάρχει και η περίπτωση των πολλαπλών πιεζοηλεκτρικών λωρίδων που ονομάζονται πολυμορφικοί επενεργητές. Το πλεονέκτημα τους είναι η επίτευξη της ίδια δύναμης και μετατόπισης με μικρότερη τάση τροφοδοσίας.

Οι επενεργητές με περισσότερα από ένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία χωρίζονται σε σειριακούς και παράλληλους. Στους σειριακούς το ένα επίπεδο λειτουργεί πάντα αντίθετα από τη διεύθυνση πόλωσης, βλ. Σχήμα 3-11. Η συνδεσμολογία αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια ένα εκ των οποίων είναι συνδεδεμένο στη γείωση και το άλλο στον διπολικό ενισχυτή.



Σχήμα 3-11. Σειριακός διμορφικός επενεργητής.

Σε αντίθεση με τους σειριακούς οι παράλληλοι έχουν τρία ηλεκτρόδια. Τα δυο επιφανειακά ηλεκτρόδια συνδέονται στη γείωση και σε σταθερή τάση. Στο μεσαίο ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται η τάση ελέγχου, η οποία κυμαίνεται μεταξύ της γείωσης και της σταθερής τάσης.



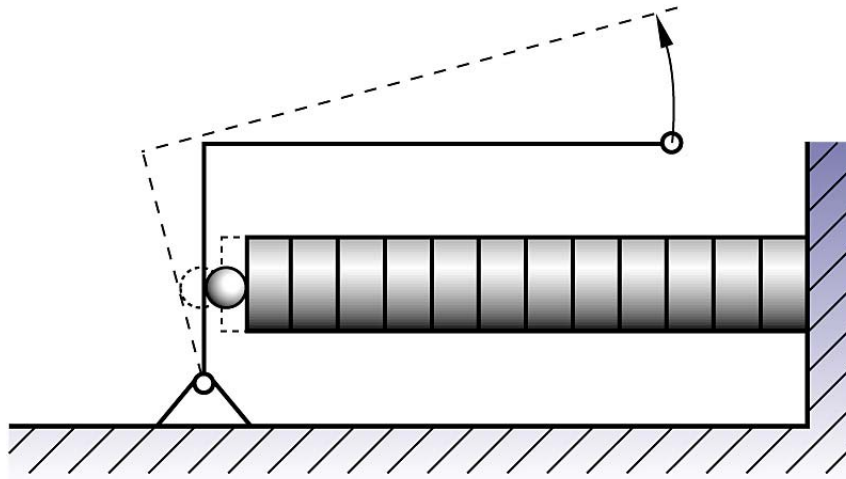
Σχήμα 3-12. Παράλληλος διμορφικός επενεργητής.

3.3.3 Ενισχυτές μετατόπισης με μοχλούς

Λόγω της μικρής μετατόπισης των πιεζοηλεκτρικών σε σχέση με το αρχικό τους μήκος, χρησιμοποιούνται ενισχυτές μετατόπισης. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές μεταξύ των οποίων συστήματα με μοχλούς, υδραυλικά συστήματα και πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες.

Ολοκληρωμένο σύστημα επενεργητή-μοχλού

Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής των επενεργητών σε συνδυασμό με ένα σύστημα ενός ή περισσότερων μοχλών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-13. Για να διατηρηθεί η μεγάλη ακρίβεια κίνησης σε συνδυασμό με το αυξημένο εύρος μετατόπισης θα πρέπει το σύστημα του μοχλού να είναι στιβαρό και να μην έχει τριβή. Για το λόγο αυτό αποφεύγεται η χρήση εδράνων.



Σχήμα 3-13. Ολοκληρωμένο σύστημα επενεργητή τύπου στοίβας με μοχλό.

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων με μοχλό σε σχέση αυτά χωρίς μοχλό είναι:

- μικρό μέγεθος με μεγαλύτερη μετατόπιση
- μικρότερα ρεύματα για την επίτευξη ίδιας μετατόπισης.

Ενώ τα μειονεκτήματα είναι:

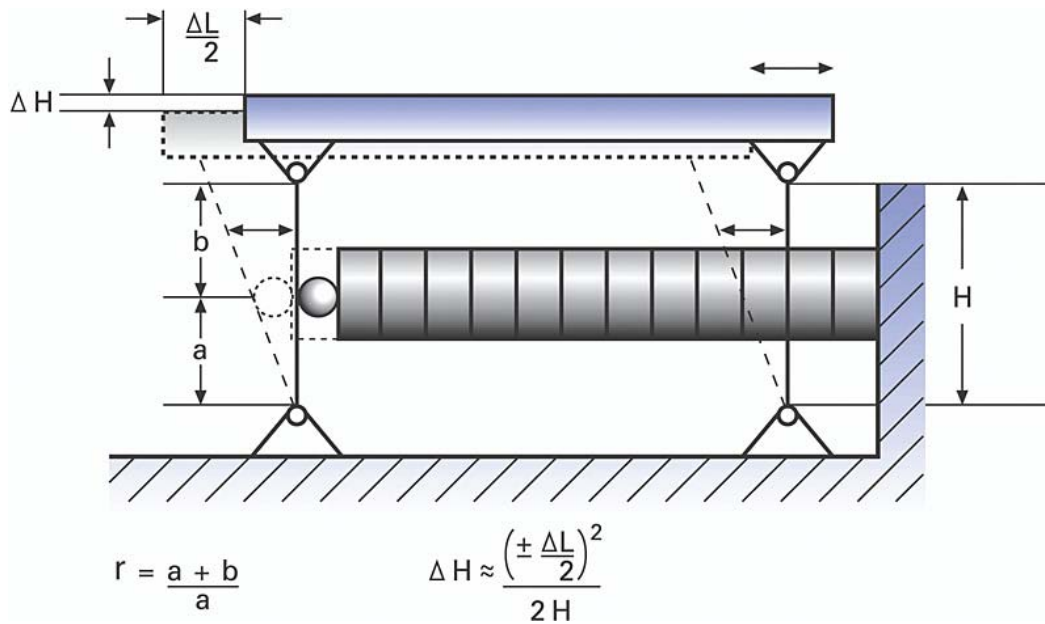
- μειωμένη στιβαρότητα
- χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού
- μικρότερη δύναμη εξόδου

Ολοκληρωμένο σύστημα οδήγησης επενεργητή–καμπτικών δοκών

Σε εφαρμογές όπου απαιτείται ενίσχυση της μετατόπισης σε συνδυασμό με ευθεία κίνηση σε κάποιον άξονα, με την απόκλιση από αυτόν να είναι της τάξης μικρόμετρων ή νανόμετρων, χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένα συστήματα με καμπτικές δοκούς, βλ. Σχήμα 3-14.

Η καμπτική δοκός δεν έχει τριβή και βασίζεται στην ελαστική παραμόρφωση ενός υλικού όπως ο χάλυβας. Δεν εμφανίζει κύλιση και ολίσθηση. Επίσης μπορούν να σχεδιαστούν με μεγάλη στιβαρότητα, αντοχή σε φορτίο και δεν φθείρονται. Είναι λιγότερο ευαίσθητη σε κραδασμούς, ταλαντώσεις και απότομες κινήσεις από τα άλλα συστήματα οδήγησης. Μπορούν να κατασκευαστούν από μη μαγνητικά υλικά και δεν χρειάζονται συντήρηση ή λιπαντικά.

Τα συστήματα οδήγησης με καμπτικές δοκούς παραλληλόγραμμου τύπου, βλ. Σχήμα 3-14, εμφανίζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά οδήγησης. Μια τυπική κατασκευή μπορεί να εμφανίσει ακρίβεια κίνησης σε μια κατεύθυνση της τάξης των νανόμετρων. Επίσης μπορεί να διαγράψει τροχιά σε τόξο με απόκλιση 0.1% από την τροχιά του.



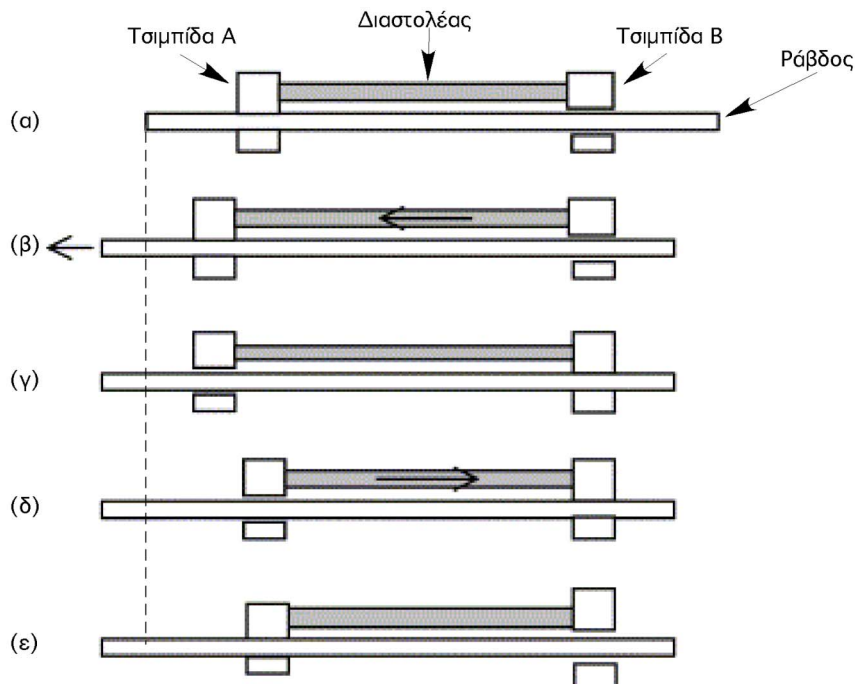
Σχήμα 3-14. Ολοκληρωμένο σύστημα επενεργητή τύπου στοίβας με καμπτικές δοκούς.

3.3.4 Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες

Στην περίπτωση αυτή η ενισχυμένη μετατόπιση προκύπτει απο πολλά μικρά βήματα. Οι βασικές κατηγορίες κινητήρων αποτελούν οι γραμμικοί βηματικοί και οι υπερηχητικοί κινητήρες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν ο κινητήρας inchworm, ο επενεργητής προσκόλλησης – ολίσθησης και κινητήρας κρουστικής οδήγησης. Στη δεύτερη ανήκουν οι κινητήρες στατικού και κινούμενου κύματος.

Κινητήρας inchworm

Στην περίπτωση αυτή η γραμμική μετατόπιση επιτυγχάνεται με τη χρήση τριών πιεζοηλεκτρικών στοιχείων τα οποία μετακινούν μια ράβδο. Οι δύο επενεργητές στην άκρη λειτουργούν ως τσιμπίδες ενώ το μεσαίο στοιχείο εκτελεί συστολή/διαστολή. Η αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3-15. Αρχικά κλείνει η Τσιμπίδα A (α) και το μεσαίο στοιχείο διαστέλλεται (β) προκαλώντας μια καθαρή μετατόπιση στη ράβδο. Στη συνέχεια (γ) κλείνει η Τσιμπίδα B και ανοίγει η Τσιμπίδα A ενώ αμέσως μετά επιστρέφει στο αρχικό του μήκος το μεσαίο στοιχείο. Ο κύκλος ολοκληρώνεται με το κλείσιμο της Τσιμπίδας A.



Σχήμα 3-15. Αρχή λειτουργίας κινητήρα inchworm.

Επενεργητής προσκόλλησης – ολίσθησης

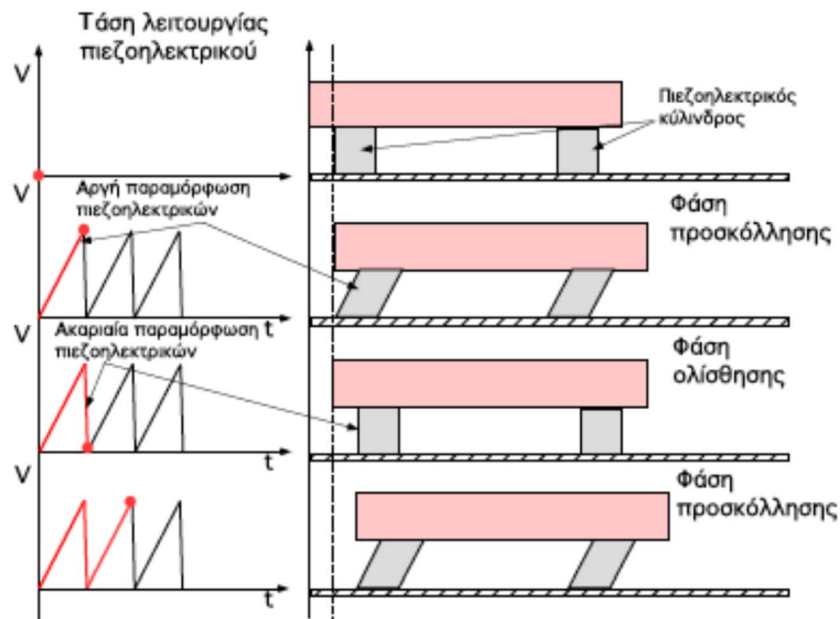
Είναι μια συσκευή η οποία κάνει χρήση της αδράνειας της κινούμενης μάζας. Το σύστημα του επενεργητή απαρτίζεται από δύο πιεζοηλεκτρικά πόδια και μια κινούμενη μάζα και μπορεί να μετατοπίζεται με θεωρητικά άπειρη ανάλυση. Η μετατόπιση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, Σχήμα 3-16. Στη φάση της προσκόλλησης τα πόδια παραμορφώνονται και μετατοπίζουν την πλατφόρμα στην οποία είναι πακτωμένα. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση της ολίσθησης κατά την οποία εκτελείται μια ακαριαία συστολή των στοιχείων. Οι αδρανειακές δυνάμεις που έχουν αναπτυχθεί στην πλατφόρμα είναι μεγαλύτερες από την τριβή με αποτέλεσμα η πλατφόρμα να μη μπορεί να ακολουθήσει την κίνηση και να προκύπτει καθαρή μετατόπιση.

Κινητήρας κρουστικής οδήγησης

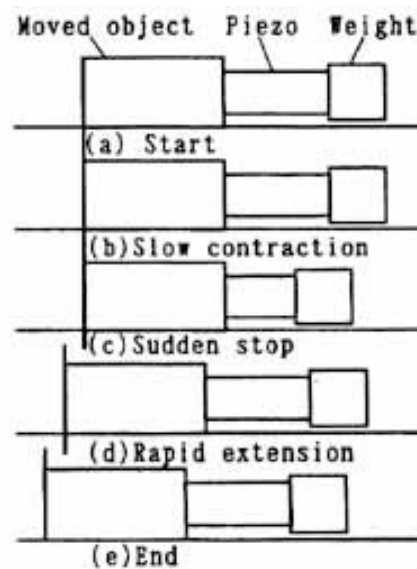
Ο μηχανισμός κίνησης αποτελείται από τρία μέρη: το προς μετακίνηση σώμα, τον επενεργητή και την βοηθητική μάζα όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-17. Το ένα μέρος του επενεργητή είναι πακτωμένο στο κυρίως μέρος και το άλλο στη βοηθητική μάζα. Το πρώτο εφάπτεται στην επιφάνεια που εκτελείται η κίνηση ενώ η βοηθητική μάζα αιωρείται.

Ο κύκλος ξεκινάει με τον επενεργητή σε εκτεταμένη θέση. Ακολουθεί αργή συστολή του η οποία σταματά απότομα ώστε να προκαλέσει πολύ μικρή κίνηση του σώματος. Στη συνέχεια ο επενεργητής εκτείνεται απότομα ώστε η αδράνεια που αναπτύσσεται να ξεπεράσει την τριβή και να προκύψει καθαρή μετατόπιση. Με τον τρόπο αυτό

ολοκληρώνεται ένα βήμα το οποίο ελέγχεται απο το πλάτος συστολής και διαστολής του επενεργητή.



Σχήμα 3-16. Αρχή λειτουργίας επενεργητή προσκόλλησης – ολίσθησης [23].



Σχήμα 3-17. Αρχή λειτουργίας κινητήρα κρουστικής οδήγησης.

3.3.5 Μέτρηση μετατοπίσεων πιεζοηλεκτρικών επενεργητών

Η ακριβής μέτρηση της μετατόπισης των πιεζοηλεκτρικών είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς καθώς και για τη δημιουργία σχήματος ελέγχου. Η χρήση τους σε τομείς μικρο-κίνησης και μικρο-χειρισμού, όσο αφορά τη

ρομποτική, απαιτεί γνώση με μεγάλη ακρίβεια της θέσης του συστήματος που οδηγείται από πιεζοηλεκτρικό επενεργητή.

Οι συνηθέστεροι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι:

- χωρητικοί
- γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (LVDT)
- οπτικά συμβολόμετρα
- επιμηκυνσιόμετρα.

Στους χωρητικούς αισθητήρες η μία από τις επιφάνειες του πυκνωτή προσαρμόζεται στο κινούμενο μέρος και η άλλη είναι σταθερή. Μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ πλακών μεταβάλλεται η χωρητικότητα του πυκνωτή και μέσω της τελευταίας αναγνωρίζεται η μετατόπιση.

Αντίστοιχα στους LVDT ένα κομμάτι μαγνήτη προσαρμόζεται στο κινούμενο μέρος και καθορίζει το ποσό της μαγνητικής ενέργειας που διαρρέει τις περιελίξεις του αισθητήρα. Το κινούμενο μέρος στην περίπτωση μελέτης της κίνησης πιεζοηλεκτρικού επενεργητή τύπου στοίβας θα ήταν το εμπρόσθιο μέρος του. Η μέθοδος μέτρησης με οπτικό συμβολόμετρο παρουσιάστηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι τρεις πρώτες μέθοδοι μέτρησης γίνονται χωρίς επαφή (non contacting methods) του κινούμενου μέρους με τον αισθητήρα με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται οι αδράνεια του συστήματος. Αντιθέτως, η χρήση του επιμηκυνσιόμετρου απαιτεί σωστή επικόλληση στην επιφάνεια του αντικειμένου που πρόκειται να μετατοπιστεί.

Τα επιμηκυνσιόμετρα είναι αντιστάσεις τύπου ταινίας με πάχος μερικών μικρόμετρων. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αλλαγή της τιμής της αντίστασης τους με τη μεταβολή των διαστάσεων. Χαρακτηριστική τιμή είναι ο συντελεστής Gauge (gauge factor) ο οποίος ορίζεται ως

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (3.16)$$

όπου

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad (3.17)$$

είναι η ποσοστιαία αλλαγή μήκους που μετράται. Για να εκμεταλλευτούμε το σήμα την αλλαγή της αντίστασης τοποθετούμε τον αισθητήρα στο μπράτσο μίας γέφυρας Wheatstone. Καθώς αλλάζει η τιμή της αντίστασης, μεταβάλλεται η ισορροπία της γέφυρας και προκύπτει ανάλογο σήμα. Περισσότερες λεπτομέρειες και εφαρμογή των παραπάνω θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών επενεργητών

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν μερικές εφαρμογές μικρορομποτικών συστημάτων στα οποία χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές. Αυτοί μπορεί είτε να αποτελούν το μηχανισμό το μηχανισμό κίνησης μίας πλατφόρμας είτε να επενεργούν σε μια αρπάγη για χειρισμούς σε μικρο/νάνο – κλίμακα.

3.4.1 Μικρορομποτικές πλατφόρμες

Πολλές προσπάθειες έχουν δημοσιευθεί σχετικά με κίνηση συστημάτων επενεργούμενα από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Τα πιο σημαντικά ερευνητικά προγράμματα στα οποία προέκυψε μικρορομποτική πλατφόρμα μερικών κυβικών εκατοστών ολοκληρώθηκαν την τελευταία δεκαετία. Πρόκειται για τα :

- NanoWalker
- MINIMAN
- MiCRoN

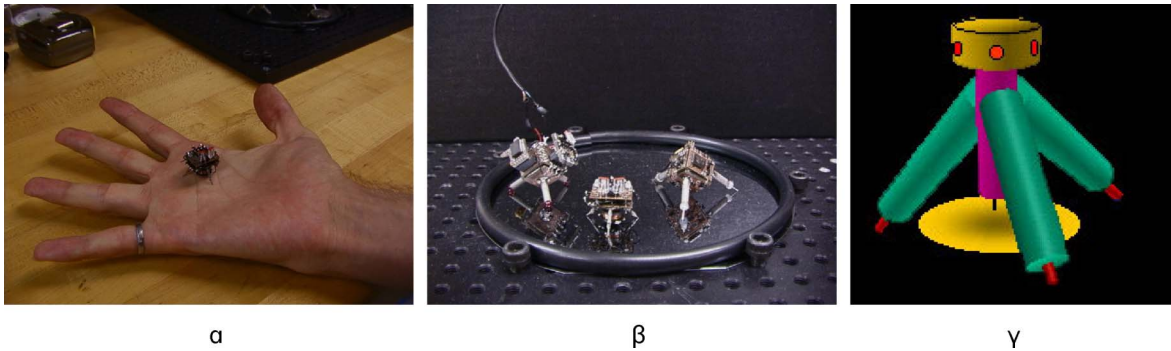
Οι παρακάτω πληροφορίες αποτελούν σύνοψη μέρους της Διδακτορικής Διατριβής του Παναγιώτη Βαρθολομαίου που ολοκληρώθηκε πρόσφατα υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή Ευάγγελου Παπαδόπουλου.

NanoWalker

Το NanoWalker αναπτύχθηκε το 2002 στο MIT των ΗΠΑ από την ερευνητική ομάδα των Sylvaine Martel και Ian Hunter. Ήταν η πρώτη προσπάθεια παγκοσμίως για τη δημιουργία ομάδας αυτόνομων μικρορομποτών τα οποία θα εργάζονται για την ολοκλήρωση συνεργατικών διεργασιών.

Χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί κύλινδροι για κίνηση με την αρχή της προσκόλλησης-ολίσθησης αλλά και άλλων τεχνικών που το επέτρεπαν να αναπτύσει ταχύτητες της τάξης των 20 cm/s. Κατα τη διάρκεια του προγράμματος αναπτύχθηκαν επίσης:

- σύγχρονα ηλεκτρονικά οδήγησης
- υπολογιστική μονάδα DSP για την υλοποίηση των αλγορίθμων κίνησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων
- ασύρματη επικοινωνία με υπέρυθρες
- πρωτότυπη τροφοδοσία της πλατφόρμας με τη χρήση ενεργειακού δαπέδου.



Σχήμα 3-18. (α) Σύγκριση Nanowalker με το ανθρώπινο χέρι, (β) τρεις ρομποτικές πλατφόρμες σε ενεργειακό πάτωμα, (γ) σχέδιο CAD.

Παρόλο που η συνεισφορά της ερευνητικής δραστηριότητας ήταν μεγάλη, το NanoWalker είχε και κάποια ελαττώματα. Η κατανάλωση κάθε πλατφόρμας ήταν αρκετά μεγάλη, 20–25 Watt, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η ταυτόχρονη εργασία πολλών ρομπότ συγχρόνως και να αναπτύσσονται θερμοκρασίες απαγορευτικές για τα ηλεκτρονικά και τους επενεργητές.

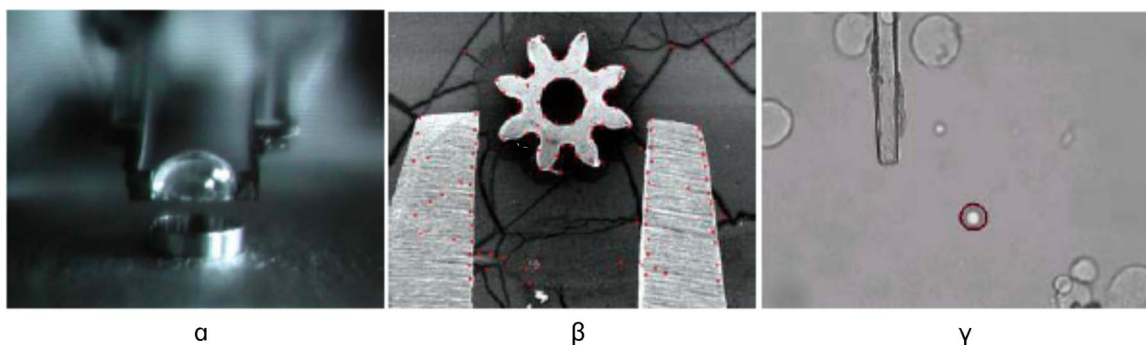
Επίσης υπήρξε πρόβλημα στον έλεγχο θέσης με αποτέλεσμα να μην γίνεται να τοποθετηθεί η πλατφόρμα σε συγκεκριμένο σημείο με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό οφείλεται στο μηχανισμό κίνησής του.

MINIMAN

Το πρόγραμμα MINIMAN (Miniaturized Robot for Micro Manipulation) αναπτύχθηκε ύστερα από συνεργασία έξι Ευρωπαϊκών Πανεπιστημίων και δύο βιομηχανιών. Κατά τη διάρκεια του αναπτύχθηκαν:

- μηχανισμός κίνησης πλατφόρμας (έξι βαθμών ελευθερίας) και βραχίονα (τριών βαθμών ελευθερίας) με κυλινδρικούς πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές.
- Ηλεκτρονικά τροφοδοσίας και οδήγησης των επενεργητών.
- Αισθητήρες δύναμης για ανάδραση δυνάμεων από το χώρο εργασίας.
- Σύστημα τρισδιάστατης όρασης
- Σχεδιασμός και υλοποίηση γραφικής διεπιφάνειας για την τρισδιάστατη απεικόνιση του ρομπότ.

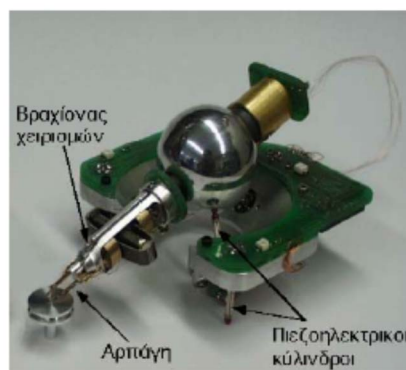
Υλοποιήθηκε κίνηση με την αρχή προσκόλλησης-ολίσθησης με τη μέγιστη ταχύτητα να φτάνει τα 30mm/s. Για πρώτη φορά επιτεύχθηκε εκτέλεση σύνθετων εργασιών στο μικρόκοσμο από κινούμενα ρομπότ, Σχήμα 3-19.



Σχήμα 3-19. (α) Τοποθέτηση μικροφακών, (β) συναρμολόγηση μικρομηχανισμού σε θάλαμο μικροσκοπίου ηλεκτρονικής σάρωσης, (γ) χειρισμός βιολογικών κυττάρων.

Τα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου έργου είναι:

- Ογκώδη ηλεκτρονικά τροφοδοσίας λόγω της υψηλής κατανάλωσης ισχύος τα οποία προϋποθέτουν σύστημα ψύξης.
- Ενσύρματη τροφοδοσία ισχύος μέσω καλωδίων τα οποία ασκούν δυνάμεις και ροπές στην πλατφόρμα και επηρεάζουν την κίνησή της.



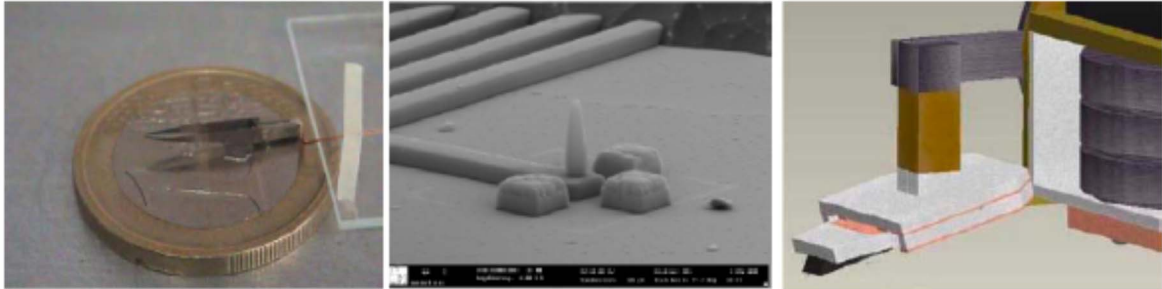
Σχήμα 3-20. Μικρορομπότ MINIMAN.

MICRoN

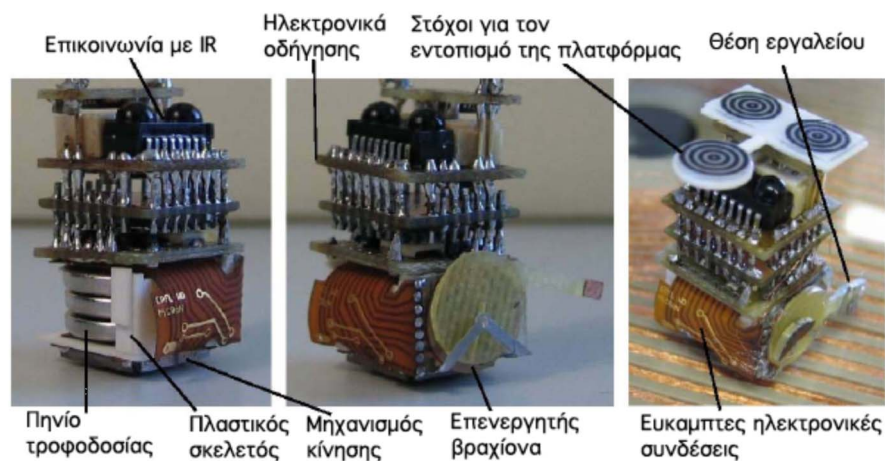
Το έργο MICRoN (Miniaturised Co-operative Robots advancing towards the Nanorange) ολοκληρώθηκε το 2005 ύστερα από τη συνεργασία επτά Ευρωπαϊκών Πανεπιστημίων, μεταξύ των οποίων η Σχολή Μηχ. Μηχ. του ΕΜΠ. Αποτελεί τη φυσική συνέχεια του MINIMAN και στα πλαίσια του ολοκληρώθηκαν τα παρακάτω:

- Σχεδιασμός κίνησης πλατφόρμας και βραχίονα βασισμένος σε πιεζοηλεκτρικά δίμορφα.
- Κατασκευή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για την επενέργηση της βάσης και του βραχίονα.
- Κατασκευή ηλεκτρονικών οδήγησης ελέγχου και επικοινωνίας σε μικρές διαστάσεις για την τοποθέτησή τους επί του ρομπότ.

- Κατασκευή καινοτόμων μικροεργαλείων όπως: μικροαρπάγη με αισθητήρα δύναμης, μικροσύριγγα και ατομικό μικροσκόπιο
- Σχεδιασμός και κατασκευή καινοτόμου ασύρματου τροφοδοτικού ισχύος.
- Σχεδιασμός και υλοποίηση αρχιτεκτονικής ελέγχου για σχεδιασμό κίνησης σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 3-21. (α) μικροαρπάγη με αισθητήρα δύναμης, (β) μικροσύριγγα γ)ατομικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 3-22. Τελική πλατφόρμα MiCRoN.

Τα προβλήματα που προέκυψαν στο συγκεκριμένο έργο καθώς και οι σχεδιαστικοί περιορισμοί παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

- Η ενεργειακή κατανάλωση των ηλεκτρονικών ήταν τριπλάσια τις προδιαγραφές.
- Το τροφοδοτικό ήταν οριακά ικανό να τροφοδοτήσει ένα ρομπότ.
- Δεν πραγματοποιήθηκαν συνεργατικές εργασίες από ομάδα αυτόνομων ρομπότ.
- Δεν μειώθηκαν οι διαστάσεις κάτω από τα 2.5 κυβικά εκατοστά.
- Πολυπλοκότητα και μεγάλο κόστος ηλεκτρονικών οδήγησης

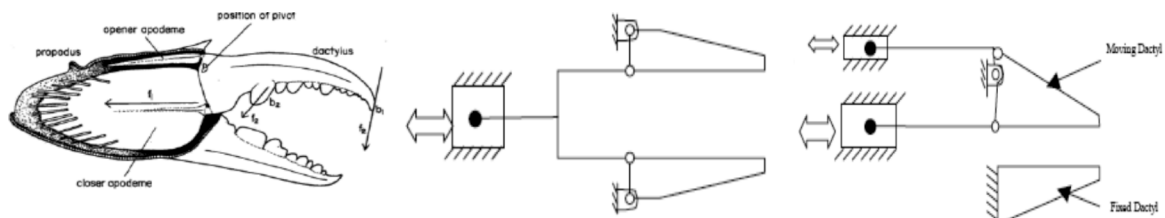
- Ειδική κατασκευή της βάσης με πιεζοηλεκτρικά δίμορφα τα οποία είναι ιδιαίτερα ακριβά.

3.4.2 Μικρορομποτικές αρπάγες

Βασικός σκοπός των μικρορομποτών είναι η συναρμολόγηση και γενικότερα ο χειρισμός αντικειμένων στο μικρόκοσμο, όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο. Οι αρπάγες μπορεί να είναι είτε μεγέθους μερικών εκατοστών ή χιλιοστών είτε σε μορφή MEMS (Micro Electromechanical System) και οι κινήσεις που εκτελούν να είναι της τάξης των μικρόμετρων ίσως και νανόμετρων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις πολυάριθμες αρπάγες που υλοποιούνται με πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Σκοπός είναι να κατανοήσει ο αναγνώστης τον τρόπο με τον οποίο η μονοδιάστατη κίνηση των πιεζοηλεκτρικών επενεργητών χρησιμοποιείται για την επενέργηση μίας αρπάγης.

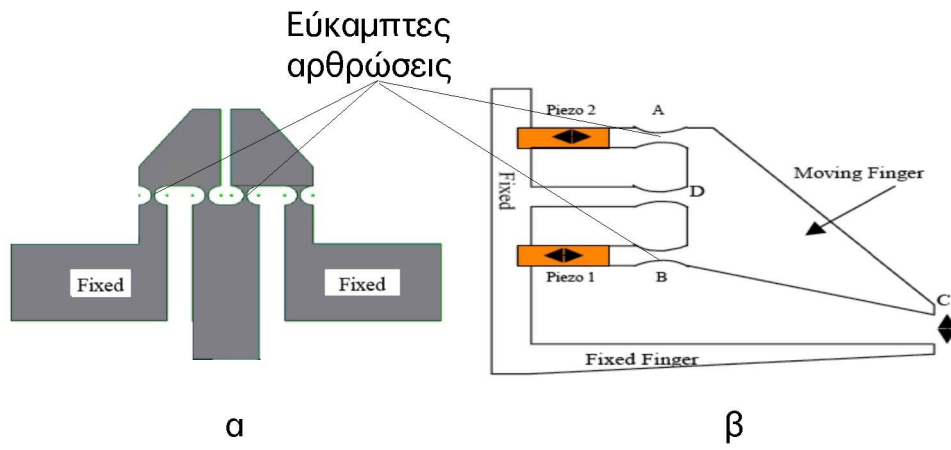
Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή από πλευράς σύλληψης της ιδέας είναι αυτή που παρουσιάστηκε από τους G. B. Madhab, C. S. Kumar και P. K. Mishra [15]. Στην παραπάνω εργασία σχεδιάζεται και κατασκευάζεται αρπάγη η οποία βασίζεται στο μηχανισμό αρπάγης που φέρουν οι καραβίδες. Στο Σχήμα 3-23 απεικονίζεται το πρότυπο και τα απλοποιημένα του μοντέλα .



Σχήμα 3-23. (α) αρπάγη καραβίδας, (β) απλοποιημένος μηχανισμός με ένα γραμμικό επενεργητή, (γ) απλοποιημένος μηχανισμός με δύο γραμμικούς επενεργητές.

Το επόμενο βήμα είναι να μετατραπεί ο μηχανισμός που επιλέγεται στον μηχανισμό, Σχήμα 3-24α, ο οποίος βασίζεται σε εύκαμπτες αρθρώσεις. Οι περιστροφικές αρθρώσεις αντικαθίστανται από εύκαμπτες οι οποίες παρέχουν την επιθυμητή περιστροφική κίνηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-24α.

Υπάρχουν αρκετοί μηχανισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μικροχειρισμούς. Η ιδέα που ακολουθείται είναι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η χρήση εύκαμπτων αρθρώσεων σε συνδυασμό με επενέργηση από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, χωρίς ο τρόπος επενέργησης να είναι ο μοναδικός.



Σχήμα 3-24. (α) μηχανισμός με ένα γραμμικό επενεργητή, (β) μηχανισμός με δύο γραμμικούς επενεργητές.

4 Μελέτη μετατόπισης πιεζοηλεκτρικών επενεργητών

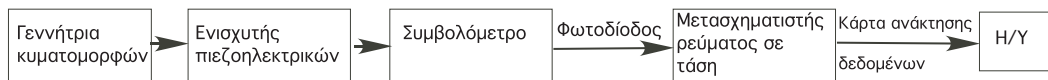
4.1 Συμβολόμετρο Michelson με μια φωτοδίοδο

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο μία από τις μεθόδους μέτρησης μετατοπίσεων είναι η συμβολομετρία. Σκοπός της εργασίας είναι η μέτρηση της μετατόπισης πιεζοηλεκτρικών επενεργητών τύπου στοίβας με τη βοήθεια του συμβολόμετρου Michelson, η ανάκτηση και επεξεργασία του σήματος που θα προκύψει από το πείραμα καθώς και η δημιουργία αλγορίθμου για την καταμέτρηση των κροσσών συμβολής.

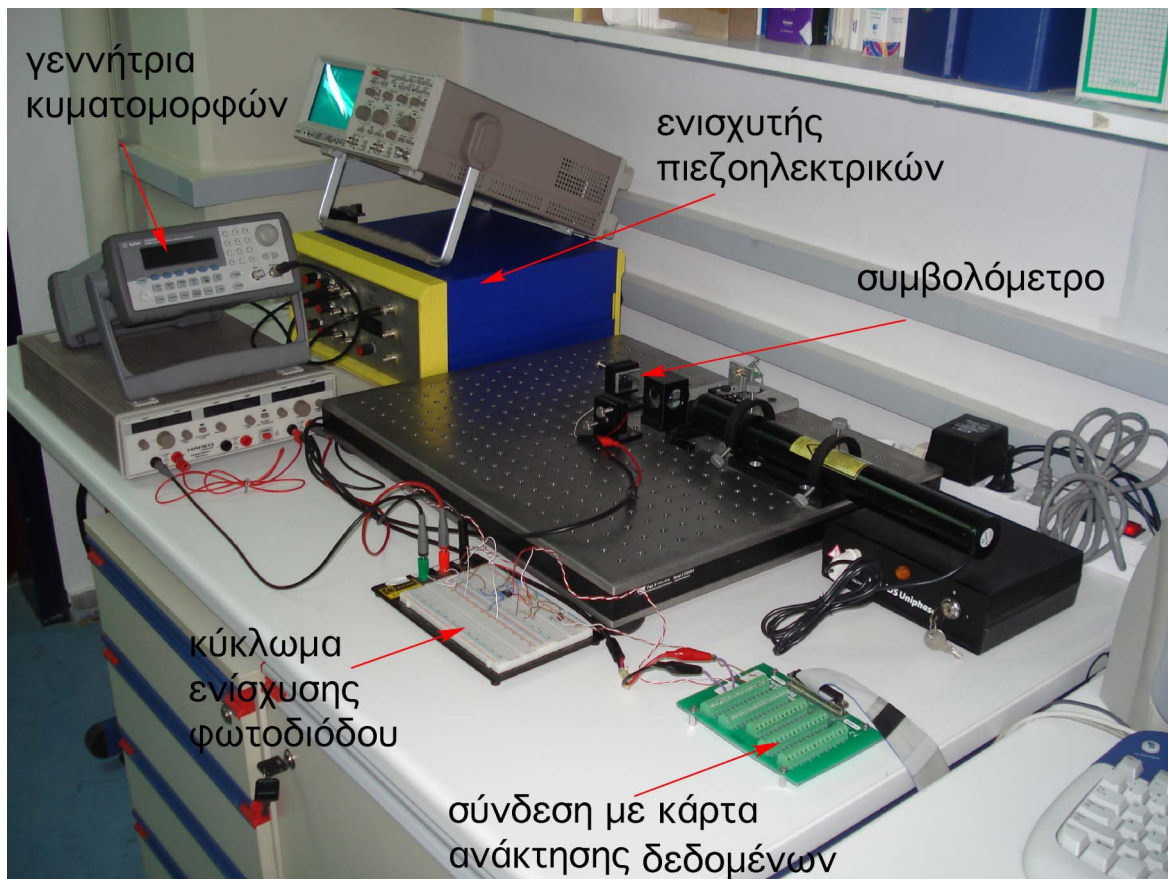
Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει περιγραφή της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο. Στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική περιγραφή και όλων των μερών που την αποτελούν. Κλείνοντας θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

4.1.1 Πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 4-1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της μετατόπισης των επενεργητών. Αρχικά παράγεται μία τάση από τη γεννήτρια κυματομορφών Agilent 33220A με πλάτος $-10V$ έως $+10V$. Το παραπάνω σήμα, αφού ενισχυθεί, θα αποτελέσει την τάση ελέγχου των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 η τάση λειτουργίας των επενεργητών στοίβας που χρησιμοποιήθηκαν είναι από 0 έως $150V$. Για τον λόγο αυτό το σήμα ενισχύεται στον ενισχυτή LE 150/25 της εταιρείας Piezomechanik. Η έξοδος του ενισχυτή οδηγείται στους επενεργητές οι οποίοι βρίσκονται στο συμβολόμετρο, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια. Μεταβάλλοντας το μήκος των πιεζοηλεκτρικών μεταβάλλεται ο οπτικός δρόμος και κατά συνέπεια οι κροσσοί συμβολής οι οποίοι προσπίπτουν στη φωτοδίοδο με αποτέλεσμα αυτή να διαρρέεται από αντίστοιχο ρεύμα. Το ρεύμα οδηγείται σε ένα κύκλωμα μετασχηματισμού σε τάση και μέσω της κάρτας ανάκτησης δεδομένων, στον Η/Υ για επεξεργασία. Στο Σχήμα 4-2 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 4-1. Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης με συμβολόμετρο και μια φωτοδίοδο.

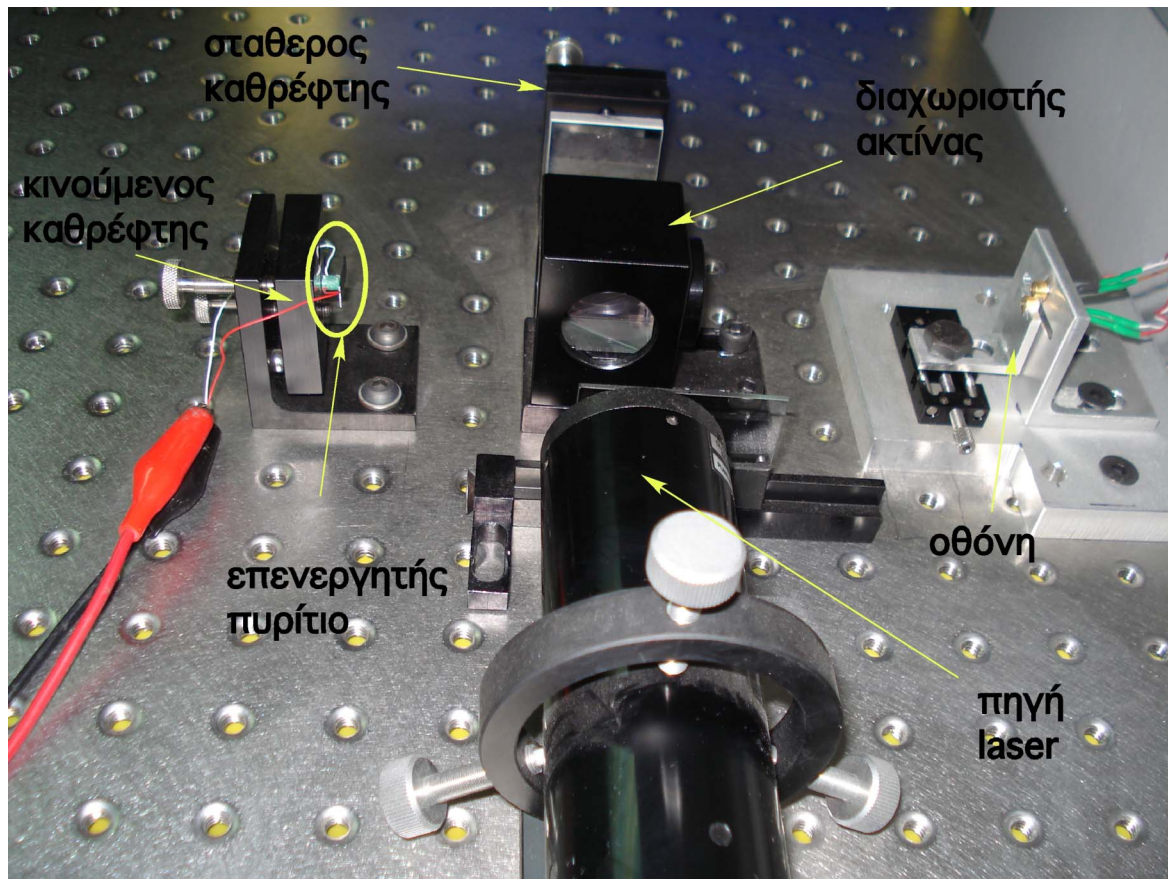


Σχήμα 4-2. Πειραματική διάταξη συμβολόμετρου για τη μέτρηση μετατόπισης πιεζοηλεκτρικών.

Συμβολόμετρο Michelson

Η επιλογή των βασικών οπτικών μερών που απαρτίζουν την οπτική διάταξη έγινε στα πλαίσια προηγούμενης μεταπτυχιακής εργασίας που εκπονήθηκε στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή Ευάγγελου Παπαδόπουλου. Εδώ θα γίνει παρουσίαση των οπτικών μερών, τα οποία έχουν προμηθευτεί από την εταιρεία Edmund Optics, ενώ περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την επιλογή τους μπορούν να βρεθούν στην εργασία [24]. Στο Σχήμα 4-3 διακρίνουμε τη φωτεινή πηγή, το διαχωριστή ακτίνας, την οθόνη, το σταθερό καθρέφτη και τον κινούμενο καθρέφτη.

Η φωτεινή πηγή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι laser Ηλίου-Νέου (HeNe) κόκκινου χρώματος της εταιρείας JDSU τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας περιέχει ο Πίνακας 4-1.



Σχήμα 4-3. Συμβολόμετρο Michelson.

Πίνακας 4-1 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά πηγής laser

Μοντέλο	1125P
Μήκος κύματος [nm]	632.8
Μέγιστη Ισχύς [mW]	<10
Ελάχιστη Ισχύς	5 mW
Μέγιστη απόκλιση (από μέση ισχύ μετά από 8h)	2.5%
Διάμετρος ακτίνας	0.81 mm
Τάση λειτουργίας	2350 V

Ο διαχωριστής ακτίνας είναι κυβικού τύπου με λόγο διάδοσης-αντανάκλασης 50/50. Περιέχεται σε μεταλλική θήκη στην οποία μπορούν να προσαρμοστούν, με ειδική βάση, φακοί και οπές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται αμφίκυκλος φακός για την εξάπλωση της συμβολής.

Ο σταθερός καθρέφτης αποτελείται από τη μεταλλική βάση και τον καθρέφτη. Η βάση έχει τη δυνατότητα να δίνει κλίση σε δύο άξονες με τις βίδες ακριβείας που

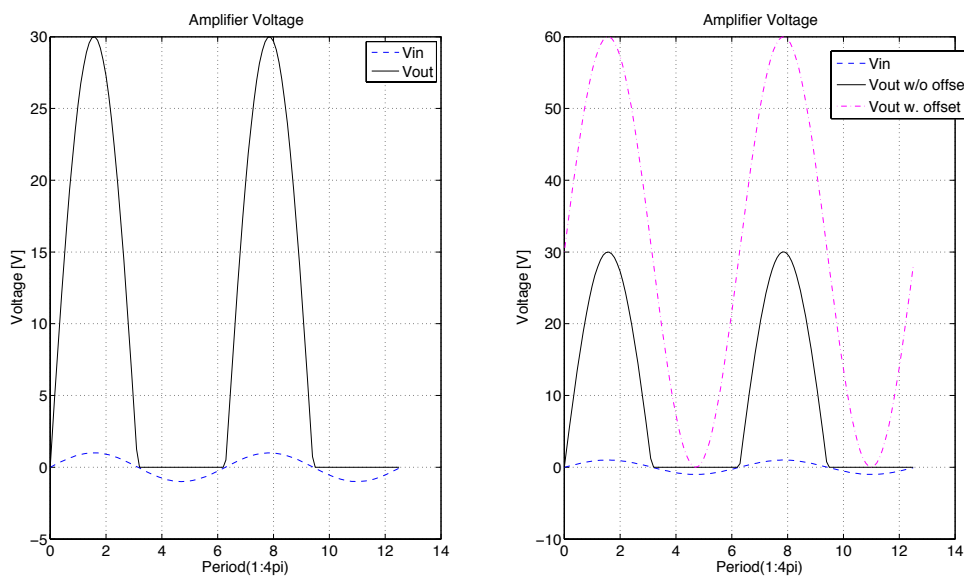
υπάρχουν στο πίσω μέρος της. Ο καθρέφτης έχει διαστάσεις 25x35 mm και ακρίβεια επιφανείας 158.2 nm.

Η μετατόπιση που μετράται στη διάταξη είναι αυτή του κινούμενου καθρέφτη. Θέλοντας να μετρήσουμε τη μετατόπιση του πιεζοηλεκτρικού επενεργητή, έχουμε αντικαταστήσει τον καθρέφτη με το σύστημα επενεργητή-πυριτίου. Το κομμάτι πυριτίου λειτουργεί ως ανακλαστική επιφάνεια και βρίσκεται κολλημένο στο μετωπικό άκρο του πιεζοηλεκτρικού. Συνεπώς μεταβάλλοντας το μήκος του τελευταίου μέσω της τάσης ελέγχου μεταβάλλουμε το μήκος του οπτικού δρόμου και κατά συνέπεια τη συμβολή των κροσσών.

Η οθόνη Ο αποτελείται από μια βάση αλουμινίου στην οποία έχουμε τοποθετήσει μια φωτοδίοδο πυριτίου (Si) για τη μετατροπή του φωτός, που προέρχεται από τους κροσσούς, σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Ενισχυτής ισχύος επενεργητών

Πρόκειται για αναλογικό ενισχυτή ισχύος με μέγιστη τάση εισόδου 5 Volt. Πιο συγκεκριμένα, δέχεται τάση εισόδου μέχρι και 10 Volt η οποία μειώνεται από τον εξασθενητή (attenuator) μέχρι και στο μισό για να προκύψουν τελικά 5 Volt. Το κέρδος στην τάση εισόδου είναι ίσο με 30. Έχει τρία κανάλια εισόδου-εξόδου τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν συγχρόνως.



Σχήμα 4-4. (α) Τάση εισόδου – εξόδου ενισχυτή πιεζοηλεκτρικών χωρίς offset, (β) με offset.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4α , όταν η τάση εισόδου είναι από -1 έως +1 Volt η τάση εξόδου θα έπρεπε να είναι από -30V έως 30V, λόγω του κέρδους. Αυτό δεν

συμβαίνει διότι ο ενισχυτής δεν έχει ως έξοδο αρνητική τάση για να μην μεταβληθεί η πόλωση του πιεζοηλεκτρικού. Για το λόγο αυτό αν θέλουμε το πιεζοηλεκτρικό να ταλαντώνεται με πλάτος 60V δίνουμε offset μια DC τάση των 30V, Σχήμα 4-4β

Γεννήτρια συχνοτήτων

Η κυματομορφή, η οποία θα αποτελέσει την είσοδο του επενεργητή, αφού ενισχυθεί, παράγεται από τη γεννήτρια συχνοτήτων Agilent 33220A. Ο χρήστης καθορίζει τον τύπο της κυματομορφής και τα χαρακτηριστικά της όπως πλάτος, συχνότητα, περίοδο κ.α. Η προκαθορισμένη έξοδος για την ημιτονοειδή κυματομορφή είναι από $-V$ έως $+V$, όπου V η τάση που καθορίζεται από το χρήστη. Εάν χρησιμοποιηθεί αυτή η λειτουργία, θα πρέπει ο χρήστης να δώσει το αντίστοιχο offset στον ενισχυτή των πιεζοηλεκτρικών.

Παρόλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα σύνθεσης από το χρήστη μιας ιδιότυπης κυματομορφής και στη συνέχεια η μεταφορά της στη γεννήτρια. Η σύνθεση γίνεται σε H/Y είτε με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού είτε σε περιβάλλον Visual Basic ή σε LabVIEW. Τέλος η σύνδεση της γεννήτριας με τον H/Y γίνεται μέσω σειριακής θύρας (USB), LAN και GPIB. Η παραπάνω επιλογή είναι πολύ χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου η καθορισμένη λειτουργία δεν εξυπηρετεί όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου ο ενισχυτής ισχύος αφαιρεί την αρνητική τάση.

Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές

Πρόκειται για πιεζοηλεκτρικούς κεραμικούς PZT επενεργητές τύπου στοίβας της εταιρείας Piezomechanik με κεραμικό επίχρισμα. Ο Pst 150/2x3/5, έχει επιφάνεια 2x3 mm και μήκος 5 mm. Η μέγιστη διαδρομή του είναι $5\mu\text{m} \pm 10\%$ όταν λειτουργεί σε τάση 0-150V. Χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρορομποτικές εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια κίνησης.

Κάρτα ανάκτησης δεδομένων

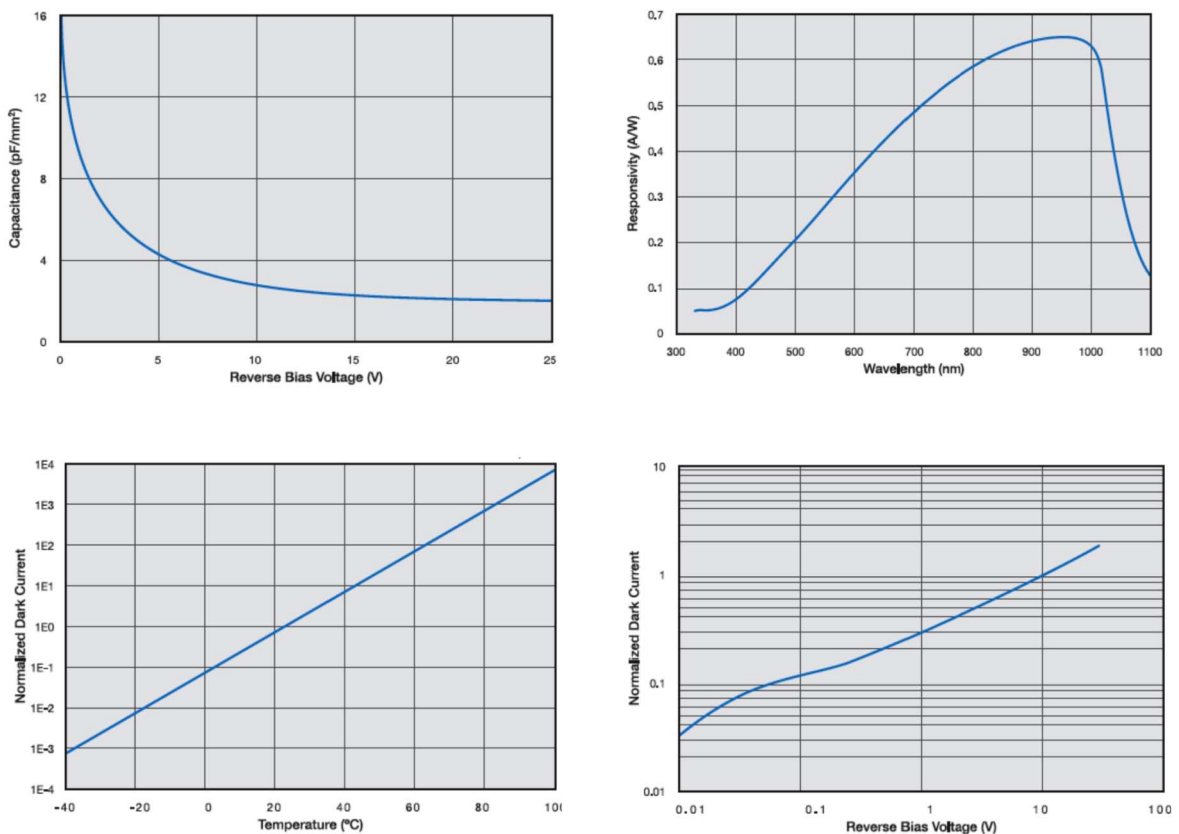
Χρησιμοποιήθηκε η κάρτα PCI 6036E της εταιρείας National Instruments με 16 αναλογικά κανάλια εισόδου και ρυθμό δειγματοληψίας στα 200kS/s. Το ηλεκτρικό σήμα μεταφέρεται στην κάρτα μέσω του τερματικού CB-68LP της ίδιας εταιρείας. Η επικοινωνία με τον H/Y γίνεται μέσω του λογισμικού LabVIEW. Οι ρουτίνες (VI) για την ανάκτηση, επεξεργασία και αποθήκευση των πειραματικών δεδομένων αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Φωτοδιόδοι

Χρησιμοποιήθηκαν φωτοδιόδοι τύπου p-i-n της εταιρείας OSI Optoelectronics και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο PIN-3CD. Τυπικές καμπύλες για τις φωτοδιόδους φαίνονται στο Σχήμα 4-5. Επιλέχθηκαν απλές φωτοδιόδοι πυριτίου και όχι κάποιος άλλος τύπος φωτοανιχνευτή για τους παρακάτω λόγους:

- μικρό μέγεθος
- ενεργή περιοχή που καλύπτει τη διάμετρο της πηγής στο συμβολόμετρο
- καλή γραμμικότητα μεταξύ έντασης φωτός (είσοδος) και τάσης εξόδου
- χαμηλή τάση λειτουργίας
- χαμηλό κόστος.

Ενδεικτικά, το κόστος της συγκεκριμένης φωτοδιόδου ανέρχεται στα 18 ευρώ ενώ μια φωτοδιόδος πυριτίου τύπου avalanche με την ίδια ενεργή περιοχή κοστίζει περίπου 300 ευρώ.



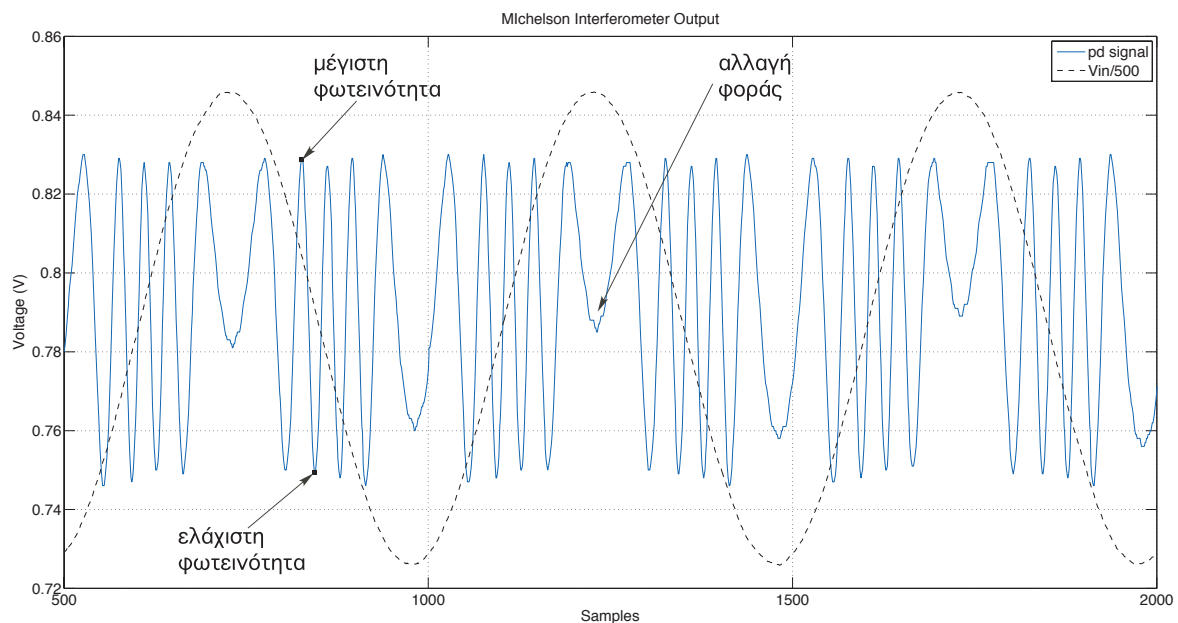
Σχήμα 4-5. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας για φωτοδιόδο PIN-3CD.

Ο τρόπος λειτουργίας της φωτοδιόδου που επιλέχθηκε είναι ο φωτοαγωγιμικός με αντίθετη πόλωση. Έγινε πληθώρα πειραμάτων στα οποία δοκιμάστηκαν κυκλώματα όπου μεταβάλλονταν η τάση πόλωσης της φωτοδιόδου, ο τρόπος λειτουργίας της καθώς και τα

στοιχεία του κυκλώματος. Αξίζει να αναφερθεί η μεγάλη ευαισθησία των φωτοδιόδων στο θόρυβο που προέρχεται από τη φωτεινότητα του υποβάθρου καθώς και στις τιμές των αντιστάσεων και της τάσης τροφοδοσίας οι οποίες σχετίζονται με το ρεύμα σκότους.

4.1.2 Πειραματικές μετρήσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις μετρήσεις που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Παρουσιάζονται πειράματα που θα δώσουν μια συνολική εικόνα της λειτουργίας της διάταξης καθώς και των μερών που θα χρειαστούν βελτίωση. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν μετρήσεις με όσο το δυνατόν αρτιότερο και καθαρό σήμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις που δρουν ως μετασχηματιστής ρεύματος σε τάση και στη συνέχεια ακολούθησε ενίσχυση του σήματος με τη χρήση τελεστικών ενισχυτών.



Σχήμα 4-6. Τάση εισόδου 60V στον επενεργητή και τάση εξόδου από το κύκλωμα της φωτοδιόδου.

Στο Σχήμα 4-6 απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή η τάση εισόδου στον επενεργητή και με συνεχή γραμμή η έξοδος από το κύκλωμα της φωτοδιόδου. Η πρώτη έχει υποστεί αρχικά φιλτράρισμα με τη μέθοδο του κινούμενου μέσου στο λογισμικό MATLAB καθώς και αριθμητική επεξεργασία για να βρίσκεται στο ίδιο εύρος με την τελευταία για λόγους καλύτερης απεικόνισης. Η συνεχής γραμμή αποτελεί την τάση εξόδου από το κύκλωμα της φωτοδιόδου το οποίο απεικονίζει την εναλλαγή των κροσσών συμβολής που προσπίπτουν στη φωτοδίοδο. Το σημείο μέγιστης φωτεινότητας που

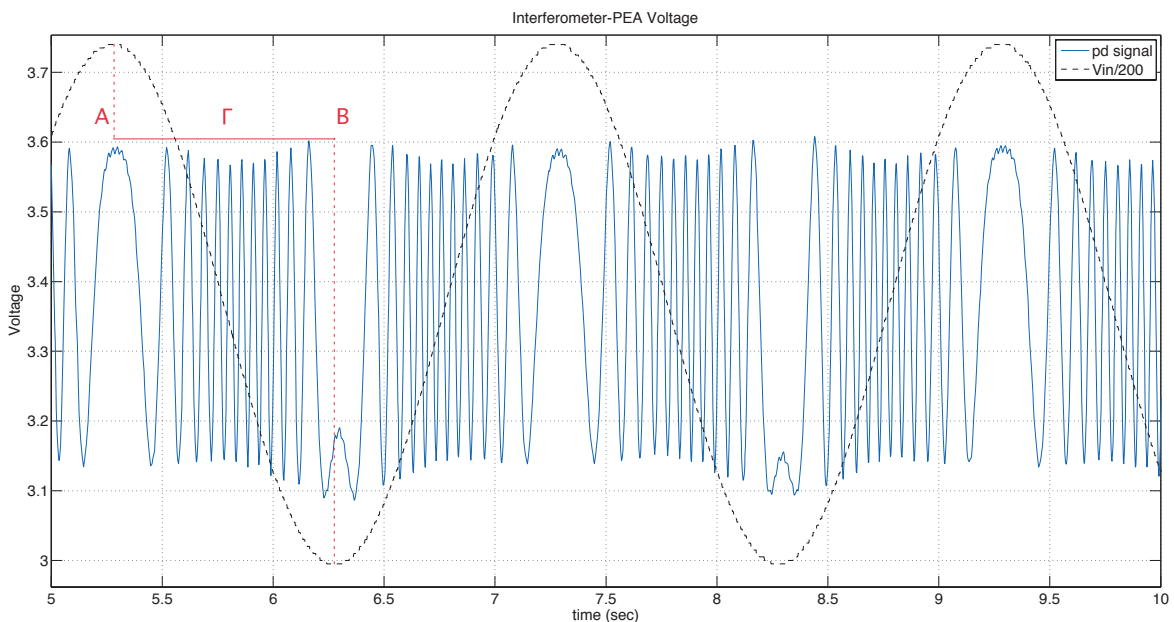
υποδεικνύεται στο Σχήμα 4-6 είναι αποτέλεσμα της πρόσπτωσης του φωτεινού κροσσού στον αισθητήρα. Παρόμοια ισχύουν και για τα σημεία ελάχιστης φωτεινότητας που αντιπροσωπεύουν τον σκοτεινό κροσσό.

Παρατηρείται ότι η ελάχιστη φωτεινότητα δεν συμπίπτει με μηδενική τάση το οποίο μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο, μέγιστη αντίθεση μεταξύ φωτεινού-σκοτεινού κροσσού προκύπτει όταν οι ακτίνες έχουν ακριβώς την ίδια ισχύ. Το παραπάνω μπορεί να μην επιτυγχάνεται πλήρως για λόγους ευθυγράμμισης. Ο δεύτερος λόγος οφείλεται σε offset που προκύπτει είτε από τα ηλεκτρονικά ή από το φως υποβάθρου.

Ερμηνεύοντας την παραπάνω γραφική παράσταση σε μετατόπιση του επενεργητή παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη τάση εισόδου προκαλεί εναλλαγή μεταξύ φωτεινού και σκοτεινού κροσσού δέκα φορές. Από την Εξ.(2.24), στο κεφάλαιο της θεωρίας της συμβολής, η εναλλαγή μεταφράζεται σε καθαρή μετατόπιση περίπου 1.6 μm .

Ημιτονοειδής τάση εισόδου

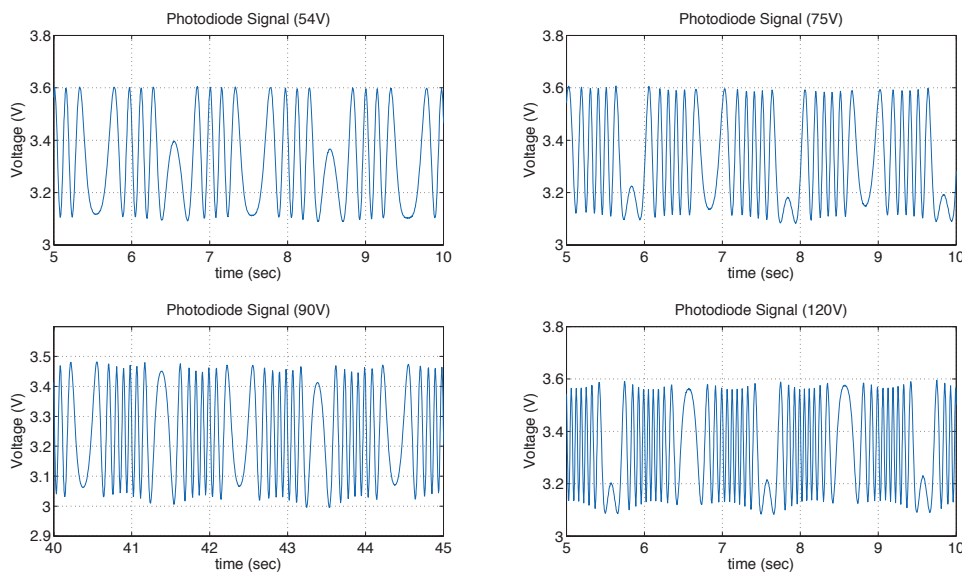
Στο Σχήμα 4-7 φαίνονται η τάση εισόδου στον επενεργητή και η τάση εξόδου από το κύκλωμα της φωτοδιόδου. Η τάση εισόδου είναι 150V και αποτελεί την μέγιστη τιμή τάσης εξόδου του ενισχυτή των πιεζοηλεκτρικών. Συνεπώς η μετατόπιση που προκύπτει είναι η μέγιστη δυνατή και είναι ίση με 24 κροσσούς που ισοδυναμούν με μετατόπιση 3.8 μm .



Σχήμα 4-7. Τάση εισόδου 150V στον επενεργητή και τάση εξόδου από το κύκλωμα της φωτοδιόδου.

Το διάστημα μεταξύ των σημείων Α και Β, που υποδεικνύονται στο Σχήμα 4-7, αποτελεί τη χρονική διάρκεια για τη μετάβαση από τη μέγιστη τιμή της τάσης εισόδου στην ελάχιστη. Μιλώντας σε όρους κίνησης του επενεργητή σημαίνει ότι στο διάστημα ΑΒ έχουμε μέγιστη μετατόπιση με οπίσθια κίνηση. Η χρονική διάρκεια μετάβασης από τον πρώτο φωτεινό κροσσό, σημείο Α, στον επόμενο σκοτεινό είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ίδια απόσταση στο σημείο Γ. Αυτό οφείλεται στην κλίση της ημιτονοειδούς τάσης εισόδου, η οποία είναι μεγαλύτερη στο σημείο Γ. Από τα παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε πληροφορία σχετικά με την ταχύτητα με την οποία διασχίζουν οι κροσσοί την οθόνη του συμβολόμετρου.

Στο Σχήμα 4-8 απεικονίζεται το σήμα εξόδου του κυκλώματος της φωτοδιόδου για τέσσερις περιπτώσεις πλάτους. Πιο συγκεκριμένα αυτές αντιστοιχούν σε πλάτος εισόδου 54V, 75V, 90V και 120V. Μεγαλύτερο πλάτος σημαίνει μεγαλύτερη έκταση του επενεργητή, μεγαλύτερη μεταβολή στον οπτικό δρόμο και τελικά μεγαλύτερο πλήθος κροσσών να διασχίζουν τη φωτοδιόδο. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται πειραματικά και φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 4-8.

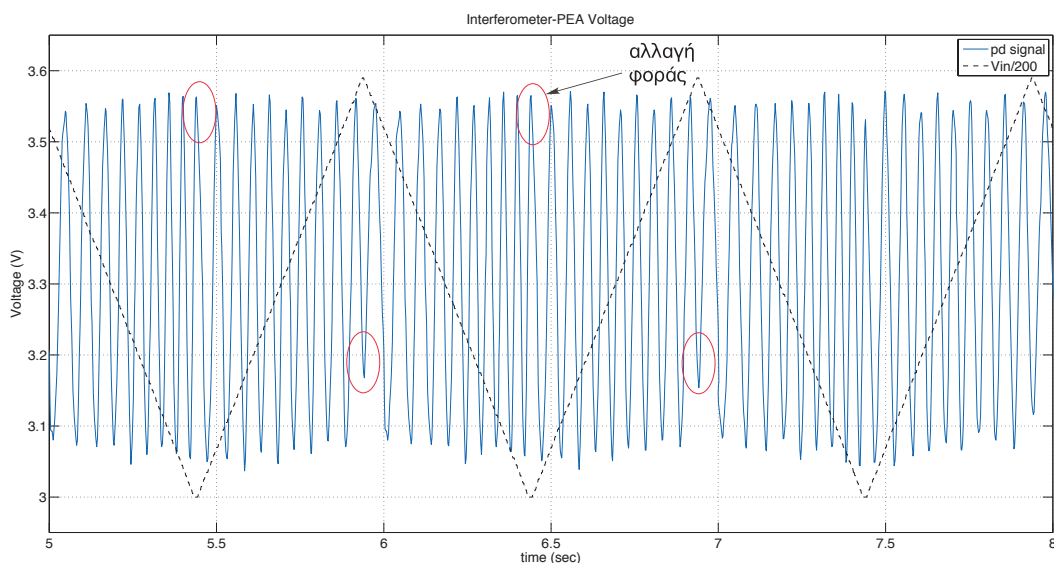


Σχήμα 4-8. Έξοδος κυκλώματος φωτοδιόδου για τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικού πλάτους και ίδιας συχνότητας σήματος εισόδου.

Άλλες μορφές τάσης εισόδου

Εκτός από την ημιτονοειδή τάση εισόδου η οποία αποτελεί την βασική μορφή εισόδου για το σχεδιασμό της απόκρισης του επενεργητή, στη συχνότητα χρησιμοποιήθηκαν είσοδοι όπως πριονωτή, εκθετική αύξηση και γραμμική αύξηση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις πειραματικές μετρήσεις που προέκυψαν.

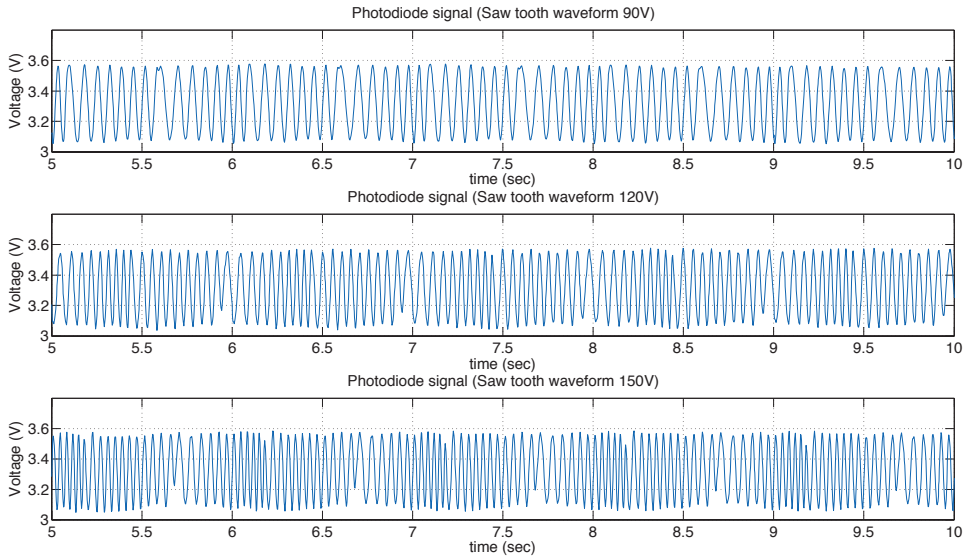
Στο Σχήμα 4-9 απεικονίζεται η πριονωτή τάση εισόδου στον επενεργητή καθώς και η απόκριση της φωτοδιόδου. Σε κόκκινο κύκλο βρίσκονται τα σημεία όπου έχουμε αλλαγή φοράς κίνησης του επενεργητή. Παρατηρούμε ότι λόγω της απότομης αλλαγής στην κλίση του σήματος σε ορισμένες περιπτώσεις, επάνω κύκλοι, είναι δύσκολο να διακρίνουμε την αλλαγή μόνο από το σήμα της φωτοδιόδου.



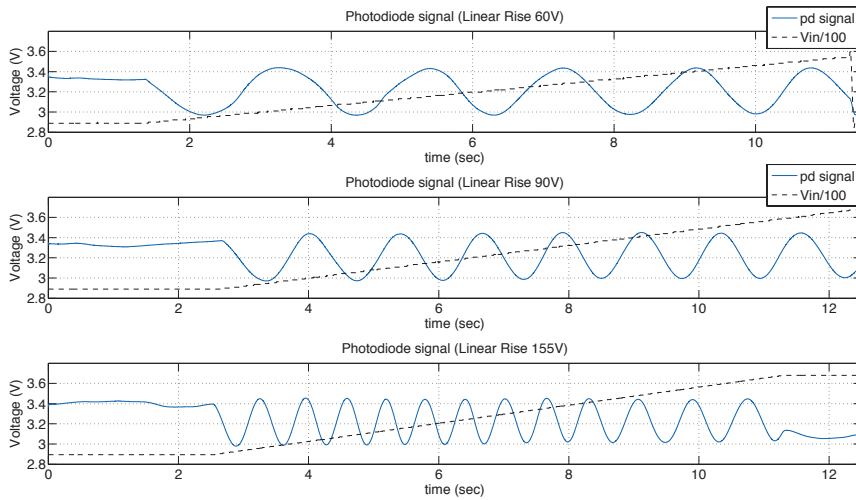
Σχήμα 4-9. Πριονωτή κυματομορφή εισόδου πλάτους 120V (διακεκομμένη γραμμή) και σήμα εξόδου κυκλώματος φωτοδιόδου.

Στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζεται το σήμα που δημιουργείται από τους διαφορετικούς σχηματισμούς των κροσσών συμβολής για τρεις περιπτώσεις πριονωτής κυματομορφής. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η τάση, υπό σταθερή συχνότητα, αυξάνονται οι κροσσοί συμβολής που διασχίζουν τη φωτοδίοδο όπως αναμενόταν. Επίσης παρατηρούμε ότι η χρονική διάρκεια της αντικατάστασης ενός φωτεινού από ένα σκοτεινό κροσσό και αντίστροφα είναι ίση σε όλο το σήμα. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι η κλίση του σήματος εισόδου είναι ίδια.

Στο Σχήμα 4-11 παρουσιάζεται η είσοδος στον επενεργητή και η έξοδος του κυκλώματος της φωτοδιόδου για τρεις περιπτώσεις εισόδου γραμμικής ανύψωσης, 60V, 90V και 155V που αποτελεί και τη μέγιστη δυνατή τάση εξόδου του ενισχυτή. Παρατηρούμε ότι αυξάνεται το πλήθος των κροσσών με την αύξηση της τάσης εισόδου. Η μέγιστη μετατόπιση που προκύπτει είναι ίση με 25 κροσσούς που αντιστοιχούν σε μετατόπιση 3.96μm.



Σχήμα 4-10. Έξοδος κυκλώματος φωτοδιόδου σε τρεις περιπτώσεις πριονωτής εισόδου ίδιας συχνότητας και διαφορετικού πλάτους.



Σχήμα 4-11. Σήμα εισόδου γραμμικής ανύψωσης για τρεις περιπτώσεις πλάτους εισόδου και τάση εξόδου κυκλώματος φωτοδιόδου.

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάστηκαν κάποιες από τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας. Σκοπός ήταν καταρχήν να στηθεί η συμβολομετρική διάταξη και να κατανοηθεί πλήρως η συσχέτιση μεταξύ κροσσών συμβολής και μετατόπισης των επενεργητών. Αυτό επιτεύχθηκε και μέρος της διαδικασίας παρουσιάστηκε παραπάνω. Έχοντας κατανοήσει τη λειτουργία του συμβολόμετρου ως

μετρικό όργανο, επιθυμούμε την καταμέτρηση των κροσσών μέσω αλγορίθμου. Αυτός παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

4.1.3 Αλγόριθμος καταμέτρησης κροσσών από σήμα φωτοδιόδου

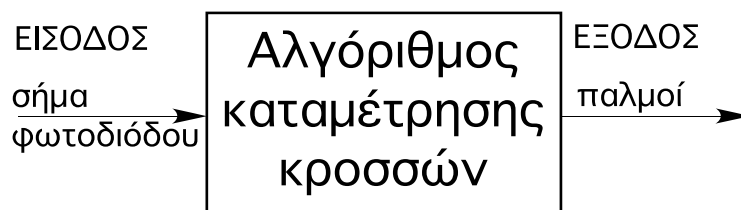
Έχοντας κατανοήσει τη συσχέτιση μεταξύ της κίνησης των κροσσών και της μετατόπισης και αφού έχουμε ανακτήσει το σήμα της φωτοδιόδου και της εισόδου στους επενεργητές, επιθυμούμε την καταμέτρηση των κροσσών που προκύπτουν. Ο λόγος που προχωρούμε στη δημιουργία αλγορίθμου είναι για να υπολογίσουμε τη μετατόπιση των επενεργητών. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τη μετατόπιση θα είμαστε σε θέση να μελετήσουμε τις διάφορες μη-γραμμικότητες που εμφανίζονται στους επενεργητές καθώς και να συγκρίνουμε, με άλλα μετρητικά συστήματα, τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Όπως είδαμε σε προηγούμενα πειράματα η μέγιστη τιμή στο σήμα της φωτοδιόδου αντιστοιχεί σε φωτεινό κροσσό και η ελάχιστη τιμή σε σκοτεινό, ή λιγότερο φωτεινό κροσσό. Συνεπώς αν εντοπίσουμε τα μέγιστα και τα ελάχιστα σημεία, στο σήμα της φωτοδιόδου, θα γνωρίζουμε τον αριθμό των κροσσών που εμφανίζονται στην οθόνη και με τη χρήση της Εξ.(2.24) θα βρούμε τη συνολική μετατόπιση. Για την εύρεση των ακρότατων δοκιμάστηκαν αρχικά έτοιμες ρουτίνες του λογισμικού LabVIEW. Δεν κατέστη δυνατό να εντοπιστούν τα τελευταία, διότι θα έπρεπε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τη διάρκεια, σε δείγματα, του ακρότατου καθώς και την τιμή του. Αυτό όμως δεν ήταν δυνατό, διότι η διάρκεια εξαρτάται από το πλάτος και τη συχνότητα λειτουργίας του επενεργητή. Επίσης, μεγάλη βαρύτητα σε αυτή τη μέθοδο έχει και θόρυβος που υπάρχει στο σήμα ο οποίος επηρεάζει και το πλάτος. Πιο συγκεκριμένα, στις πρώτες προσπάθειες που έγιναν, παρατηρήθηκε ότι λόγω θορύβου καταμετρούνταν σε ένα σημείο περισσότεροι του ενός κροσσοί.

Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε η μέθοδος παραγωγίσις του σήματος και εύρεσης των ακρότατων, που θα αντιστοιχούσαν σε φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς, από τα σημεία μηδενισμού της παραγωγού. Ούτε αυτή η προσπάθεια δεν στάθηκε ικανή να εντοπίσει με ακρίβεια τους κροσσούς. Ο βασικός λόγος είναι ο θόρυβος που επηρεάζει την παραγωγή.

Η πληροφορία που ανακτήθηκε βρίσκεται αποθηκευμένη σε αρχείο .txt. Με τη χρήση του πακέτου Matlab υλοποιείται αλγόριθμος ο οποίος καταμετρά τους κροσσούς συμβολής που εμφανίζονται στην οθόνη. Ως είσοδο του προγράμματος δίνουμε τον πίνακα των μετρήσεων, το σημείο έναρξης του πειράματος, τη συχνότητα δειγματοληψίας καθώς και ένα άνω και κάτω κατώφλι. Ως έξοδο παίρνουμε την καθαρή μετατόπιση που έχει προκύψει με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας και τη συνολική διαδρομή που διανύθηκε από τον επενεργητή.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου που επιλέχθηκε, είναι να μετατραπεί αρχικά, το σήμα από τη φωτοδιόδο σε παλμούς, βλ. Σχήμα 4-12, και στη συνέχεια να γίνει η καταμέτρησή τους. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος είναι για την αποφυγή τυχόν προβλημάτων που θα προκύψουν από το θόρυβο που υπάρχει στο σήμα και αναφέρθηκαν προηγουμένως.



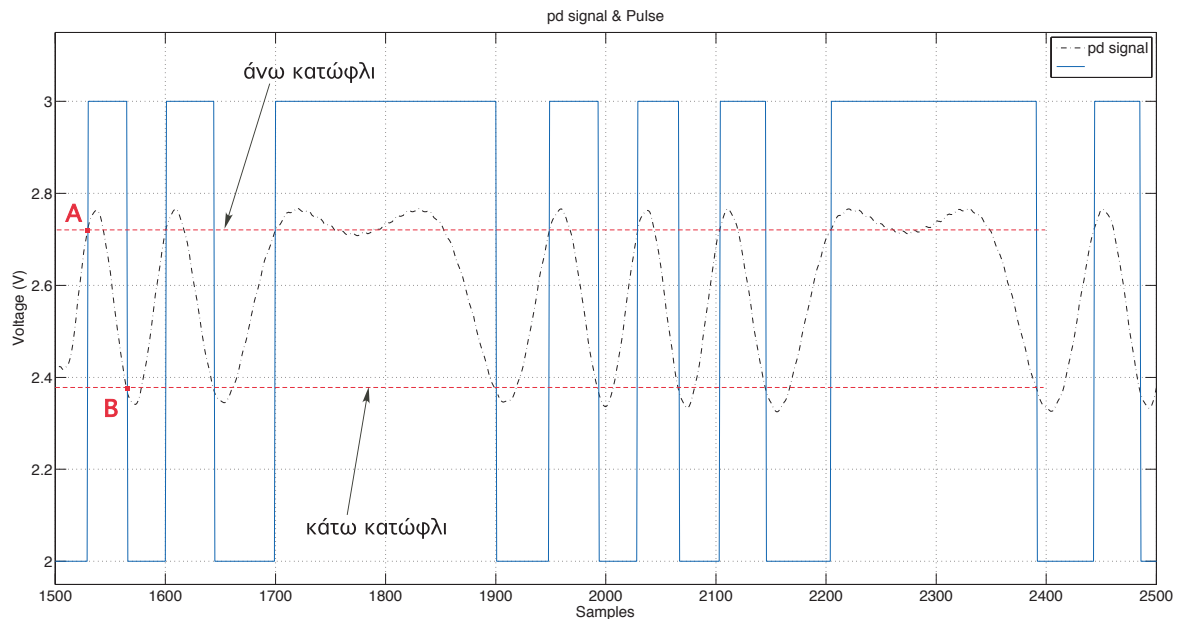
Σχήμα 4-12. Είσοδος και έξοδος του αλγορίθμου καταμέτρησης κροσσών

Οι παλμοί δημιουργήθηκαν με τη χρήση του αποζεύκτη Schmitt (Schmitt trigger). Οι τιμές των παλμών είναι μηδέν και ένα κάτι το οποίο μπορεί να αλλάξει μέσα από το πρόγραμμα. Αρχικά καθορίζουμε το άνω και κάτω κατώφλι. Όταν η τιμή του σήματος ξεπεράσει το άνω κατώφλι γίνεται ένα και παραμένει στην τιμή αυτή μέχρι το σήμα να περάσει το κάτω κατώφλι όπου γίνεται μηδέν. Παρόμοια μένει στην τιμή μηδέν μέχρι να ξεπεραστεί εκ νέου το άνω κατώφλι.

Στο Σχήμα 4-13 απεικονίζονται το σήμα της φωτοδιόδου και οι αντίστοιχοι παλμοί που προκύπτουν από τον αλγόριθμο. Για λόγους καλύτερης απεικόνισης οι παλμοί έχουν μεταφερθεί από δύο έως τρία. Στο σημείο A το σήμα της φωτοδιόδου ξεπερνάει το άνω κατώφλι, το οποίο για τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 2.72 V, με αποτέλεσμα ο παλμός να παίρνει την τιμή ένα. Η τιμή ένα διατηρείται μέχρι το σημείο B όπου το σήμα πέφτει κάτω από το κάτω κατώφλι, το οποίο είναι 2.37 V. Με τη μέθοδο αυτή ο θόρυβος που μπορεί να υπάρχει δεν επηρεάζει τον εντοπισμό των κροσσών και την καταμέτρησή τους.

Μία δυσκολία που προκύπτει με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η έλλειψη πληροφορίας για τα σημεία που έχουμε αλλαγή φοράς. Επειδή συνήθως κατά την αλλαγή φοράς δεν ολοκληρώνεται η μετάβαση από φωτεινό σε σκοτεινό κροσσό και αντίστροφα, το σήμα δεν πηγαίνει από το άνω κατώφλι στο κάτω αντίστοιχα. Καθώς συνεχίζεται η κίνηση για λιγότερο από $\lambda/4$ η θέση του φωτεινού δεν καταλαμβάνεται πλήρως από σκοτεινό κροσσό. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η τιμή του σήματος να μην φθάνει στο κάτω κατώφλι και κατά συνέπεια ο παλμός να παραμένει στην προηγούμενη τιμή.

Η δυσκολία αυτή ξεπερνιέται με τη χρήση του επόμενου αλγορίθμου, κατά τον οποίο σαρώνεται όλο το σήμα της φωτοδιόδου και με υπολογιστικές μεθόδους γίνεται εύρεση των ακρότατων. Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο δημιουργίας κροσσών και καταμέτρησης, δεν τον αντικαθιστά.



Σχήμα 4-13. Σήμα φωτοδιόδου και παλμοί schmitt.

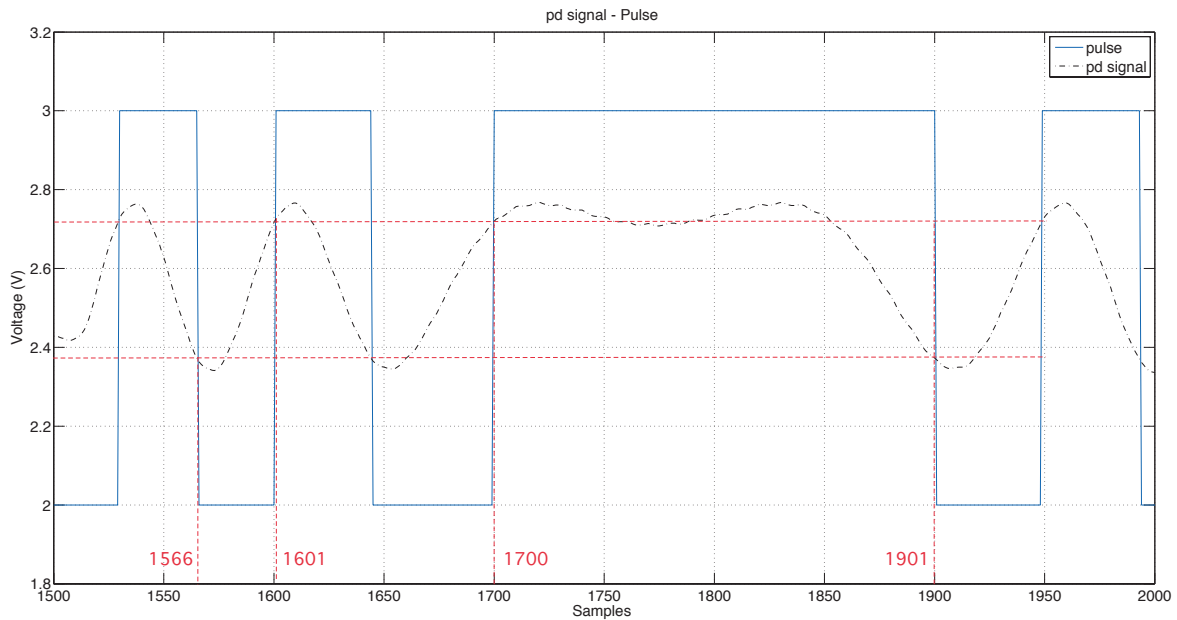
Περιγραφή αλγορίθμου

Θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του αλγορίθμου καταμέτρησης κροσσών, ο οποίος βρίσκεται στο Παράρτημα για περισσότερες πληροφορίες.

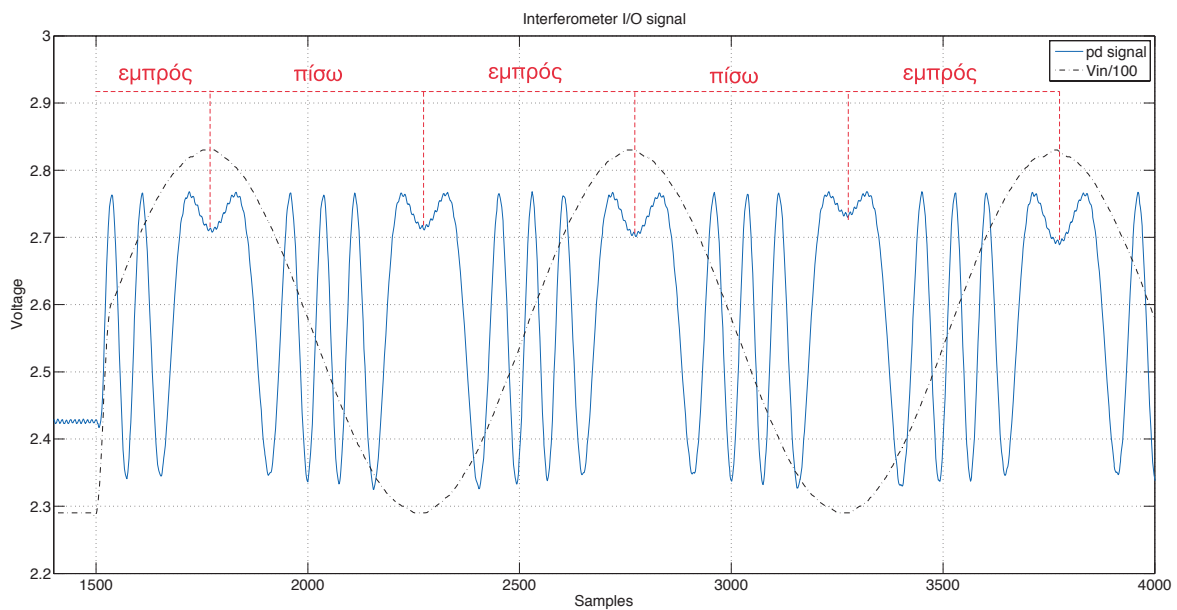
- Δημιουργία παλμών από το σήμα της φωτοδιόδου με τη μέθοδο που αναφέρθηκε πιο πάνω.
- Καταμέτρηση και αποθήκευση των σημείων αλλαγής παλμού από μηδέν σε ένα και αντίστροφα, τα οποία αντιστοιχούν σε υπέρβαση των κατωφλίων και κατά συνέπεια σε κίνηση ενός βήματος $\lambda/4$.
- Αποθήκευση των σημείων έναρξης και λήξης κάθε παλμού. Στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρήθηκε ότι λόγω της κλίσης του σήματος εισόδου η χρονική διάρκεια μετάβασης από σκοτεινό σε φωτεινό κροσσό διαφέρει. Στο Σχήμα 4-14 απεικονίζεται η συσχέτιση της διάρκειας των παλμών με την αλλαγή φοράς. Εκμεταλλευόμενοι αυτή την ιδιότητα του σήματος μπορούμε, έχοντας τη διάρκεια των μεταβάσεων να γνωρίζουμε πότε έχουμε αλλαγή φοράς. Ο λόγος που ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία είναι για να βρούμε πότε μεταβάλλεται η φορά κίνησης του επενεργητή.
- Από τις μεταβλητές εισόδου βρίσκουμε τον αριθμό των εναλλαγών από εμπρόςθια σε πίσω κίνηση. Έχοντας χωρίσει προηγουμένως, το δείγμα σε περιοχές κίνησης με διαφορετική φορά βρίσκουμε από το σήμα εισόδου τη φορά κατά την εκκίνηση του πειράματος και εναλλάξ γνωρίζουμε για τις υπόλοιπες. Στο

Σχήμα 4-15 για παράδειγμα, βρίσκουμε ότι κατά την εκκίνηση του πειράματος ο επενεργητής κινείται εμπρός, λόγω της θετικής κλίσης του σήματος εισόδου. Συνεπώς μετά την επόμενη αλλαγή η κίνηση θα είναι οπίσθια και ούτω κάθε εξής.

- Τέλος γίνεται η καταμέτρηση των παλμών ανα περιοχές και προκύπτει η εμπρόσθια και οπίσθια μετατόπιση καθώς και η συνολική διαδρομή.



Σχήμα 4-14. Σήμα φωτοδιόδου και παλμοί schmitt όπου φαίνεται η διάρκεια των παλμών και η συσχέτιση με την αλλαγή φοράς.



Σχήμα 4-15 Μεθοδολογία εύρεσης της φοράς κίνησης του επενεργητή.

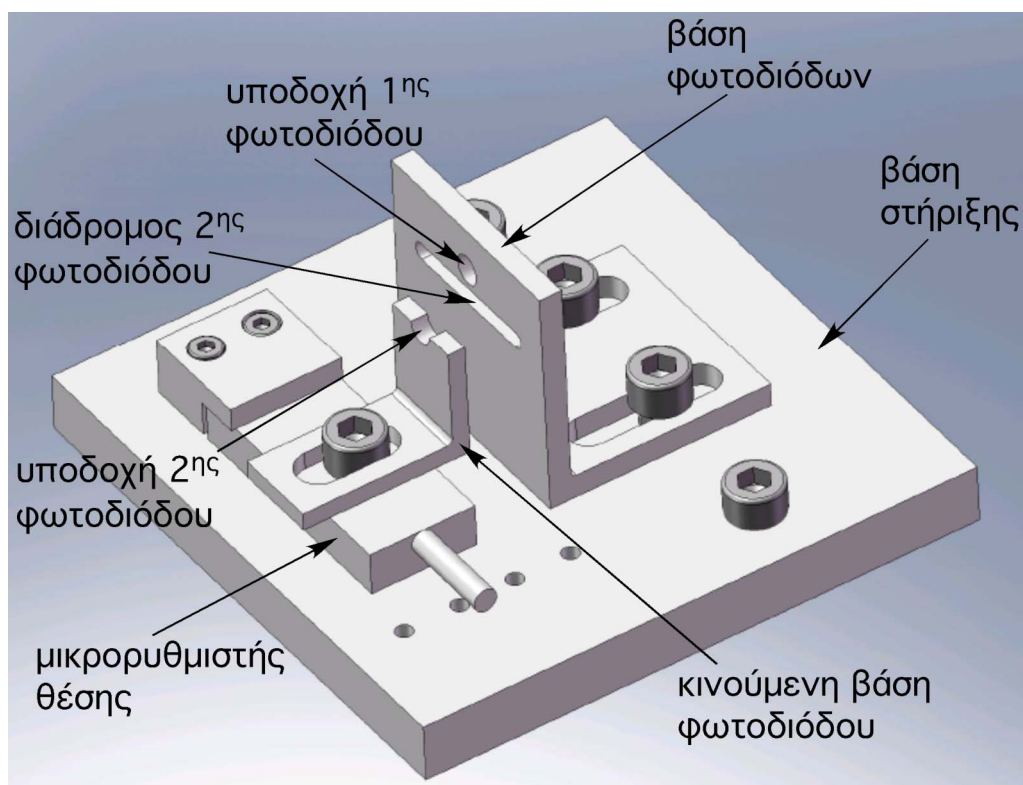
4.2 Συμβολόμετρο Michelson με συμβολομετρική παλμογεννήτρια

Στην προσπάθεια καταμέτρησης των κροσσών συμβολής προέκυψε η ανάγκη να γνωρίζουμε την φορά κίνησης του επενεργητή η οποία προήλθε από το σήμα της τάσης εισόδου. Ο λόγος που είναι απαραίτητη αυτή η πληροφορία είναι για να μπορούμε να υπολογίσουμε τη μετατόπιση του πιεζοηλεκτρικού.

4.2.1 Περιγραφή και λειτουργία συμβολομετρικής παλμογεννήτριας

Περιγραφή συμβολομετρικής παλμογεννήτριας

Εμπνευσμένοι από την οπτική παλμογεννήτρια (optical encoder), σχεδιάστηκε και συναρμολογήθηκε συσκευή η οποία παρέχει τη δυνατότητα για αναγνώριση φοράς κίνησης σε έναν άξονα, πάνω σε συμβολόμετρο Michelson. Αποτελείται από την κατασκευή που φαίνεται στο Σχήμα 4-16 και δύο φωτοδιόδους πυριτίου τοποθετημένες στις θέσεις που περιγράφονται παρακάτω.

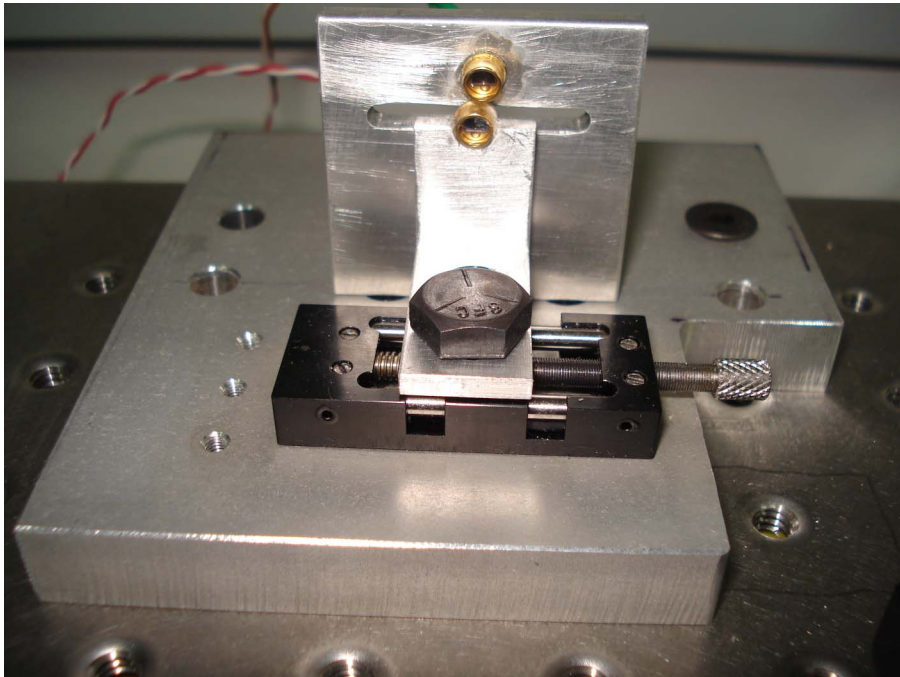


Σχήμα 4-16. Σχέδιο CAD της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας.

Η συμβολομετρική παλμογεννήτρια, Σχήμα 4-16, αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- βάση στήριξης η οποία χρησιμοποιείται για την πρόσδεση στην οπτική τράπεζα.
- Βάση για δύο φωτοδιόδους η οποία αποτελείται από μία οπή για την σταθερή φωτοδίοδο και ένα διάδρομο στον οποίο κινείται η δεύτερη φωτοδίοδος.
- Μικρορυθμιστή θέσης (micropositioner) ο οποίος έχει τη δυνατότητα να εκτελεί μετακινεί τον δρομέα του με μικρομετρική ακρίβεια.
- Βάση της κινούμενης φωτοδίοδου, την οποία έχουμε προσαρμόσει πάνω στο δρομέα. Περιστρέφοντας τον άξονα του μικρορυθμιστή επιτυγχάνουμε κίνηση της κάτω φωτοδίοδου στο διάδρομο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-16.

Να σημειωθεί ότι η τελική συσκευή της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας έχει υποστεί μικρές αλλαγές οι οποίες όμως δεν αλλάζουν τον τρόπο λειτουργίας της. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-17, έχει αφαιρεθεί ένα ορθογώνιο κομμάτι από τη μεταλλική βάση στήριξης για λόγους ευκολότερου χειρισμού του άξονα του μικρορυθμιστή. Επίσης ο τελευταίος έχει προσδεθεί πάνω στη βάση στήριξης με βίδες και όχι με σφιγκτήρα όπως φαίνεται στο σχέδιο CAD.



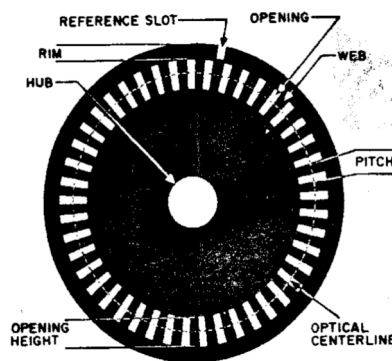
Σχήμα 4-17. Συμβολομετρική παλμογεννήτρια.

Λειτουργία συμβολομετρικής παλμογεννήτριας

Για την εξήγηση της λειτουργίας της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας θα γίνει συσχέτιση με την οπτική παλμογεννήτρια (optical encoder), του οποίου η λειτουργία είναι

πιο οικεία. Η βασική διαφορά είναι ότι με την οπτική παλμογεννήτρια μετράμε γωνιακή μετατόπιση ενώ με τη συμβολομετρική παλμογεννήτρια μετράμε ευθύγραμμη μετατόπιση.

Τα βασικά μέρη μίας οπτικής παλμογεννήτριας είναι η φωτεινή πηγή, συνήθως δίοδος λέιζερ, ο περιστρεφόμενος δίσκος και ο φωτοαισθητήρας. Πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο υπάρχουν ανοίγματα (openings), βλ. Σχήμα 4-18, των οποίων η απόσταση από κέντρο σε κέντρο (pitch) καθορίζει την ακρίβεια της μετατόπισης. Στην παλμογεννήτρια το ρόλο της πηγής παίζει η φωτεινή ακτίνα λέιζερ. Το ρόλο του περιστρεφόμενου δίσκου παίζει η συμβολή των κροσσών η οποία κινείται δεξιά–αριστερά και οι φωτοδίοδοι αποτελούν τους φωτοαισθητήρες. Τα ανοίγματα (openings) αντιστοιχούν στους φωτεινούς κροσσούς και η μεταξύ τους απόσταση (pitch) είναι η απόσταση από το κέντρο ενός φωτεινού έως το κέντρο του επόμενου φωτεινού.



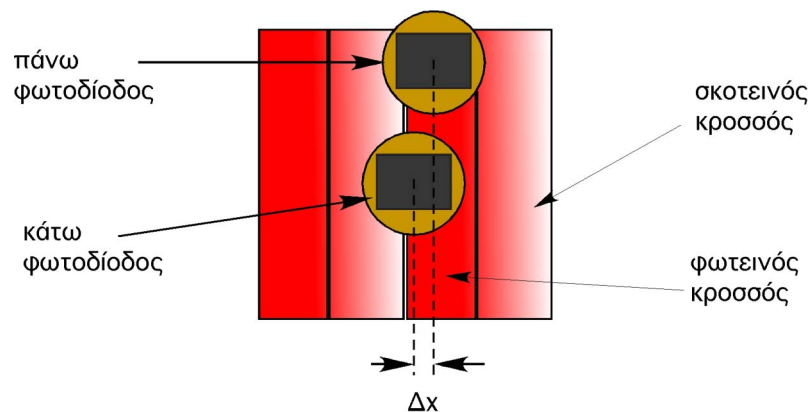
Σχήμα 4-18 Βασικός οπτικός κωδικοποιητής

Για την αναγνώριση της φοράς κίνησης με την οπτική παλμογεννήτρια, χρησιμοποιούνται δύο κανάλια παραθύρων Α και Β. Για να επιτευχθεί η αναγνώριση φοράς θα πρέπει η απόσταση μεταξύ των κέντρων των παραθύρων των δύο καναλιών να είναι πολλαπλάσιο της απόστασης των ανοιγμάτων. Στην παλμογεννήτρια η απόσταση αυτή αντιστοιχεί στην απόσταση Δx , βλ. Σχήμα 4-19, των κέντρων των δύο φωτοδίοδων τα οποία μεταβάλλονται με τη μετακίνηση του μικρορυθμιστή θέσης. Η ιδανική απόσταση Δx είναι ίση με το μισό πάχος του κροσσού. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η ρύθμιση σε αυτή τη θέση, είναι μετακινώντας το μικρορυθμιστή και ελέγχοντας στον παλμογράφο η τιμή της τάσης της κάτω φωτοδίοδου να είναι ίσης με

$$V_{pd} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \quad (4.1)$$

Όταν η πάνω φωτοδίοδος βρίσκεται σε σημείο μέγιστης φωτεινότητας η κάτω βρίσκεται σχεδόν σε μέσης φωτεινότητας σύμφωνα με την τοποθέτηση που φαίνεται στο

Σχήμα 4-19. Για το λόγο αυτό προκύπτει το σήμα των φωτοδιόδων με μια διαφορά φάσης από την οποία, ύστερα από επεξεργασία, αναγνωρίζουμε τη φορά κίνησης.



Σχήμα 4-19. Τοποθέτηση φωτοδιόδων ώστε να προκύπτει αναγνώριση φοράς.

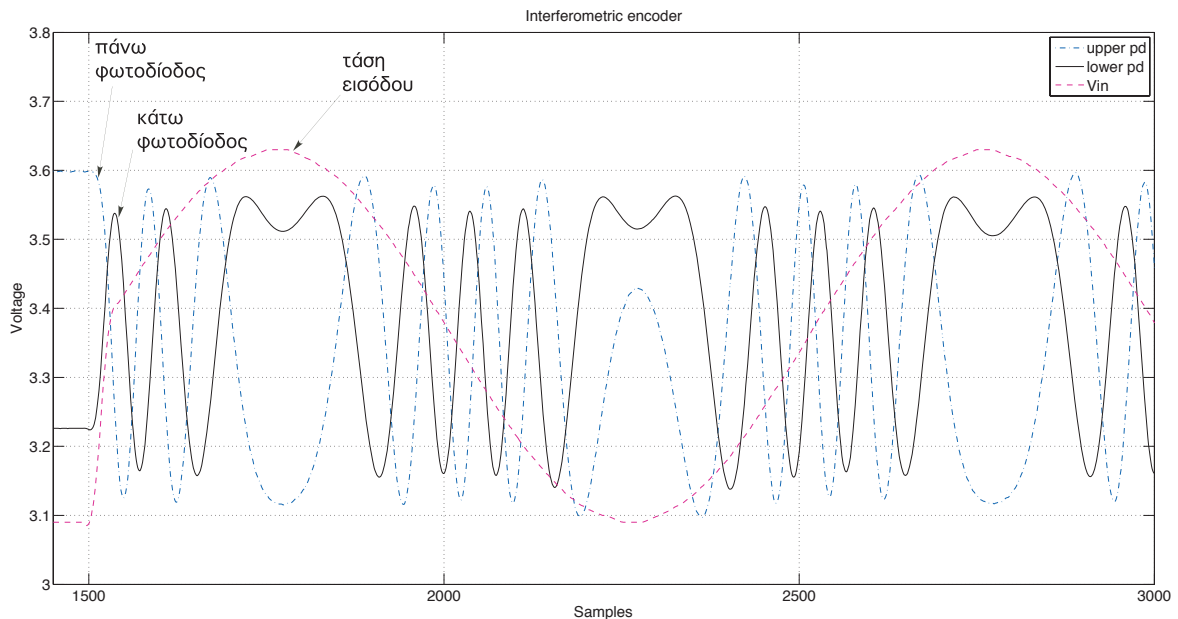
4.2.2 Πειραματικές μετρήσεις

Η οπτική διάταξη είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά στον αισθητήρα που χρησιμοποιείται. Ενώ στην προηγούμενη περίπτωση στην οθόνη του συμβολόμετρου βρισκόταν μία φωτοδίοδος τώρα βρίσκεται η συμβολομετρική παλμογεννήτρια.

Εκτός από την πολύ σημαντική προσφορά στην αναγνώριση της φοράς κίνησης, με την παλμογεννήτρια, απλοποιείται κατά πολύ ο αλγόριθμος καταμέτρησης κροσσών. Επίσης εξάγεται με πολύ μεγαλύτερη ευκολία η κυματομορφή μετατόπισης του επενεργητή με τη χρήση μόνο του σήματος της παλμογεννήτριας.

Στο Σχήμα 4-20 απεικονίζεται το σήμα των δύο φωτοδιόδων που απαρτίζουν τη συμβολομετρική παλμογεννήτρια για τάση εισόδου 54 V. Για λόγους καλύτερης απεικόνισης η τάση εισόδου έχει τοποθετηθεί στο ίδιο επίπεδο με το σήμα των φωτοδιόδων.

Έχει παρατηρηθεί ότι μπροστινή κίνηση του πιεζοηλεκτρικού επενεργητή προκαλεί κίνηση των κροσσών προς τα αριστερά όπως φαίνεται κοιτάζοντας από τον κινούμενο καθρέφτη. Αντίστοιχα η οπίσθια κίνηση προκαλεί δεξιά κίνηση των κροσσών.

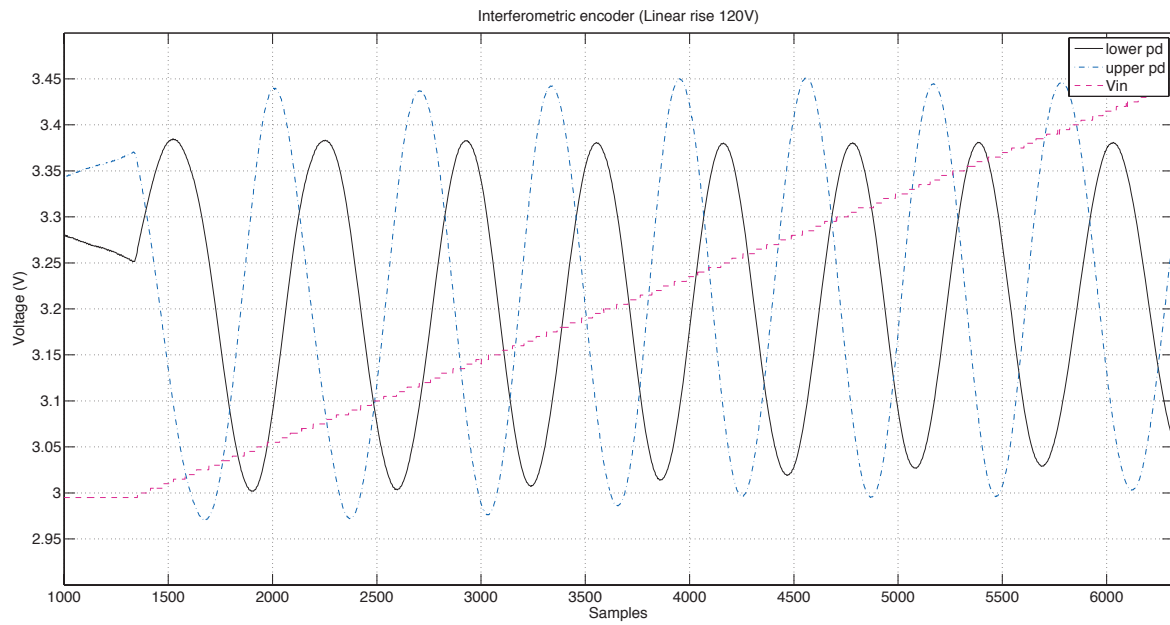


Σχήμα 4-20. Σήμα από τις δύο φωτοδιόδους της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και τάση εισόδου.

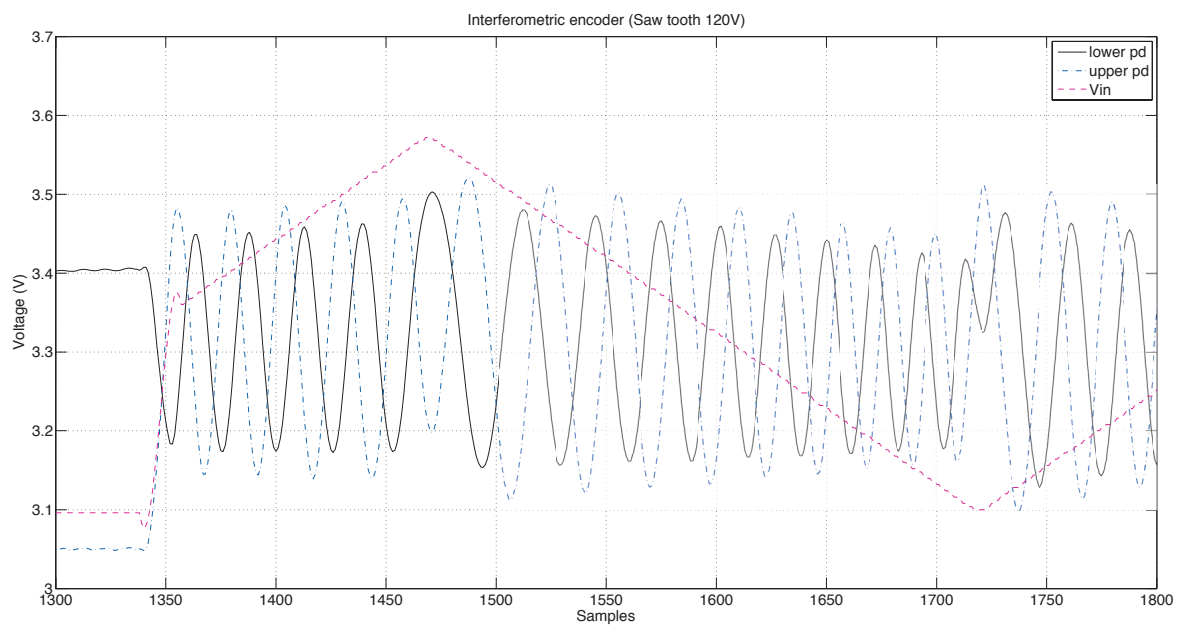
Τα παραπάνω σε συνδυασμό με την τοποθέτηση των φωτοδιόδων, Σχήμα 4-19, επιβεβαιώνονται από τη γραφική παράσταση στο Σχήμα 4-20. Η πάνω φωτοδιόδος βρίσκεται αρχικά στο σημείο μέγιστης φωτεινότητας. Το πείραμα ξεκινάει με μπροστινή κίνηση του επενεργητή. Συνεπώς, ο φωτεινός κροσσός που προσπίπτει στην πάνω φωτοδιόδο θα μετακινηθεί προς τα αριστερά και τη θέση του θα πάρει ένας σκοτεινός. Αυτό σημαίνει ότι από μέγιστη ένταση/τάση που υπάρχει στην αρχή του πειράματος θα οδηγηθούμε σε ελάχιστη, στην πάνω φωτοδιόδο. Αντίστοιχα, η κάτω φωτοδιόδος θα βρίσκεται σχεδόν σε μέση ένταση/τάση και καθώς διαγράφεται εμπρόςθια κίνηση ο φωτεινός κροσσός που πριν βρισκόταν στην πάνω φωτοδιόδο θα προσπέσει στην κάτω και θα προκύψει μέγιστη τάση. Συμπεραίνουμε ότι μπροστινή κίνηση σημαίνει ότι το σήμα της πάνω φωτοδιόδου προηγείται της κάτω. Αντίστοιχα οπίσθια κίνηση σημαίνει ότι το σήμα της κάτω φωτοδιόδου προηγείται της πάνω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-20.

Στο Σχήμα 4-21 απεικονίζεται η τάση της παλμογεννήτριας για είσοδο γραμμικής ανύψωσης 120V. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, παρατηρούμε τη διαφορά φάσης στα σήματα των δύο φωτοδιόδων καθώς και ότι η πρώτη φωτοδιόδος προηγείται της δεύτερης λόγω της μπροστινής κίνησης του επενεργητή.

Στο Σχήμα 4-22 απεικονίζεται η τάση της παλμογεννήτριας για πριονωτή είσοδο 120V. παρατηρούμε τη διαφορά φάσης στα σήματα των δύο φωτοδιόδων καθώς και ότι η πρώτη φωτοδιόδος προηγείται της δεύτερης στην μπροστινή κίνηση. Στην περίπτωση αυτή λόγω απότομης αλλαγής της κλίσης του σήματος εισόδου, η αλλαγή φάσης είναι πιο δυσδιάκριτη.



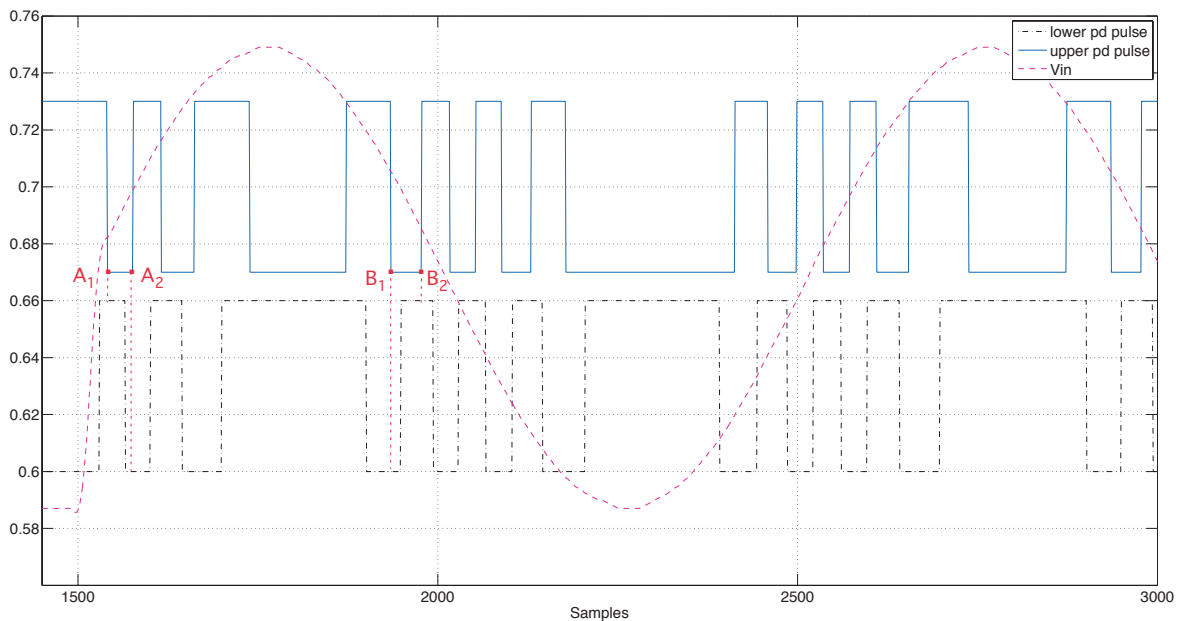
Σχήμα 4-21. Σήμα συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και τάσης εισόδου για είσοδο γραμμικής ανύψωσης.



Σχήμα 4-22. Σήμα συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και τάσης εισόδου για πριονωτή είσοδο.

4.2.3 Αλγόριθμος καταμέτρησης κροσσών από σήμα συμβολομετρικής παλμογεννήτριας

Μετά την υλοποίηση της συμβολομετρικής παλμογεννήτριας και την κατανόηση της λειτουργίας της για την αναγνώριση φοράς κίνησης, θέλουμε να σχεδιάσουμε έναν αλγόριθμο για την καταμέτρηση κροσσών. Όπως και στην περίπτωση του αλγόριθμου με τη χρήση μίας φωτοδιόδου, μετατρέπουμε το σήμα σε παλμούς και στη συνέχεια προχωρούμε στην καταμέτρηση. Οι παλμοί που αντιστοιχούν στο πείραμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-20 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-23.



Σχήμα 4-23. Παλμοί από συμβολομετρική παλμογεννήτρια και τάση εισόδου.

Να σημειώσουμε ότι οι τιμές των παλμών και τις τάσης εισόδου δεν είναι πραγματικές αλλά τις ανάγουμε στο ίδιο επίπεδο για καλύτερη απεικόνιση. Στη συνέχεια προσπαθούμε να συσχετίσουμε το είδος της κίνησης, εμπρός ή οπίσθια, με το σχηματισμό των παλμών. Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΚΙΝΗΣΗ
 - Μετάβαση πάνω φωτοδιόδου από 1→0 & τιμή κάτω φωτοδιόδου ίση με 1.
 - Μετάβαση πάνω φωτοδιόδου από 0→1 & τιμή κάτω φωτοδιόδου ίση με 0.
- ΟΠΙΣΘΙΑ ΚΙΝΗΣΗ
 - Μετάβαση πάνω φωτοδιόδου από 1→0 & τιμή κάτω φωτοδιόδου ίση με 0.
 - Μετάβαση πάνω φωτοδιόδου από 0→1 & τιμή κάτω φωτοδιόδου ίση με 1.

Περιγραφή αλγορίθμου καταμέτρησης κροσσών

Έχοντας μελετήσει τη συσχέτιση μεταξύ είδους κίνησης και τιμής παλμών προχωρούμε στην υλοποίηση του αλγορίθμου καταμέτρησης. Τα βήματα είναι:

- Δημιουργία παλμών για κάθε φωτοδίοδο με τη μέθοδο schmitt trigger που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο με λεπτομέρεια.
- Σάρωση όλου του δείγματος των παλμών και έλεγχος των υποθέσεων που καθορίζουν το είδος κίνησης και περιγράφηκαν πιο πάνω.
- Τέλος γίνεται η καταμέτρηση των παλμών ανα περιοχές και προκύπτει η εμπρόσθια και οπίσθια μετατόπιση καθώς και η συνολική διαδρομή.

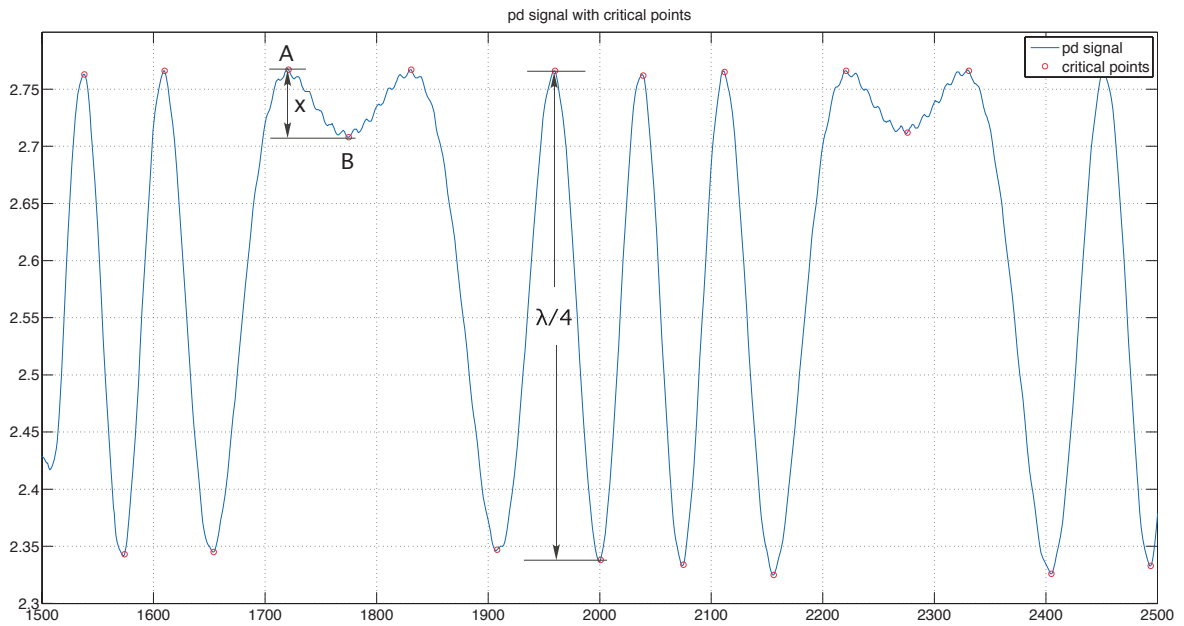
4.2.4 Αλγόριθμος δημιουργίας κυματομορφής μετατόπισης από σήμα συμβολομετρικής παλμογεννήτριας

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία της κυματομορφής της κίνησης του επενεργητή από το σήμα της φωτοδίοδου. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να εντοπίσουμε με ακρίβεια τα σημεία μέγιστης και ελάχιστης φωτεινότητας ώστε σε εκείνα τα σημεία να μετράμε μετατόπιση ενός ολόκληρου βήματος $\lambda/4$, Σχήμα 4-24. Σαρώνοντας ολόκληρο τον πίνακα που περιέχεται η πληροφορία της βρίσκουμε τα σημεία ενδιαφέροντος.

Στο Σχήμα 4-24 απεικονίζονται με κόκκινο κύκλο τα σημεία ενδιαφέροντος. Η μετατόπιση από ένα μέγιστο σε ένα ελάχιστο είναι $\lambda/4$ σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο της συμβολής. Όπως παρατηρούμε στα σημεία A και B που φαίνονται στο Σχήμα 4-24, κατά την αλλαγή φοράς δεν προκύπτει ένα ολόκληρο βήμα. Κάνοντας την παραδοχή ότι οι κροσσοί είναι ομοιόμορφης φωτεινότητας βρίσκουμε την μετατόπιση x με τον παρακάτω τρόπο :

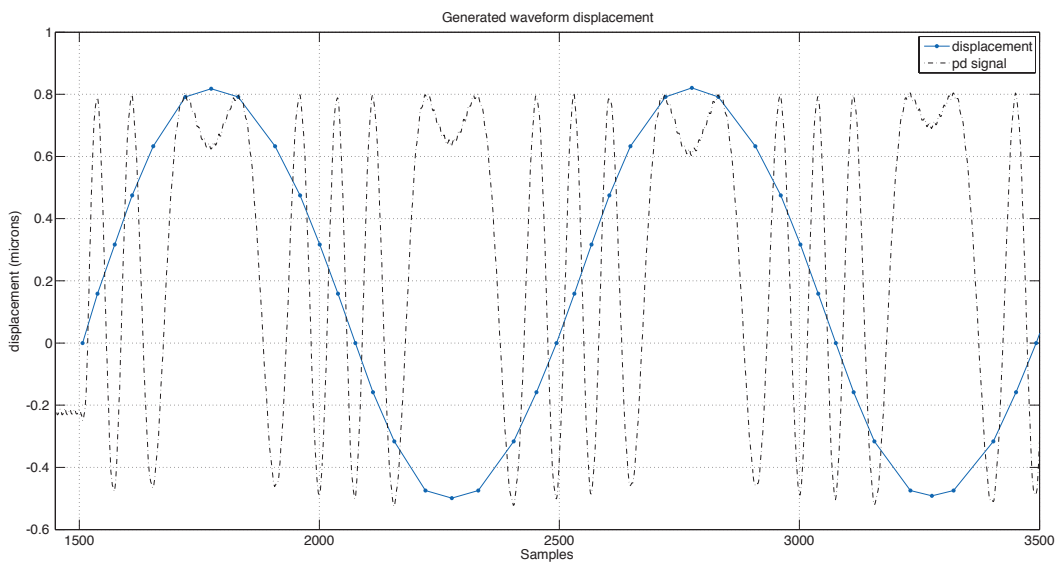
$$x = \frac{|V_B - V_A|}{V_{\max} - V_{\min}} \cdot \lambda/4 \quad (4.2)$$

όπου V είναι οι τιμές της τάσης από το σήμα της φωτοδίοδου. Ουσιαστικά βρίσκουμε το κλάσμα μεταβολής της τάσης κατά την αλλαγή φοράς και το πολλαπλασιάζουμε με το βήμα για να προκύψει η μετατόπιση.

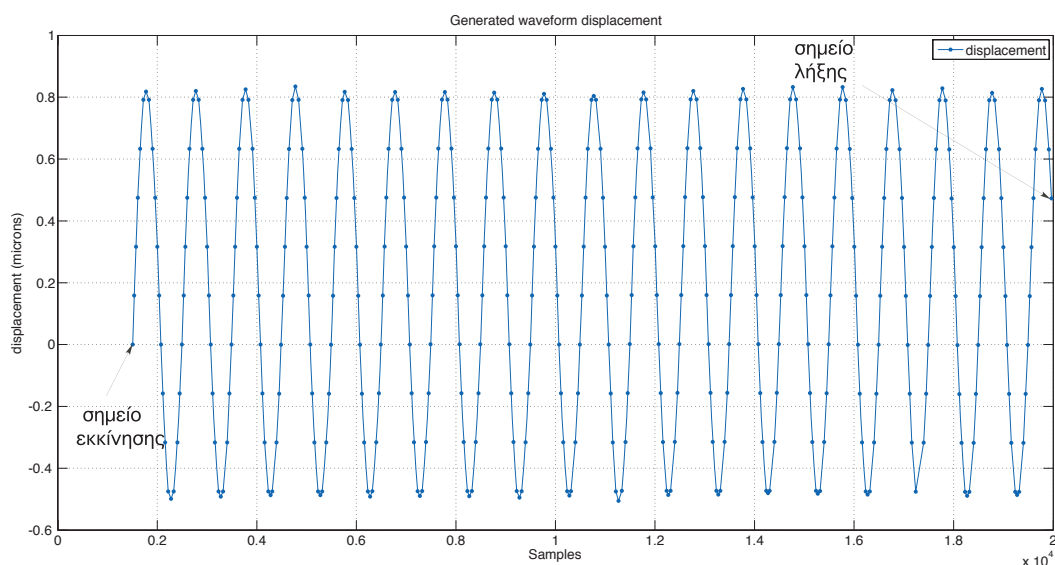


Σχήμα 4-24. Εύρεση σημείων ενδιαφέροντος για τη δημιουργία κυματομορφής κίνησης.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω, κατασκευάζουμε τη κυματομορφή της μετατόπισης του επενεργητή. Αρχικά θεωρούμε ότι ξεκινάει από μηδενική μετατόπιση και αναλόγως το είδος κίνησης προσθέτουμε ή αφαιρούμε την αντίστοιχη μετατόπιση. Στο Σχήμα 4-25 απεικονίζεται η κυματομορφή και το σήμα μίας εκ των δύο φωτοδιόδων. Με τελεία απεικονίζονται τα σημεία ενδιαφέροντος στα οποία γίνεται η κατάλληλη προσθαφαίρεση μετατόπισης.



Σχήμα 4-25. Σχηματιζόμενη κυματομορφή μετατόπισης και σήμα μίας εκ των δύο φωτοδιόδων.



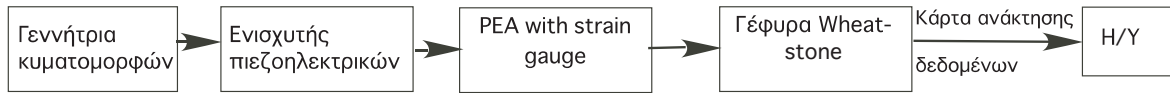
Σχήμα 4-26. Κυματομορφή μετατόπισης για ολόκληρο πείραμα διάρκειας 40 δευτερολέπτων.

Στη Σχήμα 4-26 παρουσιάζεται η κυματομορφή για τη συνολική διάρκεια του πειράματος. Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με τον αλγόριθμο προκύπτει αρνητική μετατόπιση. Έχοντας το τελικό σημείο της μετατόπισης μπορούμε να δούμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την καθαρή μετατόπιση. Αν παρατηρήσουμε το Σχήμα 4-25 θα δούμε ότι στην αρχή του πειράματος διαγράφεται μετατόπιση που αντιστοιχεί σε πέντε κροσσούς και η αμέσως επόμενη οπίσθια κίνηση είναι ίση με οχτώ κροσσούς. Η τάση εισόδου δίνεται μέσω λογισμικού στον Η/Υ στον οποίο έχουμε προσθέσει ένα offset ώστε να μην προκύψουν αρνητικές τιμές τάσης.

4.3 Επιμηκυνσιόμετρο

4.3.1 Πειραματική διάταξη

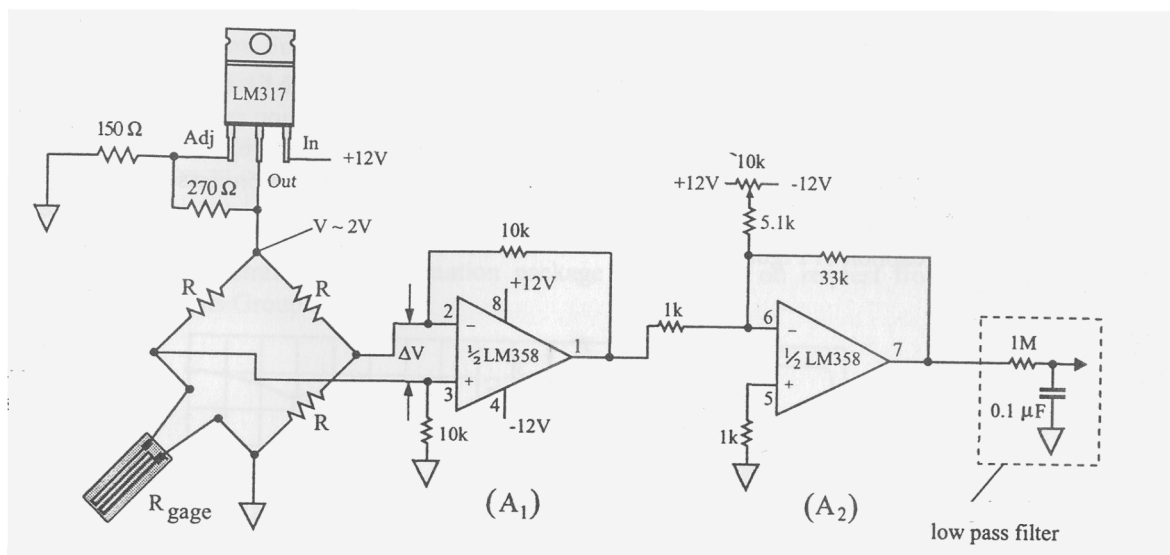
Η πειραματική διάταξη είναι όμοια με το προηγούμενο πείραμα μόνο που αλλάζει το αισθητήριο. Αντί του συμβολόμετρου χρησιμοποιείται μεταλλικό επιμηκυνσιόμετρο το οποίο βρίσκεται επικολλημένο στην πλαϊνή επιφάνεια επενεργητή ίδιου τύπου και χαρακτηριστικών. Στο Σχήμα 4-27 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 4-27. Διάγραμμα ροής πειραματικής διάταξης με επιμηκυνσιόμετρο.

Καθώς επεκτείνεται ο επενεργητής, μειώνεται το πάχος του και καθώς συμπιέζεται αυξάνεται. Αποτέλεσμα της μεταβολής του πιεζοηλεκτρικού είναι να αλλάζουν και οι διαστάσεις του και κατά συνέπεια και η ηλεκτρική αντίσταση του επιμηκυνσιόμετρου.

Εκμεταλλευόμενη αυτή την ιδιότητα, ενώνουμε τον αισθητήρα στο ένα μπράτσο μιας γέφυρας Wheatstone η οποία διεγείρεται από μια πηγή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-28. Όταν μεταβληθεί η αντίσταση του αισθητήρα βγαίνει από την ισορροπία η γέφυρα και στην έξοδό της παίρνουμε μια τάση ΔV . Στη συνέχεια ενισχύουμε το σήμα με τελεστικούς ενισχυτές και στο τέλος φιλτράρουμε το ενισχυμένο σήμα με ένα βαθυπερατό φίλτρο τα χαρακτηριστικά του οποίου εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας του επενεργητή.



Σχήμα 4-28. Κύκλωμα με γέφυρα Wheatstone, κύκλωμα ενίσχυσης και βαθυπερατό φίλτρο για το επιμηκυνσιόμετρο.

Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούμε στη γέφυρα είναι ακριβείας 1% και η τιμή τους είναι ίση με αυτή του επιμηκυνσιόμετρου. Η τάση εξόδου ΔV της γέφυρας Wheatstone, όταν δεν βρίσκεται σε ισορροπία, δίνεται από τη σχέση

$$\Delta V = \frac{V_{in} G \epsilon}{4} \quad (4.3)$$

όπου V_{in} είναι η τάση με την οποία τροφοδοτούμε τη γέφυρα, G συντελεστής Gauge και ϵ το strain το οποίο δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.4).$$

Το σήμα που παίρνουμε στην έξοδο του κυκλώματος έχει ενισχυθεί από τους τελεστικούς ενισχυτές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-28. Συνεπώς η τιμή που μετράμε είναι ίση με

$$V_{out} = \Delta V \cdot A_1 \cdot A_2 \quad (4.5)$$

όπου A_1 και A_2 είναι τα κέρδη του πρώτου και δεύτερου ενισχυτή αντίστοιχα. Από τις Εξ.(4.3) - (4.5) λύνοντας καταλήγουμε στην τιμή της μετατόπισης του επενεργητή

$$\Delta L = \frac{4 \cdot L \cdot V_{out}}{V_{in} \cdot G \cdot A_1 \cdot A_2} \quad (4.6).$$

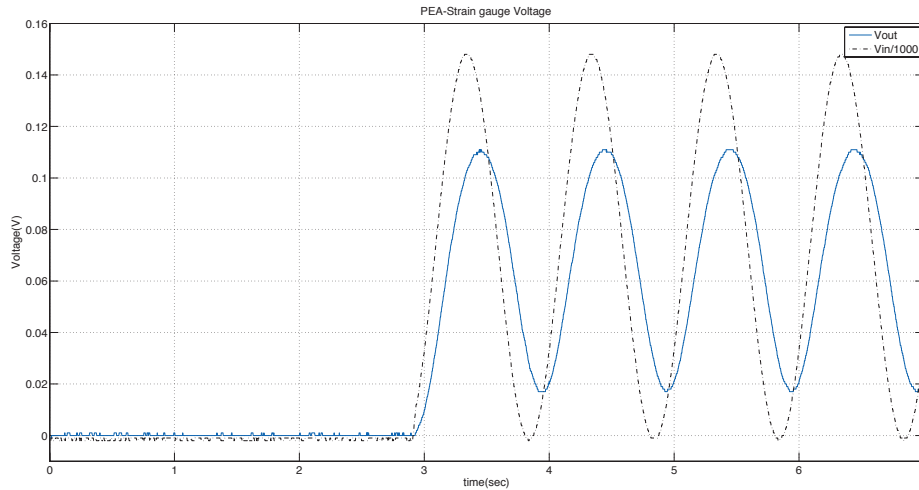
4.3.2 Πειραματικές μετρήσεις

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται μερικές από τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν με τη διάταξη που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Σκοπός είναι να κατασκευαστεί μια διάταξη η οποία θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά, είτε για σύγκριση των μετρήσεων μετατόπισης με άλλα μετρητικά συστήματα, είτε για περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το συμβολόμετρο. Έγιναν μετρήσεις για διάφορες τιμές συχνότητας αλλά και πλάτους τάσης.

Ημιτονοειδής τάση εισόδου 150 V / 1 Hz

Εισάγουμε ως είσοδο στο πιεζοηλεκτρικό μια ημιτονοειδή τάση πλάτους 150V από κορυφή σε κορυφή (peak to peak) με συχνότητα 1 Hz. Η είσοδος κατασκευάζεται στον Η/Υ και οδηγείται μέσω σειριακής σύνδεσης, USB, στη γεννήτρια κυματομορφών. Η ανάκτηση γίνεται με συχνότητα δειγματοληψίας 500 Hz. Το σήμα φιλτράρεται αρχικά μέσω του προγράμματος ανάκτησης δεδομένων. Χρησιμοποιείται το φίλτρο Savitzky-Golay με παραμέτρους που αλλάζουν σε κάθε πείραμα.

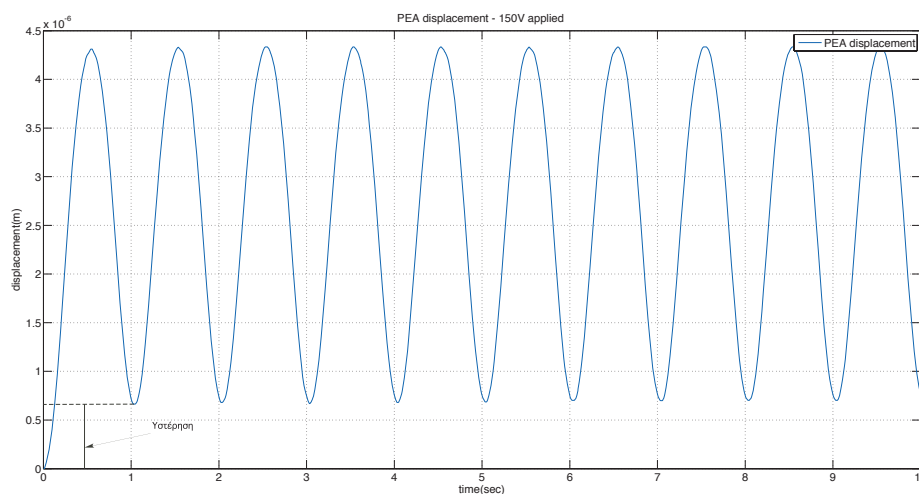
Στο Σχήμα 4-29 απεικονίζεται η τάση εισόδου στον επενεργητή, διακεκομμένη γραμμή, η οποία είναι η έξοδος από τον ενισχυτή ισχύος των πιεζοηλεκτρικών. Παρατηρούμε ότι έχει διαιρεθεί με το 1000 ώστε να μπορούμε να την μετράμε με μεγαλύτερη ασφάλεια. Η συνεχής γραμμή είναι η ενισχυμένη έξοδος της γέφυρας Wheatstone. Η πειραματική διαδικασία ξεκινάει από μηδενική τάση και μετατόπιση επειδή οι πρώτοι κύκλοι περιέχουν σημαντική πληροφορία. Τα τρία πρώτα δευτερόλεπτα εμφανίζεται κάποιος θόρυβος, κυρίως λόγω των ηλεκτρονικών, στη συνέχεια ξεκινά η τροφοδοσία των πιεζοηλεκτρικών.



Σχήμα 4-29. Τάση εισόδου στον επενεργητή διαιρεμένη με 1000 και τάση εξόδου κυκλώματος γέφυρας Wheatstone.

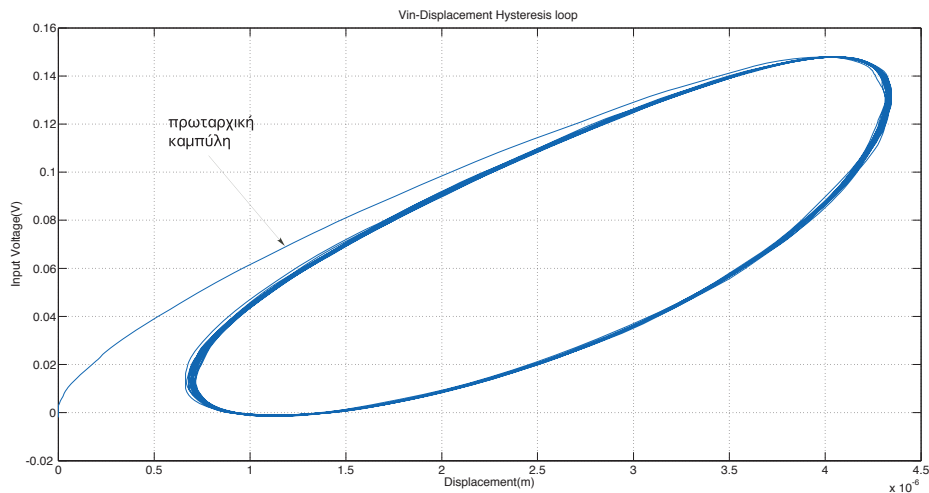
Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την Εξ.(4.6) υπολογίζουμε τη μετατόπιση που εκτελεί το πιεζοηλεκτρικό με την παραπάνω είσοδο. Στο Σχήμα 4-30 παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση που επιτυγχάνεται είναι 4.34 μm με τάση εισόδου 0 έως 150V, η οποία είναι η μέγιστη που μπορεί να παρέχει ο ενισχυτής. Αυτό είναι σύμφωνο με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές σύμφωνα με τις οποίες η μέγιστη μετατόπιση ανέρχεται στα $5\mu\text{m} \pm 10\%$.

Επίσης παρατηρούμε ότι αρχικά, όπου η τάση είναι μηδέν, το πιεζοηλεκτρικό ξεκινάει από μηδενική μετατόπιση. Παρόλα αυτά, στον επόμενο κύκλο που η τάση πέφτει πάλι στο μηδέν η μετατόπιση δεν είναι μηδενική. Αυτό οφείλεται στο μη-γραμμικό φαινόμενο της υστέρησης που υπάρχει στα πιεζοηλεκτρικά και περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.



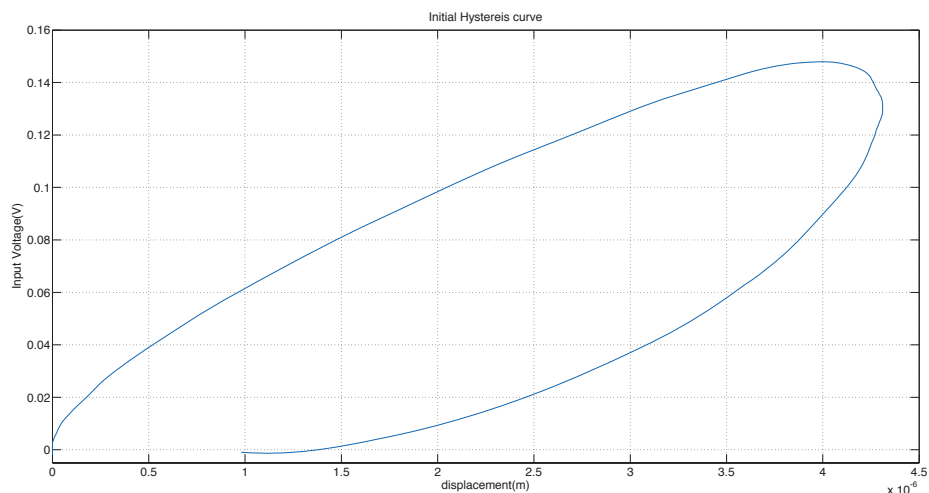
Σχήμα 4-30 Μετατόπιση πιεζοηλεκτρικού επενεργητή για είσοδο 0-150V. Παρατηρείται μέγιστη μετατόπιση 4.34 μm και υστέρηση.

Το παραπάνω φαινόμενο φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 4-31 στο οποίο απεικονίζεται ο βρόχος υστέρησης μεταξύ τάσης εισόδου και μετατόπισης του πιεζοηλεκτρικού. Όπως και πριν παρατηρούμε ότι το αρχικό άλμα γίνεται στον πρώτο κύκλο και οι υπόλοιποι κύκλοι δεν συνεισφέρουν εξίσου στο φαινόμενο. Αυτή η πληροφορία περιέχεται στην πρωταρχική καμπύλη η οποία είναι πολύ σημαντική για τη μοντελοποίηση της υστέρησης.



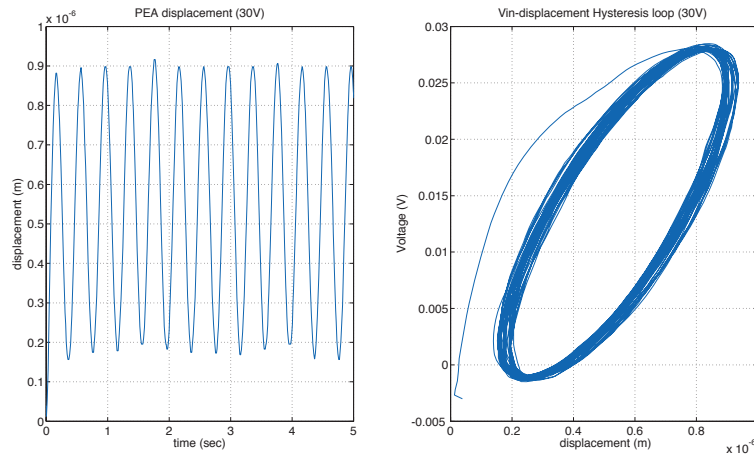
Σχήμα 4-31. Βρόχος υστέρησης μεταξύ τάσης εισόδου και μετατόπισης του πιεζοηλεκτρικού επενεργητή.

Στο Σχήμα 4-32 απεικονίζεται η υστέρηση που προκύπτει από δύο κύκλους λειτουργίας του επενεργητή. Η πρωταρχική καμπύλη ξεκινά από το μηδέν και καταλήγει μέχρι το σημείο μέγιστης μετατόπισης. Στο μοντέλο υστέρησης Maxwell χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των τιμών των μεταβλητών που θα περιγράψουν το φαινόμενο.



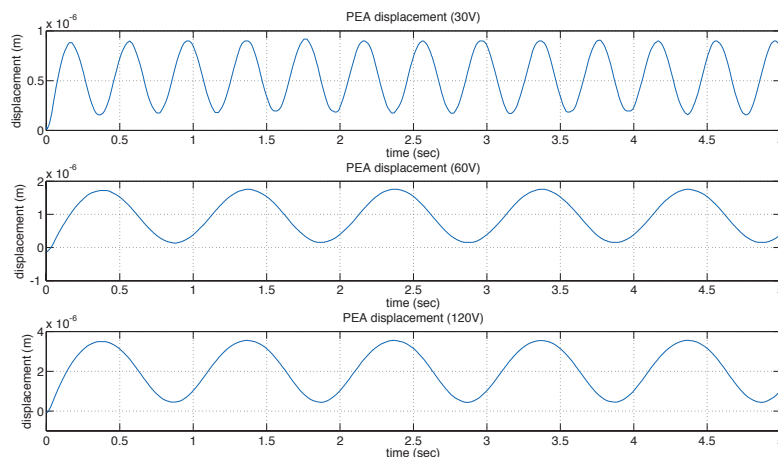
Σχήμα 4-32. Βρόχος υστέρησης για δύο πλήρεις κύκλους λειτουργίας του επενεργητή.

Στη συνέχεια, βλ. Σχήμα 4-33, παρουσιάζονται οι μετρήσεις για 30 V καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη υστέρησης. Η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω μετρήσεις για διάφορες τιμές πλάτους και συχνότητας. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να μεταβάλλεται το βαθυπερατό φίλτρο που χρησιμοποιείται πριν την έξοδο του κυκλώματος, Σχήμα 4-28.

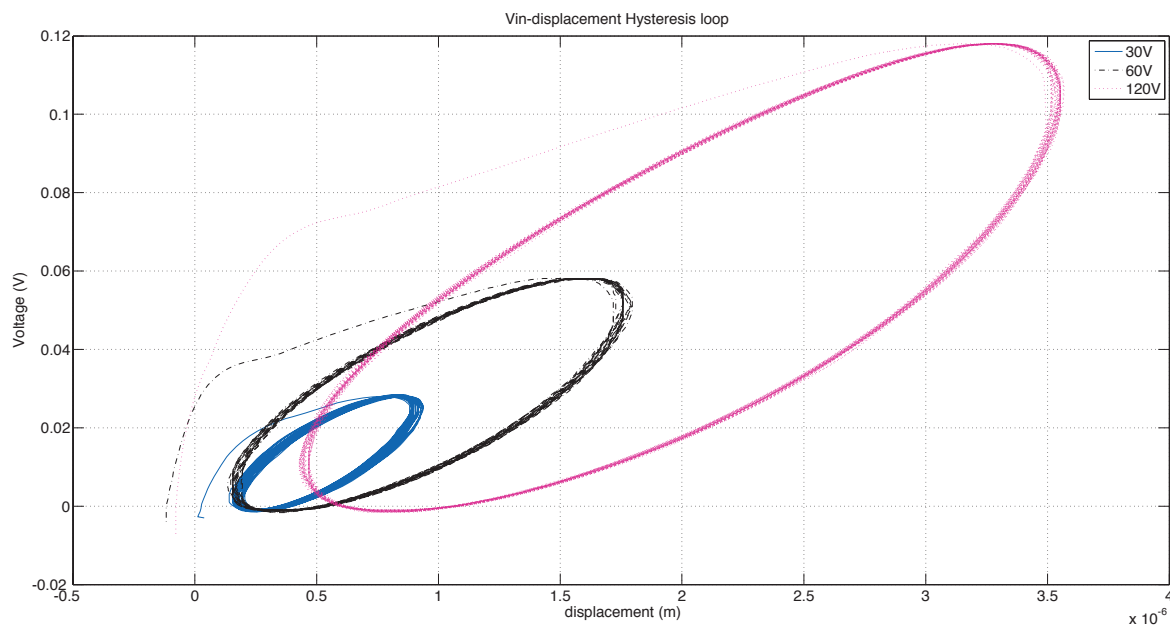


Σχήμα 4-33. Μετατόπιση επενεργητή συνάρτηση του χρόνου και βρόχος υστέρησης για είσοδο 30V και 1Hz.

Στο Σχήμα 4-34 απεικονίζεται η μετατόπιση για τις περιπτώσεις των 30 V, 60 V και 120V. Το σήμα των 30 V είναι σε συχνότητα 3Hz ενώ αυτά των 60 V και 120V είναι σε συχνότητα 1Hz. Παρατηρούμε επίσης ότι η μετατόπιση είναι ανάλογη της τάση εισόδου με λόγο που πλησιάζει το ένα προς ένα.



Σχήμα 4-34. Μετατόπιση σε συνάρτηση με το χρόνο για 30 V, 60 V και 120V.



Σχήμα 4-35. Βρόχος υστέρησης για 30 V, 60 V και 120V.

Στο Σχήμα 4-35 απεικονίζεται ο βρόχος υστέρησης για τις ίδιες περιπτώσεις με προηγουμένως. Οι αρνητικές τιμές στην τάση εισόδου καθώς και στη μετατόπιση δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα. Αντιθέτως είναι κάποιο offset το οποίο οφείλεται στα ηλεκτρονικά αλλά και στη διαδικασία φιλτραρίσματος κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

Παρατηρούμε ότι ο κύριος άξονας του βρόχου διατηρεί την κλίση του αλλά επεκτείνεται καθώς αυξάνεται η τάση και κατά συνέπεια η μετατόπιση. Επίσης παρατηρούμε ότι το χαρακτηριστικό αρχικό άλμα αυξάνεται με την αύξηση της τάσης εισόδου.

5 Συμπεράσματα και Μελλοντική εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η επεξεργασία σήματος από συμβολομετρική διάταξη με σκοπό την αναγνώριση δυναμικής συμπεριφοράς πιεζοηλεκτρικών επενεργητών. Η επιλογή των οπτικών μερών που απαρτίζουν την οπτική διάταξη έγινε στα πλαίσια προηγούμενης εργασίας.

Στα πλαίσια της εργασίας σχεδιάστηκε, συναρμολογήθηκε και ευθυγραμμίστηκε συμβολόμετρο Michelson για την μέτρηση μετατοπίσεων με ακρίβεια 158.25 nm. Το συνολικό κόστος του, μαζί με τη συμβολομετρική παλμογεννήτρια, ανέρχεται στα 2600 ευρώ. Ενώ ένα τυπικό συμβολόμετρο του εμπορίου κοστίζει περίπου 20.000 ευρώ.

Ο κινούμενος καθρέφτης αντικαταστάθηκε από σύστημα επενεργητή-ανακλαστικού υλικού, ώστε να μετράται η μετατόπιση του επενεργητή με όρους μήκους κύματος φωτός. Στην επιφάνεια της προκύπτουσας συμβολής τοποθετήθηκε φωτοδιόδος.

Σχεδιάστηκε κύκλωμα για τη μετατροπή του ρεύματος της φωτοδιόδου σε τάση, την ενίσχυση και το φιλτράρισμά του. Μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε στην απομάκρυνση του θορύβου από το σήμα της φωτοδιόδου παρά στη λειτουργία των επενεργητών σε υψηλές συχνότητες, έτσι ώστε να κατανοηθεί πλήρως η λειτουργία του μετρητικού και η χρήση της πληροφορίας που προκύπτει για τη μέτρηση μετατοπίσεων.

Υλοποιήθηκε λογισμικό σε περιβάλλον LabVIEW για την ανάκτηση σε Η/Υ του σήματος της φωτοδιόδου, στο οποίο ενσωματώθηκε υπολογιστικό φίλτρο εξομάλυνσης με τη μέθοδο Savitzky-Golay. Τα τελικά προγράμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά για ανάκτηση οποιουδήποτε σήματος στο εύρος των -10V έως +10V. Εγχειρίδιο για τα παραπάνω υπάρχει στο Παράρτημα.

Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε συμβολομετρική παλμογεννήτρια για την αναγνώριση φοράς κίνησης του πιεζοηλεκτρικού επενεργητή. Με τη χρήση δύο απλών φωτοδιόδων πυριτίου που βρίσκονται στην επιφάνεια συμβολής δίνεται η δυνατότητα αναγνώρισης της φοράς κίνησης του επενεργητή μέσω της κίνησης των κροσσών.

Σχεδιάστηκε αλγόριθμος καταμέτρησης των κροσσών με τη χρήση μίας φωτοδιόδου για την μέτρηση μετατόπισης και αλγόριθμος αναγνώρισης φοράς κίνησης για τη συμβολομετρική παλμογεννήτρια.

Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε κύκλωμα που περιλαμβάνει γέφυρα Wheatstone, ενίσχυση και φίλτρο για τη μέτρηση μετατόπισης πιεζοηλεκτρικών επενεργητών με τη χρήση επιμηκυσιόμετρου.

5.2 Μελλοντική εργασία

Η εργασία αυτή δίνει τη δυνατότητα για μελλοντική μελέτη θεμάτων που έχουν να κάνουν είτε με τη βελτίωση της διάταξης και των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιήθηκαν είτε με το σχεδιασμό νέων συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, προτείνονται:

- Μελέτη, σχεδιασμός και κατασκευή καλύτερου κυκλώματος μετατροπής του ρεύματος της φωτοδιόδου σε τάση και ενίσχυσης. Κατασκευή κυκλώματος με μικρό χρόνο απόκρισης και όσο το δυνατόν λιγότερο θόρυβο. Επίσης συνιστάται η τοποθέτηση του νέου κυκλώματος σε μεταλλικό περίβλημα και όσο το δυνατόν πιο κοντά στη φωτοδίοδο γίνεται.
- Αναδιάταξη του συμβολόμετρου για μέτρηση σε δύο άξονες μετατόπισης. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη συγκεκριμένης διάταξης, βραχίονα/αρπάγης, η οποία θα κινείται σε δύο άξονες και προσαρμογή του συμβολόμετρου σε αυτή.
- Κατασκευή κουτιού το οποίο θα χρησιμεύσει και ως προστατευτικό των οπτικών από σκόνη και μετακινήσεις αλλά και θα απομονώσει τη φωτεινή ένταση του περιβάλλοντος η οποία περνάει μέσα από τις φωτοδιόδους. Βέβαια αυτό προϋποθέτει ότι το συμβολόμετρο θα έχει πάρει την τελική μορφή του.
- Μέτρηση με συμβολόμετρο, των μετατοπίσεων επενεργητή ο οποίος θα έχει προσαρτημένο επιμηκυνσιόμετρο για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους.
- Αναγνώριση παραμέτρων επενεργητή με σκοπό τη δημιουργία μοντέλου της δυναμικής συμπεριφοράς, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη και την υστέρηση.
- Δημιουργία συστήματος για μέτρηση και έλεγχο της μετατόπισης επενεργητή σε πραγματικό χρόνο.
- Χρήση του συμβολόμετρου για μέτρηση μετατοπίσεων και προσανατολισμού του πρωτότυπου μικρορομπότ που αναπτύχθηκε από τους Δρ. Π. Βαρθολομαίο και Αν. Καθηγητή Ε. Παπαδόπουλο.
- Προσπάθεια χρήσης λέιζερ διόδου (laser diode) ως πηγή στην οπτική διάταξη. Αυτό θα μείωνε ακόμα περισσότερο το κόστος της διάταξης.

Βιβλιογραφία

- [1] Adriaens, H. J. M. T. A., de Koning, W. L., and Banning, R., "Modeling Piezoelectric Actuators," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Vol. 5, pp. 331–341, 2000.
- [2] Bonroff, N., "Recent advances in displacement measuring interferometry" *Meas. Sci. Technol.* 4 (1993) 907-926.
- [3] Dyson, J., "Interferometry as a measuring tool," The Machinery Publishing Co., 1970.
- [4] Fletcher, S., Longstaff, A., Mayers, A., "Investigation into the accuracy of a proposed laser diode based multilateration machine tool calibration system", *Journal of Physics: Conference series*, Vol. 13, 2005, pp. 398-401.
- [5] Ge, P., and Jouaneh, M., "Modeling Hysteresis in Piezoceramic Actuators," *Precis. Eng.*, Vol. 17, pp. 211–221, 1995.
- [6] Goldfarb, M., and Celanovic, N., "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation," *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol.17, pp.69–79. 1997.
- [7] Graeme, J., "Photodiode Amplifiers," McGraw-Hill, 1995.
- [8] Hariharan, P., "Optical Interferometry," Academic Press, 2003.
- [9] Hariharan, P., "Basics of Interferometry," Academic Press, 1992.
- [10] Hecht, E. and Zajac, A., "Optics," Addison Wesley, 1974.
- [11] Hoon, J., Hyun, S. and Y. Kwak, "Peak movement detection method of an equally spaced fringe for precise position measurement, " *Opt. Eng.* Vol. 41(2) 428-434(February 2002).
- [12] Hoon, J., Hyun, S. and Y. Kwak, "A nanometric displacement measurement method using the detection of fringe peak movement", *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000) 1352-1358.
- [13] IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE 176, 1987.
- [14] Johnson, M., "Photodetection and Measurement," McGraw-Hill, 2003.

- [15] Madhab, G. B., Kumar, C. S. and Mishra, P. K., "Design of a Bio-inspired Piezoelectric Compliant Miniature Gripper," *Proceedings of ISSS 2005*, July 2005.
- [16] Martens, H.-J., "Generalization and analysis of the fringe counting method for interferometric measurement of motion quantities," *Measurement*, Vol.25, pp. 71-87, January 1999.
- [17] Michelson, A. and Morley, E., "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether," *American Journal of Science*, November 1887.
- [18] Neumann, B., Müller U., "Fabry Perot interferometer with a quarter wave retarder and an intermediate exit for displacement measurements," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, Vol.112, pp. 81-85, February 2001.
- [19] PI. (2003), Tutorial: Piezoelectrics in Positioning (online), available: <http://www.pi.ws>.
- [20] Saoulli, H. M., and Ben Mrad, R., "Electromechanical Modeling of Piezoceramic Actuators for Dynamic Loading Applications," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Volume 128, pp. 558-567, September 2006.
- [21] Stone, J., Stejskal, A., "Diode Lasers in Length Metrology: Application to Absolute distance Interferometry," *The international Journal of Metrology*, November-December 1999.
- [22] Tolansky, S., "An Introduction to interferometry," Longman Group, 1973.
- [23] Βαρθολομαίου, Π., "Μοντελοποίηση και Έλεγχος Μικρορομποτικών Συστημάτων," Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2007.
- [24] Μαυροκέφαλου, Κ., "Ανάπτυξη Συμβολομετρικής Διάταξης Ακρίβειας $\lambda/2$ και Αναγνώριση Δυναμικής Συμπεριφοράς Πιεζοηλεκτρικών Επενεργητών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2005.

Παράρτημα

Στο Παράρτημα περιέχονται τα εξής προγράμματα:

- **1pdcounter.m** το οποίο κάνει καταμέτρηση κροσσών με τη χρήση μία φωτοδιόδου
- **encodercounter.m** το οποίο κάνει καταμέτρηση κροσσών με τη χρήση της συμβολομετρική παλμογεννήτριας
- **encodercounterwave.m** το οποίο κάνει καταμέτρηση κροσσών με τη χρήση της συμβολομετρική παλμογεννήτριας και δημιουργία κυματομορφής μετατόπισης

1pdcounter.m

```
*****
```

```
function [a,d2]=1pdcounter(u,upper,lower,sampl_rate,sign_freq,init_sampl)
```

```
tic
```

```
%This function computes the distance travelled from a PEA
```

```
%and it's displacement at the end of the acquisition.
```

```
%The array used must have in the first column the signal from the first
```

```
%photodiode. In the third column must be the input signal to the PEA
```

```
%(amplifier's signal)
```

```
%*****
```

```
%upper      :upper threshold   These boundaries correspond to the
```

```
%              voltage created from the
```

```
%              photodiode due to the laser light
```

```
%lower      :lower threshold   intensity.
```

```
%init_smpl   %sample at which the movement of the PEA begins(the  
              %amplifier is turned on)
```

```
%fin_smpl    %sample at which the movement of the PEA ends
```

```
%sampl_rate  %samples/sec
```

```
%sign_freq   %Hz
```

```
%*****
```

```
dur_sampl = length(u) - init_sampl;
```

```

dur_time = dur_sampl / sampl_rate;
cycles = dur_time * sign_freq;
peaks_valleys = floor(cycles*2); %no. of peaks & valleys corresponds to the
                                %no. of changes in PEA's direction

```

```

%initialize variables

```

```

a(:,:)=0;
fringes=0;
fringe1 = 0;
fringe2 = 0;
peak_dur = 0;
peak_pos = 0;
indice = 0;
indice_new = 0;
dum1 = 0;
dum2 = 0;
dum3=0;
dummie=0;
j=1;
h=0;

```

```

%create the pulse signal with the threshold defined above
%The voltage values from the photodiode must be in the 1st column

```

```

for i = 2:(length(u))
    if (u(i,2) >= upper)
        a(i)=1;
    else if (u(i,2) <= lower)
        a(i)=0;
    else if (a(i-1) == 0)
        a(i)=0;
    else
        a(i)=1;
    end
end
end
end

```

end

%count the fringes and find the index of the fringes(in the array of
%schmitt pulses) which pass on the photodiode

for i = 2:(length(a))

if (a(i) ~= a(i-1))

fringes = fringes + 1;

indice(j) = i;

j = j+1;

end

end

%find the duration of each peak, when the PEA is moving

for k = 1:(j-2)

peak_dur(k) = abs(indice(k) - indice(k+1));

end

%sort the peak duration array in order to trace at which sample period a
%change in direction occurs(at those points the duration is greater than
%others

[peak_dur_sort,IX]=sort(peak_dur,2,'descend');%IX denotes the index of each
%cell of the sorted peak_dur vector

dum1 = sort(IX(1:peaks_valleys),2,'ascend');%from 1 to peak_valleys in order
%to contain only the critical
%points

%create an array which contains the begin and the end(in samples) of
%every critical point, in order to distinguish when the PEA is moving ahead
%and when is moving rear.

peak_pos(1) = 2;

peak_pos(peaks_valleys*2+2) = (dur_sampl+1);

for i=2:2:(peaks_valleys*2)

peak_pos(i) = indice(dum1(i/2));

peak_pos(i+1) = indice(dum1(i/2)+1);

end

```
%count the fringes and save them in different counters. One for the forward  
%move and one for the back move.
```

```
for i=1:4:(peaks_valleys*2+2)  
    for j = peak_pos(i) : peak_pos(i+1)  
        if (a(j) ~= a(j-1))  
            fringe1 = fringe1 + 1;  
        end  
    end  
end
```

```
for i=3:4:(peaks_valleys*2+2)  
    for j = (peak_pos(i)) : peak_pos(i+1)  
        if (a(j) ~= a(j-1))  
            fringe2 = fringe2 + 1;  
        end  
    end  
end
```

```
%if the voltage from the amplifier is ascending then the first fringes  
%stand for forward movement. In the different case stand for backward  
%movement
```

```
if u(init_sampl,3) < u(init_sampl+2,3)  
    forward = fringe1;  
    backward = fringe2;  
    flag=1;  
else  
    forward = fringe2;  
    backward = fringe1;  
    flag=2;  
end
```

```
%create the new indice and dum matrices in order to find the local  
%critical points
```

```
dum2(1)=0;  
for i=1:length(dum1)  
    dum2(i+1)=dum1(i);  
end
```

```
indice_new(1)=2;  
indice_new(length(indice)+2)=length(a);
```

```

for i=2:length(indice)+1
    indice_new(i)=indice(1,i-1);
end

```

%We like o find the exact sample point where the dark/light fringe occurs.
 %The reason is to construct the waveform of the displacement of the PEA from
 %the signal of the photodiode. This achieved by searching each point where
 %we have a change in the value of the schmitt pulse and find the max-min

%the next for loop searches all the samples except from the fringes after
 %the last change in direxction

```
l=1;
```

```
for i=1:length(dum1)
```

```
    for j = (dum2(i)+2) : (dum2(i+1))
```

```
        if (a(indice_new(j)) - a(indice_new(j)-1) == -1)
```

```
            [x,y]=min(u(indice_new(j):indice_new(j+1),2));
```

```
            real_peaks(1,l)=y+(indice_new(j));
```

```
            l=l+1;
```

```
        end
```

```
        if (a(indice_new(j)) - a(indice_new(j)-1) == 1)
```

```
            [x,y]=max(u(indice_new(j):indice_new(j+1),2));
```

```
            real_peaks(1,l)=y+(indice_new(j));
```

```
            l=l+1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

%the next for loop searches the fringes after

%the last change in direction

```
for i=(j+2):length(indice_new)
```

```
    if (a(indice_new(i)) - a(indice_new(i)-1) == -1)
```

```
        [x,y]=min(u(indice_new(i):indice_new(i+1),2));
```

```
        real_peaks(1,l)=y+(indice_new(i));
```

```
        l=l+1;
```

```
    end
```

```
    if (a(indice_new(i)) - a(indice_new(i)-1) == 1)
```

```
        [x,y]=max(u(indice_new(i):indice_new(i+1),2));
```

```
        real_peaks(1,l)=y+(indice_new(i));
```

```
        l=l+1;
```

```
    end
```

```

end

%%%%%%%%%%
for i=1:length(indice)
    help(i)=indice(1,i);
end

for i=1:length(dum1)
    h=help(dum1(i)+1);
    while u(h,2)< upper
        h=h-1;
    end
    dummie=help(dum1(i)) + ( h - help(dum1(i)))/2;
    dummie=ceil(dummie);
    [x,y]=max(u(help(dum1(i)):dummie,2));
    real_peaks(1,l)=y+(help(dum1(i)));
    l=l+1;
    [x,y]=max(u(dummie:h,2));
    real_peaks(1,l)=y + (dummie);
    l=l+1;
    [x,y]=min(u(real_peaks(1,l-2):real_peaks(1,l-1),2));
    real_peaks(1,l)=y + (real_peaks(1,l-2));
    l=l+1;
end

%%%%%%%%%%

peaks_final=sort(real_peaks,2,'ascend');

for i=1:(length(real_peaks)-1)
    peaks_final(2,i)=u(peaks_final(1,i),2);
end

d2=peaks_final;

```

toc

encodercounter.m

```
function [a]=encodercounter(u,upper,lower,sampl_rate,sign_freq,init_sampl)
tic
%This function computes the distance travelled from a PEA
%and it's displacement at the end of the acquisition.
%The array used must have in the first column the signal from the upper
%photodiode. In the second column must be the signal from the lower
%photodiode and in the third column the input signal to the PEA
%(amplifier's signal)

%*****
%upper      :upper threshold   These boundaries correspond to the
%              voltage created from the
%              photodiode due to the laser light
%lower      :lower threshold   intensity.

%init_smpl   %sample at which the movement of the PEA begins(the
              %amplifier is turned on)
%sampl_rate %samples/sec
%sign_freq  %Hz
%*****

dur_sampl = length(u) - init_sampl;
dur_time  = dur_sampl / sampl_rate;
cycles    = dur_time *sign_freq;
peaks_valleys = floor(cycles*2); %no. of peaks & valleys corresponds to the
                                %no. of changes in PEA's direction

%initialize variables

a(:,:)=0;
b(:,:)=0;

%create the pulse signal with the threshold defined above
%The voltage values from the photodiode must be in the 1st column

a(1)=0;
for i = 2:length(u)
    if (u(i,2) >= 2.72)
        a(i)=1;
    else if (u(i,2) <= 2.37)
        a(i)=0;
    else if (a(i-1) == 0)
        a(i)=0;
    else
        a(i)=1;
    end
end
end

for i = 1:length(u)
    if (u(i,1) >= 3.55)
        b(i)=1;
    else if (u(i,1) <= 3.15)
        b(i)=0;
    else if (b(i-1) == 0)

```

```

        b(i)=0;
    else
        b(i)=1;
    end
end
end
end

%count the number of pulse and consequently the number of fringes
forward=0;
backward=0;
for i=1:length(u)-1

    if b(i)-b(i+1)==1 %change from value 1 to value 0
        if a(i)==1
            forward=forward+1;
        else
            backward=backward+1;
        end
    end

    if b(i)-b(i+1)==-1 %change from value 0 to value 1
        if a(i)==0
            forward=forward+1;
        else
            backward=backward+1;
        end
    end

end

displacement=(forward-backward)*step;

if displacement < 10^3
    fprintf('The displacement of the PEA is %6.2f nanometers.\n'...
        ,displacement);
else %displacement >= 10^3
    fprintf('The displacement of the PEA is %6.2f micrometers.\n'...
        ,displacement/(10^3));
end

toc

```


encodercounterwave.m

```
function [a,d1,d2]=encodercounterwave(u,upper,lower,sampl_rate,sign_freq,init_sampl)
tic
%This function computes the distance travelled from a PEA
%and it's displacement at the end of the acquisition.
%The array used must have in the first column the signal from the upper
%photodiode. In the second column must be the signal from the lower
%photodiode and in the third column the input signal to the PEA
%(amplifier's signal)

%*****
%upper      :upper threshold   These boundaries correspond to the
%              voltage created from the
%              photodiode due to the laser light
%lower      :lower threshold   intensity.

%init_smpl   %sample at which the movement of the PEA begins(the
              %amplifier is turned on)
%sampl_rate %samples/sec
%sign_freq  %Hz
%*****

dur_sampl = length(u) - init_sampl;
dur_time  = dur_sampl / sampl_rate;
cycles    = dur_time * sign_freq;
peaks_valleys = floor(cycles*2); %no. of peaks & valleys corresponds to the
                                %no. of changes in PEA's direction

%initialize variables

a(:,:)=0;
fringes=0;
fringe1 = 0;
fringe2 = 0;
peak_dur = 0;
peak_pos = 0;
indice = 0;
indice_new = 0;
dum1 = 0;
dum2 = 0;
dum3=0;
dummie=0;
j=1;
h=0;

%create the pulse signal with the threshold defined above
%The voltage values from the photodiode must be in the 1st column

a(1)=0;
for i = 2:length(u)
    if (u(i,2) >= 2.72)
        a(i)=1;
    else if (u(i,2) <= 2.37)
```

```

        a(i)=0;
    else if (a(i-1) == 0)
        a(i)=0;
    else
        a(i)=1;
    end
end
end
end
end

```

```

for i = 1:length(u)
    if (u(i,1) >= 3.55)
        b(i)=1;
    else if (u(i,1) <= 3.15)
        b(i)=0;
    else if (b(i-1) == 0)
        b(i)=0;
    else
        b(i)=1;
    end
end
end
end
end

```

%count the number of pulse and consequently the number of fringes

```

forward=0;
backward=0;
for i=1:length(u)-1

    if b(i)-b(i+1)==1 %change from value 1 to value 0
        if a(i)==1
            forward=forward+1;
        else
            backward=backward+1;
        end
    end

    if b(i)-b(i+1)==-1 %change from value 0 to value 1
        if a(i)==0
            forward=forward+1;
        else
            backward=backward+1;
        end
    end

end

```

%find the index of the fringes(in the array of %schmitt pulses) which pass on the photodiode

```

for i = 2:(length(a))
    if (a(i) ~= a(i-1))

        indice(j) = i;
        j = j+1;

    end
end

```

%find the duration of each peak, when the PEA is moving

```

for k = 1:(j-2)
    peak_dur(k) = abs(indice(k) - indice(k+1));
end

```

```

%sort the peak duration array in order to trace at which sample period a
%change in direction occurs(at those points the duration is greater than
%others
[peak_dur_sort,IX]=sort(peak_dur,2,'descend');%IX denotes the index of each
%cell of the sorted peak_dur vector

dum1 = sort(IX(1:peaks_valleys),2,'ascend');%from 1 to peak_valleys in order
%to contain only the critical
%points

%create an array which contains the begin and the end(in samples) of
%every critical point, in order to distinguish when the PEA is moving ahead
%and when is moving rear.

peak_pos(1) = 2;
peak_pos(peaks_valleys*2+2) = (dur_sampl+1);
for i=2:2:(peaks_valleys*2)
    peak_pos(i) = indice(dum1(i/2));
    peak_pos(i+1) = indice(dum1(i/2)+1);
end

%create the new indice and dum matrices in order to find the local
%critical points
dum2(1)=0;
for i=1:length(dum1)
    dum2(i+1)=dum1(i);
end

indice_new(1)=2;
indice_new(length(indice)+2)=length(a);
for i=2:length(indice)+1
    indice_new(i)=indice(1,i-1);
end

%We like o find the exact sample point where the dark/light fringe occurs.
%The reason is to construct the waveform of the displacement of the PEA from
%the signal of the photodiode. This is achieved by searching each point where
%we have a change in the value of the schmitt pulse and find the max-min

%the next for loop searches all the samples except from the fringes after
%the last change in direcxion
l=1;
for i=1:length(dum1)
    for j = (dum2(i)+2) : (dum2(i+1))

        if (a(indice_new(j)) - a(indice_new(j)-1) == -1)
            [x,y]=min(u(indice_new(j):indice_new(j+1),2));
            real_peaks(1,l)=y+(indice_new(j));
            l=l+1;
        end

        if (a(indice_new(j)) - a(indice_new(j)-1) == 1)
            [x,y]=max(u(indice_new(j):indice_new(j+1),2));
            real_peaks(1,l)=y+(indice_new(j));
            l=l+1;
        end
    end
end

%the next for loop searches the fringes after
%the last change in direction

```

```

for i=(j+2):length(indice_new)

    if (a(indice_new(i)) - a(indice_new(i)-1) == -1)
        [x,y]=min(u(indice_new(i):indice_new(i+1),2));
        real_peaks(1,l)=y+(indice_new(i))-1 ;
        l=l+1;
    end

    if (a(indice_new(i)) - a(indice_new(i)-1) == 1)
        [x,y]=max(u(indice_new(i):indice_new(i+1),2));
        real_peaks(1,l)=y+(indice_new(i));
        l=l+1;
    end
end

%The next loop searches the critical points during a change in direction
%occurs
for i=1:length(indice)
    help(i)=indice(1,i);
end

for i=1:length(dum1)
    h=help(dum1(i)+1);
    while u(h,2)< upper
        h=h-1;
    end
    dummie=help(dum1(i)) + ( h - help(dum1(i)))/2;
    dummie=ceil(dummie);
    [x,y]=max(u(help(dum1(i)):dummie,2));
    real_peaks(1,l)=y+(help(dum1(i)));
    l=l+1;
    [x,y]=max(u(dummie:h,2));
    real_peaks(1,l)=y + (dummie);
    l=l+1;
    [x,y]=min(u(real_peaks(1,l-2):real_peaks(1,l-1),2));
    real_peaks(1,l)=y + (real_peaks(1,l-2));
    l=l+1;
end

%the "peaks_final" matrix cointains the sample points of all the critical
%points

peaks_final=sort(real_peaks,2,'ascend');

for i=1:(length(real_peaks)-1)
    peaks_final(2,i)=u(peaks_final(1,i),2);
end

%CREATION OF THE DISPLACEMENT WAVEFORM%

disp=0;
step=158.25; %1/4
range=upper-lower;
safe_range=0.9*range;

disp(1,1)=init_sampl;
disp(2,1)=0;
disp(1,2)=peaks_final(1,1);
if (a(peaks_final(1,1))==1 && b(peaks_final(1,1))==1) || (a(peaks_final(1,1))==0 && b(peaks_final(1,1))==0)
    disp(2,2)=step;
else
    disp(2,2)=-step;
end

```

```

end

travel_sum=0;
for i=2:length(peaks_final)
    disp(1,i+1)=peaks_final(1,i);

    if abs(peaks_final(2,i) - peaks_final(2,i-1)) > safe_range

        if (a(peaks_final(1,i))==1 && b(peaks_final(1,i))==1) || (a(peaks_final(1,i))==0 && b(peaks_final(1,i))==0)
            disp(2,i+1)=disp(2,i)+step;
        end
        if (a(peaks_final(1,i))==1 && b(peaks_final(1,i))==0) || (a(peaks_final(1,i))==0 && b(peaks_final(1,i))==1)
            disp(2,i+1)=disp(2,i)-step;
        end
    end

    else

        if (peaks_final(2,i) - peaks_final(2,i-1))<0

            if (disp(2,i)-disp(2,i-1))>0
                f=(abs(peaks_final(2,i) - peaks_final(2,i-1))/range)*step;
                disp(2,i+1)=disp(2,i)+f;
                travel_sum=travel_sum+f;
            else
                f=(abs(peaks_final(2,i) - peaks_final(2,i-1))/range)*step;
                disp(2,i+1)=disp(2,i)-f;
                travel_sum=travel_sum+f;
            end
        end

        else

            if (disp(2,i)-disp(2,i-1))>0
                f=(abs(peaks_final(2,i) - peaks_final(2,i-1))/range)*step;
                disp(2,i+1)=disp(2,i)+f;
                travel_sum=travel_sum+f;
            else
                f=(abs(peaks_final(2,i) - peaks_final(2,i-1))/range)*step;
                disp(2,i+1)=disp(2,i)-f;
                travel_sum=travel_sum+f;
            end
        end

    end

end

end

end

displacement=(forward-backward)*step;
travel=(forward+backward)*step + travel_sum;

if displacement < 10^3
    fprintf('The displacement of the PEA is %6.2f nanometers.\n'...
        ,displacement);

else %displacement >= 10^3
    fprintf('The displacement of the PEA is %6.2f micrometers.\n'...
        ,displacement/(10^3));
end

if travel < 10^3
    fprintf('The PEA travelled %6.3f nanometers.\n',travel);

```

```
end
if travel >= 10^3
    fprintf('The PEA travelled %6.3f micrometers.\n',travel/(10^3));
end
if travel >= 10^6
    fprintf('The PEA travelled %6.3f millimeters.\n',travel/(10^6));
end
if travel >= 10^9
    fprintf('The PEA travelled %6.3f centimeters.\n',travel/(10^9));
end
```

```
d1=disp;
d2=peaks_final;
```

```
toc
```