

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ
ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ FOURIER**

ΑΝΔΡΕΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΟΥΣΤΑΪΖΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΜΠΙΛΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Μουσταϊζή Σταύρο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και με συμβούλεψε σε όλη την διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ τον κ. Περράκη Κωνσταντίνο υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου για τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε για την υλοποίηση των ηλεκτρονικών διατάξεων που απαιτήθηκαν για την παρούσα εργασία.

Ευχαριστώ τον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο και τον κ. Μπιλάλη Νικόλαο μέλη της επιτροπής για τις υποδείξεις και τις παρατηρήσεις τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός συστήματος υπολογισμού μηκών κύματος διαφόρων φωτεινών πηγών. Η εύρεση του μήκους κύματος μίας φωτεινής πηγής γίνεται με χρήση οπτικού συμβολομέτρου. Η μέτρηση πραγματοποιείται με την μικρομετρική κίνηση του κατόπτρου του ενός βραχίονα του συμβολομέτρου και την αντίστοιχη καταγραφή της αλλαγής της έντασης του φωτός που προκύπτει από την επαλληλία των δύο ανεξάρτητων βραχιόνων του συμβολομέτρου. Για την μικρομετρική κίνηση του κατόπτρου βηματικός κινητήρας μετακινεί την βάση του κατόπτρου και για κάθε θέση γίνεται αντίστοιχη καταγραφή της έντασης του φωτός.

Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικές πλακέτες, οπτικά στοιχεία και μηχανικά εξαρτήματα που συναρμολογήθηκαν ώστε να αποτελέσουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης μηκών κύματος φωτεινών πηγών. Αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα το οποίο μέσω του επεξεργαστή raspberry pi δίνει κατάλληλες εντολές σε έναν ολοκληρωμένο οδηγό A4988 για την περιστροφή του βηματικού κινητήρα και ένα πρόγραμμα για την καταγραφή των δεδομένων από την φωτοδίοδο. Η καταγραφή των δεδομένων ζευγών που αφορούν το χρόνο και την ένταση του φωτός αποθηκεύονται και στη συνέχεια αναλύονται μέσω του μετασχηματισμό Fourier ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές Fourier για τα αντίστοιχα μήκη κύματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	8
Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.....	8
Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικού κύματος.....	8
Ημιτονοειδή κύματα.....	8
Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	9
Συμβολή.....	10
Ενισχυτική συμβολή.....	10
Αναιρετική συμβολή.....	11
Συμβολόμετρο Michelson.....	12
Περίθλαση	14
Περίθλαση από μονή σχισμή.....	14
Περίθλαση από δύο ή περισσότερες σχισμές.....	16
ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ	18
Βηματικοί Κινητήρες.....	18
Λειτουργία Βηματικών Κινητήρων	18
Μικροεπεξεργαστής Raspberry Pi.....	20
Συνδεσμολογία Ακροδεκτών	23
A/D Converter MCP 3008.....	25
Φωτοδίοδος.....	28
ΛΕΙΖΕΡ	29
Εισαγωγή.....	29
Κύρια χαρακτηριστικά φωτός λέιζερ	29
Τα μέρη μιας τυπικής συσκευής Λέιζερ	30
Φωτόνια.....	31
Ενεργειακές στάθμες	31
Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή.....	31
Λειτουργία μιας τυπικής συσκευής Λέιζερ	32
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	34
Έλεγχος Διάταξης.....	34
Υπολογισμός Μήκους Κύματος.....	37
Μετασχηματισμός Fourier	41
Τοποθέτηση Τσόπερ Μπροστά από την Δέσμη Λέιζερ	45
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	50
Συμπεράσματα	50
Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	50

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδιδόμενο κατά την διεύθυνση του άξονα x	9
Εικόνα 2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	9
Εικόνα 3: Ενισχυτική συμβολή κυμάτων. Στο σημείο Ο του πετάσματος παρατηρείται φωτεινός κροσσός μιας και τα δύο κύματα που συναντιούνται βρίσκονται στην ίδια φάση	10
Εικόνα 4: Ενισχυτική συμβολή κυμάτων. Το κύμα με έντονο χρώμα έχει πλάτος ίσο με το άθροισμα του πλάτους του εκάστοτε κύματος	11
Εικόνα 5: Ανααιρετική συμβολή κυμάτων. Στο σημείο Υ παρατηρείται σκοτεινός κροσσός μιας και τα δύο κύματα που συναντώνται βρίσκονται εκτός φάσης κατά μισό κύκλο	11
Εικόνα 6: Ανααιρετική συμβολή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ένα κύμα φθάνει με ανεστραμμένη κορυφή σε σχέση με το άλλο και το ολικό πλάτος είναι μηδέν	12
Εικόνα 7: Συμβολόμετρο Michelson	13
Εικόνα 8: Μικρόμετρο για την μετακίνηση του κατόπτρου	13
Εικόνα 9:Κροσσοί συμβολής για το κόκκινο Λέιζερ	14
Εικόνα 10: i) Κατανομή έντασης από μονή σχισμή ii) Διαμόρφωμα περίθλασης από μονή σχισμή.....	15
Εικόνα 11:Περίθλαση από μονή σχισμή για το κόκκινο λέιζερ	15
Εικόνα 12: Ένταση της εικόνας περίθλασης δύο σχισμών.....	16
Εικόνα 13: Διαμόρφωμα περίθλασης για N=5 σχισμές	16
Εικόνα 14: Ο βηματικός κινητήρας της πειραματικής διάταξης	19
Εικόνα 15: Μικροεπεξεργαστής Raspberry Pi 3b+ Model	21
Εικόνα 16: Ακροδέκτες μικροεπεξεργαστή Raspberry Pi 3b+ Model	21
Εικόνα 17: Driver A4988.....	22
Εικόνα 18: Board A4988	23
Εικόνα 19: Συνδεσμολογία A4988 με το Rpi και το βηματικό κινητήρα.....	24
Εικόνα 20: A/D Converter MCP 3008	25
Εικόνα 21: Ακροδέκτες MCP 3008	26
Εικόνα 22: Συνδεσμολογία MCP 3008 με το Raspberry Pi.....	27
Εικόνα 23: Φωτοδίοδος.....	28
Εικόνα 24: Εσωτερική μορφή λέιζερ	30
Εικόνα 25:Διάγραμμα για σήμα 50Hz από μια γεννήτρια συχνοτήτων.....	34
Εικόνα 26:Διάγραμμα παλμογράφου για το σήμα των 50Hz από την γεννήτρια συχνοτήτων.....	34
Εικόνα 27:Διάγραμμα για σήμα 100Hz από μία γεννήτρια συχνοτήτων.....	35
Εικόνα 28:Διάγραμμα παλμογράφου για το σήμα των 100Hz από την γεννήτρια συχνοτήτων.....	35
Εικόνα 29:Διάγραμμα για σήμα 200Hz από μία γεννήτρια συχνοτήτων.....	36
Εικόνα 30: Διάγραμμα παλμογράφου για σήμα 200Hz από την γεννήτρια συχνοτήτων	36
Εικόνα 31: Τελική συνδεσμολογία συστήματος.....	37
Εικόνα 32: Συμβολόμετρο Michelson	38
Εικόνα 33:Διάγραμμα Τάσης - Απόστασης για το Κόκκινο Λέιζερ	39
Εικόνα 34: Συμβολόμετρο Michelson για το κόκκινο λέιζερ	39
Εικόνα 35:Διάγραμμα Τάσης - Απόστασης για το Πράσινο Λέιζερ	40
Εικόνα 36: Συμβολόμετρο Michelson για το πράσινο λέιζερ	40
Εικόνα 37: Σύνθετο σήμα για τον έλεγχο του Fourier	41
Εικόνα 38:Συντελεστές σύνθετου σήματος μέσω της Matlab.....	42
Εικόνα 39:Συντελεστές Fourier για το κόκκινο λέιζερ.....	43
Εικόνα 40:Συντελεστές Fourier για το πράσινο λέιζερ	44
Εικόνα 41:Τσόπερ	45
Εικόνα 42:Διάγραμμα για συχνότητα περιστροφής 50Hz	46
Εικόνα 43:Διάγραμμα παλμογράφου για συχνότητα περιστροφής 50Hz.....	46
Εικόνα 44:Διάγραμμα για συχνότητα περιστροφής 100Hz.....	47
Εικόνα 45:Διάγραμμα παλμογράφου για συχνότητα περιστροφής 100Hz.....	47

Εικόνα 46:Διάγραμμα για συχνότητα περιστροφής 200Hz	48
Εικόνα 47:Διάγραμμα παλμογράφου για συχνότητα περιστροφής 200Hz.....	48

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συντελεστές a_n και b_n για το σύνθετο σήμα	41
Πίνακας 2: Συντελεστές Fourier για το κόκκινο λείζερ	42
Πίνακας 3: Συντελεστές Fourier για το πράσινο λείζερ	43

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα [1] είναι μία διαταραχή που περιέχει χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συζευγμένα μεταξύ τους [εξισώσεις Maxwell] και η οποία μπορεί να διαδίδεται στον χώρο από μία περιοχή σε μian άλλη, ακόμη και όταν δεν υπάρχει ύλη στην ενδιάμεση περιοχή. Ενδεικτικά παραδείγματα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αποτελούν οι ραδιοφωνικές και οι τηλεοπτικές μεταδόσεις, οι ακτίνες X και πολλές άλλες μορφές ακτινοβολίας. Η αιτία της δημιουργίας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι η επιταχυνόμενη / επιβραδυνόμενη κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Το ηλεκτρικό πεδίο (E) και το μαγνητικό πεδίο (B) ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα πεδία E και B των κυμάτων υπακούουν στην αρχή της επαλληλίας σύμφωνα με την οποία το ολικό ηλεκτρικό πεδίο E σε κάθε σημείο είναι το διανυσματικό πεδίο E των επιμέρους κυμάτων. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για το ολικό μαγνητικό πεδίο B.

Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δίνεται από την σχέση $u = \frac{E}{B}$. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο με την ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m / sec}$).

Ημιτονοειδή κύματα

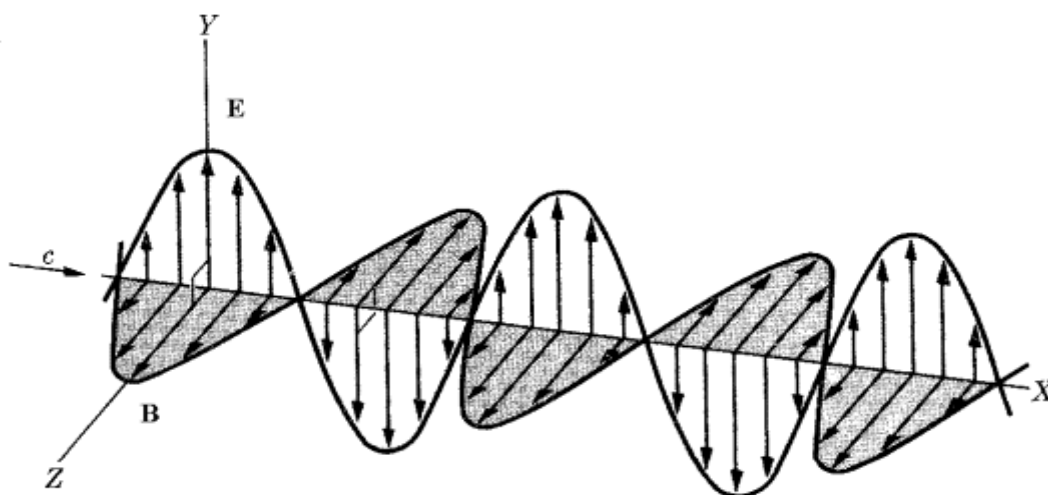
Σε ένα ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό κύμα τα πεδία E και B είναι σε κάθε σημείο του χώρου ημιτονοειδής συναρτήσεις του χρόνου.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός ημιτονοειδούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται κατά την διεύθυνση του άξονα x είναι οι εξής:

$$E = E_{\max} \cdot \sin (\omega t - kx)$$

$$B = B_{\max} \cdot \sin (\omega t - kx)$$

Όπου E_{\max} και B_{\max} είναι οι μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα.

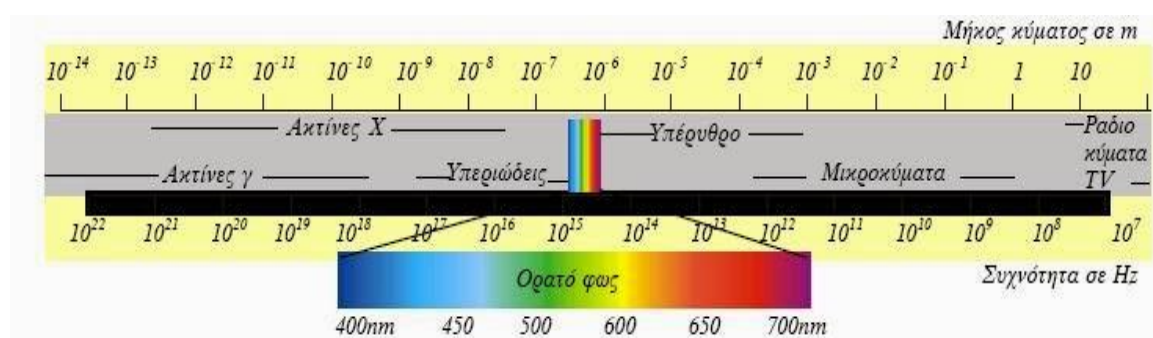


Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδιδόμενο κατά την διεύθυνση του άξονα x

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος και συχνοτήτων. Κύματα όπως τα τηλεοπτικά και τα ραδιοφωνικά, το ορατό φως, η υπέρυθη και η υπεριώδης ακτινοβολία και οι ακτίνες X και γ αποτελούν τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Από τα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αναφέρθηκαν το μόνο που μπορεί να διακριθεί με γυμνό μάτι είναι αυτό του ορατού φωτός. Τα μήκη κύματος του ορατού φωτός κυμαίνονται από 400 έως 700nm και κάθε υποπεριοχή του ορατού φάσματος προκαλεί στο ανθρώπινο μάτι την αίσθηση κάποιου συγκεκριμένου χρώματος. Τα μήκη κύματος του ορατού φάσματος είναι τα εξής:

400 έως 440 nm	Ιώδες
440 έως 480 nm	Κυανό
480 έως 560 nm	Πράσινο
560 έως 590 nm	Κίτρινο
590 έως 630 nm	Πορτοκαλί
630 έως 700 nm	Ερυθρό



Εικόνα 2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

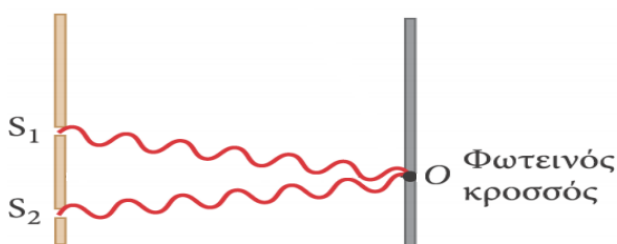
ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Συμβολή

Συμβολή [2] είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο, όταν συναντώνται διαφορετικές φωτεινές δέσμες που ταξιδεύουν (κύματα), δημιουργούν μια νέα φωτεινή κατανομή ως αποτέλεσμα της υπέρθεσής τους. Αν στην θέση συνάντησης των δύο αυτών φωτεινών δεσμών τοποθετηθεί ένα πέτασμα, τότε παρατηρείται μια αλληλουχία από φωτεινές και σκοτεινές περιοχές. Για να παρατηρηθούν φαινόμενα συμβολής θα πρέπει οι κυματικές πηγές να είναι σύμφωνες δηλαδή να έχουν ακριβώς την ίδια συχνότητα.

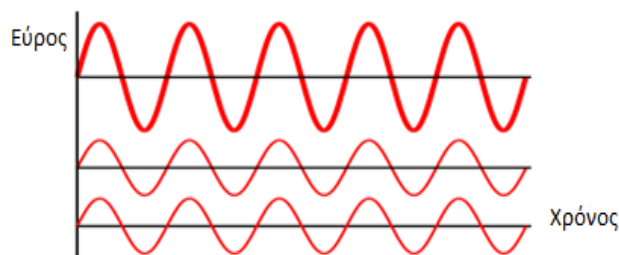
Ενισχυτική συμβολή

Ενισχυτική συμβολή συμβαίνει όταν στην ίδια περιοχή του χώρου συναντηθούν κύματα που βρίσκονται στην ίδια φάση. Έστω δύο πηγές S_1 και S_2 οι οποίες απέχουν από το σημείο O του πετάσματος αποστάσεις r_1 και r_2 αντίστοιχα, τότε η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται για να παρατηρηθεί ενισχυτική συμβολή σε ένα σημείο του πετάσματος είναι ότι η διαφορά δρόμου $r_2 - r_1$ μεταξύ των δύο πηγών πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ δηλαδή $r_2 - r_1 = m \cdot \lambda$ ($m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$).



Εικόνα 3: Ενισχυτική συμβολή κυμάτων. Στο σημείο O του πετάσματος παρατηρείται φωτεινός κροσσός μιας και τα δύο κύματα που συναντιόνται βρίσκονται στην ίδια φάση

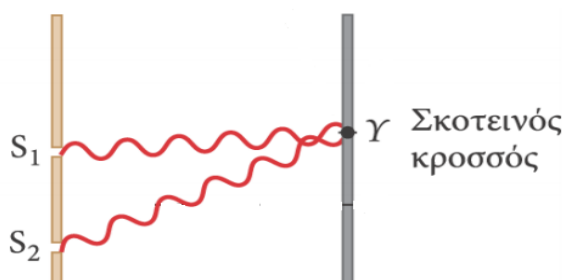
Στην ενισχυτική συμβολή τα κύματα που φεύγουν από τις πηγές προστίθενται και το ολικό πλάτος είναι το άθροισμα του πλάτους του εκάστοτε κύματος.



Εικόνα 4: Ενισχυτική συμβολή κυμάτων. Το κύμα με έντονο χρώμα έχει πλάτος ίσο με το άθροισμα του πλάτους του εκάστοτε κύματος

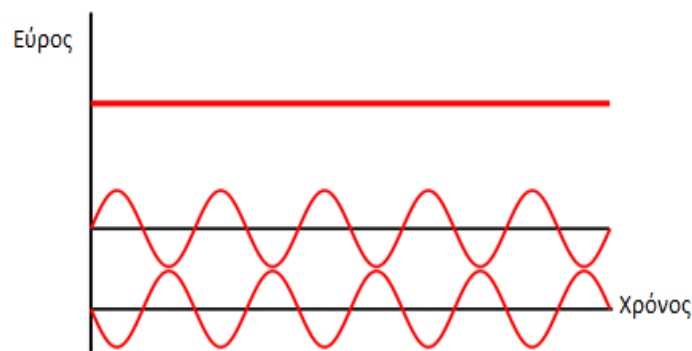
Αναιρετική συμβολή

Αναιρετική συμβολή συμβαίνει όταν στην ίδια περιοχή του χώρου συναντηθούν κύματα που βρίσκονται ακριβώς μισό κύκλο εκτός φάσης. Η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται για να παρατηρηθεί αναιρετική συμβολή σε ένα σημείο του πετάσματος είναι ότι η διαφορά δρόμου $r_2 - r_1$ μεταξύ των δύο πηγών πρέπει να είναι ημιακέραιος αριθμός μηκών κύματος λ , δηλαδή $r_2 - r_1 = (m + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$, ($m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$).



Εικόνα 5: Αναιρετική συμβολή κυμάτων. Στο σημείο Υ παρατηρείται σκοτεινός κροσσός μιας και τα δύο κύματα που συναντώνται βρίσκονται εκτός φάσης κατά μισό κύκλο

Στην αναιρετική συμβολή η μία κορυφή του ενός κύματος φθάνει την ίδια χρονική στιγμή με μία ανεστραμμένη κορυφή (κοιλιάδα) από το άλλο κύμα και το πλάτος που προκύπτει είναι η διαφορά μεταξύ των επιμέρους πλάτων. Στην περίπτωση που τα επιμέρους πλάτη είναι ίσα, το ολικό πλάτος είναι μηδέν.

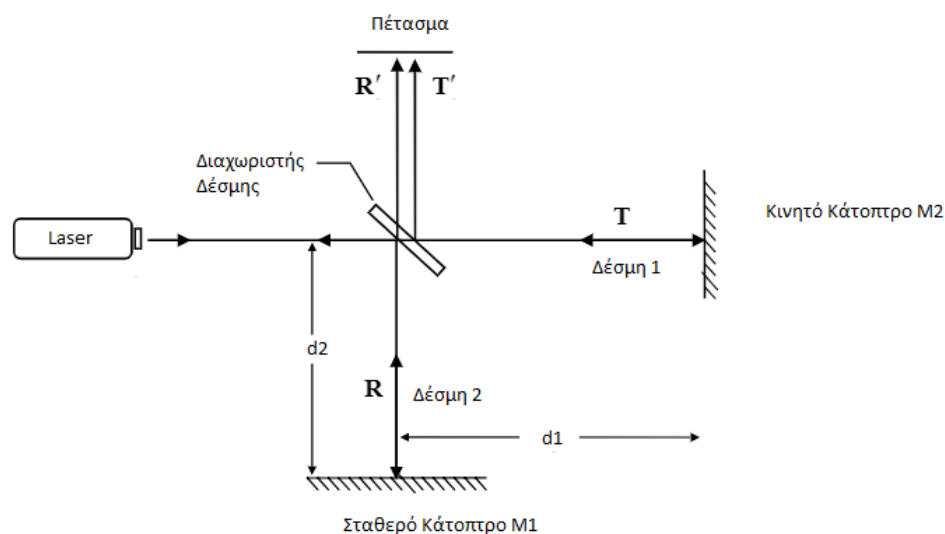


Εικόνα 6: Αναιρετική συμβολή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ένα κύμα φθάνει με ανεστραμμένη κορυφή σε σχέση με το άλλο και το ολικό πλάτος είναι μηδέν

Συμβολόμετρο Michelson

Το 1881 ο Michelson σχεδίασε και κατασκεύασε ένα συμβολόμετρο [3] χρησιμοποιώντας μια παρόμοια αρχή με αυτή που χρησιμοποίησε ο Young προκειμένου να υπολογίσει το μήκος κύματος του φωτός. Αρχικά, ο Michelson σχεδίασε το συμβολόμετρό του για να εξακριβώσει την ύπαρξη του αιθέρα - ενός υποθετικού μέσου όπου διαδιδόταν το φως. Οι προσπάθειές του όμως τον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει αιθέρας. Αργότερα, το συμβολόμετρο του Michelson χρησιμοποιήθηκε ευρέως για τη μέτρηση του μήκους κύματος του φωτός, για τη μέτρηση πολύ μικρών αποστάσεων χρησιμοποιώντας φως γνωστού μήκους κύματος και για την εξέταση διαφόρων οπτικών μέσων. Το συμβολόμετρο του Michelson αποτελείται από μια πηγή φωτός Laser, ένα διαχωριστή δέσμης (ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο), δύο κάτοπτρα εκ των οποίων το ένα είναι σταθερό (M1) και το άλλο κινητό (M2) καθώς και ένα πέτασμα για την παρατήρηση των φαινομένων συμβολής. Η ακτίνα που προσπίπτει στον διαχωριστή δέσμης μοιράζεται στα δύο. Η μία κατευθύνεται προς το σταθερό κάτοπτρο M1 και η άλλη προς το κινητό κάτοπτρο M2. Και τα δύο κάτοπτρα ανακλούν το φως πίσω στον διαχωριστή δέσμης. Ένα μέρος του φωτός από τον M1 ανακλάται από το διαχωριστή δέσμης στο πέτασμα και ένα μέρος από το φως του M2 εκπέμπεται μέσω του διαχωριστή δέσμης στο πέτασμα. Με αυτόν τον τρόπο η αρχική δέσμη φωτός χωρίζεται, ενώ κάποια μέρη των τελικών ακτίνων επαναφέρονται μαζί. Στο σημείο πρόσπτωσης στο πέτασμα οι δέσμες συμβάλουν και το αποτέλεσμα της συμβολής τους εξαρτάται από την μεταξύ τους διαφορά φάσης. Η φάση της πρώτης δέσμης μπορεί να μεταβληθεί είτε αλλάζοντας τον οπτικό δρόμο που έχει να διανύσει, είτε μετακινώντας το κάτοπτρο M2 κατά μήκος της δέσμης, είτε παρεμβάλλοντας ένα διαφανές οπτικό μέσο στην πορεία της δέσμης ώστε να προκληθεί χρονική καθυστέρηση λόγω του φαινομένου της διάθλασης. Για την παρατήρηση των μεταβολών της έντασης των δύο δεσμών στο πέτασμα μπορεί να τοποθετηθεί ανάμεσα στην φωτεινή πηγή και στο διαχωριστή δέσμης συγκλίνων φακός ο οποίος συμβάλει στο να μετατραπεί η δέσμη σε αποκλίνουσα (κωνική). Με αυτόν τον τρόπο στο πέτασμα συμβάλλουν δύο σύμφωνες κωνικές δέσμες με

αποτέλεσμα οι κροσσοί συμβολής να έχουν κυλινδρική συμμετρία γύρω από τον αρχικό άξονα και στο πέτασμα να εμφανίζονται ομόκεντροι φωτεινοί και σκοτεινοί δακτύλιοι.



Εικόνα 7: Συμβολόμετρο Michelson

Για την μετακίνηση του κινητού κατόπτρου χρησιμοποιείται μικρόμετρο με ηλεκτρονική ένδειξη και ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων. Πάνω στο μικρόμετρο τοποθετείται το κινητό κάτοπτρο και εκτελείται το πείραμα. Μέσω την ένδειξης υπολογίζεται η απόσταση μετακίνησής του κατόπτρου και μετρίεται ο αριθμός των κροσσών που πέρασαν από το πέτασμα για την συγκεκριμένη απόσταση. Στην συνέχεια για την γνωστή απόσταση d και τον αριθμό των κροσσών που μετρήθηκαν υπολογίστηκε το μήκος κύματος του κόκκινου λέιζερ σύμφωνα με τον τύπο $\lambda = \frac{2 \cdot d}{N}$.



Εικόνα 8: Μικρόμετρο για την μετακίνηση του κατόπτρου



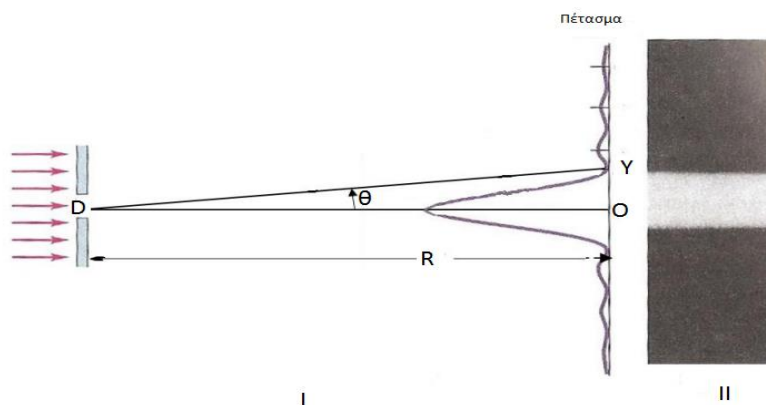
Εικόνα 9:Κροσσοί συμβολής για το κόκκινο Λείζερ

Περίθλαση

Η περίθλαση [4] είναι το ιδιαίτερο φαινόμενο που βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής κατά την διάδοση κυμάτων. Είναι μια από τις περιπτώσεις στις οποίες το φως εκτρέπεται από την ευθεία πορεία του. Κατά την διέλευση του φωτός από μία λεπτή σχισμή στο πέτασμα δεν εμφανίζεται ένα απλό φωτεινό αποτύπωμα (δηλαδή φωτεινός κροσσός) αλλά μία εικόνα που περιλαμβάνει φωτεινές και σκοτεινές περιοχές. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της συμβολής που δημιουργείται από τα κύματα που προέρχονται από τα άκρα της σχισμής και ονομάζεται φαινόμενο περίθλασης. Επομένως, προκύπτει ότι η περίθλαση είναι το φαινόμενο της διάχυσης των κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις όταν αυτά συναντήσουν ένα εμπόδιο ή μια σχισμή με διαστάσεις παρόμοιες με αυτές του μήκους κύματος. Η περίθλαση είναι αποτέλεσμα δύο κυματικών φαινομένων, της συμβολής που αναφέρθηκε νωρίτερα και της αρχής του Huygens. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος είναι δυνατόν να θεωρηθεί ως πηγή δευτερογενών κυμάτων που εξαπλώνονται προς όλες τις διευθύνσεις με ταχύτητα ίση προς την ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Η θέση του μετώπου κύματος για κάθε μεταγενέστερη χρονική στιγμή είναι η περιβάλλουσα των δευτερογενών κυμάτων εκείνη την χρονική στιγμή. Για την εύρεση της συνισταμένης (ολικής) μετατόπισης σε κάθε σημείο, συνδυάζονται όλες οι επιμέρους μετατοπίσεις που παρήγαγαν τα δευτερογενή κύματα, χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας και λαμβάνοντας υπόψιν τα πλάτη τους και τις σχετικές τους φάσεις.

Περίθλαση από μονή σχισμή

Όταν φως μήκους κύματος λ προσπέσει σε σχισμή εύρους D , τότε σύμφωνα με την αρχή του Huygens κάθε στοιχειώδες σημείο της σχισμής είναι αφετηρία ενός νέου δευτερογενούς σφαιρικού φωτεινού μετώπου (κύματος) και το φως που παρατηρείται στο πέτασμα που είναι τοποθετημένο πίσω από την σχισμή προέρχεται από τα δευτερογενή αυτά κύματα. Επομένως το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του πετάσματος προκύπτει από την υπέρθεση όλων των στοιχειωδών κυμάτων που δημιουργούνται από την σχισμή με αποτέλεσμα να παρατηρούνται στην οθόνη φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί περίθλασης.

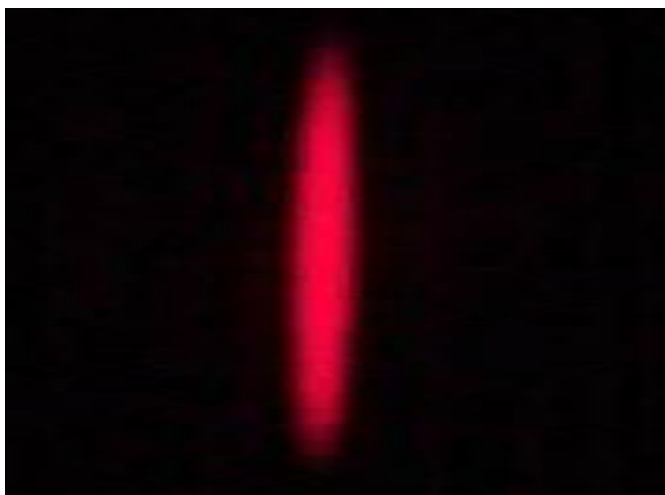


Εικόνα 10: i) Κατανομή έντασης από μονή σχισμή ii) Διαμόρφωμα περίθλασης από μονή σχισμή

Στην παραπάνω εικόνα λόγω της συμμετρίας, στο κέντρο της εικόνας περίθλασης δηλαδή στο σημείο O θα έχουμε ενισχυτική συμβολή και θα σχηματιστεί ο κεντρικός κροσσός περίθλασης. Ο υπολογισμός της γωνίας θ όπου εμφανίζονται σκοτεινοί κροσσοί δίνεται από την εξής σχέση: $\sin\theta = \frac{m \cdot \lambda}{D}$, όπου το m είναι η τάξη του κροσσού, λ το μήκος κύματος της πηγής και D το εύρος της σχισμής. Από την παραπάνω σχέση παρατηρείται ότι όσο μικραίνει το εύρος D της σχισμής τόσο μεγαλώνει η γωνία θ που θα υπάρξει ο πρώτος σκοτεινός κροσσός, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει και το εύρος της φωτεινής περιοχής στο πέτασμα.

Η ένταση I της περίθλασης από μονή σχισμή για κάθε σημείο υπολογίζεται από την σχέση $I = I_0 \cdot \left[\frac{\sin(\frac{\beta}{2})}{\beta/2} \right]^2$ όπου β είναι η ολική διαφορά φάσης μεταξύ του κύματος από το πάνω άκρο της σχισμής και του κύματος από το κάτω άκρο της σχισμής και ισούται με

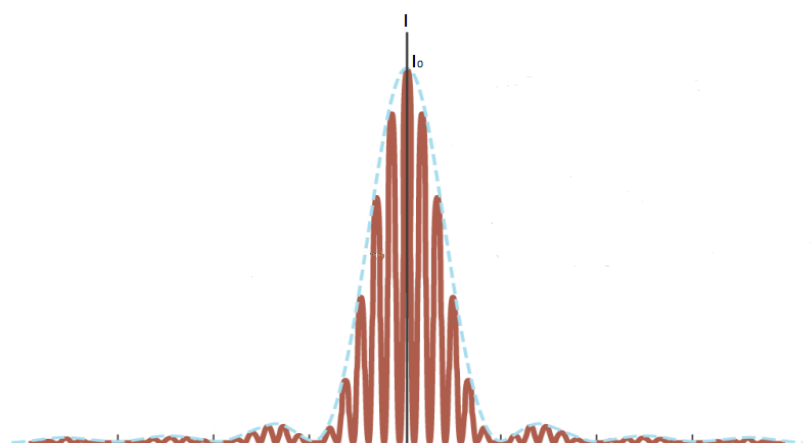
$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot D \cdot \sin\theta .$$



Εικόνα 11:Περίθλαση από μονή σχισμή για το κόκκινο λέιζερ

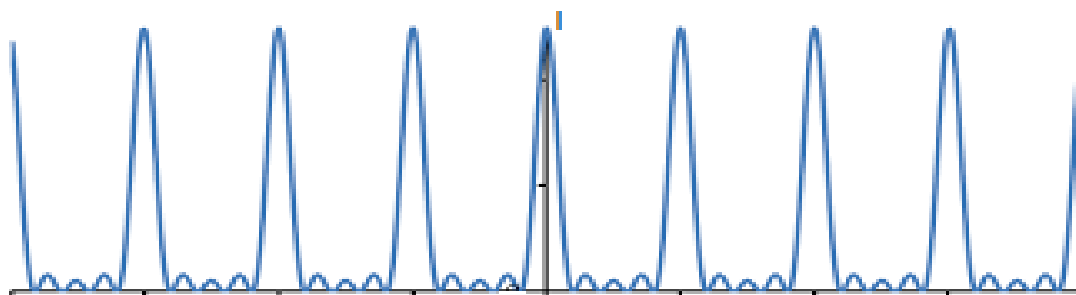
Περίθλαση από δύο ή περισσότερες σχισμές

Αν δύο παράλληλες σχισμές εύρους D οι οποίες απέχουν μικρή απόσταση a μεταξύ τους φωτιστούν από μια μονοχρωματική πηγή τότε στο πέτασμα το οποίο έχει τοποθετηθεί σε απόσταση R από τις σχισμές θα παρατηρηθεί μία σύνθετη εικόνα κροσσών. Η εικόνα αυτή προκύπτει από τον συνδυασμό των κροσσών περίθλασης από την κάθε σχισμή και των κροσσών συμβολής που προέρχονται από την υπέρθεση των κυμάτων των δύο σχισμών. Οι κροσσοί περίθλασης θα είναι πλατύτεροι από τους κροσσούς συμβολής, δηλαδή μέσα σε κάθε κροσσό περίθλασης θα περιέχεται ένας αριθμός κροσσών συμβολής που εξαρτάται από τον λόγο $\frac{a}{D}$.



Εικόνα 12: Ένταση της εικόνας περίθλασης δύο σχισμών

Ανάλογες εικόνες περίθλασης και συμβολής θα παρατηρηθούν αν υπάρξουν N παράλληλες σχισμές ίδιου εύρους D και ίδιας απόστασης a . Για αριθμό σχισμών μεγαλύτερο του δύο σχηματίζεται μία λεπτή δομή κροσσών συμβολής η οποία γίνεται ακόμα πιο λεπτή με την αύξηση του N . Επιπλέον, εκτός των κύριων φωτεινών κροσσών συμβολής που οφείλονται στην συμβολή κυμάτων από διαδοχικές σχισμές οι οποίες απέχουν απόσταση a μεταξύ τους, θα εμφανιστούν και δευτερεύοντες φωτεινοί κροσσοί, που οφείλονται στην συμβολή κυμάτων από σχισμές που απέχουν απόσταση $2a, 3a, 4a$ κτλ.



Εικόνα 13: Διαμόρφωμα περίθλασης για $N=5$ σχισμές

Η ένταση I της περίθλασης από πολλές σχισμές ισούται με $I = I_0 \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2$,
 όπου $\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot D \cdot \sin\theta$ και $\varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sin\theta$.

ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

Βηματικοί Κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες [5] είναι σύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Ειδικότερα, ως βηματικός κινητήρας ορίζεται μια ηλεκτρομηχανική συσκευή η οποία μετατρέπει τους ηλεκτρικούς παλμούς σε ιδιαίτερες μηχανικές κινήσεις, δηλαδή σε πολλαπλά μηχανικά βήματα. Οι κινήσεις αυτές μπορεί να είναι είτε κυκλικές (περιστροφικός κινητήρας) είτε γραμμικές (γραμμικός κινητήρας) Τα βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων είναι τα εξής:

1. Έχουν γωνία περιστροφής μεγαλύτερη των 360°
2. Μικρή ροπή
3. Δεν διαθέτουν ενσωματωμένα γρανάζια μείωσης στροφών
4. Απαιτείται αρχικοποίηση για τον έλεγχο θέσης του άξονα
5. Χρειάζονται εξωτερικό κύκλωμα οδήγησης
6. Έχουν μικρό κόστος

Λειτουργία Βηματικών Κινητήρων

Η λειτουργία των βηματικών κινητήρων βασίζεται στο γεγονός ότι οι μαγνητικά αντίθετοι πόλοι έλκονται. Αν και υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη ως προς την κατασκευή ενός βηματικού κινητήρα, όλοι βασίζονται στην ίδια αρχή. Στο στάτη βρίσκονται τα τύλιγματα τα οποία αποτελούν τους πόλους του κινητήρα. Κάθε φορά που ενεργοποιείται ένα τύλιγμα ένας πόλος μαγνητίζεται. Ανάλογα τη φορά της περιέλιξης (αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη) ο πόλος γίνεται βόρειος ή νότιος. Το τύμπανο, όπου βρίσκεται συνήθως ένας μόνιμος μαγνήτης, στρέφεται και προσανατολίζεται κάθε φορά στον ενεργοποιημένο πόλο δημιουργώντας πάντα ένα ζεύγος βόριου – νότιου. Όταν τροφοδοτείται με ρεύμα στο ένα τύλιγμα του στάτη δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που έλκει το μόνιμο μαγνήτη του δρομέα. Στη συνέχεια, τροφοδοτείται το δεύτερο τύλιγμα και ο μαγνήτης έλκεται πραγματοποιώντας ένα βήμα. Το δεύτερο τύλιγμα τροφοδοτείται με ρεύμα αντίθετης πολικότητας, ο μαγνήτης έλκεται και πάλι πραγματοποιώντας ένα δεύτερο βήμα. Έπειτα σειρά έχει το πρώτο τύλιγμα που τροφοδοτείται και αυτό από ρεύμα αντίθετης πολικότητας από την αρχική και ο μαγνήτης κάνει ένα βήμα ακόμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και ο κινητήρας περιστρέφεται βηματικά. Σε κάθε βήμα ο κινητήρας «κλειδώνει» σε συγκεκριμένες θέσεις και σύμφωνα με την κατασκευή του εκεί παρατηρείται και η μέγιστη ροπή του. Αυτή η ροπή μεταβάλλεται σύμφωνα με τον συνολικό αριθμό βημάτων του δρομέα σε μια πλήρη περιστροφή.

Άλλο ένα μέγεθος που μεταβάλλεται από τον αριθμό των βημάτων είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Τα δύο μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται ο αριθμός των βημάτων τόσο να μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής. Πράγματι όταν αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τότε μειώνεται και η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει ο άξονας ώστε να ευθυγραμμιστεί στο μαγνητικό πεδίο. Έστω ότι έχουμε δύο διαφορετικούς βηματικούς κινητήρες με 200 βήματα ανά περιστροφή ο ένας και 400 βήματα ανά περιστροφή ο άλλος. Αν ο χρόνος παλμοδότησης παραμένει ίδιος και σταθερός και για τους δύο βηματικούς κινητήρες τότε ο κινητήρας

των 200 βημάτων θα έχει ολοκληρώσει δύο περιστροφές έναντι μίας του άλλου κινητήρα. Οι βηματικοί κινητήρες διακρίνονται σε τρία είδη: α) Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης, β) Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και γ) Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες.



Εικόνα 14: Ο βηματικός κινητήρας της πειραματικής διάταξης

Αν και οι βηματικοί κινητήρες είναι κινητήρες ακριβείας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε εφαρμογή. Ως μηχανές παρουσιάζουν κάποια θετικά και κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά, πέραν των επιμέρους χαρακτηριστικών τους που τους διακρίνουν στους διάφορους τύπους και κατηγορίες.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Η γωνία περιστροφής του κινητήρα είναι ανάλογη με τον παλμό εισόδου.
- Αν οι περιελίξεις διαρρέονται από ρεύμα, ο κινητήρας έχει την μέγιστη ροπή του όταν δεν περιστρέφεται.
- Παρέχουν ακρίβεια στις μετακινήσεις τους διότι οι βηματικοί κινητήρες έχουν ακρίβεια 5% του βήματος και αυτό το σφάλμα δεν λειτουργεί αθροιστικά από το ένα βήμα στο άλλο.
- Έχουν άμεση απόκριση κατά την έναρξη, διακοπή και αναστροφή της κίνησής τους.
- Η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται αποκλειστικά από την διάρκεια ζωής του εδράνου κύλισης.
- Είναι δυνατόν να επιτευχθεί πολύ χαμηλή ταχύτητα περιστροφής με ένα φορτίο που συνδέεται απευθείας με τον άξονα.

- Η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να καθοριστεί εύκολα διότι είναι ανάλογη της συχνότητας των παλμών εισόδου.

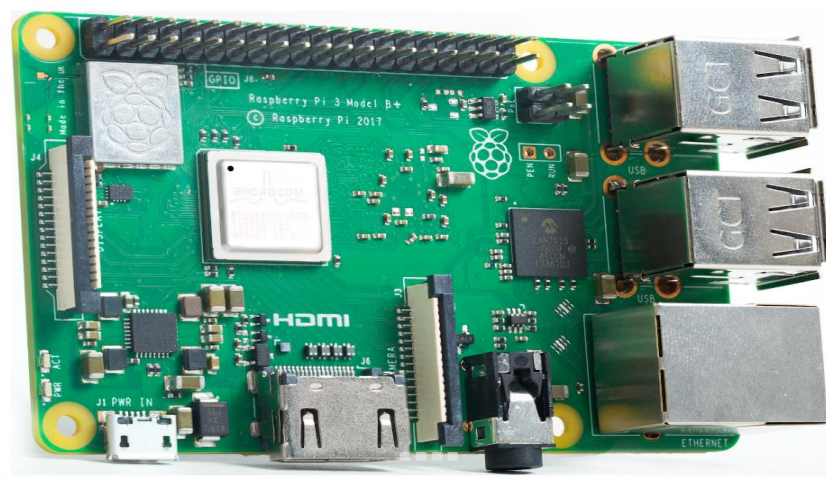
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Αν ο κινητήρας δεν ελέγχεται σωστά μπορεί να παρουσιαστούν δονήσεις και να εμφανιστούν φαινόμενα συντονισμού.
- Δεν είναι εύκολος ο χειρισμός τους σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής.
- Λόγω της μεγάλης αδράνειας, ο κινητήρας μπορεί να μην σταματήσει ακαριαία κατά την μετακίνηση μεγάλων φορτίων

Μικροεπεξεργαστής Raspberry Pi

Το Raspberry Pi [6] είναι ένας υπολογιστής σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας, ο οποίος αναπτύσσεται στο Ηνωμένο Βασίλειο από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό Raspberry Pi Foundation για να προωθήσει την εκπαίδευση στην επιστήμη των υπολογιστών. Η σημαντικότερη διαφορά του από έναν συνηθισμένο υπολογιστή δεν είναι ούτε το μικρό του μέγεθος, ούτε το χαμηλό του κόστος, αλλά το ότι διαθέτει 28 «ποδαράκια» γενικού σκοπού με τη γενική ονομασία GPIO (General Purpose Input Output) pins. Οι 28 αυτές υποδοχές επιτρέπουν τη σύνδεση ενός πολύ μεγάλου εύρους αισθητήρων και άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και επομένως την άμεση αλληλεπίδρασή του με τον πραγματικό κόσμο και μάλιστα με χαμηλό κόστος. Το επίσημο λειτουργικό σύστημα προς εγκατάσταση σε μια microSD κάρτα είναι το Raspbian, έκδοση του Debian Linux ειδικά προσαρμοσμένη για το Raspberry Pi. Διαθέτει πλήθος προεγκατεστημένων εφαρμογών, ενώ μπορεί να προγραμματιστεί σε διάφορες γλώσσες, από το Scratch μέχρι την Python, με την τελευταία να αποτελεί και την προτεινόμενη γλώσσα (εξ' ου και η ονομασία Pi). Το Pi διατίθεται σε διάφορες εκδόσεις, με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και υποδοχές σύνδεσης περιφερειακών. Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε μία μονάδα Pi έκδοσης 3b Model.

Το Raspberry pi 3 model b+ είναι το πιο πρόσφατο μοντέλο μικροεπεξεργαστή τρίτης γενιάς. Διαθέτει έναν τετραπύρρηνο ARMv8 επεξεργαστή 1.4GHz 64-bit, 27 GPIO Pins, 1GB RAM, μία θύρα Ethernet, μία επαφή σύνδεσης με οθόνη, τέσσερις θύρες USB, μία θύρα HDMI, μία επαφή σύνδεσης με κάμερα, υποδοχή για Micro SD Card, και μια ενιαία θύρα για video και ήχο.



Εικόνα 15: Μικροεπεξεργαστής Raspberry Pi 3b+ Model

Function/GPIO	J8 Pin		Function/GPIO
3.3V	1	2	5.0V
GPIO2	3	4	5.0V
GPIO3	5	6	0V
GPIO4	7	8	GPIO14
0V	9	10	GPIO15
GPIO17	11	12	GPIO18
GPIO27	13	14	0V
GPIO22	15	16	GPIO23
3.3V	17	18	GPIO24
GPIO10	19	20	0V
GPIO9	21	22	GPIO25
GPIO11	23	24	GPIO8
0V	25	26	GPIO7
(GPIO0) ID_SD	27	28	ID_SC (GPIO1)
GPIO5	29	30	0V
GPIO6	31	32	GPIO12
GPIO13	33	34	0V
GPIO19	35	36	GPIO16
GPIO26	37	38	GPIO20
0V	39	40	GPIO21

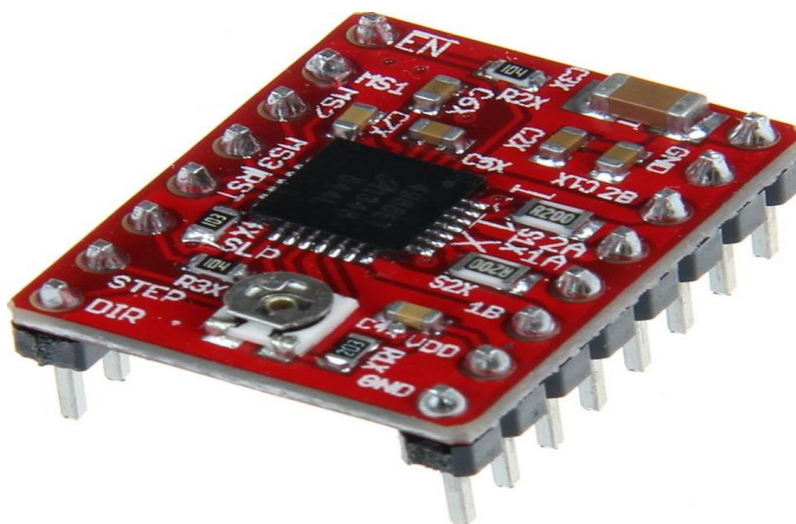
Εικόνα 16: Ακροδέκτες μικροεπεξεργαστή Raspberry Pi 3b+ Model

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται οι ακροδέκτες του Raspberry Pi 3 Model b+. Ο μικροεπεξεργαστής διαθέτει σαράντα ακροδέκτες των οποίων η αρίθμηση ξεκινά από πάνω αριστερά και τελειώνει κάτω δεξιά. Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη ακροδεκτών και το κάθε είδος απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα. Συγκεκριμένα υπάρχουν:

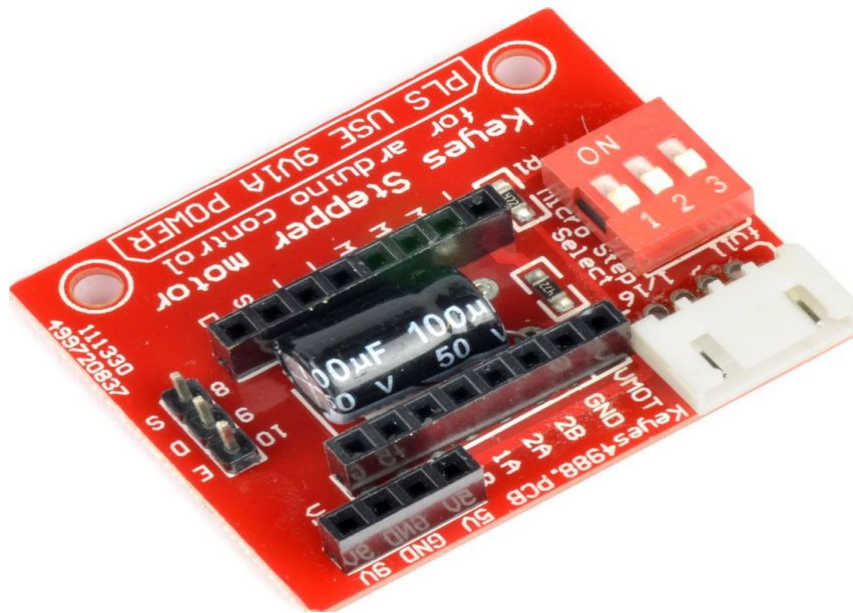
- Τέσσερις ακροδέκτες για τάση εκ των οποίων οι δύο είναι 3,3V και οι άλλοι δύο είναι 5V
- Οκτώ ακροδέκτες γείωσης (0V)
- Εικοσιοκτώ ακροδέκτες γενικής χρήσης GPIO

Driver A4988

Ο A4988 [7] είναι ένας μικροβηματικός οδηγός για τον έλεγχο των διπολικών βηματικών κινητήρων που περιέχει ενσωματωμένο οδηγό για εύκολη λειτουργία. Με τον συγκεκριμένο driver μπορεί να ελεγχθεί η κατεύθυνση της περιστροφής και τα βήματα του βηματικού κινητήρα. Ο συγκεκριμένος οδηγός παρέχει πέντε διαφορετικές αναλύσεις βημάτων: πλήρες, μισό, τέταρτο, όγδοο και δέκατοεκτο της γωνίας βήματος. Επιπλέον, διαθέτει ρυθμιζόμενο περιορισμό ρεύματος και προστασία υπερθέρμανσης. Λειτουργεί με τάση εισόδου από 8 V έως 35 V η οποία χρησιμοποιείται για τα τυλίγματα των κινητήρων και μπορεί να παρέχει ρεύμα έως 1 A ανά φάση.



Εικόνα 17: Driver A4988



Εικόνα 18: Board A4988

Συνδεσμολογία Ακροδεκτών

VMOT: Συνδέεται με την τροφοδοσία και αφορά την τάση που εφαρμόζεται για τον βηματικό κινητήρα. Η τάση που χρησιμοποιήθηκε για την λειτουργία του κινητήρα είναι 6V.

GND: Συνδέεται με τη γείωση της τροφοδοσίας.

VDD: Παροχή λογικής τάσης 5V. Είναι η τροφοδοσία των λογικών κυκλωμάτων του driver, η οποία παρέχεται από τα 12V της τροφοδοσίας με τη βοήθεια voltage regulators.

Pins 1A και 1B συνδέονται στα άκρα της μίας φάσης του κινητήρα και τα pins 2A και 2B στην άλλη φάση του κινητήρα.

DIR: Ο ακροδέκτης DIR συνδέεται με μια έξοδο του μικροελεγκτή και καθορίζει την κατεύθυνση περιστροφής του κινητήρα.

STEP: Κάθε παλμός στην είσοδο STEP αντιστοιχεί σε ένα βήμα του βηματικού κινητήρα κατά την κατεύθυνση που επιλέγεται από τον ακροδέκτη DIR. Ο παλμός αυτός δίνεται μέσω του μικροελεγκτή.

MS1, MS2, MS3: Τα pins αυτά χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί το βήμα που θα περιστραφεί ο βηματικός κινητήρας. Ανάλογα με το αν είναι HIGH ή LOW επιλέγουμε και το επίπεδο microstepping. Τα pins MS1 και MS3 έχουν εσωτερικές pull-down αντιστάσεις 100 KΩ, ενώ το pin MS2 έχει μία εσωτερική αντίσταση των 50 KΩ. Τα βήματα καθορίζονται από τους τρεις διακόπτες που βρίσκονται πάνω στο board. Στον πίνακα που ακολουθεί απεικονίζονται οι συνδυασμοί για τα διάφορα είδη βημάτων του A4988.

Το board πάνω στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο A4988 έχει τρεις διαφορετικές εισόδους για τον έλεγχο των διαφόρων καταστάσεων του: RESET, SLEEP, και ENABLE.

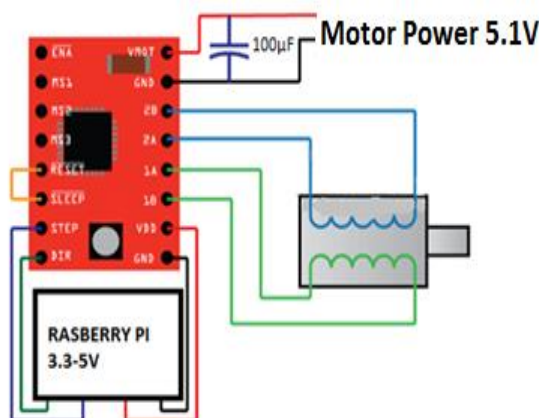
- **ENABLE:** Αυτή η είσοδος ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί όλες τις εξόδους των FET. Όταν τίθεται σε λογικό HIGH, οι έξοδοι είναι απενεργοποιημένες. Όταν τεθεί σε λογικό LOW, ο εσωτερικός έλεγχος ενεργοποιεί τις εξόδους, όπως απαιτείται. Το pin αυτό δε συνδέεται πουθενά, άρα ουσιαστικά είναι σε λογικό LOW, με συνέπεια την ενεργοποίηση των εξόδων.

- **RESET:** Όλες οι είσοδοι STEP αγνοούνται έως ότου η είσοδος RESET τεθεί σε λογικό HIGH. Σημειώνεται ότι το pin αυτό οδηγείται σε “floating” που σημαίνει ότι αν δεν χρησιμοποιηθεί, πρέπει να το θέσουμε σε λογικό HIGH, έτσι ώστε να ενεργοποιηθεί το board. Έτσι, συνδέεται μόνιμα στα 5V.

- **SLEEP:** Για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας όταν ο κινητήρας δεν είναι σε χρήση, αυτή η είσοδος απενεργοποιεί ένα μεγάλο μέρος των εσωτερικών κυκλωμάτων συμπεριλαμβανομένων και των FET εξόδου. Ένα λογικό LOW στο SLEEP βάζει το driver σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Ένα λογικό HIGH επιτρέπει την κανονική λειτουργία του A4988.

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
Off	Off	Off	Full Step	2 Phase
On	Off	Off	Half Step	1-2 Phase
Off	On	Off	Quarter Step	W1-2 Phase
On	On	Off	Eighth Step	2W1-2 Phase
On	On	On	Sixteenth Step	4 W1-2 Phase

Το Raspberry Pi, ο driver A4988 και ο βηματικός κινητήρας συνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με την συνδεσμολογία που απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



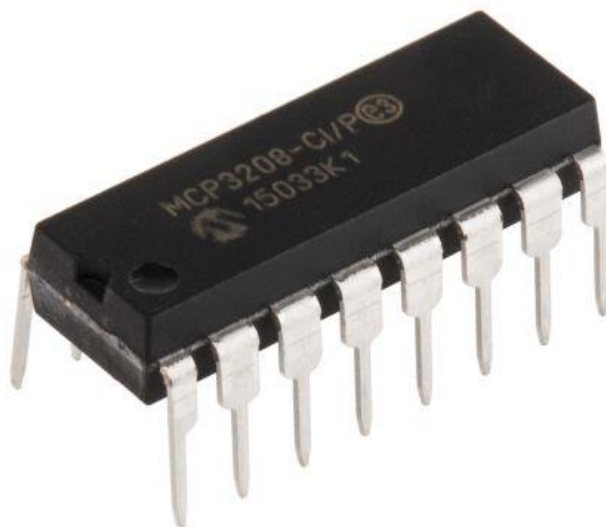
Εικόνα 19: Συνδεσμολογία A4988 με το Rpi και το βηματικό κινητήρα

Ο βηματικός κινητήρας έχει προγραμματιστεί ώστε να μετακινεί το κάτοπτρο δεξιά και αριστερά. Το κάτοπτρο έχει στηριχτεί πάνω σε μία βάση στα άκρα της οποίας υπάρχουν δύο διακόπτες. Αρχικά, δίνεται στο βηματικό κινητήρα η εντολή να περιστραφεί αριστερόστροφα (CCW). Η αριστερόστροφη περιστροφή μετακινεί το

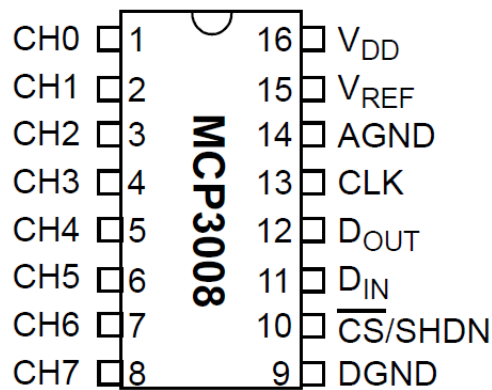
κάτοπτρο προς τα δεξιά και μόλις πατηθεί ο πρώτος διακόπτης η κίνηση του σταματάει. Με το πάτημα του διακόπτη ο κινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται δεξιόστροφα (CW) και μόλις πατηθεί και ο δεύτερος διακόπτης το κάτοπτρο παύει να μετακινείται. Οι διακόπτες συνδέονται με τους ακροδέκτες του Raspberry Pi, είναι καλωδιωμένοι και έχουν δύο άκρα, εκ των οποίων το ένα είναι συνδεδεμένο με τον ακροδέκτη GPIO και το άλλο με το GND του Raspberry Pi. Ο ακροδέκτης GPIO τραβιέται μέχρι τα 3,3V σύμφωνα με την εντολή `pull_up_down=GPIO.PUD_UP` η οποία έχει οριστεί στο `GPIO.setup`. Με την εντολή `GPIO.input()` δηλώνεται ο ακροδέκτης GPIO [8] ως είσοδος και αρχικά είναι `TRUE`. Με το πάτημα του διακόπτη η `GPIO.input()` γίνεται `FALSE` και η περιστροφή του κινητήρα σταματάει. [8]

A/D Converter MCP 3008

Ο MCP 3008 [9] είναι ένα τσιπάκι το οποίο μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό ώστε να μπορέσει να διαβαστεί από τον μικροελεγκτή Raspberry Pi. Χρησιμοποιείται επειδή το raspberry pi δεν διαθέτει προεγκατεστημένη αναλογική είσοδο και χωρίς το MCP3008 θα ήταν αδύνατον να συνδεθεί η φωτοδίοδος και να διαβαστούν τα δεδομένα που συλλέγει. Το MCP3008 έχει 8 ακίδες στο δεξιό μέρος οι οποίες συνδέονται με το raspberry pi και 8 ακίδες στο αριστερό μέρος που ονομάζονται κανάλια τα οποία δέχονται την επιστροφή του ρεύματος από την φωτοδίοδο και το μετατρέπουν σε ψηφιακό.



Εικόνα 20: A/D Converter MCP 3008



Εικόνα 21: Ακροδέκτες MCP 3008

V_{DD} : Παροχή τάσης από 2,7V έως 5,5V.

V_{REF} : Είσοδος τάσης αναφοράς.

AGND : Αναλογική γείωση η οποία συνδέεται με εσωτερικό αναλογικό κύκλωμα.

CLK : Χρησιμοποιείται για την εισαγωγή μίας μετατροπής και αφαιρεί κάθε δυαδικό ψηφίο (bit) που συμμετέχει στην διαδικασία.

D_{OUT} : Ακροδέκτης εξόδου σειριακών δεδομένων που χρησιμοποιείται για την αλλαγή της μετατροπής των αποτελεσμάτων από αναλογικά σε ψηφιακά.

D_{IN} : Είσοδος σειριακών δεδομένων η οποία χρησιμεύει στην φόρτωση δεδομένων από την συσκευή.

CS/SHDN : Ο συγκεκριμένος ακροδέκτης χρησιμοποιείται για την έναρξη της επικοινωνίας όταν η συσκευή τραβιέται χαμηλά (pulled low). Όταν τραβιέται ψηλά (pulled high) η μετατροπή τερματίζεται και η συσκευή τίθεται σε χαμηλή ισχύς. Μεταξύ των μετατροπών το pin CS/SHDN πρέπει να τραβηχτεί ψηλά (pulled high).

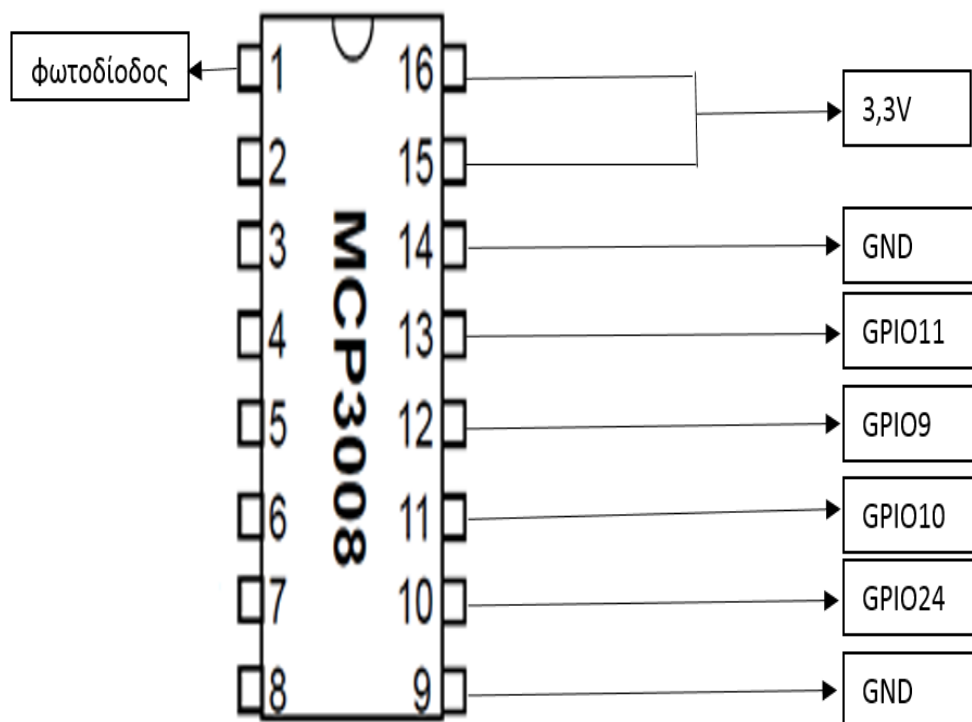
DGND : Ψηφιακή γείωση η οποία συνδέεται με εσωτερικό ψηφιακό κύκλωμα.

CH0 – CH7 : Αναλογικές εισοδοι οκτώ καναλιών. Κάθε ζεύγος καναλιών μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να χρησιμοποιηθεί ως δύο ανεξάρτητα κανάλια που λειτουργούν με μονή απόληξη ή ως μία ενιαία ψευδοτυχαία είσοδος που το ένα κανάλι της είναι το IN+ και το άλλο το IN-.

Το MCP3008 έχει οκτώ κανάλια με 10 bits ανάλυση και επικοινωνεί μέσω του λογισμικού SPI [10] που είναι ήδη προεγκατεστημένο στο Raspberry Pi αλλά χρειάζεται ενεργοποίηση. Η ενεργοποίηση του γίνεται ακολουθώντας τα εξής βήματα: Πληκτρολογώντας **sudo raspi-config** στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγεται το **Interfacing Options → P4 SPI → SELECT**. Αφού το MCP3008 έχει οκτώ κανάλια είναι ικανό να λαμβάνει και να επεξεργάζεται οκτώ διαφορετικές τάσεις (voltage). Αυτές οι τιμές μπορούν να διαβαστούν με δύο τρόπους: ο πιο τυπικός τρόπος ο οποίος και

χρησιμοποιείται ονομάζεται “single ended input”, κατά τον οποίο το επίπεδο της τάσης μετριέται με τη βοήθεια της τάσης αναφοράς (V_{REF}). Ο άλλος τρόπος είναι να μετρηθεί η διαφορά μεταξύ των $IN+$ και $IN-$. Τα 10 bits ανάλυσης αναφέρονται στο διάστημα ανάλυσης του δείγματος που μπορεί να πάρει το ADC (analog-digital-converter), δηλαδή, αν $B0000000000 = 0$ και $B1111111111 = 1023$, τότε μπορεί να μετρήσει 1024 διαφορετικά επίπεδα τάσης μεταξύ της γείωσης (Ground) και της τάσης αναφοράς (V_{REF}). Οπότε, αν η τάση αναφοράς είναι 5V και χωριστεί 1024 φορές, κάθε βήμα θα είναι 0.0049V. Εάν η τάση είναι 3.3V, τότε κάθε βήμα θα είναι 0.0032V. Μπορούν να υπάρχουν και μικρότερα βήματα, όμως από ένα σημείο και μετά υπάρχει κίνδυνος να προκύψουν λάθη στις μετρήσεις. Η τάση αναφοράς (V_{REF}) χρησιμοποιείται για να συγκριθεί με την τάση που ελέγχεται. Ο συγχρονισμός της μετάδοσης των δεδομένων είναι σημαντικός, διότι χρειάζεται χρόνος για να γίνει η μέτρηση πριν μπορέσει να διαβαστεί. Η διαδικασία που εκτελείται είναι η εξής: 1) Δίνεται η εντολή στο MCP3008 να ετοιμαστεί για μέτρηση μέσω της εντολής `spidev.SpiDev ()`. 2) Δηλώνεται σε ποιο κανάλι θα γίνει η μέτρηση. 3) Αναμένεται ο ελάχιστος χρόνος που χρειάζεται για να γίνει η μέτρηση. 4) Συλλέγονται τα δεδομένα της μέτρησης. Για να γίνει η επικοινωνία μεταξύ του MCP3008 και του Raspberry Pi στέλνονται σε κάθε χτύπο ρολογιού 8 bits δεδομένων. Για να επιτευχθεί ανάλυση 10 bits χρειάζεται: 1) Ένα bit εκκίνησης, 2) Ένα bit single/diff bit, 3) Τρία bits επιλογής καναλιού, 4) Αναμονή ενός κύκλου ρολογιού, 5) Ένα null bit, 6) Δέκα bits δεδομένων. Οπότε συνολικά απαιτούνται δεκαεφτά κύκλοι ρολογιού.

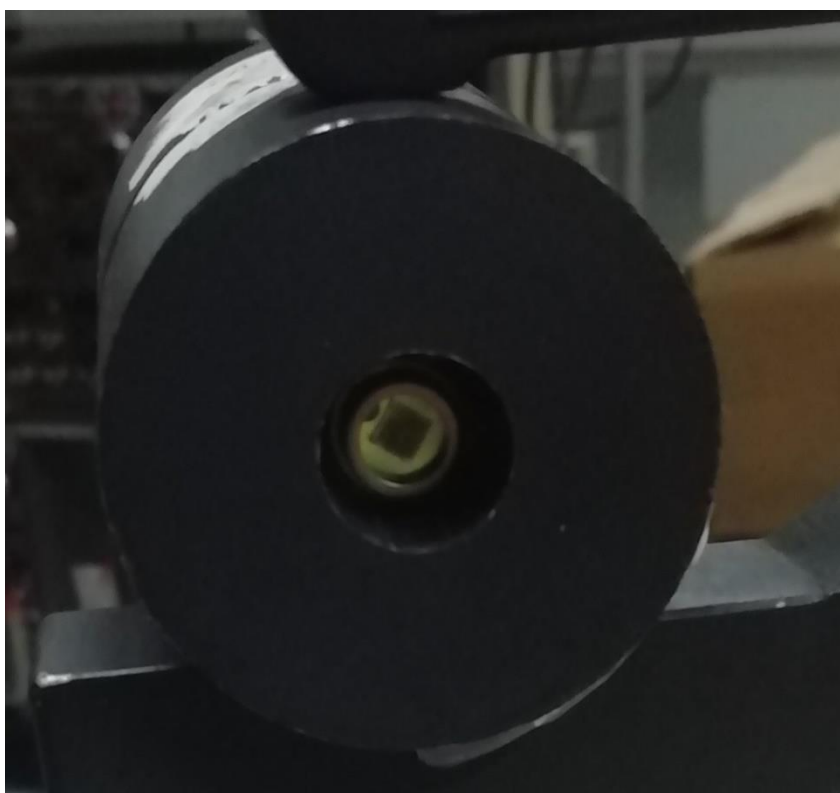
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η σύνδεση των ακροδεκτών του MCP 3008 με το Raspberry Pi.



Εικόνα 22: Συνδεσμολογία MCP 3008 με το Raspberry Pi

Φωτοδίοδος

Η φωτοδίοδος είναι ένας βασικός ανιχνευτής ακτινοβολίας τόσο του ορατού όσο και του μη ορατού φάσματος. Για να διασπαστούν δεσμοί σε έναν ημιαγωγό και να δημιουργηθούν οπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια πρέπει αυτός να ακτινοβοληθεί με φωτεινή ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος ή να αυξηθεί η ανάστροφη τάση. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει τα φωτόνια της ακτινοβολίας να έχουν τόση ενέργεια όση χρειάζεται για την διάσπαση του δεσμού. Στο φαινόμενο αυτό στηρίζεται η λειτουργία της φωτοδίοδου. Η φωτοδίοδος αποτελείται από μία επαφή p-n η οποία έχει τοποθετηθεί μέσα σε ένα διαφανές υλικό, το οποίο είναι κατάλληλα χρωματισμένο ή έχει σκεπαστεί με ειδικό περίβλημα από μέταλλο, ώστε το φως να πέφτει μόνο σε μία περιοχή. Αν η επαφή p-n πολωθεί ανάστροφα σε μία σκοτεινή περιοχή τότε θα προκύψει ένα πολύ μικρό και σταθερό ανάστροφο ρεύμα. Όταν η φωτοδίοδος φωτιστεί με ακτινοβολία κατάλληλης συχνότητας / μήκους κύματος, τότε προκαλείται αύξηση του ανάστροφου ρεύματος μιας και τα προσπίπτοντα φωτόνια διασπούν τους δεσμούς του ημιαγωγού. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται νέα ηλεκτρόνια και οπές μέσα στην περιοχή απογύμνωσης. Η τιμή του ρεύματος εξαρτάται τόσο από το είδος της διόδου όσο και από την φωτεινή ροή και από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Εικόνα 23: Φωτοδίοδος

ΛΕΙΖΕΡ

Εισαγωγή

Το φως Λείζερ [11], όπως κάθε μορφή φωτός, είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μεταφέρει ενέργεια. Το φως λείζερ δεν συναντάται στη φύση. Είναι μια τεχνητή πηγή φωτός, η οποία κατασκευάστηκε για εφαρμογές που δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν με άλλες πηγές φωτός. Το φως λείζερ είναι ορατό ή όχι ανάλογα με τη συχνότητα ή αλλιώς ανάλογα με το μήκος κύματος που έχει. Η δέσμη λείζερ ταξιδεύει όπως κάθε δέσμη φωτός στο χώρο και στο χρόνο. Αυτό που το κάνει ξεχωριστό από κάθε άλλο φως είναι ότι παράγεται από μια ειδική συσκευή, είναι σχεδόν μονοχρωματικό, σύμφωνο, δεν αποκλίνει από την κατεύθυνση προς την οποία ταξιδεύει, και έχει μικρή διάμετρο και μεγάλη ισχύ. Αυτές τις ιδιότητες τις οφείλει στον τρόπο παραγωγής του και συγκεκριμένα στην εξαναγκασμένη εκπομπή που δημιουργείται εντός της οπτικής κοιλότητας με τα δύο παράλληλα κάτοπτρα που το παράγουν. Επιπλέον, όλα τα φωτόνια του φωτός λείζερ έχουν την ίδια φάση και για αυτό ονομάζεται σύμφωνο φως. Τα χαρακτηριστικά της μονοχρωματικότητας και της μη απόκλισης δίνουν στο φως λείζερ τη δυνατότητα να έχει πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση ενέργειας από οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός. Το λείζερ βρίσκει πολλές εφαρμογές όπως την ιατρική όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χειρουργικές επεμβάσεις, στα ηχητικά συστήματα για να παράγει ψηφιακή μουσική, στα καταστήματα για να διαβάσει κωδικούς αναγνώρισης προϊόντων, στις μηχανολογικές εφαρμογές για να κόψει με ακρίβεια μέταλλα, στις στρατιωτικές εφαρμογές για να σκοπεύσει με ακρίβεια ένα στόχο, στις τηλεπικοινωνίες για να μεταφέρει τεράστιο όγκο πληροφορίας ταχύτατα κ.ά .

Κύρια χαρακτηριστικά φωτός λείζερ

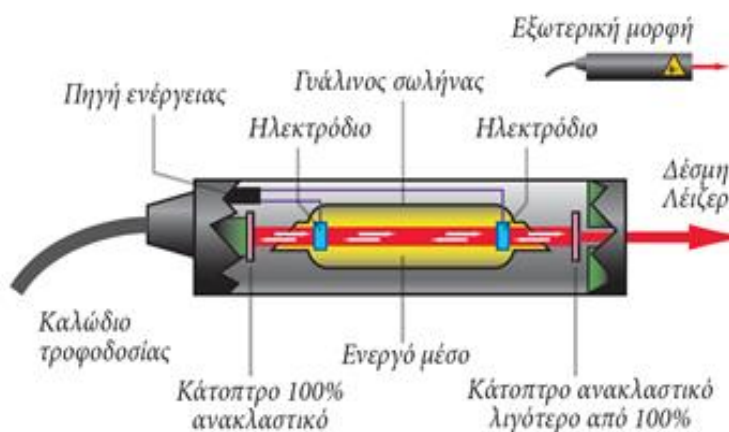
Τα κύρια χαρακτηριστικά του φωτός λείζερ είναι τα ακόλουθα:

- Είναι σύμφωνο τακτικό κύμα φωτός γεγονός που του επιτρέπει να εστιάζεται με μεγάλη ακρίβεια και να ταξιδεύει πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς να αλλάζει η δέσμη του.
- Είναι μονοχρωματικό φως δηλαδή περιέχει μόνο μια πολύ στενή περιοχή μηκών κύματος φωτός από τις διαθέσιμες του φάσματος.
- Είναι συνήθως πολωμένο φως. Πολωμένο ονομάζεται το φως το οποίο καθώς ταξιδεύει στο χώρο το ηλεκτρικό πεδίο του ταλαντώνεται πάντα στο ίδιο επίπεδο. Αυτό επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, όπως για παράδειγμα κατά την ανάκλαση ή τη διάδοση του διά μέσου διαφόρων υλικών
- Μπορεί να παραχθεί είτε με συνεχή τρόπο (συνεχόμενη δέσμη) είτε με παλμούς.

Τα μέρη μιας τυπικής συσκευής Λείζερ

Ένα τυπικό Λείζερ αποτελείται από:

- Ένα ειδικό τροφοδοτικό.
- Μια πηγή άντλησης ενέργειας που μπορεί να είναι ηλεκτρική (ρεύμα από τη ΔΕΗ ή ρεύμα μπαταρίας), φωτεινή (από λυχνία ή ακτινοβολία από άλλο Λείζερ), άλλη πηγή χημικής ή πυρηνικής ενέργειας.
- Ένα ενεργό μέσο που αντλείται από την πηγή ενέργειας (φωτονίων ή ηλεκτρονίων) και το οποίο βρίσκεται στον κύλινδρο της συσκευής λείζερ μπορεί να είναι είτε ειδικός κρύσταλλος, ημιαγωγός, υγρό ειδικής σύνθεσης είτε αέριο μείγμα.
- Μία οπτική κοιλότητα που συμπεριλαμβάνει δύο κάτοπτρα που ανακλούν φωτόνια εμπρός – πίσω σε μια ευθεία μέσα από την περιοχή του ενεργού μέσου, μέχρι η δέσμη τους να αποκτήσει την επιθυμητή ένταση. Συνήθως η οπτική κοιλότητα τοποθετείται σε προστατευτικό κυλινδρικό περίβλημα για ευκολότερη χρήση. Παρόλο που πολλά φωτόνια κινούνται κατευθυνόμενα προς κάθε κατεύθυνση μέσα στο ενεργό μέσο, προοδευτικά δημιουργείται μια αρκετά ισχυρή δέσμη φωτονίων μεταξύ των κατόπτρων λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής. Το συνηθισμένο σχήμα του ενεργού μέσου είναι κυλινδρικό με μικρή διάμετρο σε σχέση με τον άξονα. Αυτό επιτρέπει στα φωτόνια που κινούνται μεταξύ των δύο κατόπτρων να συναντούν σε μεγαλύτερη διαδρομή άτομα του ενεργού μέσου και να έχουμε μεγάλη ενίσχυση με την εξαναγκασμένη εκπομπή. Αυτά που κινούνται ακτινικά συναντούν ελάχιστα άτομα του ενεργού μέσου και δεν επιστρέφουν πίσω διότι η διαδρομή τους είναι εκτός των κατόπτρων, με αποτέλεσμα η απώλεια φωτονίων σ' αυτήν τη διεύθυνση να είναι αμελητέα. Το κάτοπτρο από τη μεριά του οποίου θα βγει η δέσμη είναι ημιπερατό (δηλαδή αφήνει μια ποσότητα φωτονίων να διαφεύγει) σε αντίθεση με το άλλο που είναι 100% ανακλαστικό. Τα φωτόνια που διαφεύγουν αποτελούν τη χρήσιμη δέσμη Λείζερ που παράγει η συσκευή.



Εικόνα 24: Εσωτερική μορφή λείζερ

Φωτόνια

Τόσο ο Planck το 1900 όσο και ο Einstein το 1905 διατύπωσαν ότι το φωτεινό κύμα δεν είναι μια συνεχής ροή ενέργειας, αλλά μια διαδοχή από μικρά κύματα ή μικρά πακέτα ενέργειας τα οποία ονομάζονται κβάντα ή φωτόνια. Η ενέργεια E κάθε φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας ν του φωτός και μιας παγκόσμιας σταθεράς h πού ονομάζεται σταθερά του Planck και δίνεται από τη σχέση $E=h \cdot \nu$. Κάθε φωτόνιο είναι ένα κύμα και αντιστοιχεί σε κάποια συχνότητα ή μήκος κύματος (δηλαδή χρώμα, αν το φως είναι ορατό). Επίσης συμπεριφέρεται και ως σωματίδιο γιατί σύμφωνα με την θεωρία της σχετικότητας έχει και ορμή η οποία δίνεται από την σχέση $p = \frac{E}{c}$ (c : Ταχύτητα του φωτός στο κενό). Συνεπώς το φως μπορεί να περιγραφεί και ως ροή σωματιδίων.

Ενεργειακές στάθμες

Σύμφωνα με τον Bohr ένα άτομο μπορεί να υποστεί μία μετάβαση από μία ενεργειακή στάθμη σε μία άλλη χαμηλότερης ενέργειας εκπέμποντας ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με την διαφορά ενεργειών μεταξύ της αρχικής και της τελικής στάθμης. Έστω E_i η αρχική ενέργεια του ατόμου πριν από μία τέτοια μετάβαση, E_f η τελική του ενέργεια μετά την μετάβαση και $h \cdot f$ η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, τότε η σχέση που ισχύει είναι $E_i - E_f = h \cdot f$. Κάθε άτομο έχει μία κατώτατη ενεργειακή στάθμη, πού αντιστοιχεί στην ελάχιστη ενέργεια πού μπορεί να έχει το άτομο. Η κατάσταση με την χαμηλότερη ενέργεια ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση και όλες οι άλλες καταστάσεις με μεγαλύτερες ενέργειες ονομάζονται διεγερμένες καταστάσεις.

Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή

Αν κάποια φωτόνια έχουν ενέργεια, η οποία συμπίπτει με την ενεργειακή διαφορά κάποιων επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων του υλικού, τότε το υλικό απορροφά αυτά τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια του υλικού που βρίσκονται σε μια χαμηλή ενεργειακή στάθμη μεταπηδούν σε μια άλλη επιτρεπτή στάθμη μεγαλύτερης ενέργειας. Η ενεργειακή διαφορά των δύο σταθμών ισούται με την ενέργεια του φωτονίου που απορροφήθηκε. Έχει μετρηθεί ότι πάντα, μετά από το χρονικό διάστημα 10^{-7} sec, το διεγερμένο άτομο επανέρχεται στην αρχική του ενεργειακή κατάσταση εκπέμποντας την επιπλέον ενέργειά του με τη μορφή ενός φωτονίου. Η εκπομπή αυτή ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή. Το φωτόνιο που εκπέμπεται κινείται προς τυχαία κατεύθυνση και έχει την ίδια ενέργεια με εκείνη του φωτονίου που αρχικά απορροφήθηκε. Κατά την αυθόρμητη εκπομπή φωτός ένα διεγερμένο υλικό αποδιεγείρεται μόνο του, χωρίς την μεσολάβηση κάποιου εξωτερικού παράγοντα ύστερα από χρόνο 10^{-7} sec από τη στιγμή της διέγερσής του. Ένα άλλο φαινόμενο παρουσιάζεται όταν σταλούν φωτόνια να αλληλεπιδράσουν με το διεγερμένο άτομο πριν προλάβει να αποδιεγερθεί αυθόρμητα. Όταν τα φωτόνια έχουν ενέργεια ίση με τη διαφορά κάποιων επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων του υλικού τότε μπορούν να παρακινήσουν τα ηλεκτρόνια του υλικού που βρίσκονται στις υψηλές ενεργειακές στάθμες και να μεταπηδήσουν σε χαμηλότερες επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες. Η περίσσεια ενέργεια των ηλεκτρονίων που αποδιεγείρονται και μεταπηδούν εκπέμπεται με τη μορφή φωτονίων. Τα φωτόνια που εκπέμπονται είναι πανομοιότυπα με εκείνα που προκάλεσαν το φαινόμενο δηλαδή έχουν

ίδια ενέργεια, συχνότητα, φάση και ίδια διεύθυνση διάδοσης (κλωνοποίηση). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός.

Λειτουργία μιας τυπικής συσκευής Λείζερ

Τα πιο γνωστά εξωτερικά χαρακτηριστικά ενός λέιζερ είναι η υψηλή κατευθυντικότητα, η συμφωνία φωτονίων, η μικρή απόκλιση και η μεγάλη ισχύς της δέσμης. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή φωτός αποτελείται από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή αλλιώς από φωτόνια που όλα είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους. Η διαδικασία που μπορεί να δημιουργήσει τέτοιου είδους αντίγραφα ενός αρχικού φωτονίου είναι η εξαναγκασμένη εκπομπή που αποτελεί ένα μοναδικό τρόπο κλωνοποίησης φωτονίων όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο εδάφιο. Επειδή στις συνθήκες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας τα διάφορα υλικά έχουν χαμηλή εσωτερική ενέργεια, δηλαδή τα περισσότερα ηλεκτρόνια τους βρίσκονται σε χαμηλή ενεργειακή στάθμη, θα πρέπει κατ' αρχήν να οδηγηθεί ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων του υλικού σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αυτό επιτυγχάνεται παρέχοντας στο υλικό ενέργεια με κατάλληλο τρόπο, όπως ηλεκτρική, χημική ή ενέργεια μέσω απορρόφησης φωτονίων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες το υλικό να βρεθεί σε κατάσταση αναστροφής πληθυσμού.

Για να δημιουργηθεί δέσμη λέιζερ πρέπει να ληφθούν οι ακόλουθες συνθήκες: α) Να υπάρχει ένα υλικό, όπου τα περισσότερα ηλεκτρόνια του να βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση παρά σε θεμελιώδη. β) Η διεγερμένη κατάσταση πρέπει να έχει χρόνο ζωής μεγαλύτερο από εκείνον της αυθόρμητης εκπομπής. γ) Πρέπει να υπάρχει εξαναγκασμένη εκπομπή. δ) Πρέπει τα εκπεμπόμενα φωτόνια να περιορισθούν σε σχετικά μικρό χώρο, ώστε να παρακινήσουν εύκολα και άλλα σε παρόμοια εκπομπή (σε μια οπτική κοιλότητα).

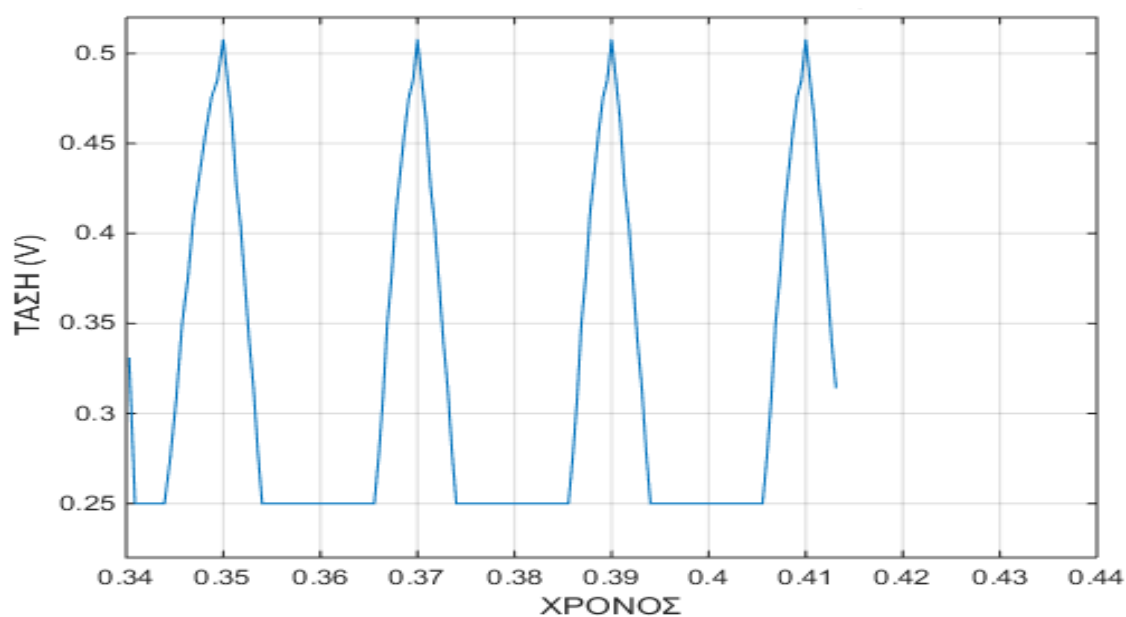
Για να επιτευχθούν οι συνθήκες γ και δ χρησιμοποιείται ένας γυάλινος σωλήνας ο οποίος στα άκρα του έχει δύο κάτοπτρα και περιέχει τα άτομα που θα διεγερθούν. Τα δύο παράλληλα κάτοπτρα είναι τοποθετημένα κάθετα στον κεντρικό άξονα της κοιλότητας και το ένα από τα δύο πρέπει να είναι λιγότερο επαργυρωμένο δηλαδή να έχει ανακλαστικότητα μικρότερη από 100% ώστε να επιτρέπει την έξοδο της δέσμης Λείζερ που δημιουργείται. Η απόσταση των κατόπτρων μπορεί να είναι από μερικά εκατοστά μέχρι λίγα μέτρα. Για να επιτευχθεί η διέγερση των ηλεκτρονίων (Συνθήκη α) προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση στο σωλήνα. Όταν ο σωλήνα συνδεθεί σε ηλεκτρική πηγή τότε θα δοθεί ενέργεια στο ενεργό μέσο. Το ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτρόνια) που θα κυκλοφορήσει μέσα στο ενεργό μέσο θα διεγείρει τα ηλεκτρόνια των ατόμων του ενεργού μέσου. Τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν σε μεταβατική ενεργειακή στάθμη εκπέμποντας αυθόρμητα φωτόνια σε τυχαίες κατευθύνσεις. Στη συνέχεια τα διεγερμένα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στη θεμελιώδη ενεργειακή τους στάθμη με νέα (εξαναγκασμένη) εκπομπή φωτονίων, πανομοιότυπων με εκείνα που προκάλεσαν τη νέα αποδιέγερση. Φωτόνια θα διαφύγουν ή θα απορροφηθούν από τα τοιχώματα του γυάλινου σωλήνα. Τα φωτόνια που κατά τύχη κατευθύνονται πάνω στα παράλληλα κάτοπτρα των δύο άκρων του σωλήνα θα ανακλαστούν από τα κάτοπτρα και θα εξακολουθήσουν να πηγαινοέρχονται μεταξύ των κατόπτρων προκαλώντας εξαναγκασμένες εκπομπές φωτονίων, αυξάνοντας σε κάθε πέρασμά τους τον αριθμό των φωτονίων. Αν συνεχιστεί η ηλεκτρική εκκένωση στο σωλήνα, τότε νέα ηλεκτρόνια του ενεργού μέσου θα μεταβούν σε υψηλή ενεργειακή στάθμη και τα φωτόνια που πηγαινοέρχονται στο σωλήνα θα τους προκαλέσουν εξαναγκασμένη εκπομπή. Δηλαδή θα τα αναγκάσουν να χάσουν ενέργεια εκπέμποντας φωτόνια πανομοιότυπα με αυτά που πηγαινοέρχονται και

να επιστρέψουν στην αρχική τους ενεργειακή στάθμη. Με αυτόν τον τρόπο ο πληθυσμός των κλωνοποιημένων φωτονίων που πηγαινοέρχονται (τα οποία προέρχονται από την εξαναγκασμένη αποδιέγερση) αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο ενισχύοντας τη δέσμη εξόδου του λέιζερ και κατά συνέπεια την ενέργειά της. Ένα φωτόνιο που πηγαινοέρχεται δημιουργεί δύο όμοια φωτόνια, τα δύο τέσσερα, τα τέσσερα οκτώ κ.ο.κ.. Τελικά δημιουργείται μια πολύ μεγάλη ροή φωτονίων και σε αυτή την ενίσχυση του φωτός οφείλει η συσκευή λέιζερ το όνομά της. Η δέσμη φωτονίων που δημιουργείται (ακτινοβολία λέιζερ) έχει πλήρη κατευθυντικότητα γιατί τα φωτόνια κινούνται παράλληλα προς τον άξονα του σωλήνα και μεγάλη μονοχρωματικότητα, αφού τα φωτόνια προέρχονται από τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων ίδιων πάντα ενεργειακών σταθμών. Επομένως όλα τα φωτόνια έχουν ίδια ενέργεια και συνεπώς ίδια συχνότητα. Επίσης, όλα τα φωτόνια της δέσμης Λέιζερ είναι όμοια (κλωνοποιημένα) και έχουν συμφωνία φάσης. Επειδή η πιθανότητα απορρόφησης ενός φωτονίου από μία χαμηλή στάθμη είναι ίση με την πιθανότητα εξαναγκασμένης εκπομπής από μία υψηλότερη ενεργειακή στάθμη πρέπει να εξασφαλιστεί ότι τα φωτόνια, που πηγαινοέρχονται μεταξύ των κατόπτρων, δεν θα απορροφηθούν από τα άτομα που βρίσκονται σε χαμηλή ενεργειακή κατάσταση, αλλά θα χρησιμοποιηθούν για την αποδιέγερση των ατόμων που βρίσκονται σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση. Αυτό επιτυγχάνεται αν ο πληθυσμός των ατόμων του υλικού, που βρίσκονται σε χαμηλή ενεργειακή κατάσταση είναι μικρότερος από αυτά που βρίσκονται σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση.

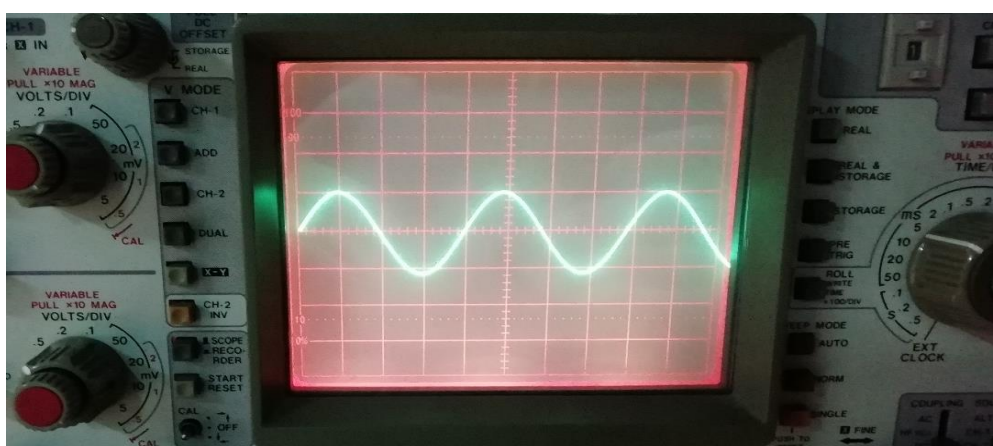
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Έλεγχος Διάταξης

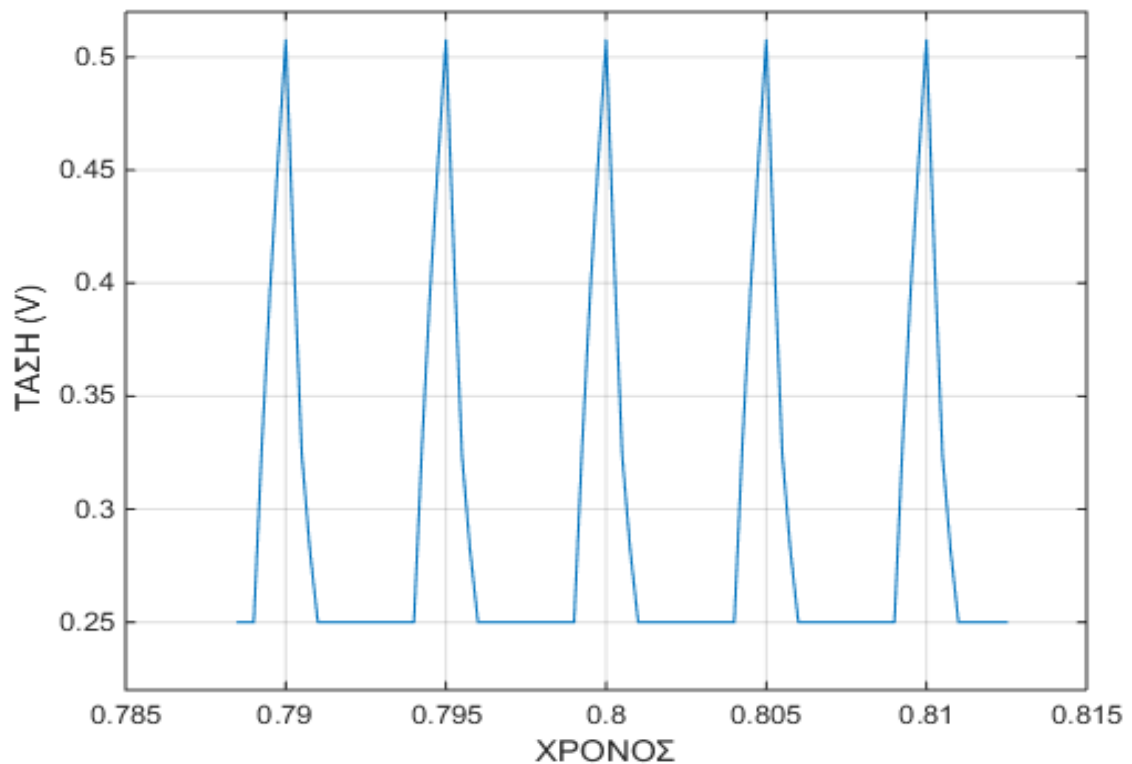
Με την ολοκλήρωση των συνδεσμολογιών ακολούθησε ο έλεγχος των ηλεκτρονικών διατάξεων. Αρχικά, ελέγχθηκε η κίνηση του κατόπτρου με την χρήση του προγράμματος που δημιουργήθηκε για τον driver A4988 και ακολούθησε ο έλεγχος του A/D converter MCP 3008. Ο έλεγχος της λειτουργίας του MCP 3008 έγινε με σήματα που στάλθηκαν από μια γεννήτρια συχνοτήτων. Συνολικά στάλθηκαν τρία σήματα, ένα των 50Hz, ένα των 100Hz και ένα των 200Hz.



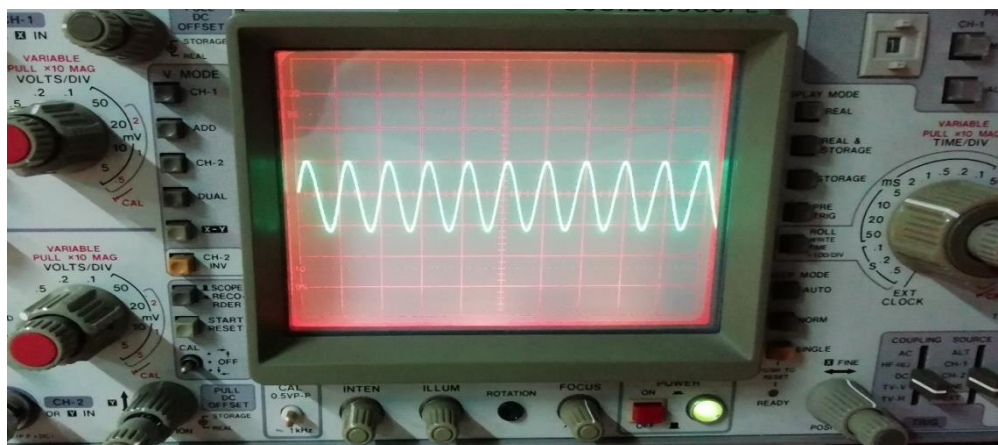
Εικόνα 25:Διάγραμμα για σήμα 50Hz από μια γεννήτρια συχνοτήτων



Εικόνα 26:Διάγραμμα παλμογράφου για το σήμα των 50Hz από την γεννήτρια συχνοτήτων

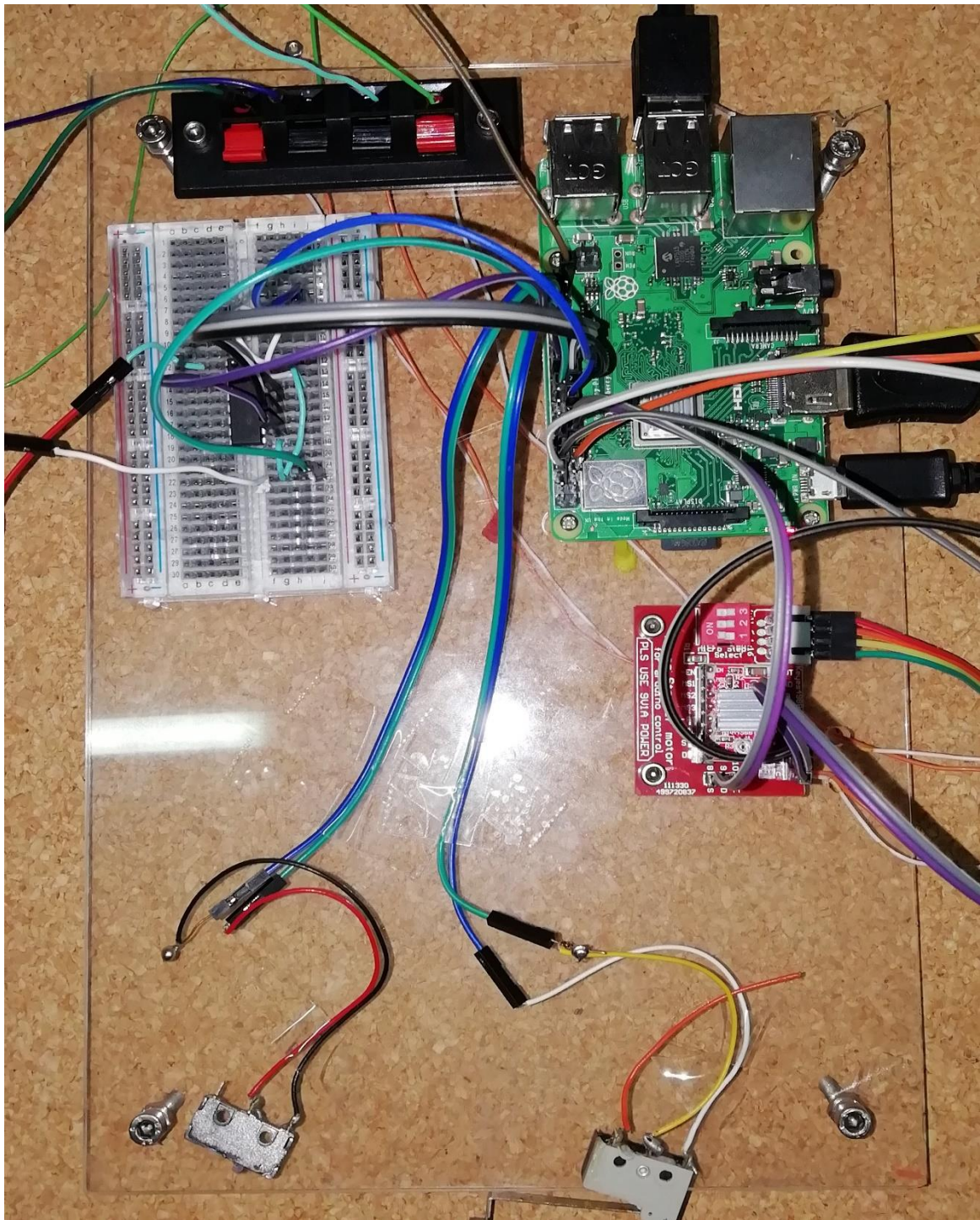


Εικόνα 29: Διάγραμμα για σήμα 200Hz από μία γεννήτρια συχνοτήτων



Εικόνα 30: Διάγραμμα παλμογράφου για σήμα 200Hz από την γεννήτρια συχνοτήτων

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι και για τις τρεις διαφορετικές συχνότητες από την γεννήτρια τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δεδομένα του A/D converter συμφωνούν με αυτά του παλμογράφου τόσο ως προς την τάση όσο και ως προς την περίοδο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο A/D converter δεν καταγράφει τιμές τάσης μικρότερες των 0,25V και αυτός είναι ο λόγος που στα διαγράμματα παρατηρείται μία ευθεία γραμμή με σταθερή τάση 0,25V. Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα δεδομένα που καταγράφονται είναι σωστά και το σύστημα είναι αξιόπιστο.



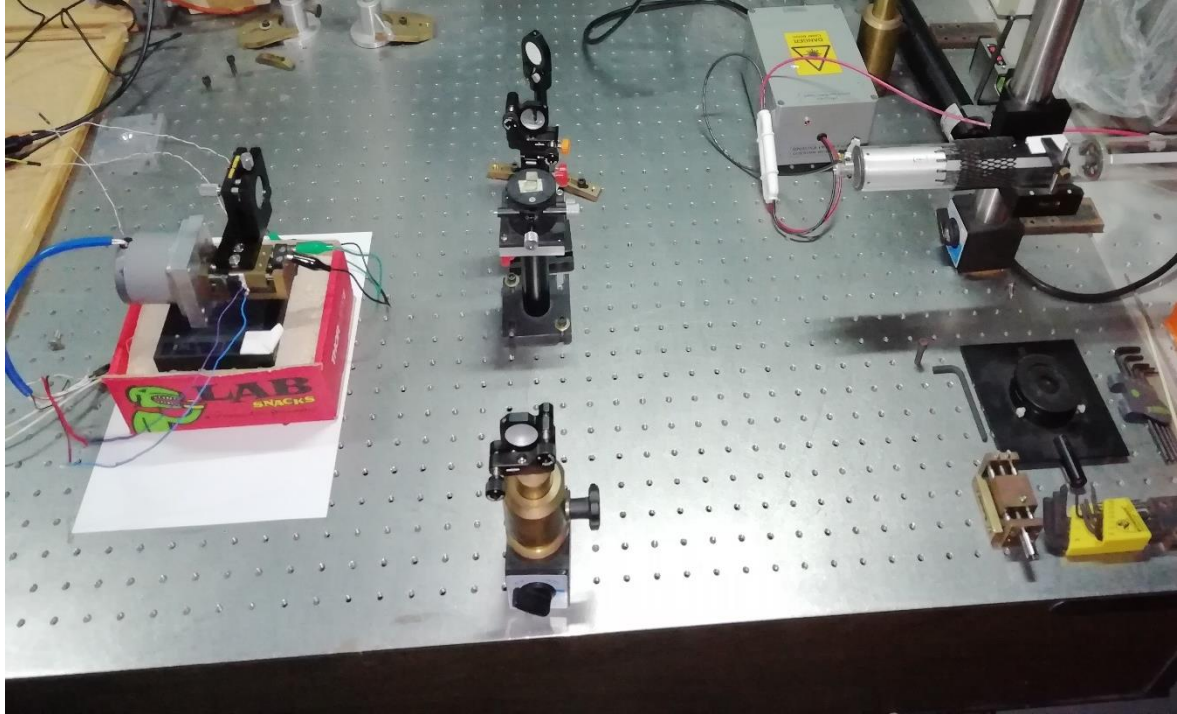
Εικόνα 31: Τελική συνδεσμολογία συστήματος

Υπολογισμός Μήκους Κύματος

Ο υπολογισμός του μήκους κύματος πραγματοποιήθηκε με την χρήση του συμβολομέτρου Michelson. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε το μήκος κύματος ενός κόκκινου και ενός πράσινου λέιζερ. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα του συμβολομέτρου του Michelson μετακινείται το κινητό κάτοπτρο και στο πέτασμα

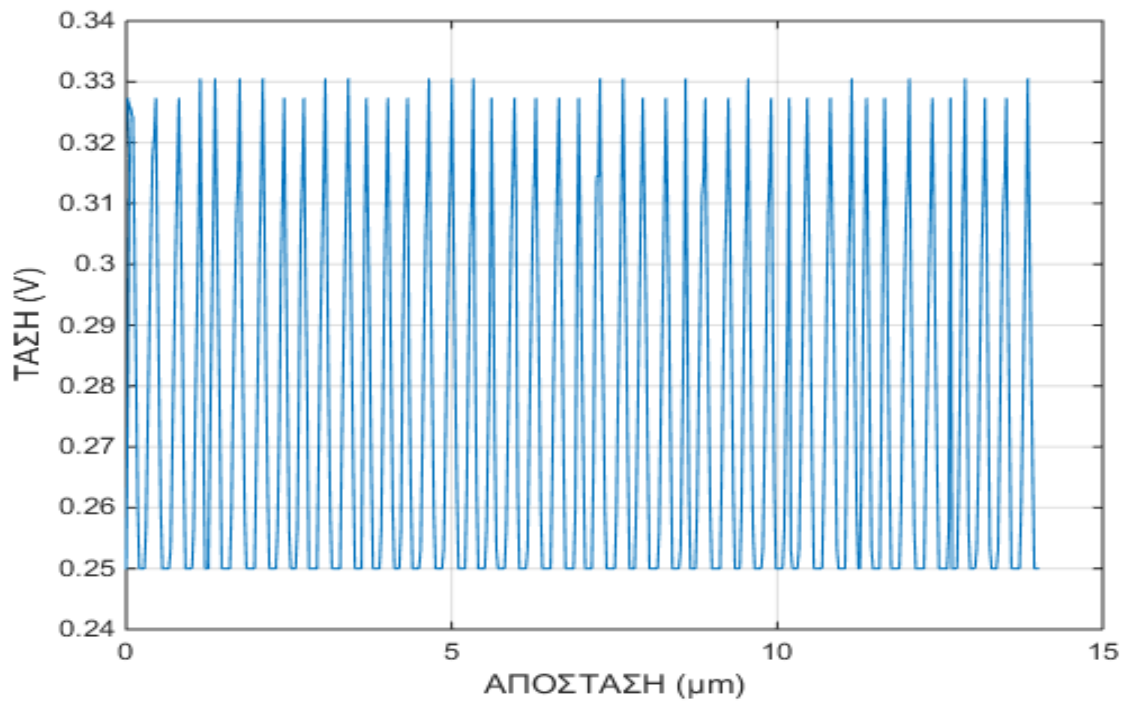
παρατηρούνται φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί. Η κίνηση του κατόπτρου γίνεται με την χρήση του βηματικού κινητήρα. Ταυτόχρονα με την μετακίνηση του κατόπτρου ο A/D converter καταγράφει τις τιμές της τάσης με την βοήθεια της φωτοδιόδου.

Η διάταξη για την εκτέλεση του πειράματος είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 32: Συμβολόμετρο Michelson

Το πείραμα ξεκινά με τον υπολογισμό του μήκους κύματος του κόκκινου λέιζερ. Η απόσταση που διανύει το κάτοπτρο είναι σταθερή και ίση με $d=14\mu\text{m}$. Το διάγραμμα της τάσης συναρτήσει του χρόνου για την συγκεκριμένη φωτεινή πηγή είναι το ακόλουθο:



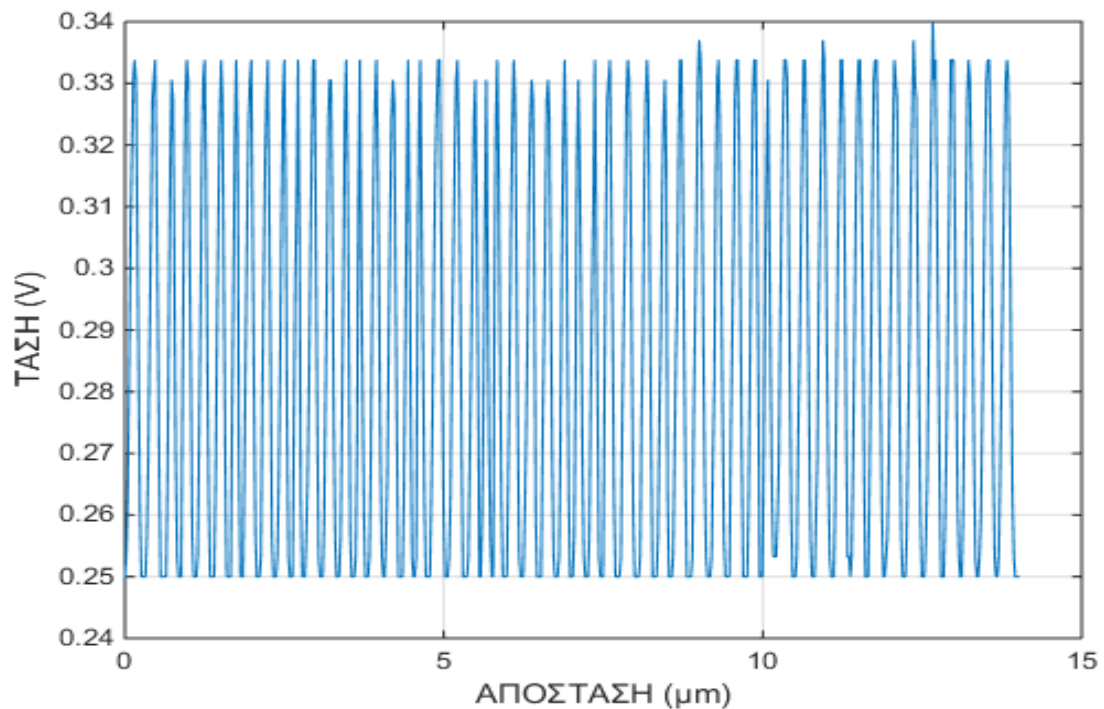
Εικόνα 33: Διάγραμμα Τάσης - Απόστασης για το Κόκκινο Λείζερ

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούνται 44 κορυφές, δηλαδή για απόσταση 14μm που μετακινήθηκε το κάτοπτρο η φωτοδίοδος κατέγραψε 44 φωτεινούς κροσσούς. Επομένως το μήκος κύματος για το κόκκινο λέιζερ προκύπτει από τον τύπο $\lambda = \frac{2 \cdot d}{N} = \frac{2 \cdot 14}{44} = 636,36 \text{ nm}$.



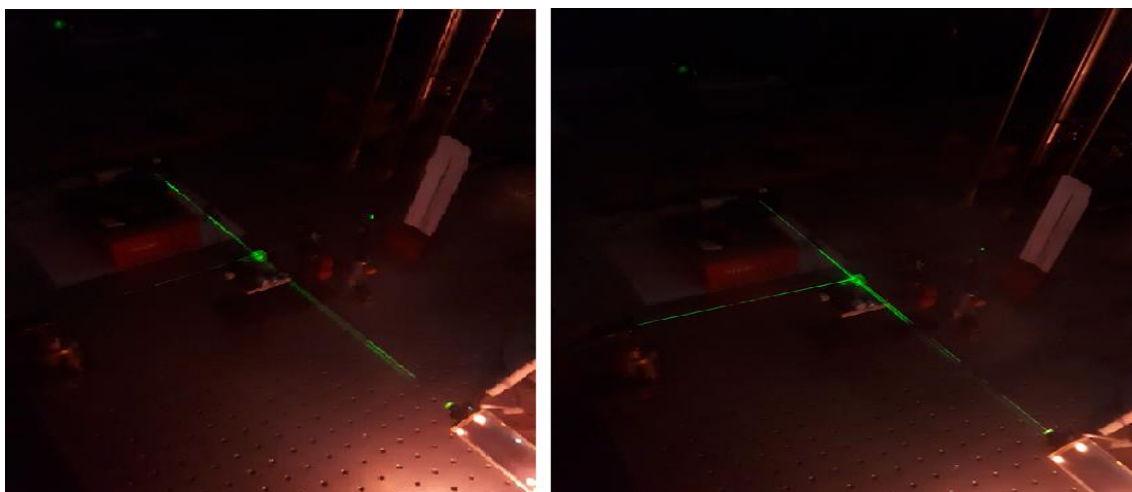
Εικόνα 34: Συμβολόμετρο Michelson για το κόκκινο λέιζερ

Στην συνέχεια τοποθετείται το πράσινο λέιζερ και χρησιμοποιείται το συμβολόμετρο για τον υπολογισμό του μήκους κύματος. Η απόσταση d που διανύει το κάτοπτρο είναι σταθερή και ίση με $d=14\mu\text{m}$. Το διάγραμμα της τάσης συναρτήσει του χρόνου για το πράσινο λέιζερ είναι το εξής:



Εικόνα 35: Διάγραμμα Τάσης - Απόστασης για το Πράσινο Λέιζερ

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούνται 53 κορυφές, δηλαδή για απόσταση $14\mu\text{m}$ που μετακινήθηκε το κάτοπτρο η φωτοδίοδος κατέγραψε 53 φωτεινούς κροσσούς. Επομένως το μήκος κύματος για το πράσινο λέιζερ προκύπτει από τον τύπο $\lambda = \frac{2 \cdot d}{N} = \frac{2 \cdot 14}{53} = 528,30\text{nm}$.



Εικόνα 36: Συμβολόμετρο Michelson για το πράσινο λέιζερ

Μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι ένας μαθηματικός μετασχηματισμός ο οποίος μετατρέπει μια μαθηματική συνάρτηση $f(t)$ σε μία νέα συνάρτηση που συμβολίζεται F και έχει μονάδα μέτρησης την συχνότητα σε Hz. Η νέα συνάρτηση που προκύπτει είναι γνωστή ως μετασχηματισμός Fourier ή ως φάσμα συχνοτήτων της συνάρτησης f . Ο μετασχηματισμός Fourier χρησιμοποιείται για την ανάλυση ενός σύνθετου σήματος σε απλούστερα σήματα. Τα σήματα που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία είναι περιοδικά και μέσω του μετασχηματισμού αναλύονται σε σήματα ημιτόνων και συνημιτόνων. Η συνάρτηση F υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο $F = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n * \cos(n * \omega * t) + b_n * \sin(n * \omega * t))$.

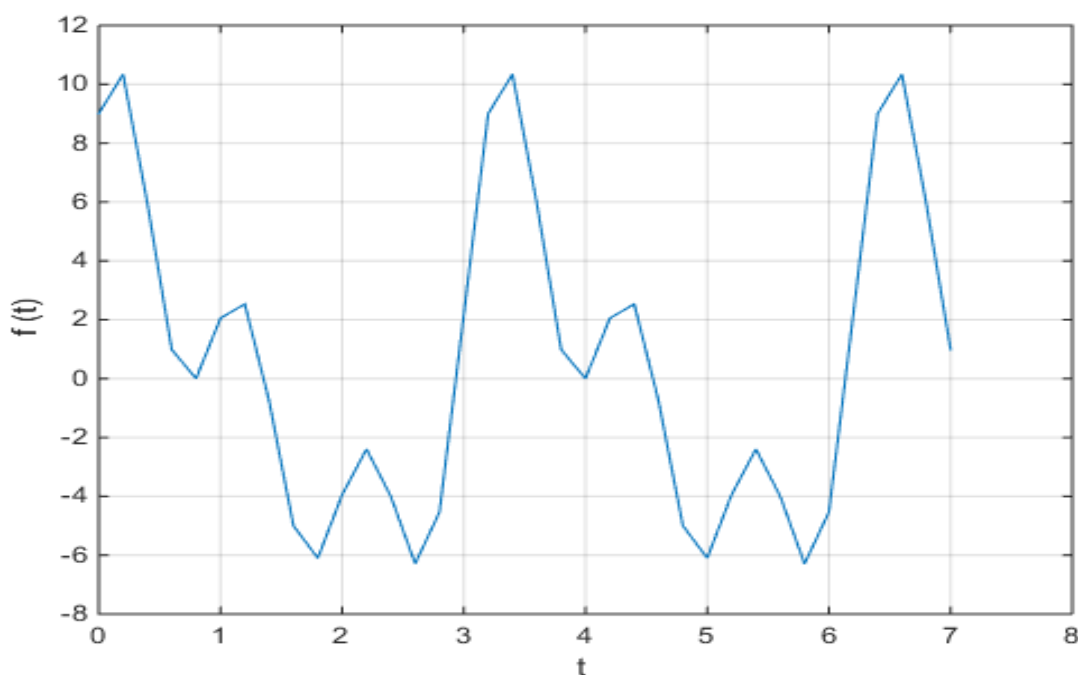
Οι συντελεστές a_n και b_n ονομάζονται συντελεστές Fourier και υπολογίζονται ως εξής:

$$a_n = \frac{2}{T} * \int_{-T/2}^{T/2} f(t) * \cos(n * \omega * t) \quad \text{και} \quad b_n = \frac{2}{T} * \int_{-T/2}^{T/2} f(t) * \sin(n * \omega * t).$$

Για τον μετασχηματισμό Fourier και την εύρεση των συντελεστών a_n και b_n δημιουργήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα σε κώδικα Matlab (βλέπε παράρτημα). Για τον έλεγχο της λειτουργίας του προγράμματος δημιουργήθηκε ένα σύνθετο σήμα στο Excel το οποίο αποτελείται από ημίτονα και συνημίτονα. Το σήμα που στάλθηκε είναι το εξής:

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{n=1}^3 (a_n * \cos(n * \omega * t) + b_n * \sin(n * \omega * t)) = \\ &(a_1 * \cos(1 * \omega * t) + b_1 * \sin(1 * \omega * t)) + (a_2 * \cos(2 * \omega * t) + b_2 * \sin(2 * \omega * t)) + (a_3 * \\ &\cos(3 * \omega * t) + b_3 * \sin(3 * \omega * t)) = (4 * \cos(1 * \omega * t) + 4 * \sin(1 * \omega * t)) + \\ &(2 * \cos(2 * \omega * t) + 1 * \sin(2 * \omega * t)) + (3 * \cos(3 * \omega * t) + 2 * \sin(3 * \omega * t)). \end{aligned}$$

Στην παραπάνω σχέση το $\omega = 1,9625$ rad/sec.

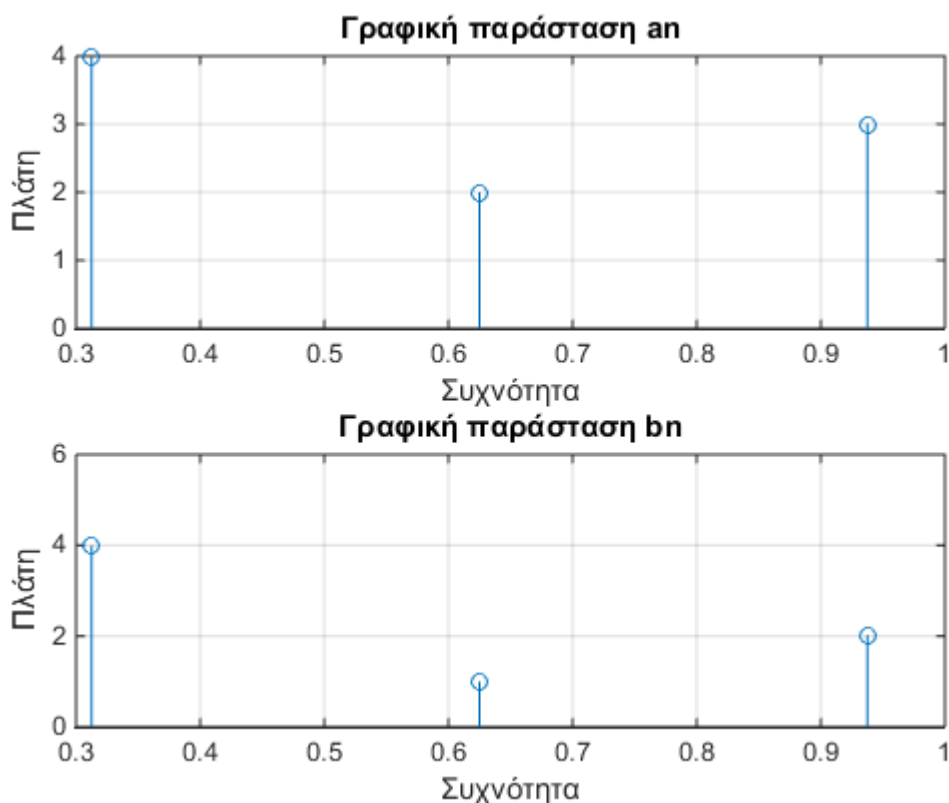


Εικόνα 37: Σύνθετο σήμα για τον έλεγχο του Fourier

Τα δεδομένα $f(t) - t$ του παραπάνω διαγράμματος διαβάστηκαν από τον κώδικα της Matlab και υπολογίστηκαν οι συντελεστές a_n και b_n του σύνθετου σήματος.

Πίνακας 1: Συντελεστές a_n και b_n για το σύνθετο σήμα

n	a_n	b_n
1	4	4
2	2	1
3	3	2



Εικόνα 38: Συντελεστές σύνθετου σήματος μέσω της Matlab

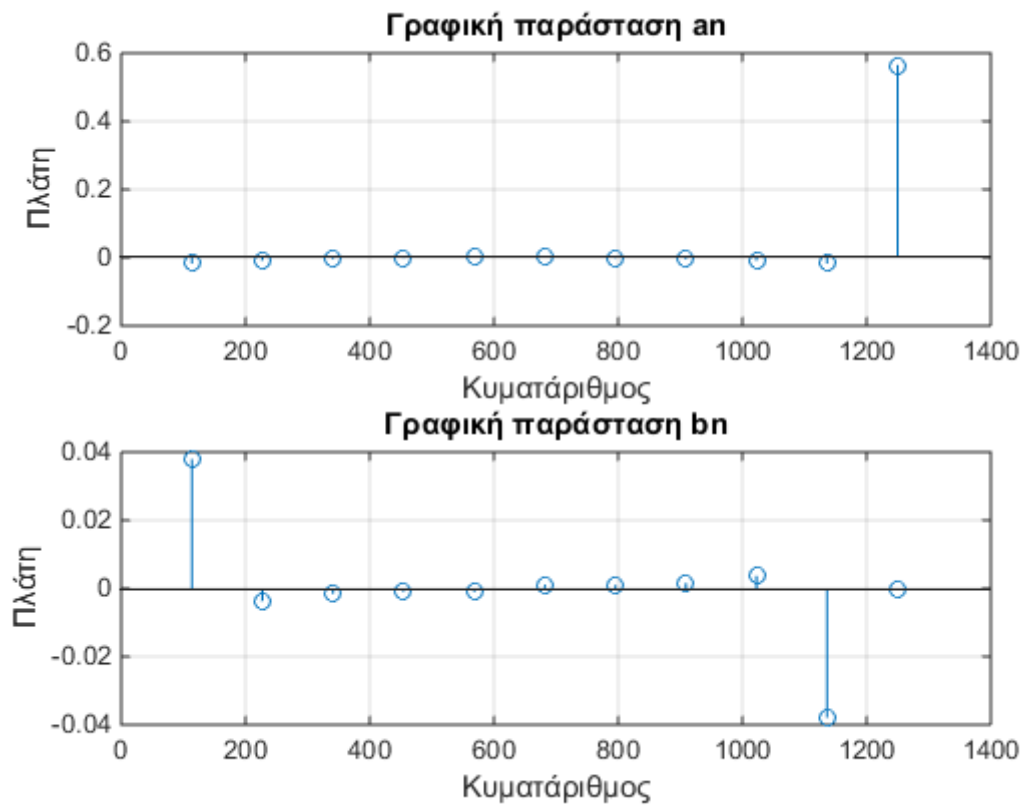
Παρατηρείται ότι οι συντελεστές που επέστρεψε το πρόγραμμα είναι ίδιοι με αυτούς που εμφανίζονται στην συνάρτηση $f(t)$. Επομένως, συμπεραίνεται ότι το πρόγραμμα λειτουργεί σωστά και μπορεί να υπολογίσει τους συντελεστές Fourier για οποιαδήποτε δεδομένα.

Με την ολοκλήρωση του υπολογισμού του μήκους κύματος των δύο λέιζερ εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός Fourier στα δεδομένα που καταγράφηκαν από τον A/D converter για το κόκκινο και το πράσινο λέιζερ με τη χρήση του προγράμματος και υπολογίστηκαν οι συντελεστές a_n και b_n .

Οι συντελεστές Fourier που προέκυψαν για το κόκκινο λέιζερ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2: Συντελεστές Fourier για το κόκκινο λείζερ

a_n	b_n
-0,0176093252462153	0,0379751210447244
-0,00821924535424541	-0,00368265638928054
-0,00425910564915884	-0,00160318080214342
-0,00141965940481882	-0,00102064296212690
0,000159679404438253	-0,00113892432680632
0,000159679404438129	0,00113892432680664
-0,00141965940481903	0,00102064296212692
-0,00425910564915805	0,00160318080214370
-0,00821924535424481	0,00368265638928030
-0,0176093252462151	-0,0379751210447241
0,562695312500000	-2,64406291247114e-15

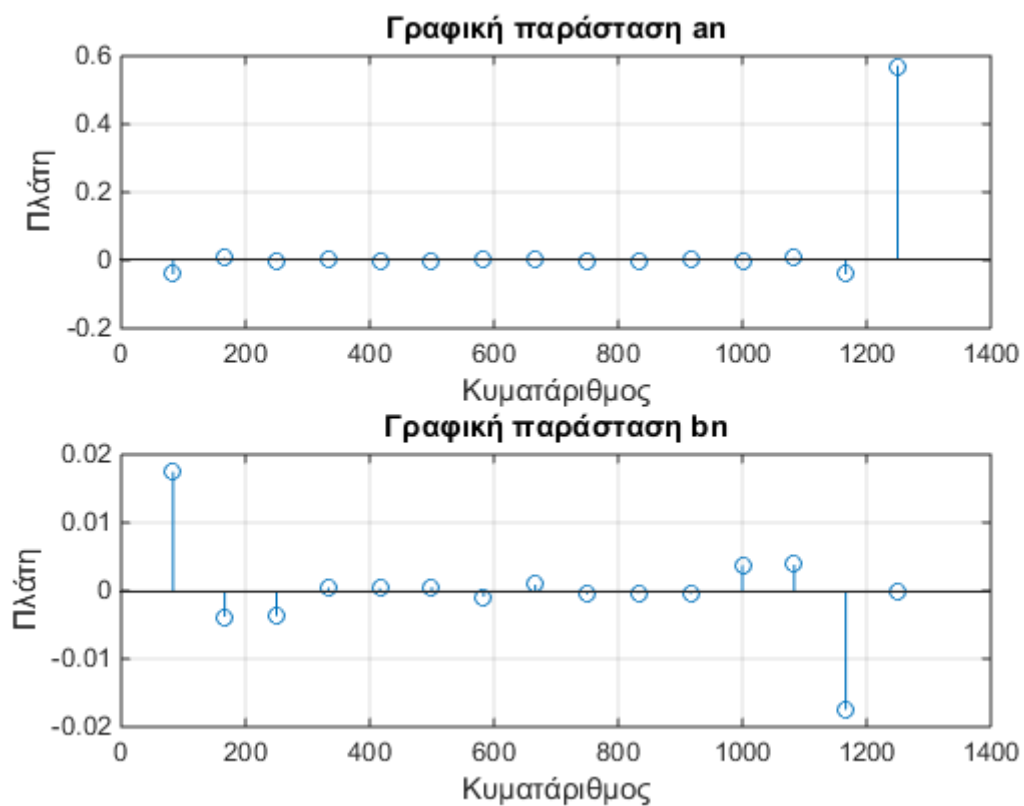


Εικόνα 39: Συντελεστές Fourier για το κόκκινο λείζερ

Οι συντελεστές Fourier που προέκυψαν για το πράσινο λείζερ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 3: Συντελεστές Fourier για το πράσινο λείζερ

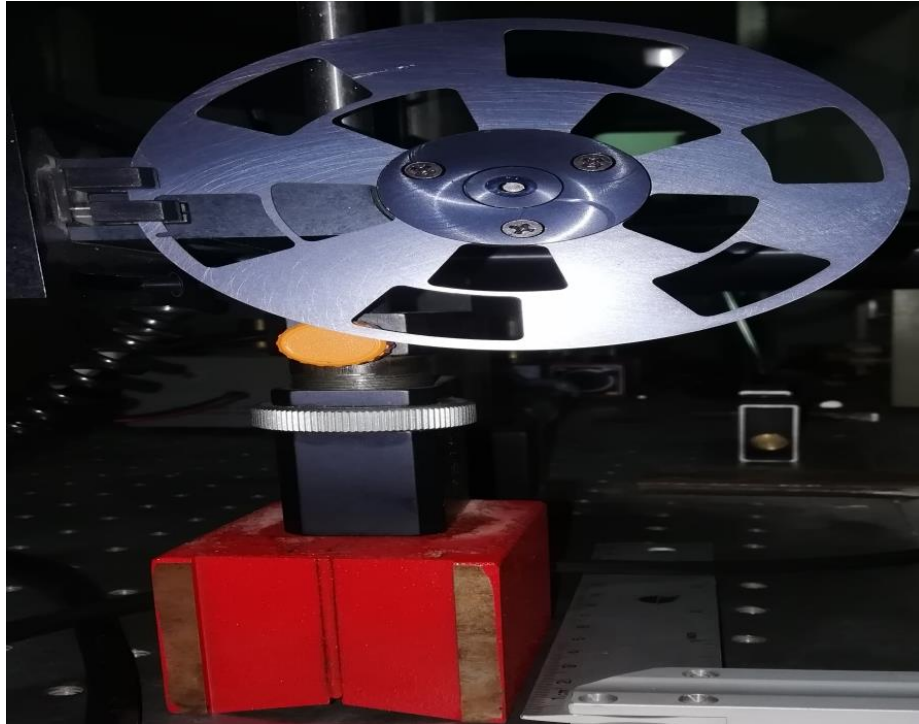
a_n	b_n
-0,0410710737568280	0,0174718996467755
0,00729456573516945	-0,00382511698608532
-0,000777311989770495	-0,00371476245904541
0,000507843529779467	0,000436244884586949
-0,000214843749999931	0,000372120290688446
-0,000296906760229673	0,000527901630661561
0,000182726991878921	-0,000894525238884622
0,000182726991878995	0,000894525238884581
-0,000296906760229430	-0,000527901630661305
-0,000214843750000151	-0,000372120290689020
0,000507843529779761	-0,000436244884586590
-0,000777311989770418	0,00371476245904603
0,00729456573516955	0,00382511698608553
-0,0410710737568282	-0,0174718996467755
0,568750000000000	-3,50446276227411e-16



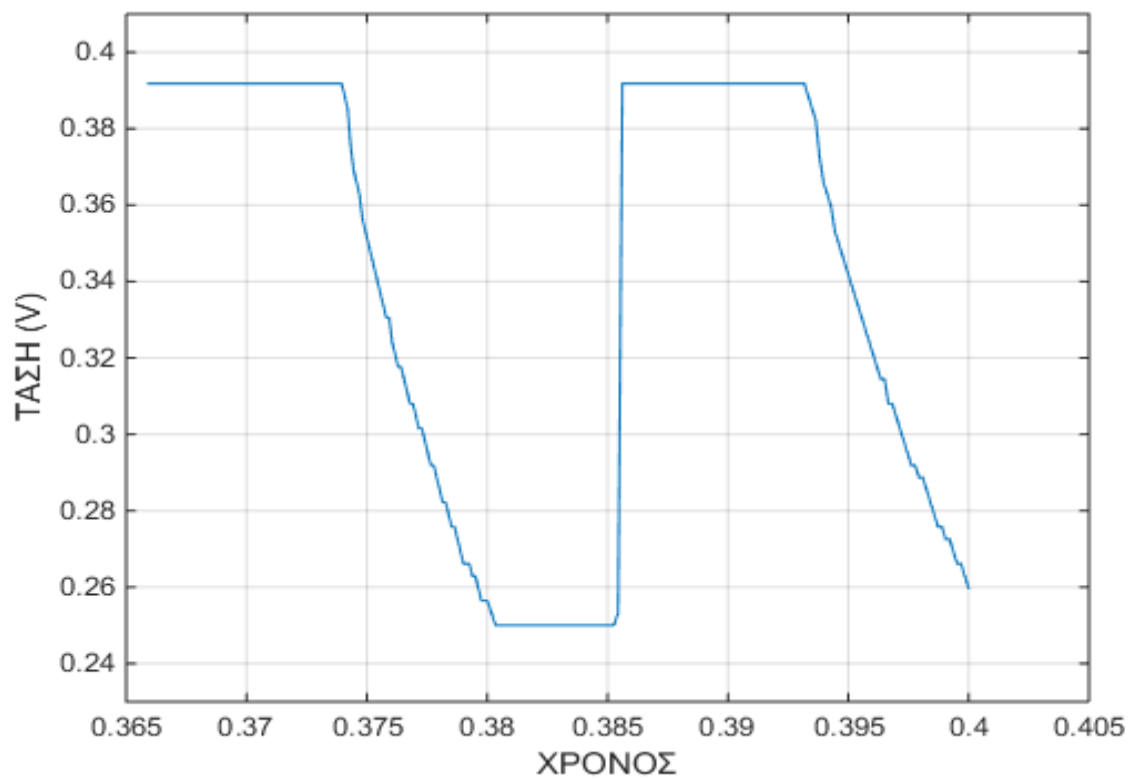
Εικόνα 40: Συντελεστές Fourier για το πράσινο λείζερ

Τοποθέτηση Τσόπερ Μπροστά από την Δέσμη Λείζερ

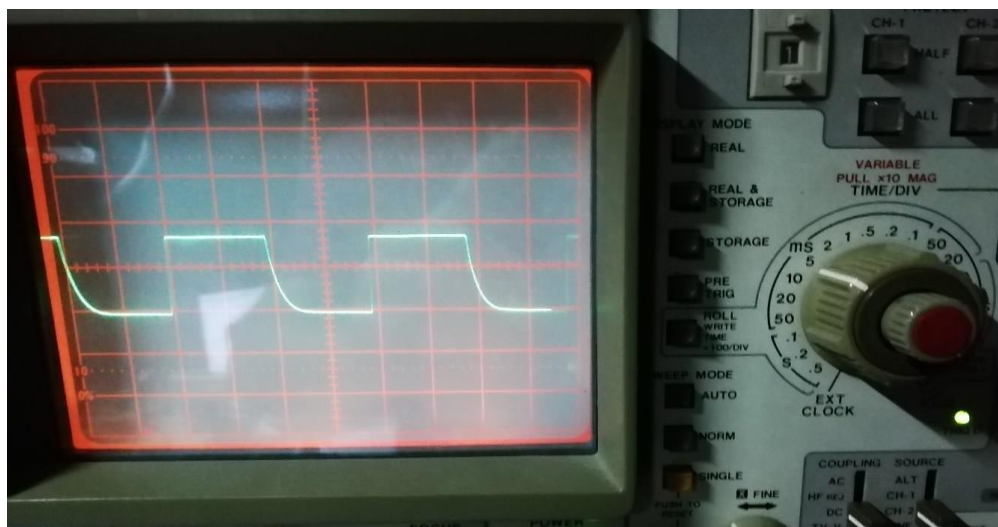
Με την ολοκλήρωση του υπολογισμού του μήκους κύματος των δύο λέιζερ και των συντελεστών Fourier τοποθετήθηκε ένα τσόπερ με οκτώ οπές μπροστά από την δέσμη του κόκκινου λέιζερ και καταγράφηκαν τα δεδομένα από τον A/D converter. Τα δεδομένα είναι για συχνότητες περιστροφής του τσόπερ για 50Hz, 100Hz και 200Hz.



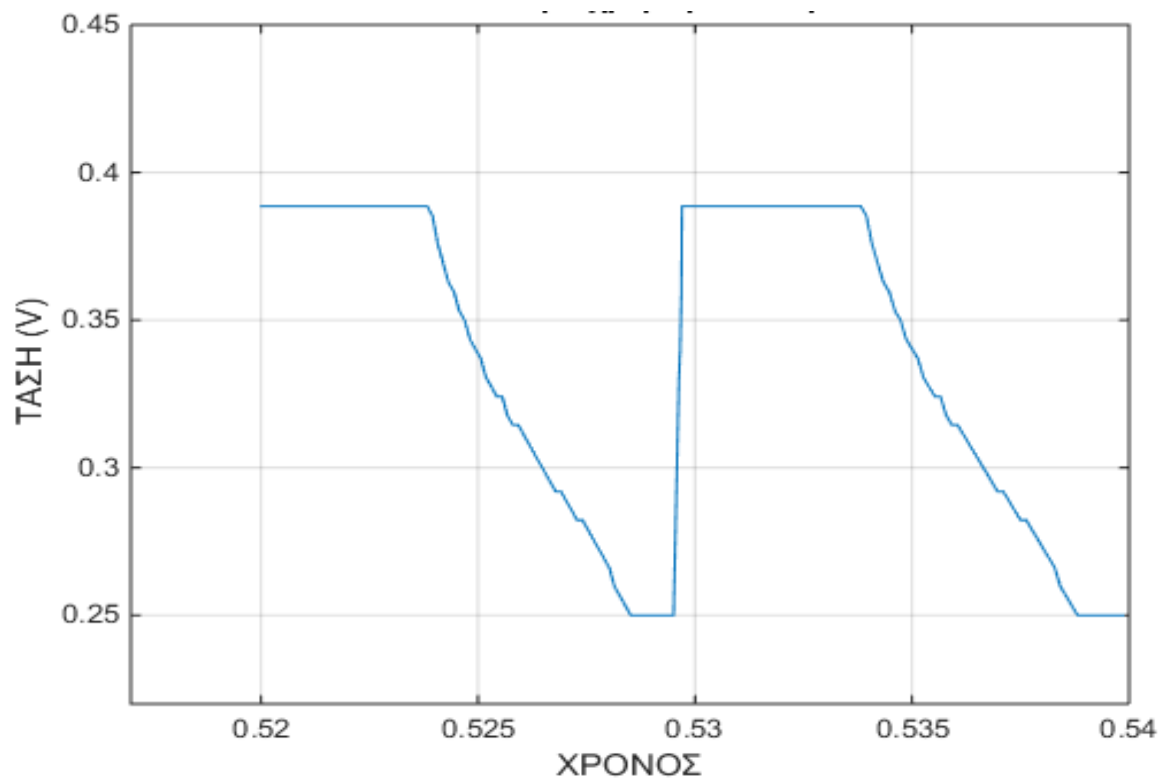
Εικόνα 41: Τσόπερ



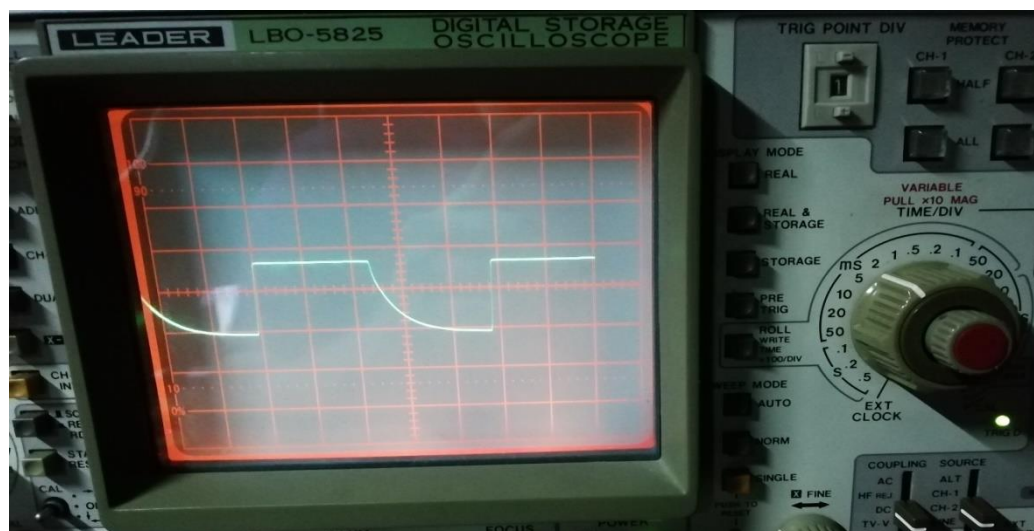
Εικόνα 42:Διάγραμμα για συχνότητα περιστροφής 50Hz



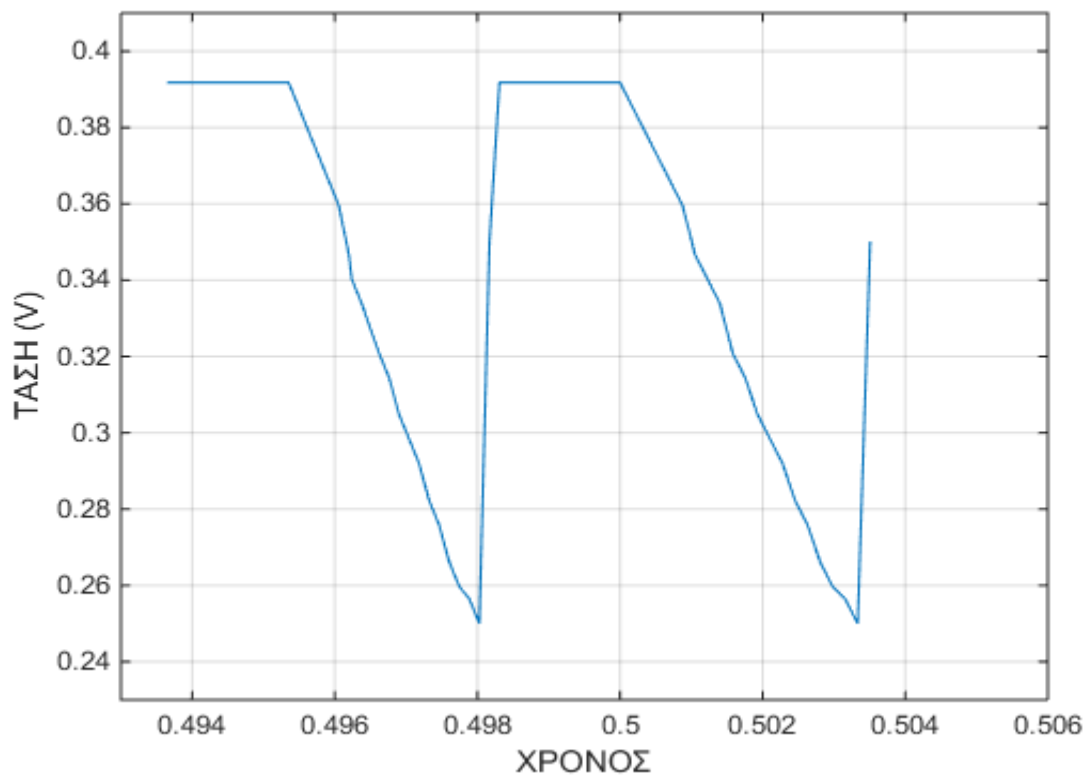
Εικόνα 43:Διάγραμμα παλμογράφου για συχνότητα περιστροφής 50Hz



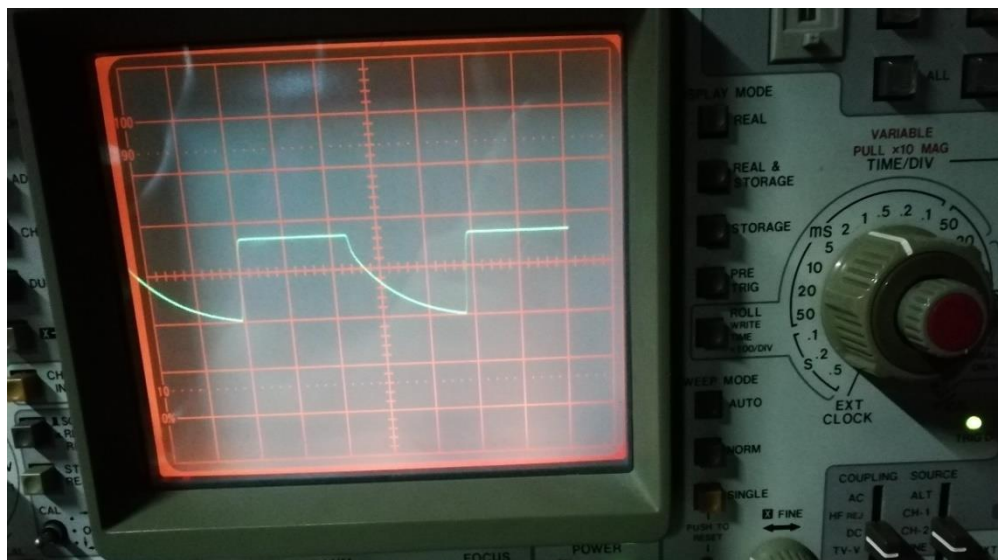
Εικόνα 44:Διάγραμμα για συχνότητα περιστροφής 100Hz



Εικόνα 45:Διάγραμμα παλμογράφου για συχνότητα περιστροφής 100Hz



Εικόνα 46:Διάγραμμα για συχνότητα περιστροφής 200Hz



Εικόνα 47:Διάγραμμα παλμογράφου για συχνότητα περιστροφής 200Hz

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι και για τις τρεις διαφορετικές συχνότητες περιστροφής του τσόπερ τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δεδομένα του A/D converter συμφωνούν με αυτά του παλμογράφου τόσο ως προς την τάση όσο και ως προς την περίοδο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη μέτρησης και υπολογισμού μήκους κύματος μίας φωτεινής πηγής. Το σύστημα αυτό είναι βασισμένο στην τεχνική του συμβολομέτρου του Michelson, το οποίο αποτελείται από δύο κάτοπτρα εκ των οποίων το ένα είναι κινητό, ένα διαχωριστή δέσμης και ένα πέτασμα. Η κίνηση του κατόπτρου επιτυγχάνεται μέσω βηματικού κινητήρα. Ο βηματικός κινητήρας είναι συνδεδεμένος με έναν driver και για την περιστροφή του έχει δημιουργηθεί κατάλληλο πρόγραμμα. Οι αλλαγές στην φωτεινότητα των κροσσών καταγράφηκαν μέσω του A/D converter που συνδέθηκε με την φωτοδίοδο και μετέτρεψε το σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των διαγραμμάτων τάσης – απόστασης. Ένα γεγονός που παρατηρείται και αξίζει να αναφερθεί είναι ότι ο A/D converter αδυνατεί να καταγράψει τιμές τάσης που είναι μικρότερες από 0,25V. Αυτή η αδυναμία του A/D converter να καταγράψει τιμές τάσης μικρότερες των 0,25V δεν δίνει την δυνατότητα να υπάρχει μια ολοκληρωμένη γραφική απεικόνιση του σήματος. Τα δεδομένα όμως που επιστρέφονται είναι σωστά τόσο ως προς την μέγιστη τάση όσο και ως προς την συχνότητα και αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στα διαγράμματα που προέκυψαν κατά τον έλεγχο του συστήματος. Επιπλέον, εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός Fourier για τα δεδομένα των δύο λείζερ. Οι συντελεστές που προέκυψαν είναι σχεδόν μηδενικοί γεγονός που φανερώνει ότι οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά την εκτέλεση του πειράματος (εξωτερικοί ήχοι, φως που πιθανόν να υπήρχε στο δωμάτιο, θερμοκρασία, υγρασία) ήταν ικανοποιητικοί και δεν επηρέασαν τις μετρήσεις. Τέλος, η ολοκλήρωση της μελέτης αποδεικνύει ότι η διάταξη που κατασκευάστηκε μπορεί να μετρήσει με σχετικά καλή ακρίβεια τα μήκη κύματος διαφόρων φωτεινών πηγών.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Να χρησιμοποιηθεί ως φασματογράφος σε πειράματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε για την λειτουργία του βηματικού κινητήρα και έτρεξε στον μικροεπεξεργαστή Raspberry Pi είναι ο ακόλουθος:

```
from time import sleep
import RPi.GPIO as GPIO
import time

DIR = 5
STEP = 6
SWITCH1=0
SWITCH2=4
CW = 1
CCW = 0
SPR =5

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(SWITCH1,GPIO.IN,pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
GPIO.setup(SWITCH2,GPIO.IN,pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
GPIO.setup(DIR, GPIO.OUT)
GPIO.setup(STEP, GPIO.OUT)
step_count=SPR
delay = 0.008

while True:
    print('BHMATA EMPROS')
    mprosta=0
    GPIO.output(DIR, CCW)
    while GPIO.input(SWITCH1)==1 :
        for x in range(step_count):
            if(GPIO.input(SWITCH1) ==1):
                GPIO.output(STEP, GPIO.HIGH)
                sleep(delay)
                GPIO.output(STEP, GPIO.LOW)
                sleep(delay)

        sleep(0)
        mprosta=mprosta+1
        print("{}".format(mprosta))

    sleep(2) #Molis pathitheï to SWITCH1 perimenei 3sec kai
    epistrefei piso

    print('BHMATA PISO')
    piso=0
    GPIO.output(DIR,CW)
    while GPIO.input(SWITCH2)==1 :
        for x in range (step_count):
            if(GPIO.input(SWITCH2) ==1):
                GPIO.output(STEP, GPIO.HIGH)
                sleep(delay)
                GPIO.output(STEP, GPIO.LOW)
                sleep(delay)
```

```

        sleep(0)
        piso=piso+1
        print("{}".format(piso))

GPIO.cleanup()
quit()

```

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε για την καταγραφή των δεδομένων από την φωτοδίοδο και έτρεξε στον μικροεπεξεργαστή Raspberry Pi είναι ο ακόλουθος:

```

import RPi.GPIO as GPIO
import time
import spidev
import time
import os
import sys

SWITCH3=16
SWITCH4=12

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(SWITCH3, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
GPIO.setup(SWITCH4, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)

spi=spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)
spi.max_speed_hz=1350000

channel=0

def getReading(channel):
    adc=spi.xfer2([1, (8+channel)<<4,0])
    data=((adc[1]&3) << 8)+adc[2]
    return data

print('METRISEIS')
print('-----')

start=0

start=time.time()

while True:
    input_state = GPIO.input(SWITCH3)
    while input_state == 0:
        light=getReading(channel)
        timenow=time.time()
        g=open('metriseis','a')
        g.write("{}\n".format(light))
        g.close()

```

```

g=open('XRONOI','a')
g.write("{}\n".format(timenow))
g.close()

if GPIO.input(SWITCH4)==0 :
    sys.exit
    print('TELOS')
    GPIO.cleanup()
    quit()

```

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την φωτοδίοδο εισήχθησαν στο παρακάτω πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε κώδικα Matlab για τον υπολογισμό των συντελεστών Fourier των μηκών κύματος.

```

clear all;
clc;

dt=input('Δώσε το βήμα: ')
T=input('Δώσε την περίοδο: ')
w=(2*pi)/T
N=input('Δώσε τα σημεία της περιόδου: ')

x=xlsread('diagramata.xlsx','sheet6','A5:A573')
y=xlsread('diagramata.xlsx','sheet6','C5:C573')

figure(1)
plot(x,y)
xlabel('XPONOS')
ylabel('ΤΑΣΗ (V)')
title('Σai*cos(n*wi*t) + Σbi*sin(n*wi*t)')
grid on

x=xlsread('diagramata.xlsx','sheet6','A5:A16')
y=xlsread('diagramata.xlsx','sheet6','C5:C16')

for n=1:11

    for j=1:N-1

E1(j,1)=[y(j,1)*cos(n*w*x(j,1))+y(j+1,1)*cos(n*w*x(j+1,1))]*
(dt/2)

E2(j,1)=[y(j,1)*sin(n*w*x(j,1))+y(j+1,1)*sin(n*w*x(j+1,1))]*
(dt/2)

    end
end

```

```

    M(n)=sum(E1) %Το αθροισμα των E1(1,j)για να βρώ το Εολ
της γραφικής f(t)*cos(n*w*t)
    L(n)=sum(E2) %Το αθροισμα των E2(1,j)για να βρώ το Εολ
της γραφικής f(t)*sin(n*w*t)
    a(n)=(2/T)*M(n) %Υπολογίζω το an
    b(n)=(2/T)*L(n) %Υπολογίζω το bn
    f(n)=(n*w)/(2*pi)%Βρίσκει την συχνότητα τω an και bn
end

figure(2)
stem(f,a)
xlabel('Συχνότητες')
ylabel('Πλάτη')
title('Γραφική παράσταση an')
grid on
figure(3)
stem(f,b)
xlabel('Συχνότητες')
ylabel('Πλάτη')
title('Γραφική παράσταση bn')
grid on

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. HUGH D. Young, *ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ*, *Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα*, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1994, σ. 919 – 926, σ.936
2. HUGH D. Young, *ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ*, *Συμβολή*, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1994, σ. 1024 – 1030
3. ΣΕΡΓΑΚΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ, ΠΕΤΡΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής II, Ηλεκτρισμός Μαγνητισμός Οπτική, Συμβολόμετρο Michelson*, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, ΑΘΗΝΑ, 2015
4. HUGH D. Young, *ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ*, *Περίθλαση*, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1994, σ. 1047 – 1056
5. ΜΠΑΡΤΖΗΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ, *Μελέτη μεθόδων ελέγχου κίνησης και προεπιλεγμένων λειτουργιών βηματικού κινητήρα με χρήση μικροεπεξεργαστή*, Διπλωματική εργασία, ΑΤΕΙΠ, 2017
6. ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ, *Προγραμματισμός με Python στο Raspberry Pi*, Σύλλογος Εκπαιδευτικών Πληροφορικής Χίου, Απρίλιος 2016
7. ALLEGRO SYSTEMS, *Driver A4988 datasheet*. Διαθέσιμο στον διαδικτυακό τόπο:
https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translation.pdf
8. SOURCEFORGE, *rasberry – gpio – python*, 2019. Διαθέσιμο στον διαδικτυακό τόπο: <https://sourceforge.net/p/rasberry-gpio-python/wiki/BasicUsage/>
9. MICROCHIP TECHNOLOGY INC. , *A/D converter MCP 3008 datasheet*. Διαθέσιμο στον διαδικτυακό τόπο:
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MCP3008.pdf>
10. GORDONS PROJECTS, *Understanding SPI on the Raspberry Pi*, 2012. Διαθέσιμο στον διαδικτυακό τόπο: <https://projects.drogon.net/raspberry-pi/>
11. ΑΦΕΝΤΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΜΟΥΣΤΑΪΖΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ, ΣΕΡΓΑΚΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ, *Οδηγός Παράστασης ΛΕΙΖΕΡ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*, ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ, Αθήνα, 2008