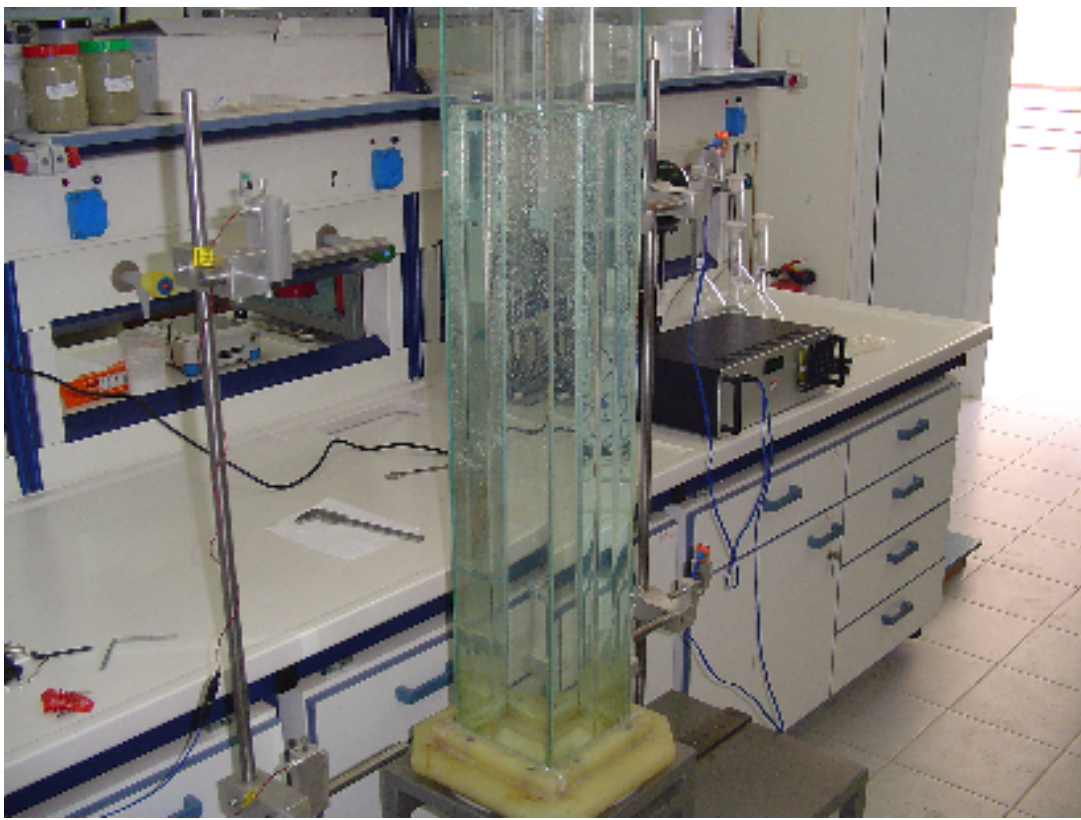




**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΧΑΝΙΑ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**Θέμα πτυχιακής εργασίας: Ανάπτυξη μετρητικού συστήματος ταχύτητας στερεού σώματος μέσα σε υγρό.**

**Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Ταταράκης Μιχαήλ**

**Επιμέλεια: Βάλλας Βασίλειος  
Μανογιαννάκης Στυλιανός**

## Περιγραφή του προβλήματος

Αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή ενός μετρητικού συστήματος το οποίο θα είναι σε θέση να μετρά με αξιοπιστία και ακρίβεια τον χρόνο και την μέση ταχύτητα καθίζησης ενός σφαιριδίου μέσα σε πειραματικό σωλήνα με υγρό όπου το σφαιρίδιο αντικαθιστά για λόγους πειραματικής διευκόλυνσης τα διάφορα πετρώματα. Η βασική ιδέα λειτουργίας της κατασκευής είναι ότι η ανίχνευση του σφαιριδίου γίνεται με δυο Laser ένα στην κορυφή της δεξαμενής και ένα στον πάτο της τα οποία και εκπέμπουν μιας σταθερής έντασης δέσμη φωτός η οποία όταν το σφαιρίδιο την διαπεράσει μεταβάλλεται ανάλογα με την επιφάνεια που θα σκιάσει το σφαιρίδιο η οποία πάλι εξαρτάται από το μέγεθος του. Με αυτό τον τρόπο μετράμε την οπτική ισχύ των laser στα όρια της επιλεγμένης απόστασης με τη χρήση αναλογικού κυκλώματος φωτοανιχνευτή. Επίσης χρησιμοποιείται κύκλωμα μικροελεκτή για τον υπολογισμό της ταχύτητας.

## **Ευχαριστίες**

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Βασίλειο Κελεσίδη Επίκουρο καθηγητή και υπεύθυνο της ερευνητικής μονάδας Τεχνικής Γεωτρήσεων , τον κύριο Γρηγόριο Μπανδέλη επιστημονικό συνεργάτη του τμήματος Ορυκτών Πόρων του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων για την καθοριστική τους βοήθεια στα θέματα παραγγελίας των παρελκόμενων της κατασκευής αλλά και για το ενδιαφέρον τους για τον συντονισμό της όλης προσπάθειας και επίσης τον συνεργάτη του εργαστηρίου κύριο Ευπρεπιο Μπαράδακη για την πολύτιμη βοήθεια του. Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε τον Αλέξανδρο Σκουλάκη για την βοήθεια του στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μέρους των κυκλωμάτων καθώς επίσης και στην εποπτεία της κατασκευής και την παρέμβαση του σε όποια σημεία ήταν αναγκαία, όπως επίσης τον Γιώργο και Δημήτρη Τσικρισάκη για την προσφορά τους στον προγραμματισμό του αναπτυξιακού.

Τέλος ευχαριστούμε την διεύθυνση του Τμήματος Ηλεκτρονικής και ειδικότερα τον επιβλέπων καθηγητή μας κύριο Μιχαήλ Ταταράκη για την ανάθεση αυτής της εργασίας σε εμάς.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιγραφή του προβλήματος.....	2
Ευχαριστίες.....	3
Preface.....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>	<b>6</b>
Εισαγωγή .....	6
Δομή της πτυχιακής .....	7
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>8</b>
Οπτικό σύστημα.....	8
2.1 Περιγραφή της οπτικής διάταξης.....	8
2.2 Laser.....	9
2.3 Φωτοδίοδος .....	37
2.4 Μαθηματική ανάλυση .....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>45</b>
Αναλογικό κύκλωμα .....	45
3.1 Ανάλυση ηλεκτρονικού κυκλώματος .....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>53</b>
Ψηφιακό κύκλωμα .....	53
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>59</b>
Μετρήσεις αποτελέσματα.....	59
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....</b>	<b>60</b>
Α) Αναπτυξιακό κύκλωμα.....	60
Β) Φωτοανιχνευτής .....	63
Γ) Laser.....	65
Δ) Δεξαμενή .....	68
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b>	<b>72</b>
Α) Φωτογραφίες αναπτυξιακού κυκλώματος.....	72
Β) Φωτοανιχνευτής .....	73
Γ) Η Φωτοδίοδος .....	74
Δ) Laser .....	75
Ε) Δεξαμενή .....	76
<b>ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ .....</b>	<b>77</b>
Α) Ρύθμιση πρισμάτων και Laser και προετοιμασία λειτουργίας συσκευής. ...	77
Β) Σύνδεση Τροφοδοσίας .....	78
Γ) Ενεργοποίηση συσκευής.....	78
Δ) Οδηγίες Λειτουργίας.....	78
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>80</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>81</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>82</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ.....</b>	<b>83</b>



## **Preface**

Object of this final work is the manufacture of counting system which will be able to measure with reliability and precision the time and the medium speed of subsidence of spherule in experimental pipe with liquid where the spherule replaces for reasons of experimental facilitation the various rocks. The basic idea of operation of manufacture is that the detection of spherule it becomes with two Laser in the top of reservoir and in the bottom that emits a constant intensity beam of light which when the spherule penetrates it is altered depending on the surface that will shade the spherule which again depends from its size. Thus with the use of electronic rungs we exploited this change of intensity of light and hence change of tendency above in utmost the photodiodes of photodetectors in order to create vibrations of beginning and pause the meter of the microprocessor.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

Η υλοποίηση του προβλήματος που μελετάμε έγινε με τους εξής τρόπους:

A) Με βιντεοσκόπηση, με αυτή τη μέθοδο η σφαίρα πρέπει να βιντεοσκοπηθεί και από την ανάλυση των frame βίντεο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή καταφέρνουμε να μετρήσουμε το χρόνο καθίζησης της σφαίρας. Αυτή η μέθοδος απορρίφτηκε διότι η ποιότητα της κάμερας και του ηλεκτρονικού υπολογιστή έπρεπε να είναι πολύ καλή για να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα , πράγμα που σημαίνει μεγάλο κόστος.

B) Μέτρηση με τη βοήθεια διοδικών laser. Με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούμε δυο διοδικά laser και δύο φακούς διασκόρπισης και σύγκλισης αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε το άνοιγμα της δέσμης οριζόντια που σημαίνει ότι μπορούμε να εντοπίσουμε τη σφαίρα. Με τη βοήθεια ενός διαφορικού ενισχυτή ανιχνεύουμε τη μεταβολή στη τάση και οι έξοδοι του ενισχυτή πάνε σε δύο εισόδους του μικροεπεξεργαστή και με τη βοήθεια αυτού υπολογίζουμε το χρόνος καθίζησης και τον απεικονίζουμε σε μια οθόνη υγρών κρυστάλλων.

Επιλέξαμε αυτή τη μέθοδο γιατί αρχικά ήταν η πιο εύκολα υλοποιήσιμη με τα βέλτιστα αποτελέσματα μετρήσεων και το χαμηλότερο κόστος.

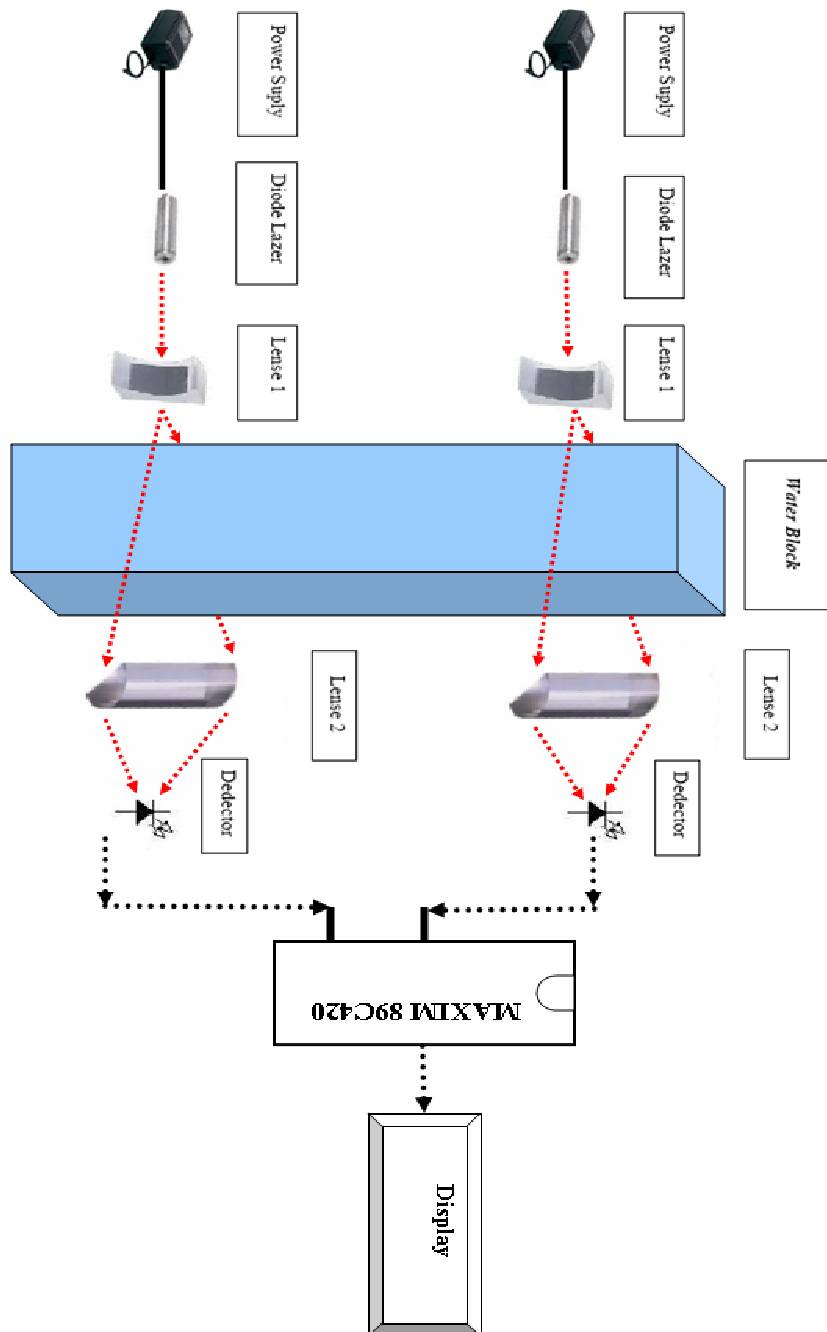
## Δομή της πτυχιακής

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στο οπτικό σύστημα. Περιγράφει την οπτική διάταξη, τα laser και τη φωτοδίοδο. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο αναλογικό κύκλωμα και στα φίλτρα. Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στη διάταξη του αναπτυξιακού κυκλώματος. Το πέμπτο κεφάλαιο παραθέτει αποτελέσματα μετρήσεων που αφορούν τη κατασκευή. Ακολουθεί το παράρτημα Α το οποίο περιέχει σχηματικά και πίνακες τεχνικών χαρακτηριστικών και τέλος το παράρτημα Β περιέχει φωτογραφικό υλικό από τη μέρη της κατασκευής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Οπτικό σύστημα

#### 2.1 Περιγραφή της οπτικής διάταξης



Κάτοψη οπτικής διατάξεως

## 2.2 Laser

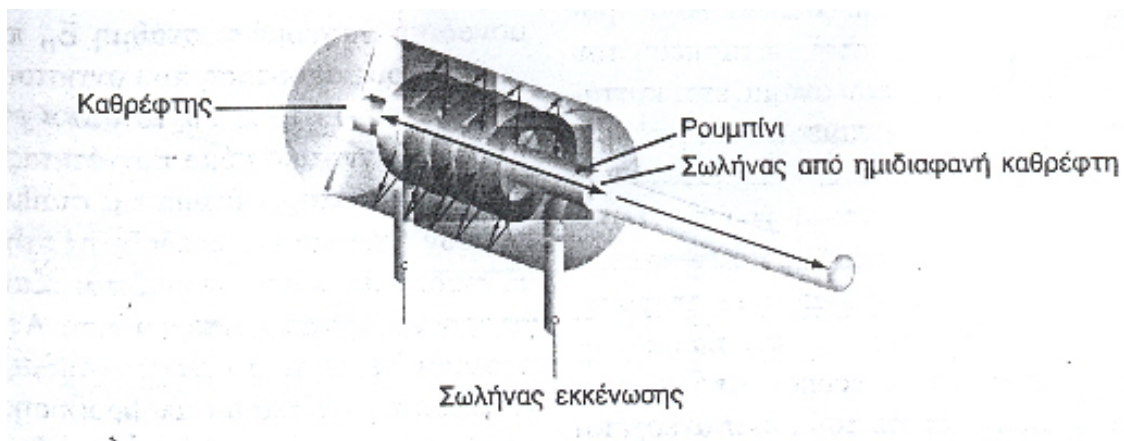
### Ιστορικά στοιχεία για τα laser

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει κάνει πλέον πολύ κόσμο να εξοικειωθεί με τις έννοιες της φυσικής και τις εφαρμογές τους, όπως π.χ. το laser.

Αν και ο Einstein έδωσε την έννοια της εξαναγκασμένης εκπομπής το 1917, το πρώτο laser λειτούργησε 43 χρόνια αργότερα. Πρόκειται για το laser ρουμπινίου, (ruby), που κατασκεύασε ο T. H. Maiman το 1960. Έξι μήνες μετά λειτούργησε το πρώτο laser αερίου (He-Ne), και στα τέλη του 1962 λειτούργησαν τα πρώτα laser ημιαγωγών. Από τότε η έρευνα προχώρησε με άλματα και μία μεγάλη ποικιλία ενεργών μέσων δοκιμάστηκαν και καθιερώθηκαν. Ανάμεσα σ' αυτά θα βρει κανείς μοριακά ή ιονισμένα αέρια, ημιαγωγούς, συνθετικούς κρυστάλλους με προσμίξεις, διαλύματα χρωστικών κ.ά.

Το μέγεθος και η μορφή των laser ποικίλει. Μπορεί να είναι μικρά σαν τα εκπαιδευτικά laser He-Ne, ή να αποτελούν συστήματα πολύ μεγάλων διαστάσεων. Η ισχύς τους ποικίλει επίσης. Μπορεί να είναι οποιασδήποτε τάξης από mwatts έως Twatts. Ισχύ της τάξης του mwatt παίρνουμε από μερικά από τα laser οπτικής άντλησης μακροϋπέρυθρου συνεχούς λειτουργίας που εκπέμπουν στην περιοχή από  $\lambda = 40\mu\text{m}$  έως  $\lambda = 200\mu\text{m}$ . Ισχύ της τάξης των mwatt παίρνουμε από τα εκπαιδευτικά laser He-Ne συνεχούς λειτουργίας. Μερικά watts παίρνουμε εύκολα από τα μοριακά laser συνεχούς λειτουργίας και από περισσότερα laser παλμικής λειτουργίας. Kwatts δίνουν τα παλμικά laser αερίων και μερικά μόνο από τα laser συνεχούς λειτουργίας. Mwatts παίρνουμε εύκολα από τα laser παλμικής λειτουργίας στερεών ή αερίων και τέλος Gwatts ή και Twatts παίρνουμε από τα μεγάλα συστήματα laser που χρησιμοποιούνται σε προγράμματα θερμοπυρηνικής σύντηξης, με ενεργό υλικό το Nd:YAG, Nd:Glass (Νεοδύμιο) CO ή HF (Υδροφθόριο).

Παρ' όλο που οι δίοδοι λέιζερ βρίσκονται σε κάθε CD player και γι' αυτό παράγονται σε πολλά κομμάτια, είναι το μοναδικό, εξάρτημα στις μέρες μας που είναι ακόμα πειραματικά ακριβό. Οι δίοδοι λέιζερ των CD player, λειτουργούν μόνο στην άορατη περιοχή του υπέρυθρου (IR). Τον πρώτο καιρό χρησίμευαν οι ημιαγωγοί - Laser σαν ένα κομμάτι της παραγωγής για την εκπομπή του ορατού φωτός. Το πρώτο Laser δεν ήταν ημιαγωγός- Laser. Αποτελούνταν από μία στοχευόμενη με χρωμοάτομα αναμειγμένη ράβδο ρουμπίνιου, της οποίας οι άκρες έχουν λειανθεί απόλυτα κάθετα, με τρίψιμο. Γύρω από αυτήν τη ράβδο σε μορφή σπιδράλ υπάρχει ένας σωλήνας ηλεκτρικής εκκένωσης (σχήμα 1).



Σχήμα 1 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Όταν γίνει εκκένωση στον σωλήνα φορτίζονται τα ηλεκτρόνια των χρωμοατόμων. Η ουσιαστική ιδιότητα των χρωμοατόμων είναι ότι τα ηλεκτρόνια δεν αποδίδουν αμέσως αυτήν την ενέργεια αλλά μόνο όταν διεγερθούν.

Η διέγερση αυτή συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρόνιο συγκρουσθεί με ένα φωτόνιο συγκεκριμένου χρώματος. Με την διέγερση η αποθηκευμένη ενέργεια επανακτινοβολείται με την μορφή μιας ίδιας σε χρώμα ακτίνας φωτός η οποία στην συνέχεια διεγείρει και άλλα ηλεκτρόνια και δημιουργώντας μια μικρή χιονοστιβάδα. Πολλά ξαναδιεγείρονται γιατί η ακτίνα χάνεται από τη ράβδο, από τα πλάγια. Μόνο οι ακτίνες οι οποίες κινούνται ακριβώς στην κατεύθυνση της ράβδου καθρεφτίζονται και ανακλώνται πέρα δώθε στα παράλληλα άκρα. Η ενέργεια αυτής της χιονοστιβάδας μεγαλώνει εκρηκτικά μέχρι που διαπερνούν αυτές οι ακτίνες την άκρη της ράβδου, αντανακλώντας μόνο το 90% . Αυτό το γεγονός εξηγεί τη απόλυτη εστίαση της ακτίνας λέιζερ. Το σχήμα 2 δείχνει πως μια ακτίνα η οποία δεν διέρχεται παράλληλα με τη ράβδο, βγαίνει έξω νωρίτερα.



Σχήμα 2 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του φωτός του Laser είναι η μονοχρωματικότητα. Αυτό σημαίνει ότι η ακτινοβολία του περιλαμβάνει ένα μοναδικό χρώμα φωτός. Ο κυματικός χαρακτήρας του φωτός δίνει εξήγηση σε αυτό το φαινόμενο. Μεσα στην κοιλότητα συσκευής του laser οι ακτίνες εξαναγκάζονται να κινούνται πέρα δώθε. Αν δεν έχουν το κατάλληλο μήκος κύματος ακριβώς ανάμεσα στους δύο καθρέφτες, τότε αποσβένονται λόγω καταστροφικής συμβολής.

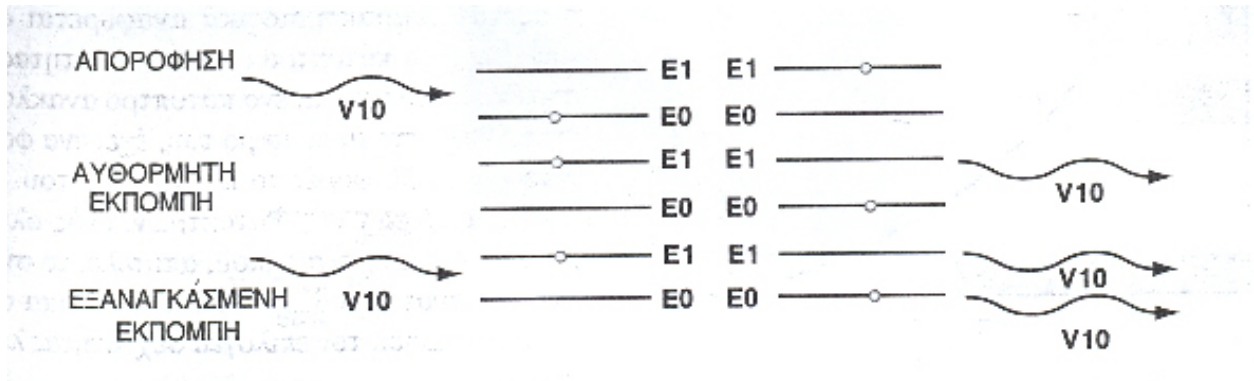
Αυτό το μήκος κύματος οδηγεί στο αποτέλεσμα της χιονοστιβάδας, και καθορίζει μαζί με το χρώμα της ράβδου το εκπεμπόμενο φως. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη Laser. Διαφέρουν ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούν. Υπάρχει το στερεό Laser όπως το Laser με ρουμπίνι, το αέριο καθώς και το υγρό Laser. Όταν διεγείρουμε ένα Laser σε ένα σωλήνα εκκένωσης, αποδίδει φως μόνο κατά την διάρκεια των μικρών στιγμών των εκκενώσεων (Laser παλμών). Αντίθετα υπάρχει και το συνεχώς ακτινοβολούμενο Laser. Αντίστροφα μπορούμε να βάλουμε στην κατασκευή του Laser μια οπτική βαλβίδα που ονομάζεται κύτταρο. Διακόπτει την πορεία ανάμεσα στους καθρέφτες και εμποδίζει αρχικά να ενεργοποιηθεί η ενέργεια των ηλεκτρονίων. Σε αυτό το χρόνο αντλούμε ενέργεια φωτός στην ράβδο του Laser. Ανοίγει τελικά το κύτταρο, δημιουργεί απότομα τη χιονοστιβάδα, και παράγει ακαριαία δυνατό παλμό φωτός διάρκειας 5-50ns (nanosecond). Ακόμη μερικοί αριθμοί: Η φωτεινότητα του Laser ανέρχεται σε  $10^6 - 10^{12} \text{W/cm}^2$ . Αυτό ακούγεται αρχικά γιγαντιαίο ( $10^{12} \text{W} = 1 \text{TW}$ ). Αν κατευθύνουμε μία δέσμη Laser στο ανθρώπινο μάτι καταστρέφονται τα κύτταρα της όρασης του ματιού. Στο χειρισμό ακτινών Laser πρέπει να χρησιμοποιούμε προστατευτικά γυαλιά.

### **Βασικές αρχές λειτουργίας των Laser**

Για να δημιουργηθεί ακτινοβολία Laser, (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένες βασικές συνθήκες. Πρέπει οπωσδήποτε να υπάρχει ένα ενεργό μέσο, που να μπορεί να δώσει εκπομπή ακτινοβολίας στο «οπτικό» μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πρέπει επίσης να υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας μιας κατάστασης, που είναι γνωστή σαν αναστροφή πληθυσμών, μέσα από μία διαδικασία διέγερσης που αναφέρεται σαν άντληση. Τέλος για να δημιουργηθούν συνθήκες για ταλάντωση Laser πρέπει να υπάρχει κάποιο οπτικό αντηχείο. Χωρίς οπτικό αντηχείο τα Laser θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνο σαν ενισχυτές φωτός και όχι σαν γεννήτριες μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε αναλυτικά τις τέσσερις αυτές βασικές έννοιες:

#### α) Ενεργό μέσο και ενεργειακές στάθμες

Το ενεργειακό μέσο μπορεί να είναι κάποια συλλογή ατόμων, μορίων ή ιόντων κάποιου αερίου υγρού ή στερεού. Ας θεωρήσουμε το πολύ απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα του σχήματος 3 και ας εξετάσουμε τις διαδικασίες απορρόφησης και εκπομπής που συμβαίνουν στο σύνολο των ατόμων του αερίου προτύπου μας.



Σχήμα 3 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Τα άτομα αυτά χαρακτηρίζονται από δύο ενεργειακές στάθμες, τη βασική μη διεγερμένη στάθμη  $E_0$ , και την μοναδική διεγερμένη στάθμη  $E_1$ , που απέχουν μεταξύ τους απόσταση που αντιστοιχεί σε ενέργεια  $E_{10}=E_1-E_0$  ή σε συχνότητα  $\nu_{10}=E_{10}/h$ . Όταν ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $\nu_{10}$  περάσει μέσα στο σύστημα, άτομα της στάθμης  $E_0$  απορροφούν ενέργεια και ανεβαίνουν στη στάθμη  $E_1$ .

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εξαναγκασμένη απορρόφηση ή απλά απορρόφηση. Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει με τα άτομα στη στάθμη  $E_1$ . Παράλληλα με τη διαδικασία απορρόφησης, μία διαδικασία εκπομπής δρα γρήγορα και ξαναγεμίζει τη στάθμη  $E_0$  με άτομα. Η διαδικασία αυτή της επιστροφής των διεγερμένων ατόμων στη στάθμη  $E_0$  μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους, είτε αυθόρμητη είτε εξαναγκασμένα. Είναι προφανές ότι κατά τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής προστίθεται τελικά ενέργεια στο εξαναγκάζον κύμα δηλαδή στο φωτόνιο ίδιου μήκους κύματος και της ίδιας φάσης με το αρχικό. Αυτό γιατί άτομα που εκπέμπουν ακτινοβολία με την διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής, εκπέμπουν σε τυχαίες χρονικές στιγμές, ενώ άτομα που εκπέμπουν ύστερα από εξαναγκασμό εκπέμπουν σε φάση με την εξαναγκάζουσα ακτινοβολία.

Οι τρεις διαδικασίες που περιγράψαμε συμβαίνουν ταυτόχρονα σ' ένα σύνολο ατόμων και όπως έδειξε ο Einstein οι ρυθμοί των μεταπτώσεων αυτών συνδέονται μαθηματικά μεταξύ τους. Ο ρυθμός με τον οποίο άτομα της στάθμης  $E_1$  μεταπίπτουν αυθόρμητα στην στάθμη  $E_0$  χαρακτηρίζονται από την σταθερά  $A_{10}$  που λέγεται συντελεστής του Einstein για την αυθόρμητη εκπομπή και ισχύει:

$$\text{Ρυθμός αυθόρμητης εκπομπής} = N_1 \times A_{10} \quad (1)$$

όπου  $N_1$  ο αριθμός των ατόμων στην στάθμη  $E_1$ . Εξαναγκασμένη εκπομπή και απορρόφηση συμβαίνει μόνο όταν υπάρχει εξωτερική ακτινοβολία. Ο Einstein έδειξε ότι ο ρυθμός εξαναγκασμένης απορρόφησης είναι:

$$\text{Ρυθμός εξαναγκασμένης απορρόφησης} = N_0 \rho \nu B_{01} \quad (2)$$

όπου  $N_0$  ο αριθμός των ατόμων στην χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη,  $\rho \nu$ , η φασματική πυκνότητα ενέργειας της ακτινοβολίας στην συχνότητα  $\nu_{10}$ , και  $B_{01}$  η σταθερά ή συντελεστής του Einstein για εξαναγκασμένη απορρόφηση.



Ανάλογα για τον ρυθμό εξαναγκασμένης εκπομπής ισχύει:

$$\text{Ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής} = N_i \rho \nu B_{10} \quad (3)$$

όπου  $B_{10}$  ο συντελεστής του Einstein για εξαναγκασμένη εκπομπή.

### β) Αναστροφή πληθυσμών και διαδικασία άντλησης

Η διεργασία με την οποία τα άτομα διεγείρονται ή αντλούνται και εξωθούνται σε κατάσταση μη θερμικής ισορροπίας ονομάζεται διαδικασία άντλησης, η δε κατάσταση  $N_j > N_i$  ονομάζεται αναστροφή πληθυσμών. Η αναστροφή πληθυσμών έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση της φωτεινής ακτινοβολίας με την διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής. Όπου  $N_j$  αριθμός ατόμων στη στάθμη  $j$  (ανώτερη) και  $N_i$  αριθμός ατόμων στη στάθμη  $i$  (κατώτερη).

### γ) Συντελεστές Einstein και αρχή Boltzmann

Ο ρυθμός αυθόρμητης μετάπτωσης  $\zeta$  ατόμων από την στάθμη 1 στην στάθμη 0 δίνεται από την (1). Το αντίστροφο του  $A_{10}$  της (1) ισούται με το  $\tau_{10}$  που είναι ο χρόνος ζωής της μετάπτωσης  $1 \rightarrow 0$ , δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται για να γίνει μία τέτοια μετάπτωση. Η τιμή του  $A_{10}$  και επομένως και του  $\tau_{10}$  εξαρτώνται από το είδος των ατόμων και από το συγκεκριμένο σύστημα των δύο επιπέδων.

Ο ρυθμός εξαναγκασμένης απορρόφησης δίνεται από την (2) και τέλος ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής δίνεται από την (3). Ισχύει όμως ότι  $\rho \nu = I \nu / 4\pi C$ , όπου  $\rho \nu$  η φασματική πυκνότητα ενέργειας της δέσμης,  $I \nu$  η φασματική ένταση της δέσμης και επομένως οι ρυθμοί μπορούν να γραφούν:

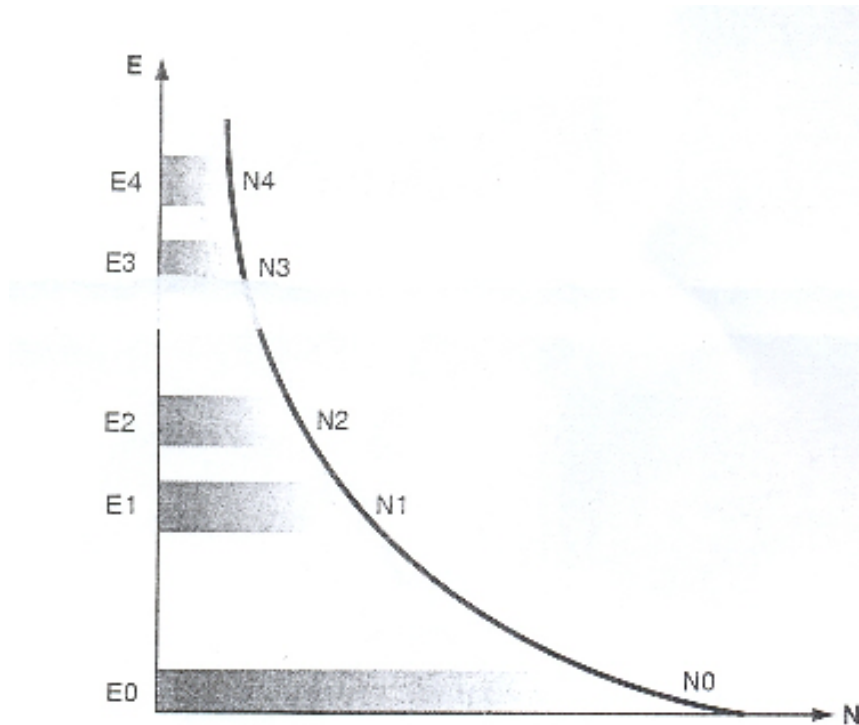
$$\text{Ρυθμός εξαναγκασμένης απορρόφησης} = N_0 I \nu B_{01} / 4\pi C \quad (4)$$

$$\text{Ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής} = N_i I \nu B_{10} / 4\pi C \quad (5)$$

Θεωρούμε την συλλογή των ατόμων σε θερμική ισορροπία. Τότε ο μεγαλύτερος αριθμός ατόμων βρίσκεται στην βασική μηδενική στάθμη αλλά μερικά άτομα βρίσκονται και σε υψηλότερες στάθμες ενέργειας που οπωσδήποτε υπάρχουν. Η αρχή του Boltzmann προβλέπει ότι το ποσοστό των ατόμων που βρίσκεται στην υψηλότερη στάθμη  $i$  δίδεται από την:

$$N_j = N_0 e^{-E_j / kT} \quad (6)$$

όπου  $N_0$  είναι ο πληθυσμός της βασικής στάθμης,  $E_j$  η διαφορά ενέργειας της στάθμης  $i$  από την στάθμη 0,  $T$  η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  Joules/ $^{\circ}$ K η σταθερά του Boltzmann. Γραφικά η εξίσωση (6) φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Τώρα γενικότερα για δύο αυθαίρετα επίπεδα,  $E_i$  και  $E_j$  με  $E_j > E_i$  ισχύει:

$$\frac{N_j}{N_i} = \exp \frac{-(N_j - N_i)}{kT} = \exp \frac{-\Delta E_{ji}}{kT}$$

Έχουμε τώρα δύο περιπτώσεις:

- 1)  $\Delta E \ll kT$  και
- 2)  $\Delta E \gg kT$

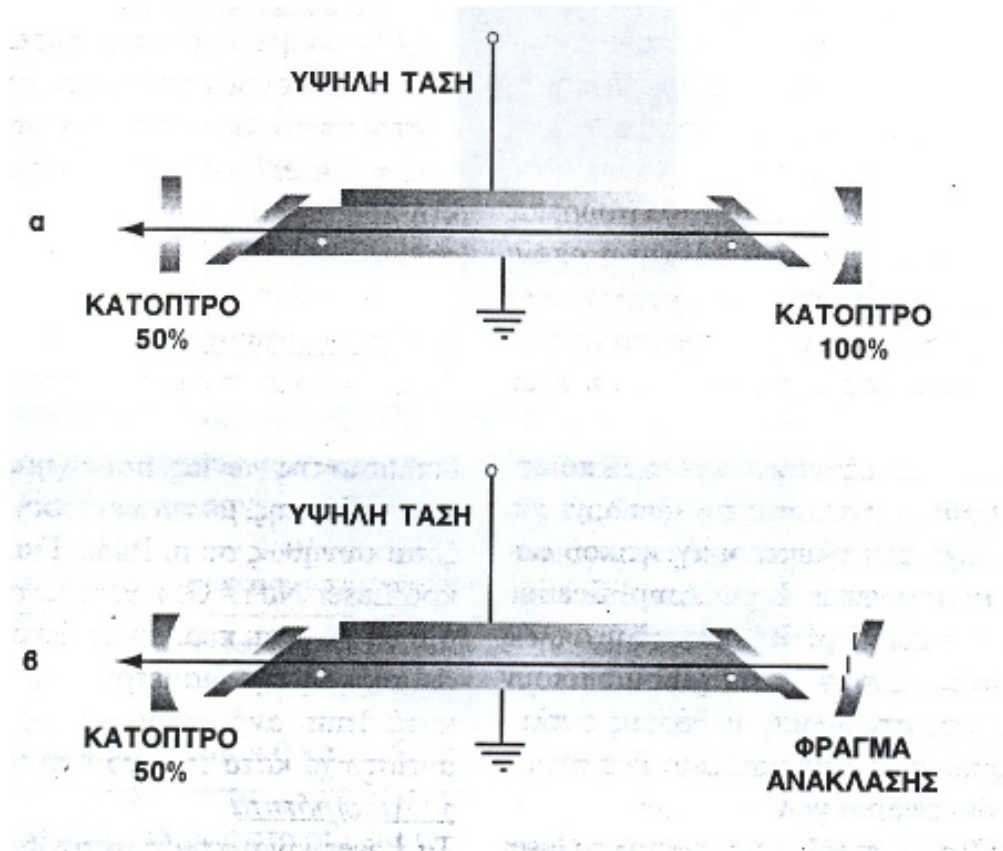
Όταν ισχύει η 1, όταν δηλαδή έχουμε περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας  $N_j \approx N_i$ . Όταν ισχύει η 2, όταν δηλαδή έχουμε περίπτωση χαμηλής θερμοκρασίας οι πληθυσμοί σε μεγαλύτερα επίπεδα είναι σχεδόν μηδενικοί. Επομένως παρατηρούμε ότι τα  $N_1, N_2, \dots, N_j$  μπορούν στην καλύτερη περίπτωση, δηλαδή σε πολύ μεγάλα  $T$ , να γίνουν ίσα, αλλά ποτέ μεγαλύτερα από τα αμέσως προηγούμενα τους. Πληθυσμοί μεγαλύτεροι από αμέσως προηγούμενους επιτυγχάνονται μόνο κάτω από τελείως ειδικές συνθήκες με την βοήθεια της διαδικασίας της άντλησης.

#### δ) Οπτικά αντηχεία

Κατ' ευθείαν εφαρμογή της ενίσχυσης με εξαναγκασμένη εκπομπή έχουμε στους ενισχυτές μιας διέλευσης, (single pass amplifiers), συσκευές Laser που δέχονται στην είσοδο τους μία ακτίνα Laser και την ενισχύουν μονόδρομα. Τέτοιες συσκευές χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την ισχύ των ruby, Nd: YAG και CO<sub>2</sub> Laser, δεν αποτελούν όμως κοινή πρακτική.

Στα περισσότερα Laser η ακτίνα ταξιδεύει και παλινδρομεί πολλές φορές μέσα στο ενεργό υλικό χάρη σ' ένα ζευγάρι κατόπτρων που τοποθετούνται κάθετα στον οπτικό άξονα του Laser. Με ένα τέτοιο σύστημα κατόπτρων το ενεργό φαινομενικό μήκος του ενισχυτικού μέσου πολλαπλασιάζεται. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ένα Laser με ένα κάτοπτρο ανακλαστικότητας 100% στο ένα άκρο του και ένα κάτοπτρο ανακλαστικότητας 98% στο άλλο άκρο του, έχει ένα φαινομενικό μήκος 50 φορές το πραγματικό του. Το σύστημα αυτό των δύο κατόπτρων, ενός ολικά και ενός μερικά ανακλαστικού, αποτελεί το σύστημα οπτικής ανατροφοδότησης του Laser και σε πολλές περιπτώσεις τον επιλογέα συχνότητας λειτουργίας του.

Ένα κλασσικό οπτικό αντηχείο φαίνεται στο σχήμα 5α. Πιθανόν όμως ένα τέτοιο αντηχείο να δώσει πολυχρωματική ακτινοβολία. Οι ανάγκες των πειραμάτων συνήθως απαιτούν αυστηρά μονοχρωματική ακτινοβολία. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να επέμβουμε στη λειτουργία του Laser και με την χρησιμοποίηση κατάλληλου επιλογέα συχνότητας λειτουργίας να περιορίσουμε ή να επιλέξουμε το μήκος κύματος εκπομπής του. Ένας τέτοιος επιλογέας μπορεί να είναι π.χ. ένα φράγμα ανάκλασης που θα αντικαταστήσει το κάτοπτρο ανακλαστικότητας 100%, ένα πρίσμα, ή ένα στοιχείο μη γραμμικής απορρόφησης κλπ. Ένα τέτοιο αντηχείο φαίνεται στο σχήμα 5β. Στην περίπτωση ,του σχήματος 5β χρησιμοποιείται ένα φράγμα ανάκλασης και το αντηχείο συντονίζεται σε μία μόνο από τις γραμμές που προβλέπονται από την φασματοσκοπία του ενεργού μέσου του Laser.



Σχήμα 5 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Ας δούμε τώρα πιο αναλυτικά το τι συμβαίνει μέσα στο οπτικό αντηχείο του Laser. Απαραίτητη προϋπόθεση λειτουργίας ενός συστήματος Laser είναι οι συνολικές απώλειες της δέσμης του Laser να είναι μικρότερες από την ενίσχυση του συστήματος. Κάνουμε την παραδοχή ότι η δέσμη του Laser καλύπτει όλο το ενεργό υλικό δηλαδή γίνεται 100% εκμετάλλευση του ενεργού μέσου.

Αν παρακολουθήσουμε την δέσμη καθώς ταξιδεύει μέσα στο οπτικό αντηχείο, ξεκινώντας από το πρώτο κάτοπτρο  $M_1$ , (ανακλαστικότητας  $R_1$ ) και πηγαίνοντας στο δεύτερο  $M_2$ , (ανακλαστικότητας  $R_2$ ), βλέπουμε ότι η ένταση της δέσμης αυξάνει από  $I_0$  σε  $I_1$  σύμφωνα με την  $I_1 = I_0 e^{(\beta-a)L}$

όπου:  $L$  είναι η απόσταση των κατόπτρων,  $\beta$  ο συντελεστής ενίσχυσης ασθενούς σήματος και  $a$  οι απώλειες ανά μονάδα μήκους.

Μετά την ανάκλαση στο  $M_2$  η ένταση της δέσμης είναι:  $I_2 = R_2 I_0 e^{(\beta-a)L}$ . Μετά από ένα πλήρη κύκλο και επομένως και ανάκλαση στο  $M_1$  η σχετική αύξηση της έντασης της δέσμης είναι: όπου  $G$  είναι η ενίσχυση ενός πλήρους κύκλου.

$$\frac{I \text{ πλήρους κύκλου}}{I \text{ αρχική}} = G = R_1 R_2 e^{2(\beta-a)L}$$

Αν τώρα  $G \geq 1$  παράγεται ακτινοβολία Laser ενώ αν  $G < 1$  το Laser δεν παράγει ακτινοβολία.

Για να έχουμε σωστή λειτουργία του Laser πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη ισοροπίας του Laser:  $G = R_1 R_2 e^{2(\beta-a)L} = 1$

Αν το  $G \gg 1$  ή  $G < 1$  η λειτουργία του Laser είναι προβληματική.

Ας προσπαθήσουμε τώρα να βρούμε

μία αντίστοιχη σχέση για την σταθερότητα του οπτικού αντηχείου του Laser. Αν μετά από ένα μεγάλο αριθμό ανακλάσεων η δέσμη Laser παραμένει κοντά στον οπτικό του άξονα, τότε το οπτικό αντηχείο είναι σταθερό, ενώ αν η δέσμη απομακρύνεται από τον οπτικό άξονα τότε το αντηχείο είναι ασταθές. Η σταθερότητα των οπτικών αντηχείων εκφράζεται με τις παραμέτρους  $g$  που είναι αδιάστατες και αναφέρονται στα κάτοπτρα  $M_1$  και  $M_2$ :

$$g_1 (\text{παραμέτρος } g \text{ του } M_1) = 1 - \frac{L}{r_1}$$

$$g_2 (\text{παραμέτρος } g \text{ του } M_2) = 1 - \frac{L}{r_2}$$

όπου  $L$  είναι το μήκος του αντηχείου, (απόσταση  $M_1 M_2$ ), και  $r_1, r_2$  οι ακτίνες καμπυλότητας των  $M_1, M_2$  αντίστοιχα. Η συνθήκη σταθερότητας του οπτικού αντηχείου είναι:  $0 < g_1 g_2 < 1$

Όταν αυτή ικανοποιείται οι ακτίνες μένουν κοντά στον οπτικό άξονα και το οπτικό αντηχείο είναι σταθερό. Αν  $g_1 g_2 < 0$  ή  $g_1 g_2 > 1$  τότε το αντηχείο είναι ασταθές. Αν  $g_1 g_2 = 0$  ή  $g_1 g_2 = 1$  τότε το αντηχείο βρίσκεται μεταξύ αστάθειας και σταθερότητας.

### Χαρακτηριστικές ιδιότητες Laser

Τα laser είναι διατάξεις οι οποίες παράγουν ή ενισχύουν σύμφωνη οπτική ακτινοβολία. Το μήκος κύματος αυτής της ακτινοβολίας μπορεί να βρίσκεται στην περιοχή του υπέρυθρου, του ορατού ή του υπεριώδους φάσματος. Η αρχή λειτουργίας των laser βασίζεται σε μία ανακάλυψη η οποία αρχικά χρησιμοποιήθηκε στα μικροκύματα και ονομάζεται MASER από τα αρχικά του 'Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation', το οποίο σημαίνει ενίσχυση μικροκυμάτων με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Χρησιμοποιώντας την ίδια αρχή για την οπτική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος η ονομασία γίνεται 'Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation' ή απλώς LASER. Οι πρακτικές πηγές laser χρησιμοποιούν ένα μεγάλο πλήθος από υλικά, μεθόδους άντλησης και τοπολογίες ενώ παρουσιάζουν ένα ακόμα μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογών.

Μέχρι το 1960 που λειτούργησε το πρώτο laser ρουμπινίου η ηλεκτρονική χρησιμοποιούσε μικροκυματικές λυχνίες και τρανζίστορ και είχαν σαν όριο μήκη κύματος της τάξης του χιλιοστού. Με την ανάπτυξη αυτή των laser τα τελευταία 30 χρόνια όλες οι διατάξεις παραγωγής, ενίσχυσης, διαμόρφωσης, εκπομπής, διάδοσης και ανίχνευσης σύμφωνων σημάτων στην μικροκυματική περιοχή, είναι τώρα διαθέσιμες και εφικτές όχι μόνο στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αλλά και στην υπέρυθρη. Αυτό σημαίνει φέροντα σήματα, με ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη συχνότητα (ή ένα εκατομμύριο φορές μικρότερο μήκος κύματος) πράγμα που συνεπάγεται και την ανάλογη αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας. Οι εφαρμογές των laser φυσικά δεν σταματούν στις τηλεπικοινωνίες. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά των laser, όπως το μικρό μήκος κύματος, η μεγάλη ισχύς και το ελεγχόμενο εύρος παλμών, τα καθιστούν άκρως απαραίτητα σε όλους τους τεχνολογικούς τομείς, από τη βιομηχανία αυτοκινήτων έως την μικροβιολογία. Τα laser παράγουν ή ενισχύουν την οπτική ακτινοβολία, όπως ακριβώς τα τρανζίστορ παράγουν και ενισχύουν τα μικροκύματα. Η οπτική αυτή ακτινοβολία που εξέρχεται από ένα laser έχει τις εξής χαρακτηριστικές ιδιότητες:

#### α) Μονοχρωματικότητα

Η πιο βασική ίσως ιδιότητα της ακτινοβολίας Laser είναι η μονοχρωματικότητα της. Αν και καμιά φωτεινή πηγή δεν δίνει απόλυτα μονοχρωματικό φως, τα Laser δίνουν την καλύτερη δυνατή - υπαρκτή προσέγγιση προς το ιδανικό μονοχρωματικό φως.

#### β) Κατευθυντικότητα

Κριτήριο για την κατευθυντικότητα της δέσμης Laser είναι το άνοιγμα της, και ορίζεται σαν το διπλάσιο της γωνίας, που σχηματίζει η εξωτερική , ακτίνα δέσμης, με την κεντρική ακτίνα και εκφράζεται συνήθως σε m Rads. Για ένα κλασσικό μικρό Laser NdYAG, π.χ. το άνοιγμα αυτό της δέσμης του, είναι περίπου 1mRad. Αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση της διαμέτρου της δέσμης του Laser κατά 1 mm ανά μέτρο διαδρομής της δέσμης ή αντίστοιχα κατά 1 m ανά Km διαδρομής της.

#### γ) Λαμπρότητα

Τα Laser είναι πηγές ακτινοβολίας μεγάλης λαμπρότητας. Αξίζει να αναφερθεί χαρακτηριστικά ότι η λαμπρότητα της δέσμης του εκπαιδευτικού laser He-Ne, που έχει ισχύ συνήθως 1 mWatt, είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ήλιου. Αυτό εύκολα μπορεί να φανεί κάνοντας κάποιους απλούς υπολογισμούς και συγκρίνοντας τα αντίστοιχα μεγέθη για τις δύο περιπτώσεις, του ήλιου και του εκπαιδευτικού Laser He-Ne.

#### δ) Συμφωνία

Όταν το φως κάποιας πηγής είναι απόλυτα σύμφωνο και στο χώρο και ως προς τον χρόνο, τότε υπάρχει απόλυτη συσχέτιση των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου του φωτεινού κύματος σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου με τις αντίστοιχες σε οποιοδήποτε

άλλο σημείο του. Εάν οι μεταβολές αυτές μετρηθεί και στα δύο σημεία κάποια χρονική στιγμή, τότε με απόλυτη βεβαιότητα μπορούμε να πούμε ποια είναι η κατάσταση του ηλεκτρικού πεδίου στο δεύτερο σημείο μετρώντας απλά το πεδίο στο πρώτο σημείο. Αυτό φαίνεται από την μορφή που παίρνει το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου στις περιπτώσεις της πλήρους συμφωνίας. Μπορεί να αποδειχθεί ότι μόνο το μονοχρωματικό φως μπορεί να είναι απόλυτα σύμφωνο και στο χώρο και ως προς τον χρόνο.

Το φως μίας φωτεινής πηγής μπορεί να είναι σύμφωνο, ασύμφωνο ή μερικά σύμφωνο. Στα Laser βρίσκει κανείς το μεγαλύτερο βαθμό συμφωνίας παρά σε οποιαδήποτε άλλη φωτεινή πηγή. Η ικανότητα ή όχι μέτρησης του βαθμού συμφωνίας μιας ακτινοβολίας ανάγεται στην ικανότητα ή όχι μέτρησης των κροσσών συμβολής που η ακτινοβολία αυτή μπορεί να δημιουργήσει, όπως επίσης η συμφωνία ή όχι της ακτινοβολίας μεταφράζεται σε ικανότητα ή όχι δημιουργίας κροσσών συμβολής. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται ορατότητα των κροσσών, (fringe visibility) και ορίζεται σαν:

$$V = \frac{\text{Μέγιστος φωτισμός κροσσών} - \text{Ελάχιστος φωτισμός κροσσών}}{\text{Μέγιστος φωτισμός κροσσών} + \text{Ελάχιστος φωτισμός κροσσών}}$$

Και προφανώς έχει μία τιμή μεταξύ 0 και 1. Όταν η ορατότητα των κροσσών γίνεται μονάδα τότε βγαίνει το συμπέρασμα ότι το φως στα σημεία των οπών παρουσιάζει απόλυτη συμφωνία. Όταν η ορατότητα των κροσσών παρουσιάζει τιμή μικρότερη της μονάδας τότε το φως στις οπές είναι μερικά σύμφωνο. Τέλος αν η ορατότητα των κροσσών είναι μηδενική τότε το φως στις οπές είναι τελείως ασύμφωνο.

Χρησιμοποιώντας σαν κριτήριο την ορατότητα των κροσσών μπορούμε πειραματικά να διαπιστώσουμε ότι υπάρχει κάποιος κρίσιμος χρόνος  $t_c$  ή ισοδύναμα κάποιο κρίσιμο μήκος  $l_c$  (που συνδέονται μεταξύ τους με την  $t_c = l_c/c$ ), τα οποία οδηγούν σε τιμές του  $V$  ίσες με 0. Το κρίσιμο αυτό μήκος ονομάζεται μήκος συμφωνίας, (coherence length), και αντίστοιχα ο κρίσιμος χρόνος ονομάζεται χρόνος συμφωνίας, (coherence time), της πηγής που εξετάζεται. Οι μονοχρωματικές πηγές, όπως τα Laser, παρουσιάζουν μεγάλο μήκος συμφωνίας. Είναι γνωστό ότι:

$$l_c = \frac{c}{\Delta \nu}$$

όπου το  $\Delta \nu$  είναι το εύρος εκπομπής του φάσματος της πηγής. Επομένως ο χρόνος συμφωνίας αντίστοιχα συνδέεται με το  $\Delta \nu$  με την:

$$t_c = \frac{1}{\Delta \nu}$$

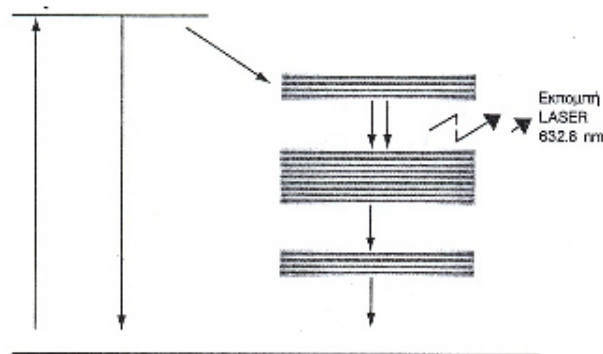
### ε) Πόλωση

Το φως των κλασικών πηγών είναι συνήθως μη πολωμένο ή μερικά πολωμένο. Αντίθετα πολλά Laser παράγουν πολωμένο φως είτε λόγω της φύσης είτε της γεωμετρίας του ενεργού τους υλικού, (ruby, NdYAG με γωνίες Brewster κ.λ.π.), είτε επειδή έχουν

προσθεθεί οπτικά πολωτικά στοιχεία στο οπτικό αντηχείο τους, όπως π.χ. πρίσματα, πλακίδια Brewster, φράγματα ανάκλασης, (gratings), πολωτές υψηλής ισχύος κ.λ.π.

### Διοδικά laser

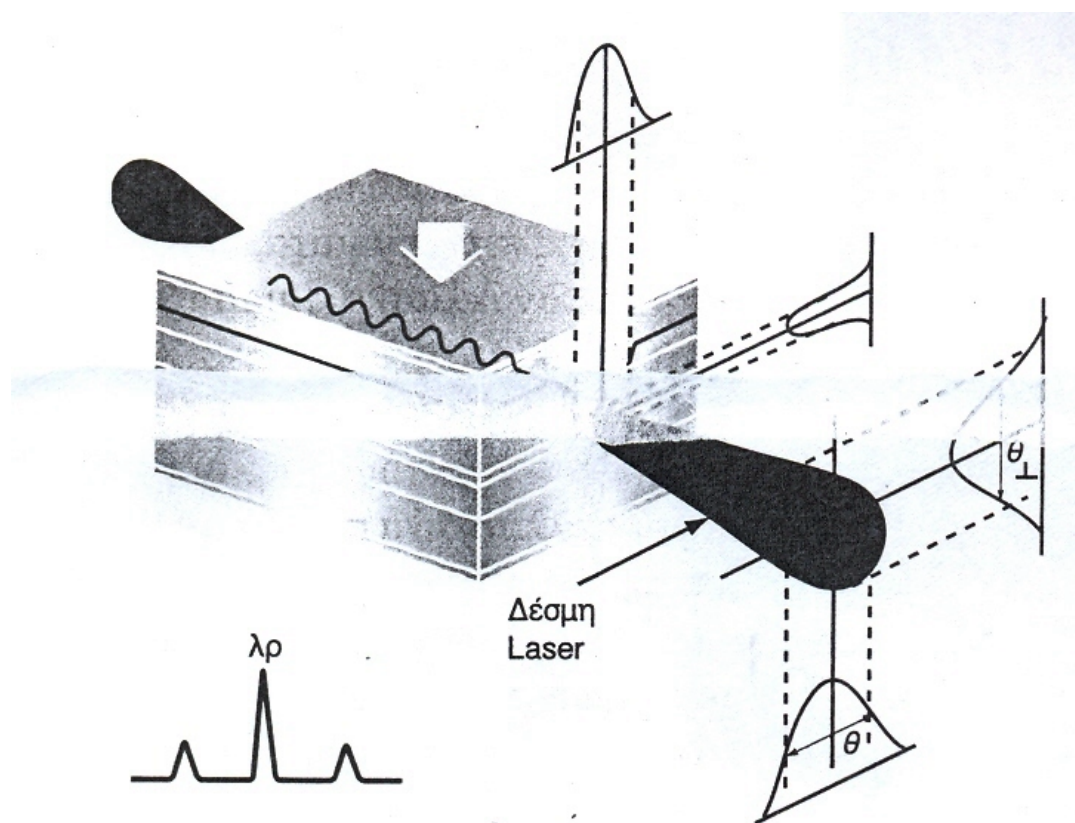
Τα διοδικά laser έχουν πολλά κοινά σημεία με τις γνωστές διόδους εκπομπής φωτός (LED). Οι διόδοι laser εκπέμπουν σύμφωνο φως μεγάλης έντασης και σχεδόν μονοχρωματικό (πολύ μικρό φασματικό εύρος), ενώ τα LEDs εκπέμπουν ασύμφωνο φως με μεγάλο φασματικό εύρος. Τα περισσότερα laser κατασκευάζονται από ενώσεις ημιαγωγών όπως GaAlAs (Γάλλιο - Αργίλιο - Αρσενικό) ή το InGaAsP (Ινδίο - Γάλλιο - Αρσενικό - Φώσφορος). Και στους δύο παραπάνω ημιαγωγούς με κατάλληλες προσμίξεις παράγονται τα απαραίτητα στρώματα P και η για τη δημιουργία της επαφής pn.



Σχήμα 6 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)



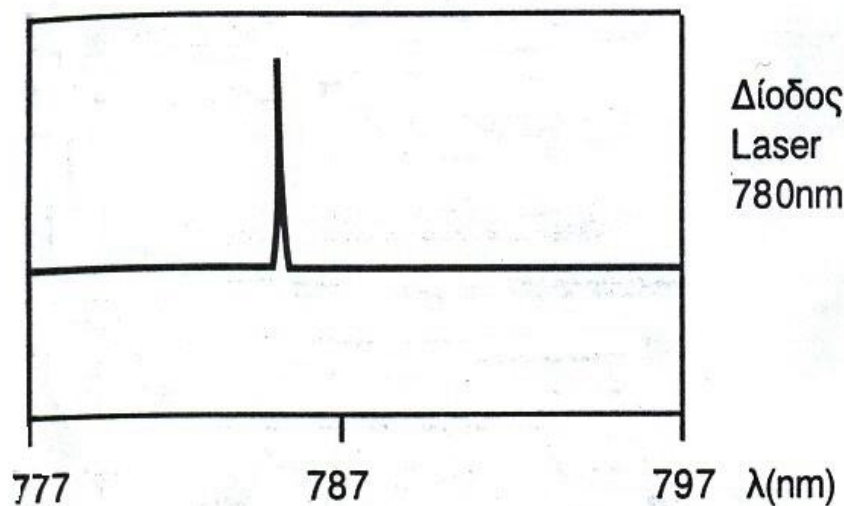
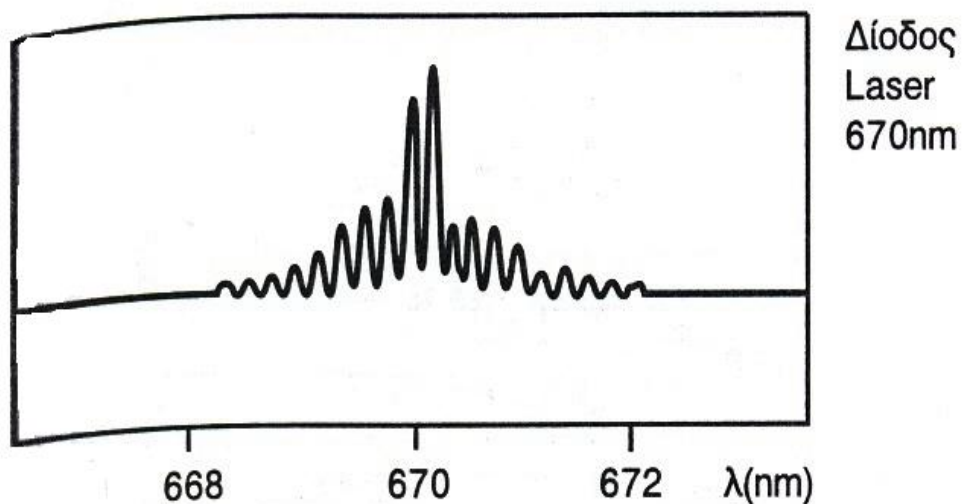
Όταν η ενεργός αυτή επαφή ρη διαρρέεται από ρεύμα, το οποίο αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια και οπές), κατά την επανασύνδεση τους απελευθερώνει ενέργεια η οποία εκπέμπεται με την μορφή φωτονίων.



Σχήμα 7 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

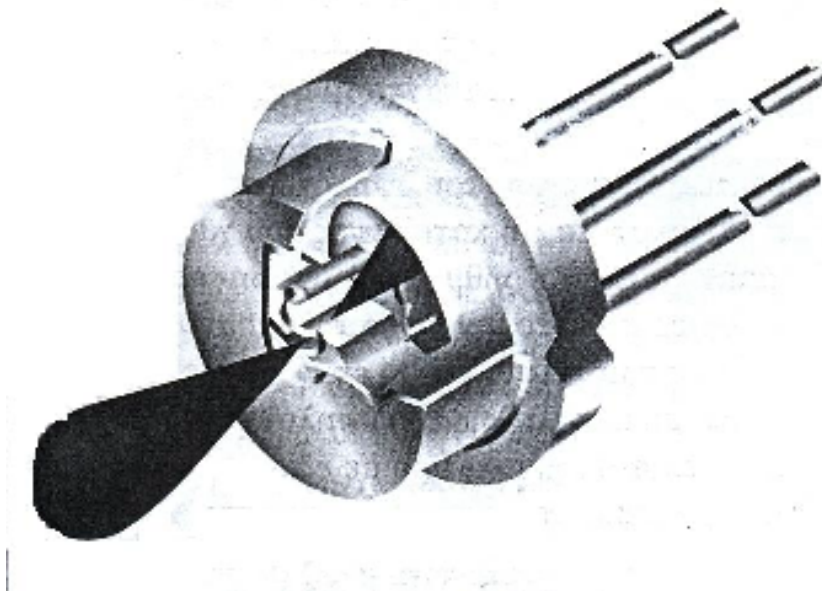
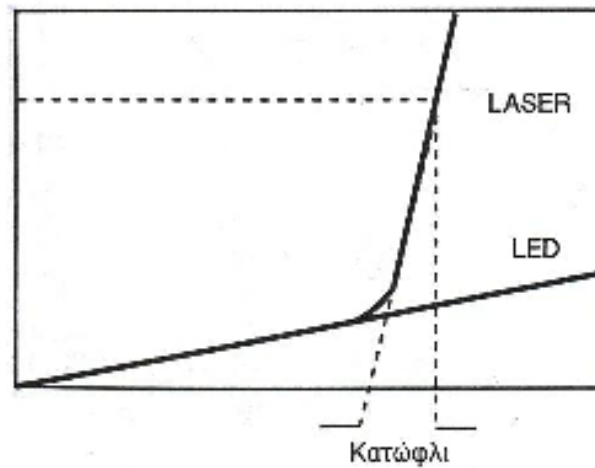
Σε ένα LED η διαδικασία αυτή ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων και τα φωτόνια αυτά έχουν ένα μεγάλο πλήθος ενεργειών, πράγμα που σημαίνει και μεγάλη περιοχή μηκών κύματος ή μεγάλο φασματικό εύρος. Σε μία δίοδο laser η πυκνότητα των ηλεκτρικών φορέων είναι πολύ μεγάλη διότι οι διαστάσεις της ενεργού περιοχής είναι πολύ μικρές. Με μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων η πιθανότητα σύγκρουσης είναι πολύ μεγαλύτερη. Όταν συμβαίνουν τέτοιες συγκρούσεις έχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων με την ίδια φάση (σύμφωνη ακτινοβολία) την ίδια κατεύθυνση διάδοσης, την ίδια πόλωση και την ίδια συχνότητα (μονοχρωματική ακτινοβολία). Οι δύο άκρες του laser λειαίνονται ώστε να λειτουργούν σαν κάτοπτρα (μερική ανάκλαση).Γ

Το φαινόμενο της εκπομπής laser εμφανίζεται από μία στάθμη ρεύματος και πάνω, παρουσιάζει δηλαδή κατώφλι. Μία δίοδος laser ουσιαστικά λειτουργεί σαν LED όσο το ρεύμα οδήγησης παραμένει κάτω από το ρεύμα κατώφλιου. Η κοιλότητα που σχηματίζεται μεταξύ δύο τέτοιων κατόπτρων ονομάζεται Farby Perrot.



Σχήμα 8 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Τα διοδικά laser μπορεί να είναι ενός τρόπου (single mode) ή πολλών τρόπων (multimode) (σχήμα 8). Τα laser απλού τρόπου έχουν μία μόνο γραμμή στο φάσμα εκπομπής ενώ τα πολύτροπα από 12 έως 24 γραμμές. Τα διοδικά laser μπορούν να λειτουργούν συνεχόμενα αλλά και παλμικά. Τα διαθέσιμα μήκη κύματος καλύπτουν σχεδόν όλη την περιοχή από 635nm -1350nm. Η ισχύς εξόδου του διοδικού laser κυμαίνεται από μερικά m W έως μερικές δεκάδες Watt, παλμική ή συνεχόμενης λειτουργίας. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαμόρφωσης είναι 0.1 Gbit/sec – 4 Gbit/sec.

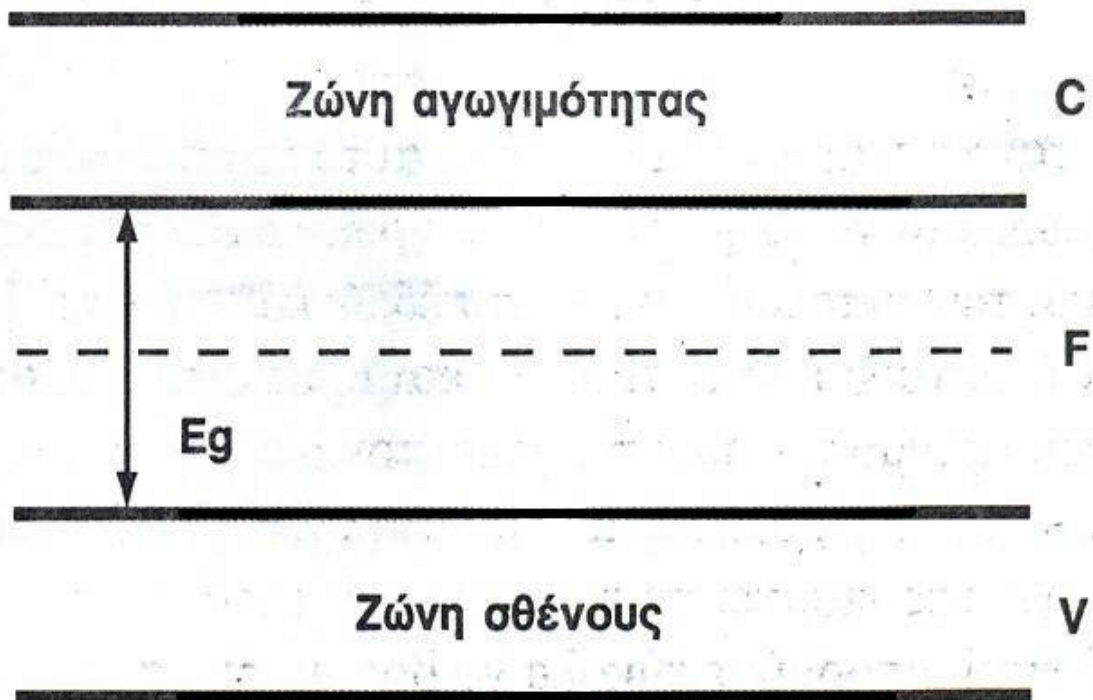


Σχήμα 9 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

### Φωτοφυσικές Ιδιότητες των Lasers Ημιαγωγών

Το διάγραμμα ενεργειακών επιπέδων για έναν ιδανικό ημιαγωγό φαίνεται στο σχήμα 10. Το φάσμα ενεργειακών επιπέδων αποτελείται από πολύ ευρείες ζώνες. Αυτές είναι η ζώνη σθένους V και η ζώνη αγωγιμότητας C, διαχωρισμένες από μια περιοχή απαγορευμένων ενεργειών (ζώνη χάσματος). Κάθε ζώνη αποτελείται πρακτικά από ένα μεγάλο αριθμό πολύ κοντά τοποθετημένων ενεργειακών καταστάσεων. Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, μπορεί να βρίσκονται μόνο δύο ηλεκτρόνια (με αντίθετο spin) σε κάθε ενεργειακή κατάσταση. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα κατάληψης  $f(E)$  δεδομένης κατάστασης ενέργειας  $E$  δίνεται από τη στατιστική Fermi-Dirac παρά από τη στατιστική Maxwell-Boltzmann. Έτσι

$$f(E) = \{1 + \exp [(E-F)/kT]\}^{-1}$$



Σχήμα 10 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

όπου  $F$  είναι η ενέργεια του αποκαλούμενου επίπεδου Fermi. Αυτό το επίπεδο έχει την ακόλουθη φυσική σημασία: όταν  $T=0$  έχουμε,

$$f = 1 \text{ (για } E < F)$$

$$f = 0 \text{ (για } E > F)$$

έτσι ώστε αυτό το επίπεδο παριστά το σύνορο μεταξύ των πλήρως κατειλημμένων και των τελείως κενών επιπέδων σε  $T=0^\circ\text{K}$ . Για μη εκφυλισμένους ημιαγωγούς το επίπεδο Fermi βρίσκεται μέσα στη ζώνη χάσματος βλέπε σχήμα 10. Έτσι λοιπόν για  $T=0^\circ\text{K}$  η ζώνη σθένους θα είναι πλήρως κατειλημμένη και η ζώνη αγωγιμότητας τελείως κενή. Μπορεί ναδειχθεί ότι, κάτω απ' αυτές τις συνθήκες, ο ημιαγωγός δεν θα άγει, και είναι ως εκ τούτου ένας μονωτής. Σημειώστε επίσης πως το επίπεδο Fermi έχει άλλη μία φυσική σημασία: για κάθε θερμοκρασία έχουμε  $f(F)=1/2$ .

Έχοντας κάνει αυτές τις προκαταρκτικές παρατηρήσεις, μπορούμε τώρα να αρχίσουμε την περιγραφή των αρχών λειτουργίας ενός laser ημιαγωγού. Για απλότητα, θα υποθέσουμε πρώτα ότι ο ημιαγωγός είναι σε  $T=0^\circ\text{K}$  (στο σχήμα 11α στο οποίο η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί σε εντελώς πλήρεις ενεργειακές καταστάσεις). Υποθέτουμε τώρα ότι ηλεκτρόνια διεγείρονται κατά κάποιο τρόπο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Μετά από έναν πολύ βραχύ χρόνο ( $\sim 10^{-13}\text{s}$ ) τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας θα έχουν πέσει στα χαμηλότερα επίπεδα μέσα στη ζώνη και επίσης τα ηλεκτρόνια κοντά στην κορυφή της ζώνης σθένους θα έχουν

πέσει στα χαμηλότερα μη κατειλημμένα επίπεδα, αφήνοντας έτσι την κορυφή της ζώνης σθένους γεμάτη «οπές».

Αυτό σημαίνει πως υπάρχει τότε αντιστροφή πληθυσμών μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας πέφτουν πίσω στη ζώνη σθένους (δηλ., επανασυνδέονται με τις οπές) εκπέμποντας στη διαδικασία ένα φωτόνιο (ακτινοβολία επανασύνδεσης). Δεδομένης μιας αντιστροφής πληθυσμών μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, η διεργασία της εξαναγκασμένης εκπομπής της ακτινοβολίας επανασύνδεσης θα παράγει ταλάντωση laser όταν ο ημιαγωγός τοποθετηθεί σ' ένα κατάλληλο αντηχείο. Από το σχήμα.11 b φαίνεται ότι η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη

$$E_g < h\nu < F_c - F_v$$

η οποία δημιουργεί το εύρος γραμμής απολαβής του ημιαγωγού.

Εξετάζουμε τώρα την κατάσταση όπου ο ημιαγωγός διατηρείται σε θερμοκρασία  $T > 0$ . Αναφερόμενοι πάλι στο σχήμα .11 σημειώνουμε ότι, αν και ο ημιαγωγός στην ολότητά του δεν είναι σε θερμοκή ισορροπία, παρ' όλα αυτά ισορροπία. θα επιτευχθεί εντός μιας μόνης ζώνης σε πολύ βραχύ χρόνο. Μπορούμε λοιπόν να μιλούμε για πιθανότητες κατάληψης  $f_v$  και  $f_c$  για τις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας χωριστά, όπου  $f_v$  και  $f_c$  δίνονται από εκφράσεις της ίδιας μορφής όπως:

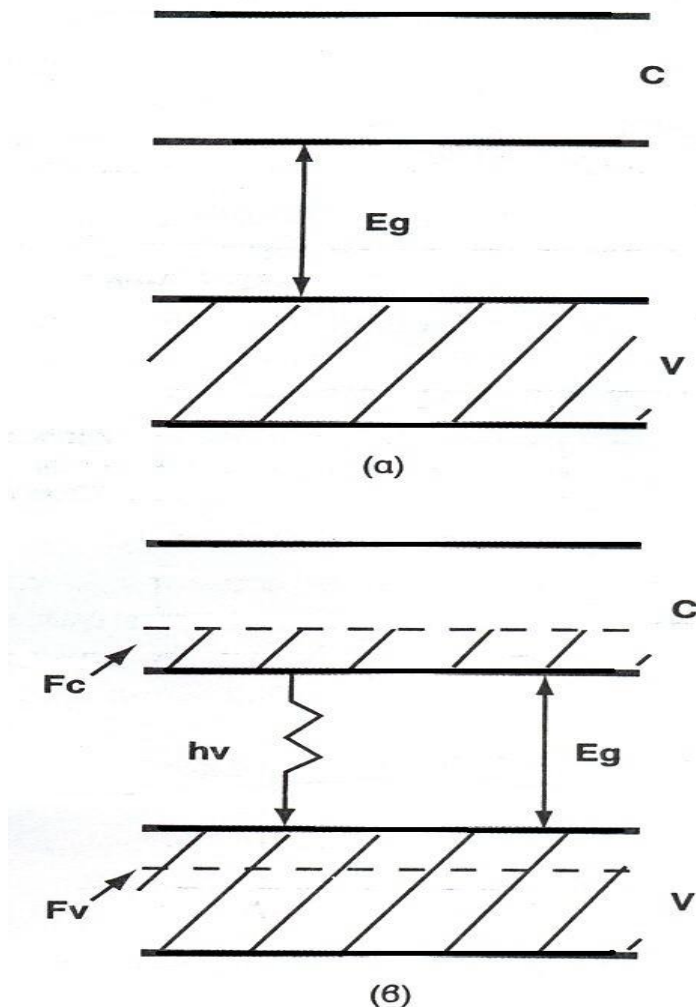
$$f_v = \{ 1 + \exp [ (E - F_v)/kT] \}^{-1}$$

$$f_c = \{ 1 + \exp [ (E - F_c)/kT] \}^{-1}$$

όπου  $F_v$  και  $F_c$  είναι οι ενέργειες των αποκαλούμενων επιπέδων Fermi των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας αντίστοιχα. Από την εικόνα και από τις, εισαγωγικές μας παρατηρήσεις φαίνεται ότι, όταν για παράδειγμα  $T=0^\circ\text{K}$ , αυτά τα επίπεδα διαχωρίζουν τα τμήματα των πλήρως κατειλημμένων και των εντελώς κενών επιπέδων κάθε ζώνης. Είναι φανερό πως οι τιμές  $F_v$  και  $F_c$  εξαρτώνται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων

που διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας με την αντλητική διεργασία. Έχοντας εισάγει την έννοια των ψευδοεπιπέδων Fermi, μπορούμε εύκολα να βρούμε την αναγκαία συνθήκη για δράση laser επιβάλλοντας την απαίτηση ο αριθμός των φαινομένων εξαναγκασμένης εκπομπής να γίνει μεγαλύτερος από τον αριθμό των φαινομένων απορρόφησης (η περίσσεια είναι αναγκαία για να ξεπεραστούν οι απώλειες της κοιλότητας). Και οι δυο αυτές διεργασίες είναι ανάλογες προς το γινόμενο του αριθμού των φωτονίων που παρευρίσκονται στην κοιλότητα και του συντελεστή  $B$  για τη μετάπτωση. Από το άλλο μέρος, ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής θα είναι επίσης ανάλογος προς το γινόμενο της πιθανότητας κατάληψης του υψηλότερου επιπέδου με την πιθανότητα μη κατάληψης του χαμηλότερου επιπέδου, ενώ ο ρυθμός απορρόφησης θα είναι ανάλογος προς το γινόμενο της πιθανότητας κατάληψης του χαμηλότερου επιπέδου με την πιθανότητα μη κατάληψης του υψηλότερου επιπέδου. Ως εκ τούτου, για να έχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή, πρέπει να ικανοποιησουμε την

$$B_q [ f_c (1-f_v) - f_v(1-f_c) ] > 0$$



Σχήμα 11 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Αυτή η ανισότητα σημαίνει ότι  $f_c > f_v$ . Άρα

$$F_c - f_v > E_2 - E_1 = hv$$

όπου  $E_2$  και  $E_1$  είναι οι ενέργειες του υψηλότερου και του χαμηλότερου επιπέδου αντίστοιχα Έχουμε

λοιπόν έτσι αναπαράγει μια από τις δυο σχέσεις οι οποίες βρέθηκαν προηγουμένως με μια εννοιακή προσέγγιση για  $T=0^{\circ}\text{K}$ . Αυτή η απόδειξη όμως, δείχνει ότι η σχέση αυτή ισχύει για κάθε θερμοκρασία (εφόσον η έννοια των ψευδοεπιπέδων Fermi εξακολουθεί να ισχύει).

#### Χαρακτηριστικά των Laser Ημιαγωγών

Οι αντλητικές διεργασίες σ' ένα laser ημιαγωγού επιτυγχάνονται συνήθως προπαρασκευάζοντας τον

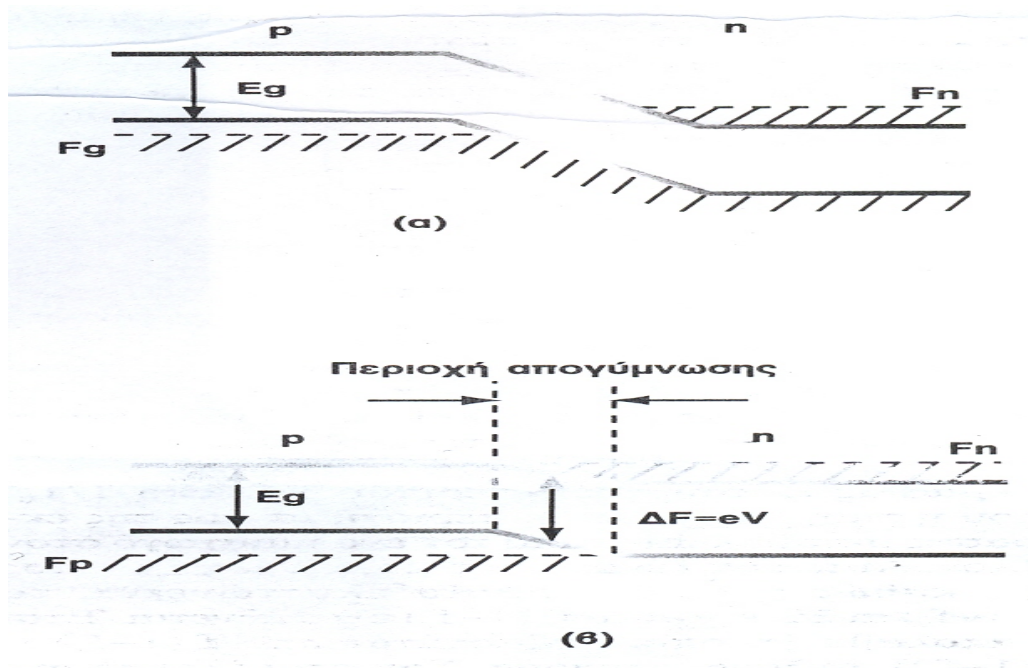
ημιαγωγό υπό την μορφή μιας διοδικής επαφής p-n με υψηλά εκφυλισμένες p-τύπου και n-τύπου περιοχές, δηλαδή, πολύ εμπλουτισμένες, (συγκεντρώσεις δοτών ή



αποδεκτών μεγαλύτερες από  $10^{18}$  άτομα/cm<sup>3</sup>). Μπορεί να φανεί ότι μ' αυτόν τον τρόπο η αντιστροφή παράγεται στην περιοχή της επαφής.

Σαν πρώτο παράδειγμα ενός Laser επαφής θα θεωρήσουμε την περίπτωση όπου τα υλικά p-τύπου και n-τύπου είναι τα ίδια (π. χ. GaAs) και εφάπτονται άμεσα για να σχηματίσουν την επαφή (η οποία ως εκ τούτου θα ονομάζεται ομοεπαφή). Οι αρχές λειτουργίας μιας διόδου κατασκευασμένης μ' αυτόν τον τρόπο φαίνονται στο σχήμα 12. Επειδή τα υλικά είναι πολύ εμπλουτισμένα, το επίπεδο Fermi  $F_p$  του ημιαγωγού p-τύπου πέφτει μέσα στη ζώνη σθένους και το επίπεδο Fermi  $F_n$  του ημιαγωγού n-τύπου πέφτει μέσα στην ζώνη αγωγιμότητας. Μπορεί να δειχθεί ότι, χωρίς την εφαρμογή τάσης, τα δύο επίπεδα Fermi βρίσκονται στην ίδια οριζόντια γραμμή σχ. 12α δηλαδή έχουν την ίδια ενέργεια. Όταν εφαρμόζεται μια τάση  $V$ , τα δυο επίπεδα διαχωρίζονται κατά μία ποσότητα που δίνεται από τη σχέση  $\Delta F = eV$

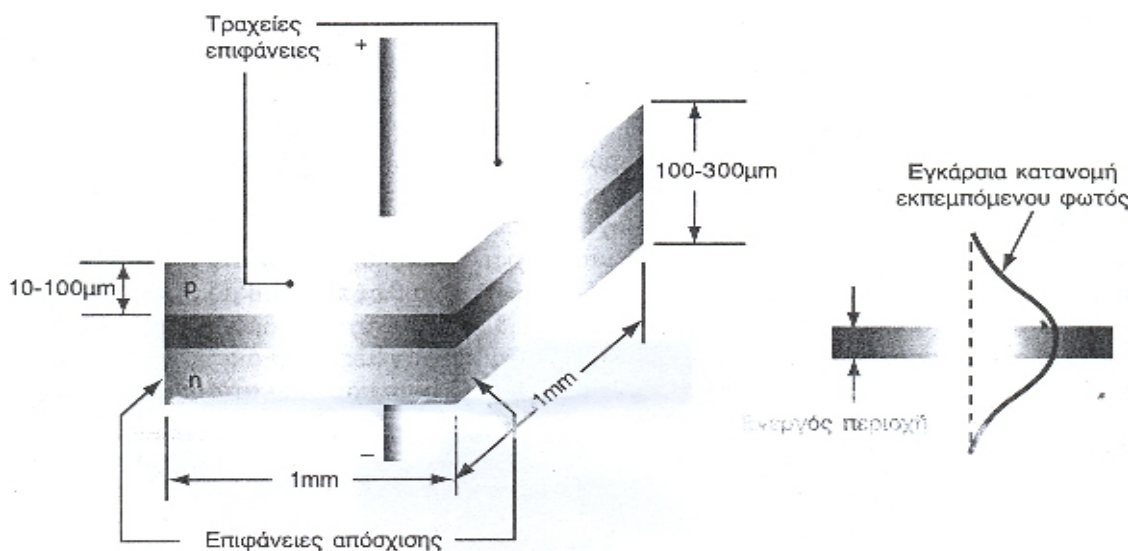
Έτσι, εάν η διόδος είναι ορθά πολωμένη, τα ενεργειακά επίπεδα θα είναι τότε όπως φαίνονται στο σχ. 12β. Βλέπουμε από την εικόνα πως η αντιστροφή, πληθυσμών έχει παραχθεί στο αποκαλούμενο «στρώμα απογύμνωσης» της επαφής p-n. Αυτό που πετυχαίνει η ορθή πόλωση είναι βασικά η έγχυση στο στρώμα απογύμνωσης ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας του n-τύπου υλικού και οπών από τη ζώνη σθένους του p-τύπου υλικού. Τελικά, σημειώνουμε ότι αφού  $\Delta F = E_g$ , όπου  $E_g$  είναι το ενεργειακό χάσμα, συνεπάγεται ότι  $V \approx E_g/e$ . Για το GaAs Laser αυτό σημαίνει ότι  $V = 1.5V$ .



Σχήμα 12 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Στο σχήμα 13 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός Laser επαφής p-n, η γραμμοσκιασμένη περιοχή είναι το στρώμα απογύμνωσης. Φαίνεται ότι η δίοδος έχει μικρές διαστάσεις. Το πάχος της περιοχής του στρώματος απογύμνωσης είναι συνήθως πολύ μικρό ( $0.1 \mu\text{m}$ ).

Για να πετύχουμε δράση laser, οι δυο τερματικές επιφάνειες κατασκευάζονται παράλληλες, συνήθως με κόψιμο κατά μήκος των κρυσταλλικών επιπέδων. Οι άλλες δυο αφήνονται επεξεργασμένες ανώμαλα για να εξουδετερωθεί ταλάντωση σε ανεπιθύμητες διευθύνσεις. Συχνά οι δυο επιφάνειες δεν έχουν ανακλαστικές επιστρώσεις. Στην πράξη, επειδή ο δείκτης διάθλασης του ημιαγωγού είναι μεγάλος, υπάρχει ήδη αρκετά μεγάλη ανακλαστικότητα ( $\sim 35\%$ ) για τη διαχωριστική



Σχήμα 13 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

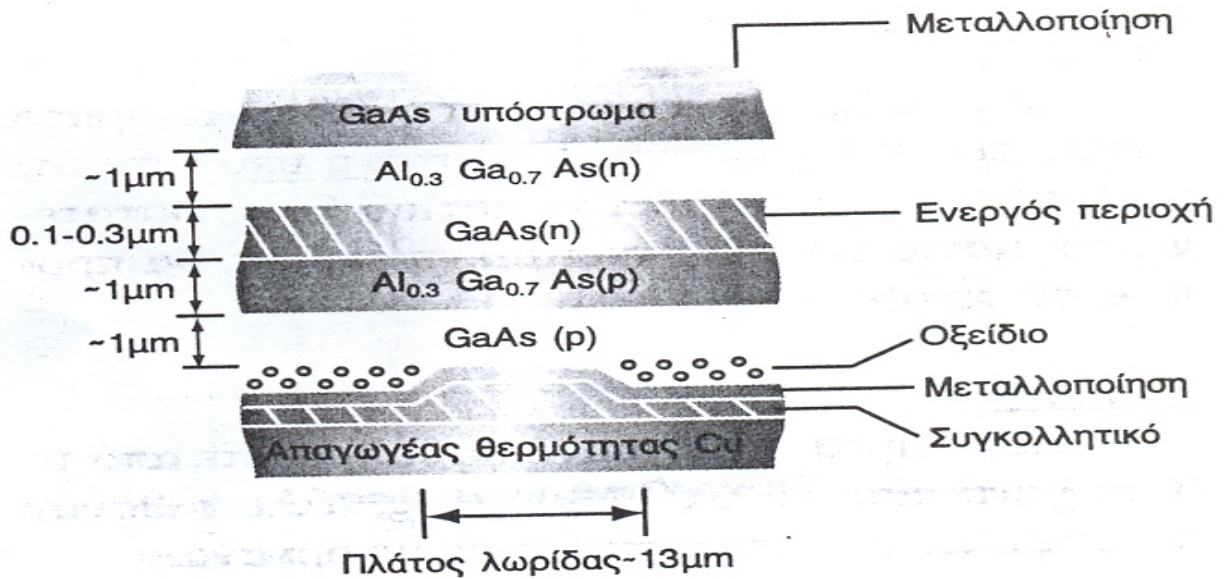
επιφάνεια ημιαγωγού-αέρα. Η ενεργός περιοχή αποτελείται από στρώμα πάχους  $\sim 1 \mu\text{m}$ , δηλ., κάπως πλατύτερο από το στρώμα απογύμνωσης. Εξ' αιτίας της περίθλασης η εγκάρσια διάσταση της δέσμης είναι λοιπόν πολύ μεγαλύτερη ( $\sim 40 \mu\text{m}$ ) απ' ό,τι το πλάτος της ενεργού περιοχής σχ.13. Η δέσμη Laser έτσι εκτείνεται κατά πολύ μέσα στις P και η περιοχές. Όμως, επειδή οι εγκάρσιες διαστάσεις της δέσμης είναι ακόμη πολύ μικρές, η δέσμη εξόδου παρουσιάζει τελικά κάπως μεγάλη απόκλιση (λίγες μοίρες). Τονίζουμε ότι, σε θερμοκρασία δωματίου, η πυκνότητα ρεύματος' κατωφλίου για ένα Laser ομοεπαφής είναι αρκετά υψηλή ( $\sim 105 \text{ A/cm}^2$  για το GaAs). Αυτό οφείλεται στις υψηλές απώλειες του ρυθμού της κοιλότητας επειδή εκτείνεται πολύ μέσα στις P και η περιοχές (όπου η απορρόφηση μάλλον παρά η ενίσχυση κυριαρχεί). Αυτή η πυκνότητα ρεύματος, όμως, ελαττώνεται γρήγορα με την ελάττωση της θερμοκρασίας λειτουργίας (περίπου σαν exp



$T/T_0$ ) όπου η τιμή του  $T_0$  και η περιοχή ισχύος της έκφρασης μεταβάλλεται από τον ένα ημιαγωγό στον άλλον. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα του γεγονότος ότι, καθώς η θερμοκρασία ελαττώνεται, το  $f_c(1-f_y)$  αυξάνει και το  $f_v(1-f_c)$  ελαττώνεται. Έτσι η απολαβή [η οποία εξαρτάται από  $f_c(1-f_y) f_v(1-f_c)$ ], αυξάνει γρήγορα. Σαν επακόλουθο αυτού, τα Laser ομοεπαφής μπορούν να λειτουργούν σε cw μόνο σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Αυτό αποτελεί σόβαρο περιορισμό του Laser αυτού του τύπου.

Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, έχουν χρησιμοποιηθεί τα Lasers ετεροεπαφής. Το σχήμα 14 δείχνει ένα παράδειγμα ενός Laser GaAs διπλής ετεροεπαφής. Σ' αυτήν τη δίοδο υπάρχουν δυο επαφές [  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As(p)$  -GaAs και  $GaAsAl_{0.3}Ga_{0.7}As(n)$  ] μεταξύ διαφορετικών υλικών. Η ενεργός περιοχή αποτελείται από λεπτό στρώμα GaAs (0.1-0.3 $\mu m$ ). Με μια τέτοια δίοδο η πυκνότητα ρεύματος κατωφλίου για λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου μπορεί να μειωθεί περίπου δυο τάξεις μεγέθους (δηλαδή σε  $\sim 10^3 A/cm^2$ ) συγκριτικά με τη συσκευή ομοεπαφής. Έτσι η cw λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου έγινε δυνατή. Η μείωση της πυκνότητας ρεύματος κατωφλίου οφείλεται στο συνδυασμένο αποτέλεσμα τριών περιστάσεων:

- i. Ο δείκτης διάθλασης του GaAs ( $n \approx 3.6$ ) είναι σημαντικά μεγαλύτερος από εκείνον του  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  ( $n \approx 3.4$ ) παρέχοντας μια δομή οπτικού κυματοδηγού. Αυτό σημαίνει πως ο ρυθμός Laser θα είναι τώρα εγκλωβισμένος στο στρώμα GaAs, δηλαδή στην περιοχή ενίσχυσης και, αντίθετα προς την κατάσταση στη .1 δίοδο ομοεπαφής, τα πτερύγια της κατανομής, του πεδίου δεν εκτείνονται πλέον μέσα στις μη αντλούμενες (και ως εκ τούτου απορροφούσες) περιοχές.
- ii. Το χάσμα ζώνης του  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  ( $\sim 1.8 eV$ ), είναι σημαντικά μεγαλύτερο από εκείνο του GaAs ( $\sim 1.5 eV$ ). Συνεπώς σχηματίζονται ενεργειακοί φραγμοί στις δυο επαφές οι οποίοι εγκλωβίζουν αποτελεσματικά τις εγγεόμενες, σπές και ηλεκτρόνια στο ενεργό στρώμα. Για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος, η συγκέντρωση οπών και ηλεκτρονίων στο ενεργό στρώμα αυξάνεται, και ως εκ τούτου η απολαβή επίσης αυξάνεται.



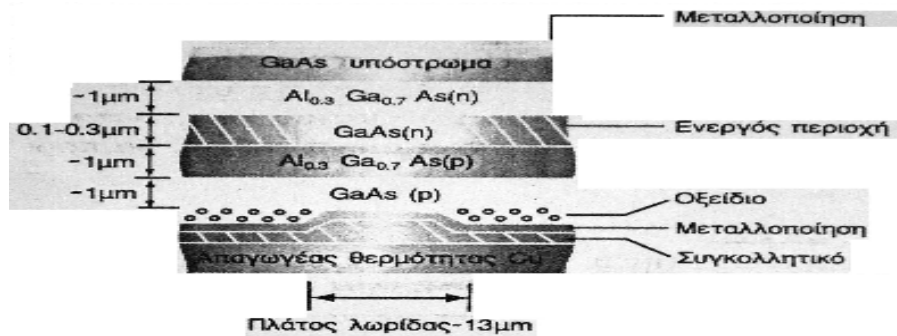
Σχήμα 14 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

- iii. Η ικανότητα κατανάλωσης θερμότητας της διόδου έχει αισθητά βελτιωθεί. Αυτό έχει επιτευχθεί συγκολλώντας στο GaAs(p) υπόστρωμα ένα πλακίδιο χαλκού (ή κασσίτερου) το οποίο, εξ' αιτίας της μάζας και της θερμικής του αγωγιμότητας, δρα σαν απαγωγέας θερμότητας.

Τα Lasers ημιαγωγών καλύπτουν μια ευρεία περιοχή μηκών κύματος από περίπου 0.7 έως  $\sim 30\mu\text{m}$ . Προς το παρόν το πιο σπουδαίο Laser ημιαγωγού είναι το Laser GaAs ( $\lambda=0.84\mu\text{m}$ ). Έχουν επιτευχθεί συνεχείς ισχείς εξόδου μέχρι μερικά mW (5-10 mW) σε θερμοκρασία δωματίου με ολική αποδοτικότητα κλίσης περίπου 10%. Η εσωτερική κβαντική αποδοτικότητα (κλάσμα των εγχυμένων φορέων οι οποίοι επανασυνδέονται ακτινοβολητικά) είναι ακόμη υψηλότερη (~70%). Τα Lasers ημιαγωγών είναι λοιπόν μεταξύ των πιο αποδοτικών Lasers. Σημειώνουμε ότι, εξαιτίας του μεγάλου εύρους γραμμής ταλάντωσης ( $\sim 10^{11}$  HZ για το GaAs) οι δυνατότητες για λειτουργία εγκλειδωμένου ρυθμού είναι ελκυστικές. Παλμοί διάρκειας περίπου 5ps έχουν πράγματι επιτευχθεί με Laser GaAs παθητικά εγκλειδωμένου ρυθμού. Σημειώστε επίσης ότι τριμερείς ουσίες όπως Ga(A sI-xPx) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Το ταλαντούμενο μήκος κύματος εκτείνεται από  $\lambda=0.84$  ( $\chi=0$ ) έως  $0.64\mu\text{m}$  ( $\chi=0.4$ ). Έτσι, μεταβάλλοντας τη σύνθεση, είναι δυνατό να μεταβάλλουμε συνεχώς το μήκος κύματος εξόδου. Τα Lasers αρσενικούχου γαλλίου είναι ελκυστικά σαν πηγές οπτικών τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες σαν μέσο μεταφοράς. Χρόνοι ζωής λειτουργίας που ξεπερνούν τις  $10^6\text{h}$  έχουν ήδη επιδειχθεί με Lasers GaAs διπλής ετεροεπαφής. Το Laser GaAs είναι επίσης πολύ ενδιαφέρον σ' αριθμό εφαρμογών που απαιτούν μόνο Laser χαμηλής ισχύος (όπως οπτικό διάβασμα), όπου δεν είναι μειονέκτημα να χρησιμοποιούμε παρά, ορατό φως. Lasers ημιαγωγών διπλής ετεροεπαφής που λειτουργούν στο  $\lambda \approx 1.3$  ή στο  $\lambda \approx 1.6\mu\text{m}$ , όπου παρουσιάζονται δυο ελάχιστα των απωλειών της οπτικής ίνας του χαλαζία, αναπτύσσονται τώρα εντατικά. Εδώ, ο πιο ενδιαφέρον ημιαγωγός για την περιοχή φαίνεται ότι είναι το τετραμερές κράμα  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ , ενώ οι p και n πλευρές των επαφών μπορούν να κατασκευαστούν από την απλή διμερή ουσία InP. Εάν  $Y=2.2\chi$ , το πλέγμα του τετραμερούς κράματος

ταιριάζει με του InP, και με την κατάλληλη εκλογή του  $x$  το μήκος κύματος εκπομπής μπορεί να επιλεγεί από 0.92 έως 1.5 $\mu\text{m}$ .

Από τα διάφορα άλλα Lasers ημιαγωγών, πρέπει να γίνει αναφορά στα Lasers αλάτων μολύβδου τα οποία όλα ταλαντώνονται στο μέσο ως μακρό υπέρυθρο, και ειδικότερα των τριμερών ουσιών  $\text{PbS}_{1-x}\text{Se}_x$  (4-8.5  $\mu\text{m}$ ),  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  (6.532 $\mu\text{m}$ ) και  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$  (9-30 $\mu\text{m}$ ). Λειτουργία Laser σ' αυτές τις περιπτώσεις απαιτεί κρυογενικές θερμοκρασίες ( $T \approx 77^0\text{K}$  για cw λειτουργία).



Σχήμα 15 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Για δεδομένο δείκτη σύστασης  $X$ , το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μπορεί να επιλεγεί με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου, με την εφαρμογή υδροστατικής πίεσης, ή με τη μεταβολή του ρεύματος της διόδου (θερμικό φαινόμενο). Τυπικές εφαρμογές αυτών των Lasers μολυβδούχων αλάτων βρίσκονται στο πεδίο της υπέρυθρης φασματοσκοπίας, ειδικότερα στη φασματοσκοπία υψηλής διακριτικότητας. Το εύρος γραμμής της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, μπορεί πράγματι να γίνει πολύ στενό (π.χ., -50 KHz για το  $\text{PbSnTe}$ ).

## Ταξινομήσεις Lasers

Η υψηλή συγκέντρωση της ακτινοβολίας των laser σε μικρή επιφάνεια απαιτεί κατά τη χρήση τους προφυλάξεις και ειδικά προστατευτικά μέσα ιδιαίτερα για τα μάτια. Ανάλογα με την ισχύ εκπομπής τα laser χωρίζονται σε τάξεις. Στις τάξεις 1, 2 και 3α περιλαμβάνονται τα laser ισχύος μέχρι και 5mWatt τα οποία θεωρούνται ακίνδυνα και η χρήση τους δεν απαιτεί προφυλάξεις.

Lasers ισχύος μεγαλύτερης από 5m W ανήκουν στην κατηγορία 3b. Τέτοια laser απαιτούν ειδικά προστατευτικά γυαλιά με επιστρώσεις που απορροφούν το συγκεκριμένο μήκος κύματος εκπομπής του laser. Εκτός από τα προστατευτικά γυαλιά πρέπει πάντα να αποφεύγεται η κατευθείαν παρατήρηση της δέσμης του laser αν αυτή είναι συγκεντρωμένη και εστιασμένη με φακούς και να αναρτώνται πινακίδες σε όλους τους χώρους όπου λειτουργούν συσκευές laser.

## Τάξη 1

Ασφαλές κάτω από σχετικά προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας. Σημειώστε ότι δεν είναι «ασφαλές κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες».

### **Τάξη 2**

Τα ορατά λέιζερ με έξοδο φωτός μέσα στο ορατό φάσμα των 400-700 nm. Υπάρχει η υπόθεση ότι

το αυτόματο κλείσιμο τού ματιού θα προστατέψει τα μάτια μας. Η εκτεταμένη έκθεση θα προκαλέσει προβλήματα.

### **Τάξη 3α**

Ασφαλές στην θέα με γυμνό οφθαλμό είτε από το ορατό είτε από το υπέρυθρο φως, αλλά πιθανόν μη-ασφαλές όταν παρατηρούμε με όργανα.

### **Τάξη 3β**

Η άμεση θέαση είναι επικίνδυνη αλλά η ανάκλαση του φωτός είναι κανονικά ασφαλής. Σημειώστε το κανονικά. Δεν πρέπει να το παρατηρούμε με όργανα.

λης

### **Τάξη 4**

Πολύ επικίνδυνο. Ακόμη και οι ανακλάσεις cIVdr2 να επικίνδυνες και η άμεση δέσμη μπορεί να προκαλέσει φωτιά ή εγκαύματα στο δέρμα.

## **Προδιαγραφές Lasers**

Μήκος κύματος. Το μήκος κύματος που δίνεται είναι μόνο μια τυπική τιμή. Έτσι, αν θέλουμε να αγοράσουμε ένα λέιζερ για το παράθυρο των 1300 nm, αυτό που παρέχεται μπορεί να προδιαγράφεται σαν 1285-1320 nm και η πραγματική συχνότητα θα βρίσκεται κάπου μεταξύ αυτών των ορίων. Μερικές φορές διατίθεται απλά σαν 1300 nm (ονομαστική).

Χρόνος ανοίγματος - κλεισίματος. Αυτό είναι μέτρο του πόσο γρήγορα το λέιζερ μπορεί να ανοίξει ή να κλείσει υπολογισμένο μεταξύ επιπέδων ισχύος από 10% μέχρι 90% το πολύ. Τυπική τιμή είναι τα 0.3 ns.

Ρεύμα κατωφλίου. Είναι το χαμηλότερο ρεύμα στο οποίο λειτουργεί το λέιζερ. Τυπική τιμή είναι 50 mA και το κανονικό ρεύμα λειτουργίας είναι περίπου 70 mA.

Φασματικό εύρος. Είναι το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου φωτός. Τυπικά φασματικά εύρη κυμαίνονται μεταξύ 1 και 5 nm. Ένα λέιζερ με έξοδο 1310nm με φασματικό εύρος 4 nm, εκπέμπει υπέρυθρο φως μεταξύ 1308 και 1312 nm.

Θερμοκρασία λειτουργίας. Τυπικές τιμές είναι από -10°C μέχρι +45°C και γι' αυτό τα όρια της θερμοκρασίας των ινών ταιριάζουν αρκετά καλά. Τάσεις και ρεύματα. Οι προδιαγραφές επίσης δίνουν και τις τάσεις (και τα ρεύματα λειτουργίας του ανιχνευτή, το ρεύμα της συσκευής ψύξης και της αντίσταση του θερμίστορ. Αυτά γενικά ενδιαφέρουν μόνο τον σχεδιαστή των εξαρτημάτων Υ ή τον τεχνικό επισκευών.

Ισχύς εξόδου. Η ισχύς εξόδου μπορεί να δίνεται σε watts ή σε dBm.

## **Χειρισμός και προειδοποιήσεις ασφάλειας**

Για τα τελευταία ημιαγωγά λέιζερ ς απαιτούνται καθορισμένες προειδοποιήσεις χειρισμού. Αν και μικρά, εκπέμπουν φως λέιζερ που μπορεί να είναι αρκετά επικίνδυνο για τα μάτια σας. Να θυμάστε αυτά τα σημεία:

- ✓ Σιγουρευτείτε πάντοτε ότι οι επαφές της διόδου λέιζερ είναι συνδεδεμένες κατάλληλα στο κύκλωμα οδήγησης.

- ✓ Ποτέ μην εφαρμόζετε περισσότερο ρεύμα ορθής τάσης από το maximum, αλλιώς το λέιζερ θα καεί. Χρησιμοποιείστε οδήγηση παλμών αν δεν χρησιμοποιείτε το λέιζερ με έλεγχο κυκλώματος ανατροφοδότησης φωτοδιόδου.
- ✓ Χειριστείτε τα διοδικά λέιζερ με την ίδια φροντίδα όπως τα CMOS εξαρτήματα. Φορέστε ένα γάντι κατά του στατικού ηλεκτρισμού όταν χρησιμοποιείτε ένα λέιζερ, και φυλάγετε το σε μια προστατευτική σακούλα κατά του στατικού ηλεκτρισμού μέχρι να το χρησιμοποιήσετε.
- ✓ Χρησιμοποιείτε μόνο γειωμένο κολλητήρι όταν κολλάτε καλώδια στις επαφές του λέιζερ. Όριο διάρκειας κόλλησης είναι λιγότερο από 5 δευτερόλεπτα για κάθε επαφή.
- ✓ Ποτέ μη συνδέετε ακροδέκτες από πολύμετρα στις επαφές του λέιζερ. (το ρεύμα τις εσωτερικής μπαταρίας του οργάνου μπορεί να κάνει ζημιά στο λέιζερ).
- ✓ Χρησιμοποιείτε μόνο μπαταρίες ή καλά φιλτραρισμένη A.C. τάση. Τα διοδικά λέιζερς είναι ευαίσθητα σε παροδικές τάσεις και μπορεί να καταστραφούν όταν τροφοδοτούνται με λίγο φιλτραρισμένη τάση.
- ✓ Φροντίστε να μη βραχυκυκλωθούν οι επαφές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.
- ✓ Αποφεύγετε να κοιτάτε μέσα στην περιοχή ακτίνας του λέιζερ όταν βρίσκεται σε λειτουργία, ακόμα και αν δε βλέπετε καθόλου φως να εξέρχεται. Αυτό είναι ακόμα πιο σημαντικό αν έχετε προσθέσει εστίαση.
- ✓ Τοποθετείστε το λέιζερ σε μια κατάλληλη ψύκτρα. Χρησιμοποιείστε σιλικόνη για να σιγουρέψετε την καλή θερμική επαφή μεταξύ του λέιζερ και της ψύκτρας.
- ✓ Απομονώστε τις συνδέσεις μεταξύ της διόδου και της οδήγησης για να περιοριστεί η περίπτωση βραχυκυκλώματος. Χρησιμοποιείτε καλώδιο τριών αγωγών για να μειωθούν οι παρεμβολές από κοντινές πηγές υψηλής συχνότητας.
- ✓ Αν δεν προδιαγράφεται αλλιώς από τον κατασκευαστή, καθαρίστε το «παράθυρο» εξόδου του λέιζερ με ένα βαμβακερό ύφασμα βουτηγμένο σε αιθανόλη. Εναλλακτικά, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε υγρό καθαριστικό για φακούς.

## Οδήγηση laser

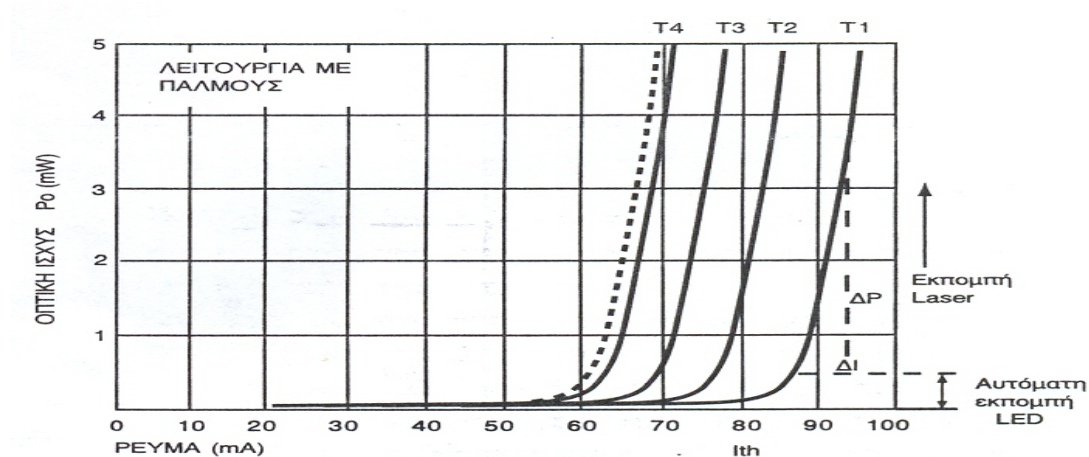
### 1 Χαρακτηριστική διόδου Laser

Ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό μιας 'διόδου Laser είναι η καμπύλη της φωτεινής ισχύος εξόδου σαν συνάρτηση του ρεύματος οδήγησης ( $P_o-I$ ). Οι καμπύλες (σχ.16) για μία δίοδο Laser (των GTE Laboratories) δείχνουν για διάφορες θερμοκρασίες, το κατώφλι ρεύματος ( $I_{th}$ ) στο οποίο αρχίζει η ταλάντωση (lasing), και τη μεταβολή του κατωφλίου ρεύματος με τη θερμοκρασία. Η καμπύλη  $P_o-I$  δείχνει ότι το ρεύμα κατωφλίου ελαττώνεται με τη θερμοκρασία του στοιχείου. Το ρεύμα στοιχείου  $I_{th}$  θεωρείται ότι είναι το σημείο στο οποίο η εφαπτόμενη στην καμπύλη  $P_o-I$  τέμνει τον άξονα του ρεύματος. Κάτω από το κατώφλι, η φωτεινή έξοδος είναι μια ευρείας ζώνης, τύπου LED, αυτόματη εκπομπή.

Πάνω από το κατώφλι, η εκπομπή ακτινοβολίας Laser της διόδου Laser έχει στενό εύρος ζώνης (<1mm) που είναι χαρακτηριστικό ενός οπτικού ταλαντωτή. Το

κατώφλι ρεύματος αυξάνεται μη γραμμικά με τη θερμοκρασία,  $T$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{th} = I_A \exp\left(\frac{T - T_A}{T_0}\right)$$



Σχήμα 16 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

όπου  $I_A$  είναι το κατώφλι ρεύματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_A$  (K) και  $T_0$  είναι μια σταθερά του στοιχείου, που καλείται χαρακτηριστική θερμοκρασία. Η τιμή  $T_0$  είναι το μέτρο της θερμοκρασιακής ευαισθησίας του  $I_{th}$  και κυμαίνεται στην περιοχή των 130~160K για στοιχεία AlGaAs.

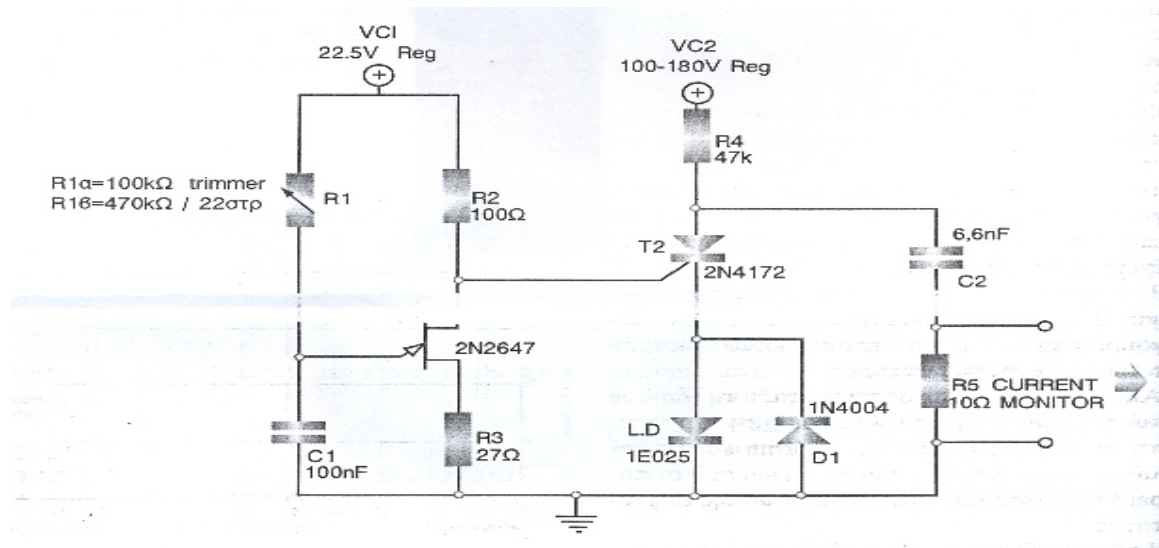
Η οδήγηση μιας διόδου Laser (ILD) είναι κάπως πιο πολύπλοκη απ' ό,τι η οδήγηση μιας LED επειδή το Laser είναι στοιχείο κατωφλίου όπου το κατώφλι μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Στο σχήμα φαίνονται οι χαρακτηριστικές ισχύος συναρτήσεσι του ρεύματος μιας διόδου σε διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

## 2. Κυκλώματα οδήγησης Laser

Στο σχήμα 17, έχουμε ένα κύκλωμα οδήγησης παλμικής διόδου Laser. Το κύκλωμα αποτελείται από το στάδιο σκανδαλισμού-διαμόρφωσης, και το στάδιο οδήγησης ισχύος. Το κύκλωμα σκανδαλισμού αποτελείται από το τρανζίστορ unijunction  $T_1$ , το οποίο χρησιμοποιείται συχνά σε κυκλώματα έναυσης θυρίστορ (Thyristor). Το κύκλωμα ισχύος αποτελείται από ένα γρήγορο thyristor καθώς και το δικτύωμα φόρτισης - εκφόρτισης  $R_4 C_2$  και  $R_5 C_2$  αντίστοιχα. Το τρανζίστορ 2N2647 ( $T_1$ )

παράγει στενούς παλμούς ισχύος ικανούς να οδηγούν το  $T_2$  σε αγωγή ή αποκοπή. Το πλάτος αυτού του παλμού εξαρτάται από την χωρητικότητα του πυκνωτή  $C_1$ . Όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο μικρότερο θα είναι το εύρος του παλμού έναυσης. Ο παλμός που παράγεται λαμβάνεται στα άκρα της  $R_2$  και εφαρμόζεται στην πύλη  $T_2$ .



Σχήμα 17 ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)

Η συχνότητα επανάληψης των παλμών, είναι συνάρτηση της σταθεράς χρόνου  $R_1 C_1$  η οποία ορίζεται στα 10kHz που είναι και η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας της διόδου για την μέγιστη ισχύ εξόδου.

Όταν το  $T_2$  βρίσκεται σε ηρεμία ο πυκνωτής  $C_2$  φορτίζεται, μέσω της αντίστασης  $R_4$  από την τροφοδοσία  $VC_2$ . Τη στιγμή που εφαρμόζεται ένας παλμός στην πύλη του  $T_2$ , τότε αυτό έρχεται σε κατάσταση αγωγιμότητας, και ο  $C_2$  εκφορτίζεται μέσα από το  $T_2$  και τη δίοδο Laser. Την επόμενη χρονική στιγμή το  $T_2$  οδηγείται σε αποκοπή δίνοντας χρόνο στο  $C_2$  να φορτιστεί από την τάση τροφοδοσίας  $VC_2$ . Για να μπορεί η φόρτιση - εκφόρτιση του πυκνωτή να ανταποκρίνεται στο μέγιστο αριθμό επανάληψης πρέπει η εσωτερική χωρητικότητα του πυκνωτή να είναι μικρή. Η δίοδος  $D_1$  χρησιμοποιείται για προστασία της Laser από τυχόν ανάστροφες τάσεις

### Το κύκλωμα τροφοδοσίας

Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή του κυκλώματος τροφοδοσίας ενός διόδου laser, πρέπει αρχικά να κατανοήσουμε τις ανάγκες και τους περιορισμούς της διόδου laser σαν ηλεκτρονικό εξάρτημα.

Το κύριο χαρακτηριστικό λειτουργίας είναι το ρεύμα τροφοδοσίας, το οποίο έχει μια κρίσιμη περιοχή λειτουργίας για κάθε δίοδο. Κάτω από κάποιο κατώφλι, η δίοδος φωτίζει ελάχιστα, αφού δεν αρκεί η ενέργεια ώστε να ξεκινήσει το lasing.

Ελάχιστα mA πιο πάνω από το κατώφλι, βρίσκεται το ρεύμα λειτουργίας, κοντά συνήθως στα 70 mA για διόδους αυτής της κατηγορίας.

Εκτός όμως από το ρεύμα λειτουργίας που θα πρέπει να ελέγχεται από το κύκλωμα τροφοδοσίας μέσα στα πλαίσια της περιοχής λειτουργίας, σημαντικό είναι να μην υπάρχουν απότομες κορυφές ρεύματος κατά το άναμμα ή το σβήσιμο του κυκλώματος. Παρόμοια προσοχή απαιτείται και για φορτία στατικού ηλεκτρισμού που μπορεί να φτάσουν στη δίοδο κατά τη συναρμολόγηση ή τις δόκιμες, από τα χέρια τον πάγκο εργασίας ή το κολλητήριο. Πιο σημαντικό είναι να γίνεται σωστή απαγωγή θερμότητας από το σώμα κυρίως στις διόδους των 5mW (η TOLD 9200 του κυκλώματος λειτουργεί άνετα και χωρίς ψήκτρα διότι είναι στα 3m W), και πιο πολύ στις εφαρμογές όπου η δίοδος μένει αναμμένη για πολύ ώρα.

Η συσκευασία έχει τρεις ακροδέκτες και αυτό γίνεται διότι μέσα στην συσκευασία υπάρχουν δυο διόδοι, μια δίοδος laser και μια φωτοδίοδος που χρησιμοποιείται από το κύκλωμα έλεγχου της τροφοδοσίας της δίοδου laser. Η φωτοδίοδος χρησιμοποιείται για να ελέγχει διαρκώς, ότι η οπτική ισχύς της δίοδου laser βρίσκεται κάτω από το σημείο ασφάλειας που ρυθμίζουμε την πρώτη φορά που θα δοκιμάσουμε το κύκλωμα.

Ο τρόπος έλεγχου της τροφοδοσίας είναι να χρησιμοποιούνται και τα τρία ποδαράκια, ώστε να υπάρχει κάποιος έλεγχος με την μέθοδο της ανατροφοδότησης, που να μεταβάλλει δηλαδή το ρεύμα τροφοδοσίας ανάλογα με τις πληροφορίες που δίνει η φωτοδίοδος.



## 2.3 Φωτοδίοδος

Στις μέρες μας στους πιο διαδεδομένους αισθητήρες ανήκουν οι φωτοευαίσθητοι ημιαγωγοί. Σε αντίθεση με τα άλλα φωτοευαίσθητα στοιχεία, αυτοί έχουν μικρό χρόνο αύξησης και μείωσης του ρεύματος.

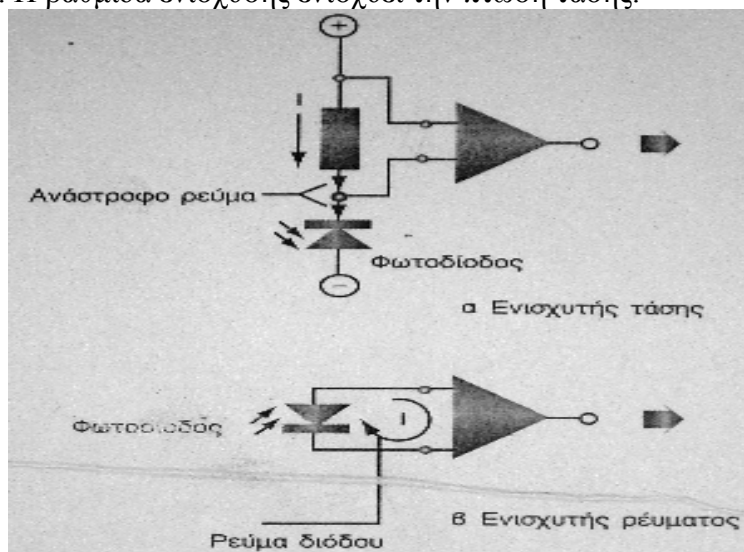
Οι φωτοδιόδοι είχαν κατασκευαστεί στη βάση τους όπως οι απλές διόδοι με την επαφή PN. Άγουν ή δεν άγουν ανάλογα με την κατεύθυνση της τάσης που έχει εφαρμοστεί, δεν άγουν στο σκοτάδι επειδή ο ημιαγωγός και το περίβλημα είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να διαπερνάει το φως στην PN επαφή.

Η πτώση του φωτός προκαλεί δύο λειτουργίες. Η φωτοδίοδος λειτουργεί ανάστροφα, συν στην κάθοδο και μείον στην άνοδο. Το ρεύμα κόρου εξαρτάται από την ένταση του φωτός. Βασικά η δίοδος δεν διαρρέεται από ρεύμα αλλά στην πραγματικότητα διαρρέεται από μικρά ρεύματα, τα οποία μπορούμε να αγνοήσουμε. Στην φωτοδίοδο το ρεύμα κόρου μεγαλώνει με την αύξηση της έντασης του φωτός η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μονάδα μέτρησης. Στην ανάστροφη λειτουργία είναι πάντα αναγκαία αρχικά μια αρνητική τάση. Απεναντίας αν δεν εφαρμόσουμε καμία αρχική τάση στη δίοδο, λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος με την πτώση του φωτός(συγκεκριμένα, όπως ένας μετατροπέας ενέργειας που μετατρέπει την φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική). Συχνά ονομάζουμε αυτό το είδος λειτουργίας κενή λειτουργία επειδή χωρίς τροφοδοσία οι μεταβολές της τάσης είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με τις μεταβολές του φωτός.

Σε αντίθεση με αυτό η λειτουργία όταν εφαρμόσουμε ανάστροφη πόλωση ονομάζεται, λειτουργία βραχυκυκλώματος. Αυτή η λειτουργία είναι εφικτή μόνο θεωρητικά. Στην πράξη χρησιμοποιούμε την δίοδο μόνο σε λειτουργία κενού ή μόνο σε λειτουργία βραχυκυκλώματος, δηλαδή σαν να συνδέσουμε το κύκλωμα με μεγάλη ή με μικρή αντίσταση εισόδου.

Για τη διευκρίνιση των παραπάνω διαφορετικών λειτουργιών το σχήμα 1 δείχνει πως είναι συνδεδεμένες οι βαθμίδες ενίσχυσης στους δύο σχηματισμούς.

Στο σχήμα α(Ενισχυτής τάσης), είναι σχεδιασμένη η λειτουργία βραχυκυκλώματος. Ανάμεσα στους δύο πόλους τροφοδοσίας βρίσκονται συνδεδεμένα σε σειρά μια δίοδος πολωμένη ανάστροφα και μια αντίσταση. Το ρεύμα σ' αυτό κύκλωμα εξαρτάται από την ακτινοβολία που πέφτει στην φωτοδίοδο (η αρχική βαθμίδα ενίσχυσης δεν τραβάει καθόλου ρεύμα τροφοδοσίας). Αυτό το ρεύμα προκαλεί μια πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση, η οποία εξαρτάται από την ακτινοβολία. Η βαθμίδα ενίσχυσης ενισχύει την πτώση τάσης.

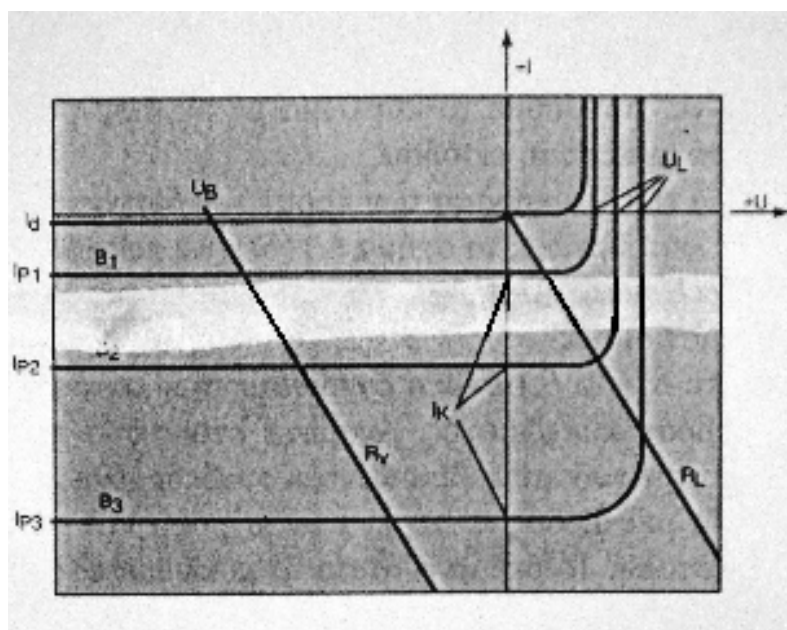


σχήμα 1

Στο σχήμα β(Ενισχυτής ρεύματος), η φωτοδίοδος λειτουργεί όπως μια πηγή τάσης, η οποία προκαλεί ένα ρεύμα στην είσοδο του ενισχυτή(εδώ πρόκειται σε αντίθεση με το σχήμα α για έναν ενισχυτή ρεύματος). Το ρεύμα αυξάνει με την ακτινοβολία.

Στο παρελθόν όταν μιλούσαμε για φωτοστοιχεία αναφερόμαστε σε φωτοδίοδο (η οποία ήταν από σελήνιο ενώ σήμερα από πυρίτιο) που λειτουργούσε σε κενό.

Στο σχήμα 2 φαίνεται η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος για μια φωτοδίοδο σε διαφορετικούς φωτισμούς.



σχήμα 2

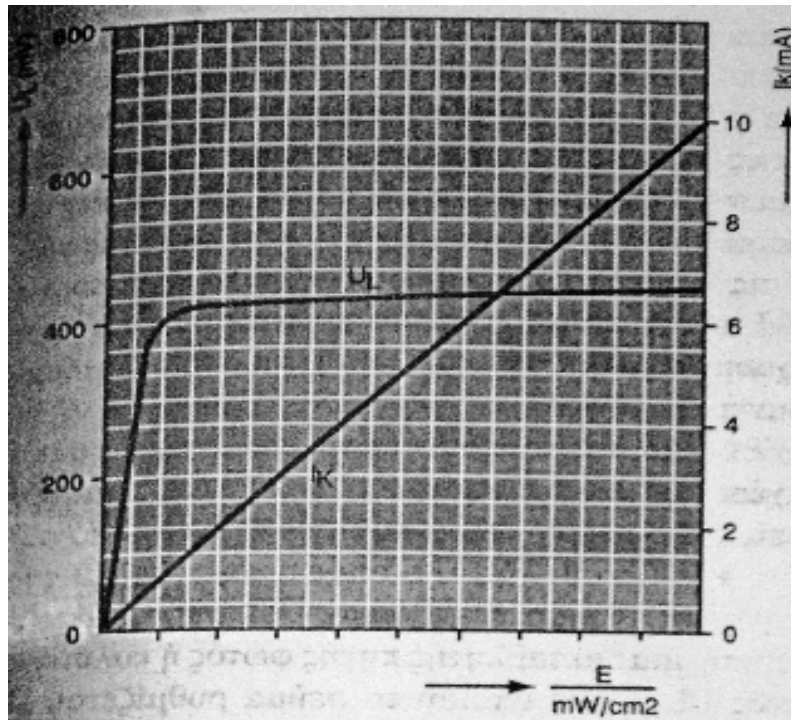
Στο σχήμα παρατηρούμε και τα δύο είδη λειτουργιών της διόδου σε σχέση με την χαρακτηριστική της (το ρεύμα της ανάλογα με την τάση). Η παραπάνω καμπύλη είναι μια κλασική χαρακτηριστική αποκοπής που αντιπροσωπεύει εδώ την λειτουργία σε σκοτάδι. Με την αύξηση του συντελεστή B η χαρακτηριστική πάντα βυθίζεται περισσότερο. Το επίπεδο τμήμα της καμπύλης βυθίζεται στο τρίτο τεταρτημόριο. Το ρεύμα προς τις αρνητικές τιμές της τάσης αυξάνεται. Επομένως το ρεύμα κόρου δεν εξαρτάται από την αντίστοιχη τάση. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακτινοβολία, τόσο πιο χαμηλά τέμνουν οι καμπύλες τον κάθετο άξονα του ρεύματος. Επειδή σ' αυτόν τον άξονα η τάση είναι μηδενική δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για λειτουργία βραχυκυκλώματος, όπου το ρεύμα είναι ανάλογο με το προσπίπτον φως.

Η χαρακτηριστική πέφτει όταν αυξάνεται ο φωτισμός, το ρεύμα λειτουργίας και το ανάστροφο ρεύμα πέφτουν σε μεγάλες αρνητικές τιμές.

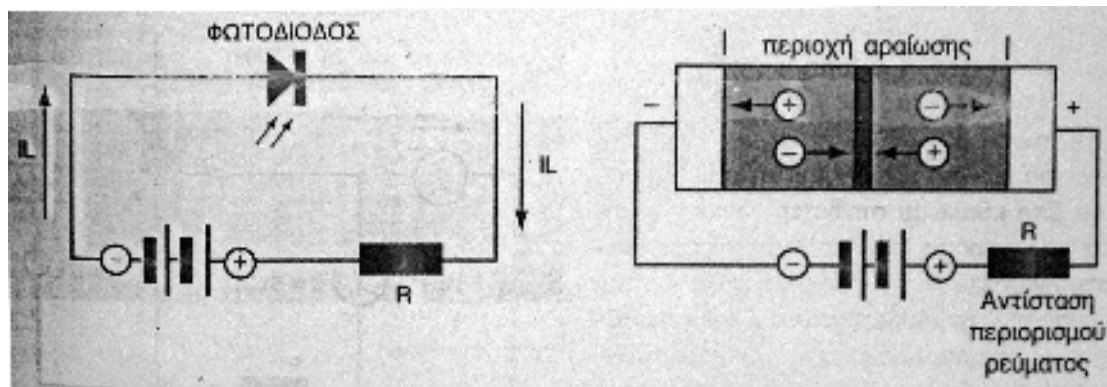
Το σημείο τομής με τον οριζόντιο άξονα μας βοηθάει να καταλάβουμε την λειτουργία κενού. Εδώ το ρεύμα είναι μηδενικό και η τάση λειτουργίας μεταβάλλεται από το προσπίπτον φως. Πρακτικά τα σημεία λειτουργίας δεν βρίσκονται πάνω στους άξονες ,επειδή η απόλυτη λειτουργία σε κενό , ή η λειτουργία σε βραχυκύκλωμα δεν είναι εφικτή. Το πραγματικό σημείο λειτουργίας σε βραχυκύκλωμα βρίσκεται στα τμήματα των καμπύλων στο τρίτο τεταρτημόριο. Το πραγματικό σημείο λειτουργίας σε κενό βρίσκεται επάνω στα τμήματα των καμπύλων του πρώτου και τέταρτου τεταρτημόριου. Η θέση του σημείου λειτουργίας σε διαφορετικά τεταρτημόρια δηλώνει ότι η φωτοδίοδος στην λειτουργία βραχυκύκλωμα είναι παθητικό στοιχείο, καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια (η οποία προέρχεται από την πηγή),ενώ στην

λειτουργία κενού συμπεριφέρεται σαν ενεργό στοιχείο , αποδίδει ηλεκτρική ενεργεία. Ενώ το ρεύμα λειτουργίας σε βραχυκύκλωμα είναι ανάλογο της ακτινοβολίας, στην σε κενό υπάρχει λογαριθμική σχέση της τάσης με την ακτινοβολία.

Το σχήμα 3 δείχνει τις διαφορετικές χαρακτηριστικές .



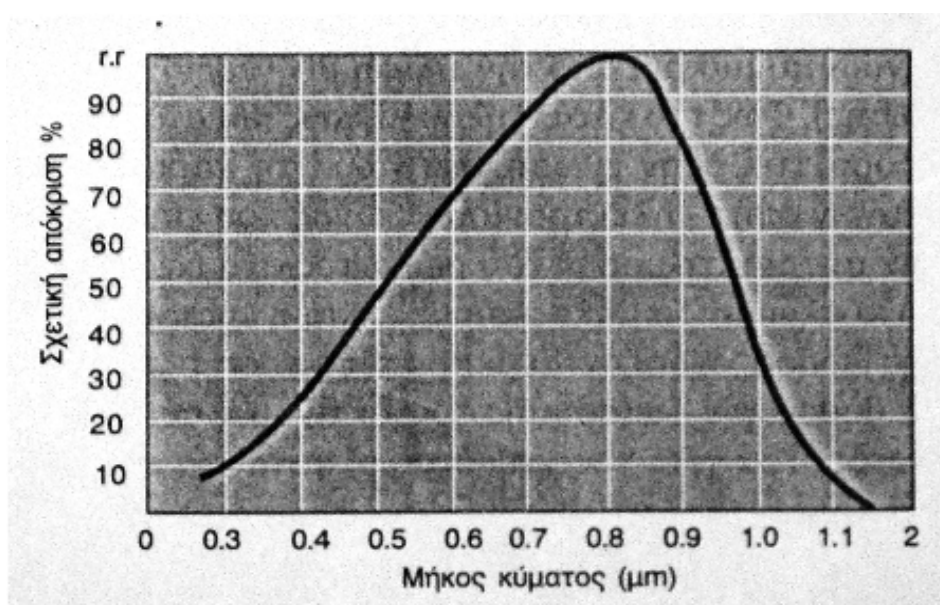
Πομποί ορατού η υπέρυθρου φωτός μετατρέπουν τον ηλεκτρισμό σε φως. Η δίοδος που ακτινοβολεί φως, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, μπορεί να κατασκευαστεί ώστε να είναι ευαίσθητη στο φως, δηλαδή η ένωση να λειτουργεί ως φωτοαισθητήρας. Όταν μια δίοδος πυριτίου, πολώνεται ανάστροφα, τα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται μακριά από την επαφή PN (περιοχή κένωσης). Φως του καταλλήλου μήκους κύματος που προσπίπτει στην ένωση, προκαλεί τη παραγωγή ζευγών οπής -ηλεκτρονίου γεγονός που επιφέρει την αύξηση της ροής του ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα. Το μήκος κύματος και η ευαισθησία της δίοδου, σχετίζονται με τον τύπο πρόσμιξης και το βάθος της διείσδυσης του ακτινοβολούμενου φωτός. Το σχήμα 4 δείχνει έναν ανάστροφα πολωμένο φωτοανιχνευτή.



Η πυκνότητα της ισχύος της απορροφούμενης ροής P (μετριέται σε milli ή microwatts / τετραγωνικό εκατοστό) καθορίζει τη ροή του ρεύματος IL. Αν δεν παρουσιάζεται ακτινοβολία φωτός (μηδενικό φως) ένα μικρό ρεύμα διαρροής που ονομάζεται ρεύμα σκότους, ( $I_d$ ), θα κυκλοφορεί στο κύκλωμα. Η ποσότητα του ρεύματος σκότους εξαρτάται από την ανάστροφη τάση πόλωσης, τις αντιστάσεις σε σειρά ή την αντίσταση του φορτίου, και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Η απόκριση R είναι η ικανότητα μιας φωτοδιόδου να αυξάνει το ανάστροφο ρεύμα πόλωσης της ως αποτέλεσμα μιας αύξησης του φωτός. Η απόκριση της φωτοδιόδου μετριέται σε milliamperes ανά milliwatt σ'ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η φωτοδιόδος Honeywell SE 3452 έχει  $R = 0.5 \text{ mA} / \text{mW}$ .

Όταν το ακτινοβολούμενο φως είναι 2m W, η διόδος παράγει μια ροή ρεύματος 1 mA ( $0.5 \times 2 \text{ mW}$ ). Η απόκριση κορυφής του SE 3452 είναι περίπου 802 nm. Η φασματική απόκριση του φωτοδιόδου κυμαίνεται από 400 σε 1100 nm.



Η φασματική απόκριση φαίνεται στο σχήμα 5.

Οι φωτοδιόδοι πυριτίου, PIN, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φωτοβολταικές πηγές όπως μελετήθηκε στην προηγούμενη άσκηση. Το φως που διαποτίζεται πάνω στις περιοχές αραίωσης τους, κοντά στην επαφή, δημιουργεί ένα δυναμικό το οποίο είναι ανάλογο του εισερχόμενου φωτός. Δε χρειάζεται εξωτερική πόλωση, αφού η ένωση 'γεννά' τη δική της ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Η φωτοδιόδος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν ανάγνωση κάρτας, ελέγχου φωτός του περιβάλλοντος, προβολείς σταθερής εικόνας (σλαίντ), και τηλεοράσεις. Η φωτοδιόδος αισθάνεται την παρουσία της ακτινοβολούμενης ενέργειας και προκαλεί ένα ρεύμα ελέγχου στο εξωτερικό κύκλωμα. Τυπικά, η ροή του ρεύματος της διόδου μετριέται στα microamperes.

*(ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Γ)*

## Ανάλυση της χαρακτηριστικής σε λειτουργία κλειστού κυκλώματος.

Μπορούμε να μελετήσουμε τα τμήματα της χαρακτηριστικής της φωτοδιόδου στην λειτουργία κλειστού κυκλώματος. Επιλέγεται συχνά η παραπάνω λειτουργία εξαιτίας της γραμμικής της σχέσης με την ακτινοβολία.

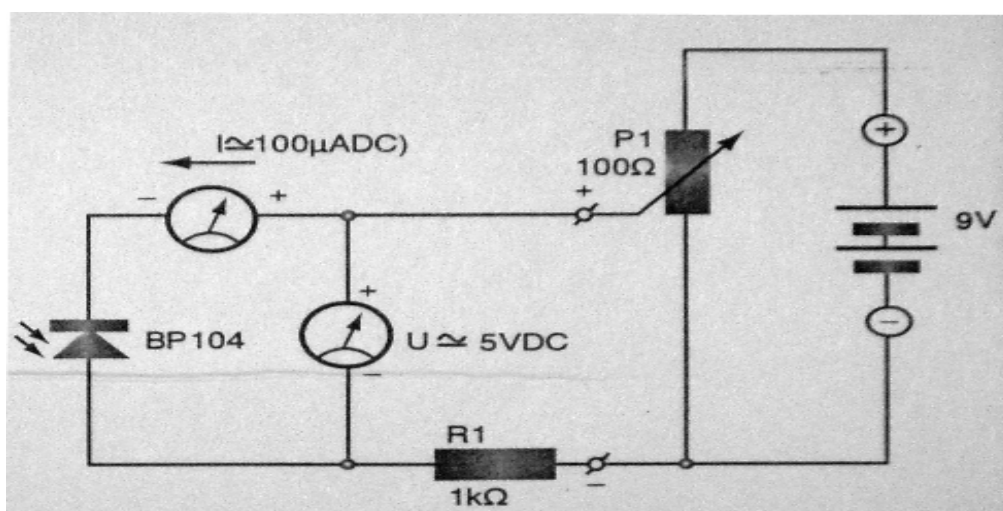
Τα 9V εφαρμόζονται στην αντίσταση της φωτοδιόδου. Στο κύκλωμα συνδέεται και ένα ευαίσθητο μικροαμπερόμετρο. Μετράμε την τάση ανάμεσα στο ένα άκρο της διόδου και το άλλο του αμπερομέτρου. Την διόδο την φωτίζουμε σταθερά με μια λάμπα παραδείγματος χάρη των 60 W από αποστάσεις 0,3 έως 1m. Η μεταβολή της απόστασης επιφέρει μεταβολή της ισχύος ακτινοβολίας.

Εάν χρησιμοποιήσουμε ένα τροφοδοτικό λαμβάνουμε και μεγαλύτερες τάσεις μέχρι 20V. Παίρνουμε περισσότερες μετρήσεις για διαφορετικές τιμές τάσης. Θα πρέπει να μετράμε με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια γιατί τις περισσότερες φορές τα ρεύματα είναι μικρά.

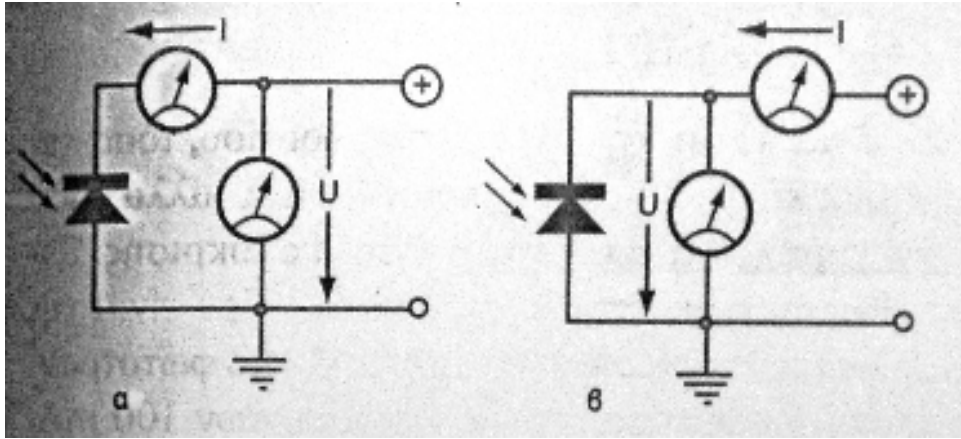
Με την πτώση της τάσης στο αμπερόμετρο, έχουμε σφάλμα στην μέτρηση, το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Ένας άλλος τρόπος για να υπολογίσουμε τη σχέση μεταξύ του προσπίπτοντος φωτός και του ρεύματος κόρου της φωτοδιόδου εκτός από αυτόν της μεταβολής της απόστασης μεταξύ της πηγής φωτός ή καλύτερα ενός LED εξαρτάτε γραμμικά από το ρεύμα του LED. Μεταβάλλοντας το ρεύμα που διαρρέει το LED μεταβάλλουμε ανάλογα και το φως που εκπέμπεται από αυτό. Στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε μετρήσεις σε συγκεκριμένες περιοχές μηκών κύματος χρησιμοποιούμε ένα LED και φωτοδιόδους με περιβλήματα διαφορετικών χρωμάτων

Ένα σημαντικό σημείο της διαδικασίας μέτρησης το οποίο πρέπει να τονιστεί είναι το σφάλμα μέτρησης με χρήση δυο οργάνων.



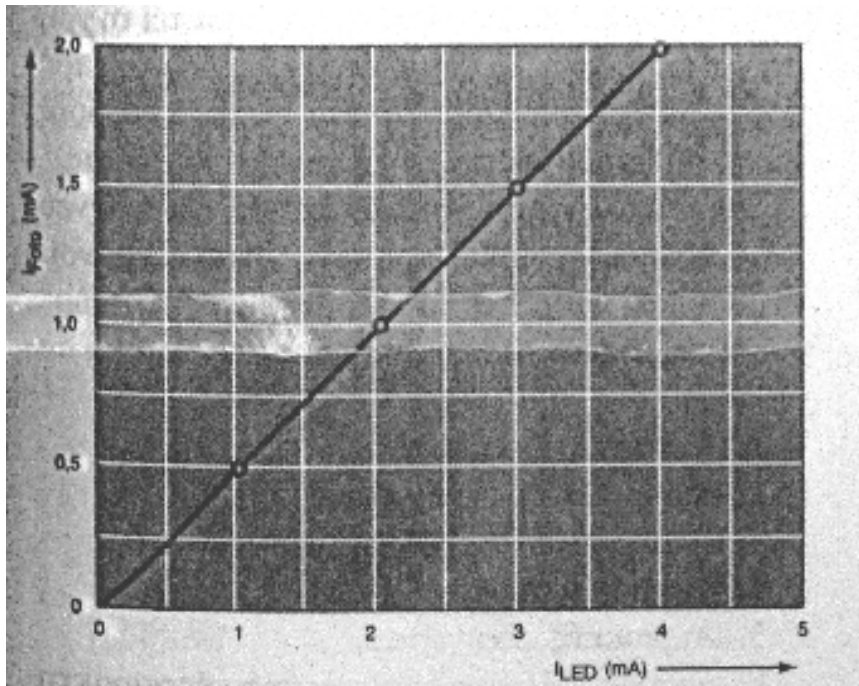
Από τις μετρήσεις του σχήματος 6, τίθεται το ερώτημα, εάν πρέπει να τοποθετηθεί το βολτόμετρο πάνω στο στοιχείο και στο αμπερόμετρο (σχήμα 7α) ή μόνο στο στοιχείο (σχήμα 7β). Το τελευταίο είναι καλύτερο εφόσον δεν μετράμε μαζί την πτώση τάσης πάνω στο αμπερόμετρο.



Τότε όμως δημιουργείται ένα σφάλμα μέτρησης στο ρεύμα. Το αμπερόμετρο μετράει το ρεύμα του στοιχείου και του βολτομέτρου. Πρέπει δηλαδή να λάβουμε υπόψιν μας, ότι το βολτόμετρο καταναλώνει ένα μικρό ρεύμα καθώς και το αμπερόμετρο παρουσιάζει στα άκρα του μια μικρή πτώση τάσης. Ποια συνδεσμολογία είναι η πιο σωστή, πρέπει να το εξακριβώνουμε σε κάθε πείραμα. Αυτή την φορά είναι η συνδεσμολογία α.

Αν χρησιμοποιούμε ένα καλό αμπερόμετρο (50mA), με εσωτερική αντίσταση στα 2KΩ και για ένα ρεύμα π.χ. 10μΑ (τυπικό ρεύμα φωτοδιόδου), η πτώση τάσης στα άκρα του είναι περίπου:  $U = 2K\Omega \times 10 \mu A = 20 \text{ mV}$  η οποία είναι αμελητέα σε σχέση με την πτώση τάσης πάνω στην φωτοδίοδο. Αντίθετα στην περίπτωση (β) το ρεύμα του βολτομέτρου προσθέτει μερικές δεκάδες μΑ, στο συνολικό ρεύμα μέτρησης και το αποτέλεσμα θεωρείται λανθασμένο.

Τις τιμές μέτρησης τις καταγράφουμε στο διάγραμμα του σχήματος 8.



σχήμα 8

Η καμπύλη που σχεδιάζουμε, είναι μια ευθεία γραμμή και δείχνει την γραμμική σχέση του ρεύματος της φωτοδιόδου με την ακτινοβολία.

Η ευθεία δείχνει την γραμμική σχέση του φωτός με το αντίστροφο ρεύμα της φωτοδιόδου.  
(ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Γ)

## 2.4 Μαθηματική ανάλυση



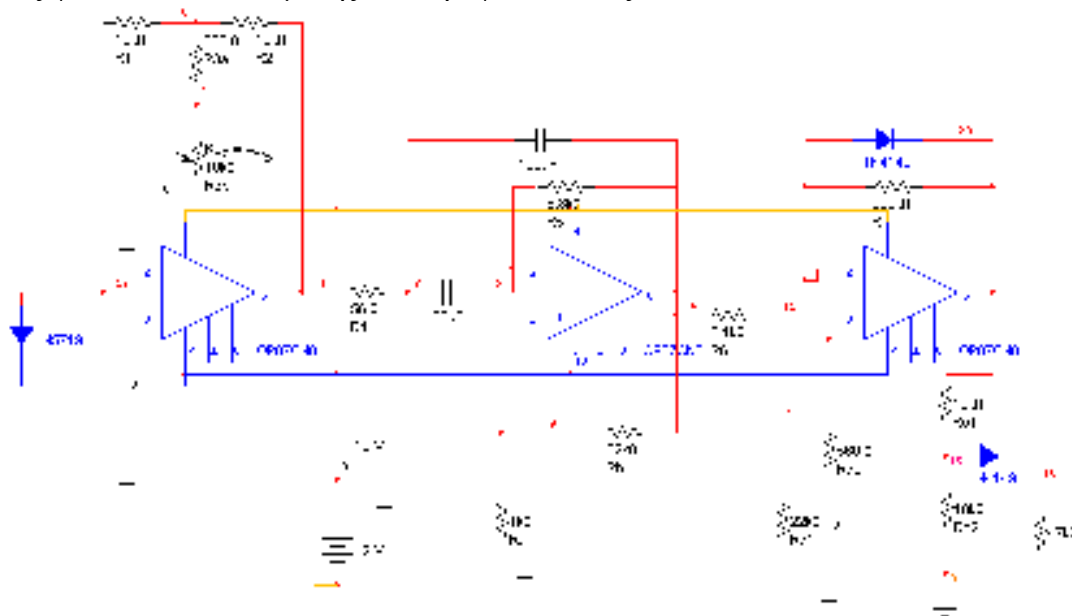
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Αναλογικό κύκλωμα

#### 3.1 Ανάλυση ηλεκτρονικού κυκλώματος

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα αποτελείται από τρεις επιμέρους βαθμίδες συνδεδεμένες σε σειρά :

α) Ένας ανιχνευτής της οπτικής ακτινοβολίας ο οποίος υλοποιείται με τη χρήση μιας φωτοδιόδου πολωμένης ανάστροφα και ενός



Εικόνα 1 Κύκλωμα ανιχνευτή

μετατροπέα ρεύματος σε τάση με τη χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή. Η ανάλυση του κυκλώματος δίνει τη σχέση μεταξύ της τάσεως εξόδου ( $V_o$ ) και του ρεύματος της φωτοδιόδου ( $I_{input}$ ). Στον κόμβο 6 από το 1<sup>ο</sup> νόμο του Kirchhoff έχουμε

$I_{R2} = I_{input} + I_{R3}$  (1) (Σημ1. όπου  $R_3$  είναι το άθροισμα της  $R_{3a}$  και του ποτενσιόμετρου  $R_{3b}$ ), (Σημ2: Οι φορές των ρευμάτων επιβάλλονται από την πολικότητα της τάσης πόλωσης της διόδου). Με τη βοήθεια του νόμου του Ohm εκφράζουμε τα ρεύματα στην εξίσωση (1) με τις πτώσεις τάσης πάνω στις αντιστάσεις.  $I_{input} = (V_6 - V_o)/R_2 - V_6/R_3$  (2). Αλλά η τάση  $V_6$  (στον κόμβο 6) είναι  $V_6 = -I_{input} \cdot R_1$  (3). Αντικαθιστώντας την (3) στην (2) και λύνοντας αυτή ως προς  $V_o$  έχουμε  $V_o = -I_{input} \cdot (R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3)/R_3$  (4). Επιλέγοντας τις τιμές των αντιστάσεων ίσες, δηλαδή  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ , η (4) γίνεται  $V_o = -3 \cdot R \cdot I_{input}$  (5). Ένας άλλος εναλλακτικός τρόπος είναι να επιλέξουμε τις  $R_1$  και  $R_2$  ίσες, δηλαδή  $R_1 = R_2 = R$  οπότε η (4) γίνεται  $V_o = -I_{input} \cdot (R^2/R_3 + 2 \cdot R)$  (6). Μεταβάλλοντας κατάλληλα μόνο την  $R_3$  μπορούμε να ρυθμίσουμε την  $V_o$  στην επιθυμητή τιμή ( $V_o \sim 9,5V$  με τάση τροφοδοσία του τελεστικού 12V για να μην έχουμε ψαλιδισμό

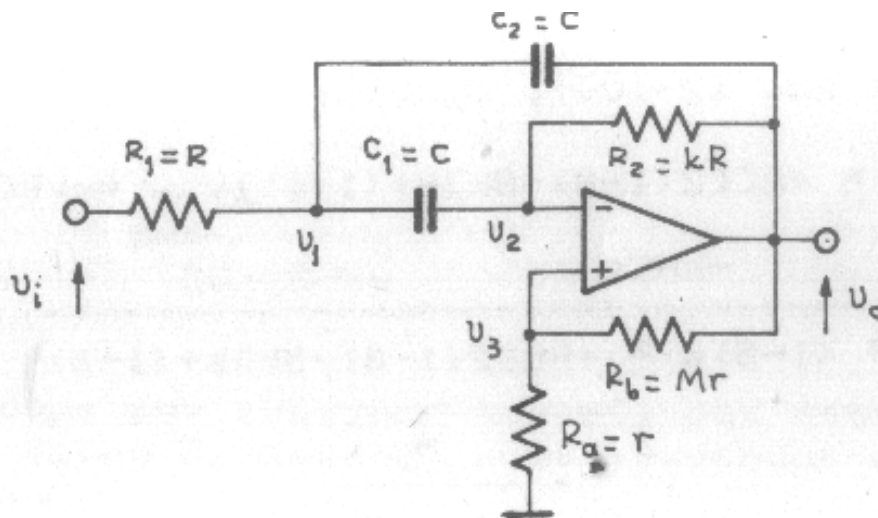
όταν το Input άγνωστο μεν αλλά μπορεί να μεταβληθεί σε μια γνωστή περιοχή (20μΑ~300μΑ) στην περίπτωση μας .Η μεταβολή της τάσης  $V_0$  γίνεται με τρόπο αντιστρόφως ανάλογο της μεταβολής της  $R_3$  αλλά όχι γραμμικά λόγω ύπαρξης του δευτέρου όρου στην (6). Οι τιμές των αντιστάσεων στο κύκλωμα εκλέχτηκαν σύμφωνα με την παραπάνω περιοχή ρευμάτων . (ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Β ΚΑΙ ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Β)

**3.2 Η δεύτερη βαθμίδα είναι ένα φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης τροποποιημένο από τον Δεληγιάννη(η ανάλυση είναι στις φωτοτυπίες) .Σκοπός του είναι να κόψει την συνεχή συνιστώσα και να ορίσει την περιοχή λειτουργίας κάτω από τα 50Hz .**

Η μέθοδος υπολογισμού όπως αναφέρεται στις φωτοτυπίες είναι :Επιλέγουμε την κεντρική συχνότητα  $f_0$ , συντελεστή συντονισμού  $Q$  και την παράμετρο  $k$ ( μικρό),του πυκνωτές  $C$ ,και στη συνέχεια υπολογίζουμε τις αντιστάσεις .

Στο φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης είδαμε ότι το  $Q(1/a)$  είναι συνάρτηση της αντίστασης  $R_3$  ( $R_3 = \frac{2Q}{\omega_0 CK}$ ). Για να επιτύχουμε μεγάλο  $Q$  θα πρέπει η αντίσταση

αυτή να γίνει πολύ μεγάλη , με αποτέλεσμα το φίλτρο να μην είναι πραγματοποιήσιμο . Ο Δεληγιάννης πρότεινε το κυκλώματα του παρακάτω σχήματος που εξουδετερώνει το μειονέκτημα αυτό. Το κύκλωμα είναι ένας απλός συντονιστής με έναν ΤΕ που έχει και θετική ανασύζευξη



Εικόνα 2 Φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης Δεληγιάννη

Από το σχήμα αυτό έχουμε :

Κόμβος  $v_1$

$$-\frac{1}{R_1} V_1 + \left(-\frac{1}{R} + 2s C\right) V_1 - s C V_2 - s C V_0 = 0$$

Κόμβος  $v_2$

$$-sCV_1 + \left(-\frac{1}{KR} + sC\right)V_2 - \frac{1}{KR}V_0 = 0$$

Κόμβος  $v_3$

$$V_3 = \frac{R_a}{R_a + R_b} V_a = \beta v_a$$

Όπου

$$B = \frac{R_a}{R_a + R_b} V_a = \frac{r}{r + Mr} = \frac{1}{1 + M}$$

Για ιδανικό ενισχυτή, έχουμε :

$$V_3 - V_2 = 0$$

$$V_2 = V_3 = \beta v_a$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε :

$$V_1 = -\frac{(1-\beta) - \beta kRCr}{kRCs} V_a$$

Από τις εξ.

Έχουμε :

$$(KR^2 C^2 (1-\beta) s^2 + RC[2(1-\beta)]s + (1-\beta)) V_a = -kRCsV_1$$

$$H(s) = \frac{V_1}{V_a} = \frac{-kRCs}{kR^2 C^2 (1-\beta) s^2 + RC[2(1-\beta) - BK]s + (1-\beta)}$$

$$H(s) = \frac{-\frac{s}{(1-\beta)RC}}{s^2 + \frac{2(1-\beta) - BK}{(1-\beta)kRC}s + \frac{1}{kR^2 C^2}}$$

Από αυτή την εξίσωση προκύπτει :

$$\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{K}}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{2(1-B) - \beta\kappa}{(1-\beta)\kappa RC}$$

$$Q = \frac{(1-B)\sqrt{K}}{2(1-B) - \beta\kappa}$$

Από την εξίσωση αυτή είναι φανερό ότι αν  $2(1-\beta) = \beta\kappa$  , το Q γίνεται άπειρο που σημαίνει ότι το φίλτρο γίνεται ταλαντωτής . Συνεπώς ,αν δώσουμε μία τιμή στο κ , θα έχουμε μια συχνότητα συντονισμού  $f_0$  και το ελάχιστο Q. Μπορούμε δε να βρούμε την τιμή του συντελεστή ανασύζευξης που κάνει το Q μέγιστο. Η τιμή αυτή του β

Βρίσκεται από τον παρονομαστή της Εξ.(  $Q = \frac{(1-B)\sqrt{K}}{2(1-B) - \beta\kappa}$  ) και είναι:

$$B_{\max} = \frac{2}{2+k}$$

Η εξίσωση τούτη μας δίνει την τιμή του β που δημιουργεί ταλαντώσεις .π.χ Αν  $\kappa=100$ ,η μέγιστη τιμή του β είναι μόνο 0.02,ενώ αν ο αντιστάσεις είναι ίσες ( $\kappa=1$ ) θα έχουμε  $\beta = 2/3 = 0,67$  . κατά συνέπεια στον προσδιορισμό του Q, ο συντελεστής ανασύζευξης δε δίνει συγκεκριμένη πληροφορία , επειδή θα πρέπει να ξέρουμε και την τιμή του κ.

Από τις εξισώσεις ( $Q = \frac{(1-B)\sqrt{K}}{2(1-B) - \beta\kappa}$ ) και ( $B = \frac{R_a}{R_a + R_b} \quad V_a = \frac{r}{r + Mr} = \frac{1}{1 + M}$ )

Έχουμε:

$$M = \frac{KQ}{2Q - \sqrt{K}}$$

Και από την εξίσωση ( $Q = \frac{(1-B)\sqrt{K}}{2(1-B) - \beta\kappa}$ ), προκύπτει ότι :

$$B = \frac{2Q - \sqrt{K}}{2Q + KQ - \sqrt{K}}$$

Για να βρούμε την ενίσχυση του φίλτρου στην κεντρική συχνότητα  $f_0$  της ζώνης διέλευσης, αντικαθιστούμε στην εξίσωση

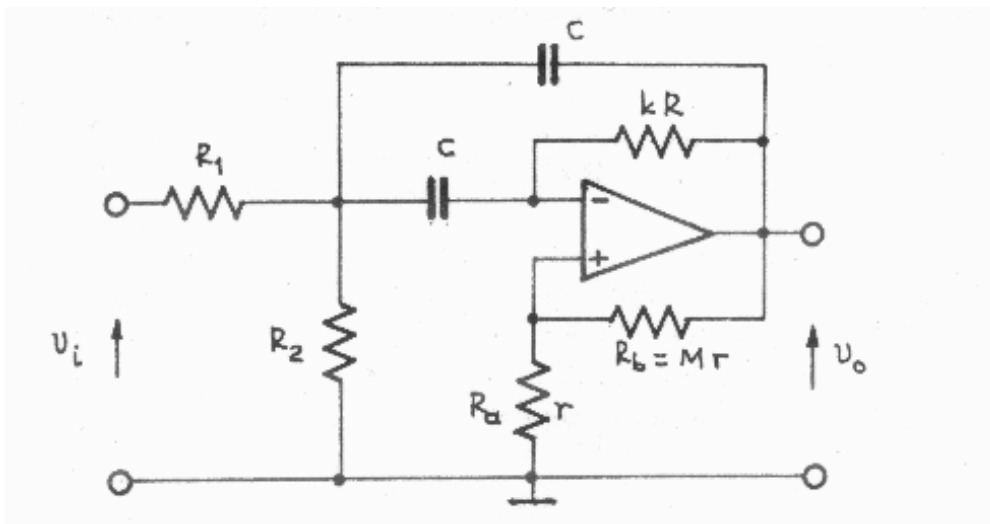
$$H(s) = \frac{-\frac{s}{(1-\beta)RC}}{s^2 + \frac{2(1-\beta) - \beta K}{(1-\beta)kRC}s + \frac{1}{kR^2C^2}}$$

Όπου  $s = j\omega_0$ , δηλαδή:

$$K = H(j\omega_0) = \frac{\frac{-j\omega_0}{(1-\beta)RC}}{-\omega_0^2 + j\omega_0 \frac{2(1-\beta) - \beta k}{(1-\beta)kRC}} + \frac{1}{kR^2C^2}$$

$$K = \frac{k}{2(1-\beta) - \beta k}$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι για ημιτονικό σήμα εισόδου 5V, η έξοδος στη συχνότητα  $f_0$  θα είναι ημιτονικό σήμα πλάτους 5KV πράμα που σημαίνει ότι ο ενισχυτής μπορεί εύκολα να οδηγηθεί στο όριο της τάσης παροχής (ψαλίδιση). Αν θέλουμε να έχουμε φίλτρο ζώνης διέλευσης με ενίσχυση μονάδα, πράμα πολύ συνηθισμένο, θα πρέπει να εξασθενήσουμε το σήμα εισόδου με συντελεστή εξασθένησης  $1/K$ .



Εικόνα 3 Φίλτρο ζώνης διέλευσης Δεληγιάννη με ενίσχυση 1.

$$\text{Συνεπώς: } \frac{1}{K} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ και } R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτουν:

$$R_1 = KR \quad \text{και} \quad R_2 = \frac{KR}{K-1}$$

### Μέθοδος Υπολογισμού

1. Διαλέγουμε τα  $f_0$  και  $Q$ .
2. Εκλέγουμε μια κατάλληλη τιμή για τον  $C$ .
3. Διαλέγουμε το  $k$  ώστε να είναι τετράγωνο των αριθμών  $2, 3, \dots, 10, \dots$
4. Υπολογίζουμε την  $R$  από την εξίσωση
5. Υπολογίζουμε το  $M$  από την εξίσωση
6. Διαλέγουμε τις αντιστάσεις  $R_a = r$  και  $R_b = Mr$ , τέτοιες ώστε το άθροισμα τους να είναι μεγαλύτερο από 20 και μικρότερο από 200 kΩ.
7. Αν η ενίσχυση  $K$  της ζώνης διέλευσης δεν πρόκειται να δημιουργήσει πρόβλημα, τότε η μεν  $R_2 = 0$  η δε  $R_1 = R$ . Αν όμως θέλουμε ενίσχυση μονάδα υπολογίζουμε την  $K$  από τις εξισώσεις
8. Υπολογίζουμε τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  από τις εξισώσεις
9. Διαλέγουμε κατάλληλες τιμές αντιστάσεων εμπορίου. Προσπαθούμε να αντισταθμίσουμε το σφάλμα μας, δηλαδή αν η  $R$  είναι λίγο μικρότερη από την τιμή που υπολογίσαμε. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το  $k$  να είναι λίγο μεγαλύτερο απ' αυτό που δεχθήκαμε. Κατά συνέπεια θα πρέπει να κάνουμε το συντελεστή ανασύζευξης  $\beta$  λίγο μικρότερο.

Με το φίλτρο αυτό μπορούμε να έχουμε  $Q$  μέχρι 30 για να έχει καλή σταθερότητα.

*(ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Β ΚΑΙ ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Β)*

**Υπολογισμός τιμής φίλτρου ζώνης διέλευσης Δεληγιάννη με  $f_0 = 200$  Hz και  $Q=12$ .**

$$C=0,047 \mu\text{f} , k=25 (\sqrt{k}=5)$$

$$R=\frac{1}{2\pi * 200 * 0,047 * 10^{-6} * 5}=3,386 \text{ k}\Omega$$

$$kR=84,65 \text{ k}\Omega$$

Υπολογισμός του M

$$M=\frac{25 * 12}{2 * (12 - 5)}=15,8$$

$$R_a = r = 2,7 \text{ k}\Omega , R_b = Mr = 15,8 * 2,7 \approx 47 \text{ k}\Omega$$

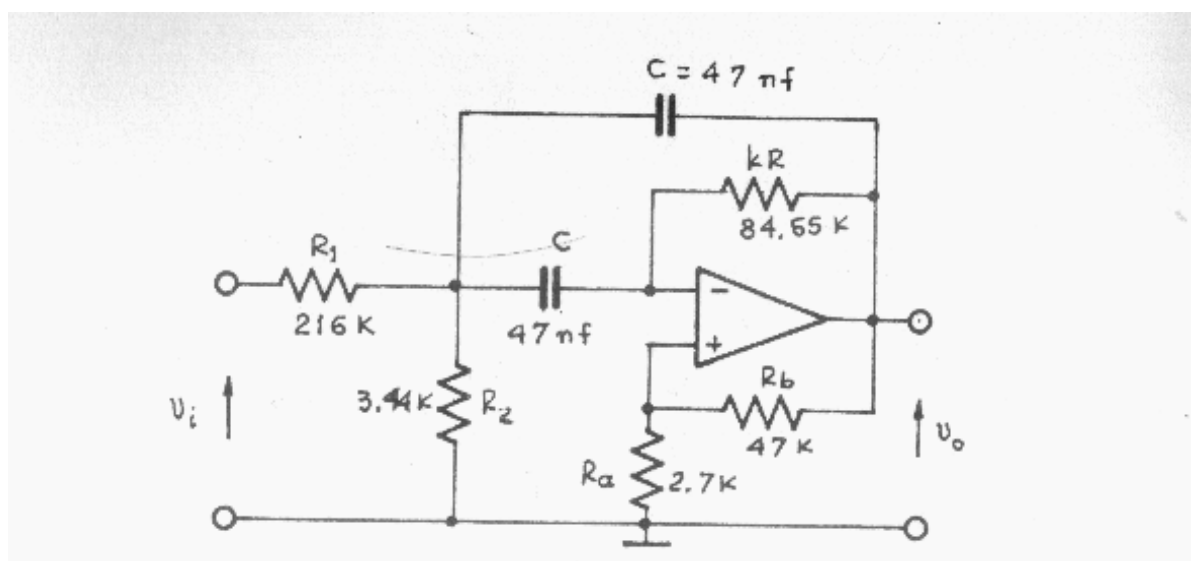
Αν θέλουμε ενίσχυση μονάδα:

$$K=\frac{12 * 16,8 * 25}{15,8} = 63,8$$

$$R_1 = KR = 63,8 * 3,386 \approx 216 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{KR}{K - 1} = \frac{63,8 * 3,386}{63,8 - 1} = 3,44 \text{ k}\Omega$$

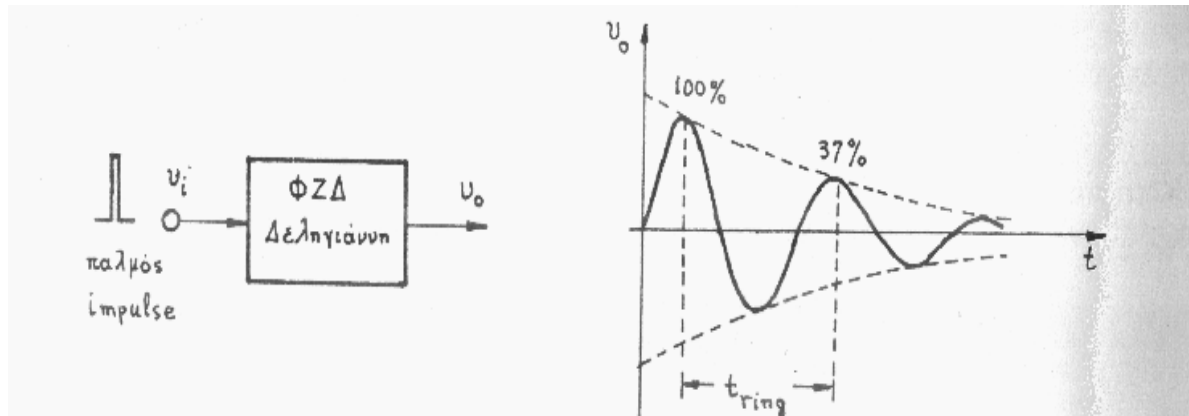
Το παρακάτω σχήμα δείχνει το φίλτρο που υπολογίσαμε.



Εικόνα 4 Κύκλωμα Φίλτρου

Μετά την κατασκευή του φίλτρου θα πρέπει να κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις ώστε να έχουμε τις επιθυμητές επιδόσεις. Για να έχουμε συντονισμό στη  $f_0$  ρυθμίζουμε την αντίσταση  $kR$ . Με κατάλληλη ρύθμιση των  $R_a$  και  $R_b$  επιτυγχάνουμε το επιθυμητό  $Q$ . Συνήθως σε σειρά με την  $R_a$  συνδέουμε ένα ποτενσιόμετρο.

Επειδή για φίλτρο με μεγάλο  $Q$  δεν μπορούμε να μετρήσουμε το  $Q$ , με βάση το εύρος διέλευσης, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο που δείχνει το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5 Μέθοδος μέτρησης του  $Q$

Όταν το φίλτρο διεγερθεί με έναν πολύ στενό παλμό  $\delta(t)$ , η έξοδος του θα είναι αποσβεννυμένη ταλάντωση. Ο χρόνος από την πρώτη κορυφή (100% της μέγιστης τιμής) στη δεύτερη κορυφή (37% της μέγιστης τιμής της,  $1/e$ ) ονομάζεται χρόνος κωδωνισμού  $t_{ring}$ . Για να μετρηθεί ο χρόνος αυτόν, το  $Q$  βρίσκεται από τη σχέση:

$$Q = \pi f_0 t_{ring}$$

**3.3 Η τρίτη βαθμίδα είναι ένας συγκριτής** και σκοπό έχει να μετατρέψει την έξοδο του φίλτρου σε ένα θετικό παλμό. Η σύγκριση γίνεται με μια στάθμη αναφοράς  $V_{ref}$  (κόμβος 3) η οποία υλοποιείται από τον διαιρέτη τάσης ( $R_{d1}, R_{d2}$ ) και είναι  $V_{ref} = -12 \cdot R_{d2} / (R_{d1} + R_{d2}) V$  (~300mV στην περίπτωση μας) και ορίζει το κατώφλι θορύβου. Η τάση εξόδου θα είναι από την εξίσωση  $V_o = -R_f / R_6 (V_o(\text{φίλτρου}) - V_{ref}) + V_{ref}$ , όπου  $R_f$  είναι η αντίσταση του βρόχου ανάδρασης η οποία παίρνει δύο διαφορετικές τιμές ανάλογα εάν η διόδος είναι ορθά ή ανάστροφα πολωμένη. Από την εξίσωση φαίνεται ότι όταν  $V_o(\text{φίλτρου}) > V_{ref}$  η διαφορά τους είναι θετική η διόδος πολώνεται ορθά και η  $R_f$  γίνεται πρακτικά ίση με την αντίσταση ορθής πόλωσης της διόδου. Η τάση εξόδου θα είναι  $V_o = V_{ref} - V_d = -1V$ , όπου  $V_d$  είναι τάση κατωφλίου της διόδου. Αντίστοιχα όταν  $V_o(\text{φίλτρου}) < V_{ref}$  διόδος πολώνεται ανάστροφα και η  $R_f$  γίνεται πρακτικά ίση με 200 KΩ. Η τάση εξόδου θα είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας με μόνο -6mV διαφορά μεταξύ της  $V_o(\text{φίλτρου})$  και  $V_{ref}$ ,  $V_o = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 12V$ . Άρα η τάση εξόδου του συγκριτή μεταβάλλεται μεταξύ της θετικής τάσης τροφοδοσίας +12V και -1V. Ο διαιρέτης τάσης ( $R_{o1}, R_{o2}$ ) σκοπό έχει να προσαρμόσει την τάση εξόδου του συγκριτή στις λογικές στάθμες του μικρό ελεγκτή (5V, 0V), ενώ η τελευταία διόδος είναι προαιρετική και σκοπό έχει να αποκόψει την παραμένονσα αρνητική τάση -0,5 V.

(ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Β ΚΑΙ ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Β)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Ψηφιακό κύκλωμα

#### 4.1 Σκοπός του ψηφιακού κυκλώματος

Σκοπός του ψηφιακού κυκλώματος είναι να λαμβάνει τους δύο παλμούς από τη μεταβολή της τάσης και τρέχει ένα πρόγραμμα το οποίο λαμβάνοντας το πρώτο παλμό ξεκινά να μετρά το χρόνο μέχρι να λάβει το δεύτερο παλμό οποίος σταματά το μέτρημα. Μετά το λογισμικό εκτελεί τη πράξη σύμφωνα με το τύπο  $u=s/t$  αφού βέβαια στην αρχή μας έχει ζητήσει την απόσταση  $s$ .

#### 4.2 Αναπτυξιακό κύκλωμα

Το αναπτυξιακό είναι η ηλεκτρονική πλακέτα η οποία αποτελεί την κύρια επεξεργαστική μονάδα της κατασκευής κι αυτό γιατί έχει πάνω του τον μικροεπεξεργαστή 89C420 της Maxim ο οποίος αποτελεί την καρδιά του συστήματος μας μιας και είναι υπεύθυνος για τις πράξεις υπολογισμού εύρεσης χρόνου και ταχύτητας καθώς επίσης και της λειτουργίας του πληκτρολογίου και της οθόνης που είναι συνδεδεμένα πάνω του. Το αναπτυξιακό περιέχει πάνω του δυο σειριακές θύρες οι οποίες βγαίνουν στο πίσω μέρος του κουτιού για να είναι πρόσβασης στον χρήστη. Η μια θύρα χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του 89C420 ενώ η άλλη για την εξαγωγή των μετρήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το πληκτρολόγιο βρίσκεται επίσης πάνω στο αναπτυξιακό και συνδέεται μέσω καλωδιωταινίας πάνω στον μικροεπεξεργαστή. Το πληκτρολόγιο χρησιμοποιείται για παραμετροποίηση των δεδομένων βάση των οποίων γίνεται η πράξη υπολογισμού της ταχύτητας καθίζησης του σφαιριδίου. Εκεί είναι συνδεδεμένη και η ψηφιακή οθόνη πάνω στην οποία τυπώνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και επίσης βλέπουμε την μέτρηση του ρολογιού σε πραγματικό χρόνο. Το ρολόι μετράει λεπτά, δευτερόλεπτα και κλάσματα του δευτερολέπτου κάτι το οποίο σημαίνει υψηλή ακρίβεια στο πείραμα. Το πληκτρολόγιο και η οθόνη συνδέονται πάνω στο αναπτυξιακό με καλωδιωταινίες πάνω σε ειδικές βάσεις προκειμένου να μπορούν να βγουν στην πρόσοψη και να αντικατασταθούν από καινούργια μιας και η οθόνη είναι ιδιαίτερα επιβλαβές εξάρτημα. Τέλος πάνω στο αναπτυξιακό βρίσκεται το πλήκτρο RESET του συστήματος το οποίο είναι συνδεδεμένο στον 89C420 και βγαίνει και αυτό στην πρόσοψη.

*(ΒΛΕΠΕ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Α) και (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Α)*

### 4.3 Περιγραφή λογισμικού

Το πρόγραμμα αρχικά στέλνει στο lcd το μήνυμα <<TEI CRETE>>,DOSTE MHKOS: και περιμένει μέχρι να λάβει το μήκος από το πληκτρολόγιο. Μόλις πληκτρολογήσουμε το μήκος πατάμε μια φορά το enter. Μόλις το πατήσουμε στην πρώτη γραμμή του lcd εμφανίζεται το μήνυμα START COUNTING και περιμένει μέχρι να κοπεί η πάνω δέσμη. Μόλις κοπεί η πάνω δέσμη αρχίζει να μετράει. Κάθε 1 msec ελέγχει αν έχει κοπεί και η δεύτερη δέσμη. Μόλις αντιληφθεί ότι έχει κοπεί η δεύτερη δέσμη εμφανίζει στο lcd το μήνυμα **min:sec:msec** και στη δεύτερη γραμμή του lcd αποτυπώνει το χρονικό διάστημα που πέρασε.

Μετά για να κάνουμε reset στο σύστημα μας πατάμε μια φορά το κόκκινο μπουτόν και το πρόγραμμα πάει πάλι από την αρχή.

Η μορφή του πληκτρολογίου είναι η παρακάτω :

```
1      2      3
4      5      6
7      8      9
        0      enter
```

Το πρόγραμμα είναι το παρακάτω :

```
DEFSEG START,absolute
SEG START
org 0000h
ljmp main
org 0003h
call inter0
ljmp arx
org 0030h
```

```
START_COUNT EQU P3.4
STOP_COUNT EQU P3.5
MSG1:        DB ' <<TEI CRETE>> ',0AH,0DH
MSG1S:       DB 'DOSTE MHKOS: ',0AH,0DH
MSG2:        DB 'min:sec:msec ',0AH,0DH
MSG3:        DB ' START COUNTING ',0AH,0DH
```

```
main:        mov sp,#80h
              MOV B,#00H
              clr p2.2
              clr p2.3
              call del10ms
              mov a,#38h
              call control
              mov a,#38h
              call control
              mov a,#38h
              call control
              mov a,#38h
```

```

call control
mov a,#06h
call control
mov a,#0eh
call control
mov a,#01h
call control
mov a,#80h
call control
setb p2.3
CALL FLFP
MOV DPTR,#MSG1
call msg2lcd
clr p2.3
mov a,#0C0h
call control
setb p2.3
MOV DPTR,#MSG1S
call msg2lcd
clr p2.3
mov a,#0CCh
call control
setb p2.3
ARX:  mov r0,#0
      mov r1,#0
      mov r2,#0
      mov r3,#0
      mov r4,#0
      SETB EX0
      SETB EA
      mov p1,#11110000b
      sjmp $
inter0: mov p1,#0feh
        jb p1.4,l1
        mov a,#'1'           ;'1'
        call controla
l1:     jb p1.5,l2
        mov a,#'2'           ;'2'
        call controla
l2:     jb p1.6,l3
        mov a,#'3'           ;'3'
        call controla
l3:     mov p1,#0fdh
        jb p1.4,l5
        mov a,#'4'           ;'4'
        call controla
l5:     jb p1.5,l6
        mov a,#'5'           ;'5'
        call controla
l6:     jb p1.6,l7

```

```

        mov a,#'6'                ;'6'
        call controla
l7:     mov p1,#0fbh
        jb p1.4,l9
        mov a,#'7'                ;'7'
        call controla
l9:     jb p1.5,l10
        mov a,#'8'                ;'8'
        call controla
l10:    jb p1.6,l11
        mov a,#'9'                ;'9'
        call controla
l11:    mov p1,#0f7h              ;'RESET'
        jb p1.5,l14
        mov a,#'0'                ;'0'
        call controla
l14:    jb p1.6,l16A             ;ENTER
        CALL FLFP
        MOV DPTR,#MSG3
        call msg2lcd

syn:    JNB START_COUNT,$
        LJMP SYN3
SYN2:   JNB STOP_COUNT,SYN3
        LJMP SYN1
SYN3:   clr tf0                  ;DELAY 10 msec
        MOV TH0,#0dbh
        MOV TL0,#0ffh
        Mov TMOD,#00000001B      ;Timer0 = 16 bits
        SETB TR0
        JNB TF0,$
        inc r2
        mov a,r2
        cjne a,#99,syn2           ;990 msec
        mov r2,#00h
        inc r3
        mov a,r3
        cjne a,#59,syn2          ;60 sec
        mov r3,#00h
        inc r4
        cjne r4,#59,syn2

syn1:   clr p2.3
        mov a,#01h                ;CLEAR LCD
        call control
        setb p2.3
        call flfp
        MOV DPTR,#MSG2
        call msg2lcd

```

```

        call print
        LJMP L16
FLFP:   clr p2.3
        mov a,#80h
        call control
        setb p2.3
        RET
L16A:   LJMP L16
MSG2LCD: Clr A
        Movc A,@A+Dptr
        Inc Dptr
        call CONTROLA
        Cjne A,#0DH,MSG2LCD
        clr p2.3
        mov a,#0C0h
        call control
        setb p2.3
        ret
print:  clr p2.3
        mov a,#0C1h
        call control
        setb p2.3
        mov a,r4
        CALL PRINT1
        clr p2.3
        mov a,#0C5h
        call control
        setb p2.3
        mov a,r3
        CALL PRINT1
        clr p2.3
        mov a,#0C9h
        call control
        setb p2.3
        mov a,r2
PRINT1: call hex2asc
        mov a,r0
        call controla
        mov a,r1
        call controla
        ret
hex2asc: mov b,#10
        div ab
        add a,#30h
        mov r0,a
        mov a,b
        add a,#30h
        mov r1,a
        ret
I16:    CALL DEL_KEY

```

```

reti:      reti
control:  mov p0,a
              setb p2.5
              call DEL10mS
              clr p2.5
              ret
controlA: mov p0,a
              setb p2.5
              call DEL50MS
              clr p2.5
              ret
DEL_KEY:  MOV R4,#50
              SJMP LOOP
DEL50mS:  MOV R4,#05           ;DELAY 50m SEC
              SJMP LOOP
DEL10mS:  MOV R4,#01H
LOOP:      clr tf0           ;DELAY 10mSEC
              MOV TL0,#LOW(-5000)
              MOV TH0,#HIGH(-5000)
              Mov TMOD,#21h
              SETB TR0
              JNB TF0,$
              DJNZ R4,LOOP
              RET
              end

```

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Μετρήσεις αποτελέσματα

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει μετρήσεις και αποτελέσματα από δοκιμές που κάναμε όταν ολοκληρώσαμε τη κατασκευή.

Η απόσταση είναι σταθερή στα 0,6m

Διάμετρος σφαίρας (mm)	Χρόνος (s)
Σφαιρίδιο 0,5	25,5
Σφαιρίδιο 1	26
Σφαιρίδιο 1,5	26,3
Σφαιρίδιο 2	26,6
Σφαιρίδιο 2,5	27

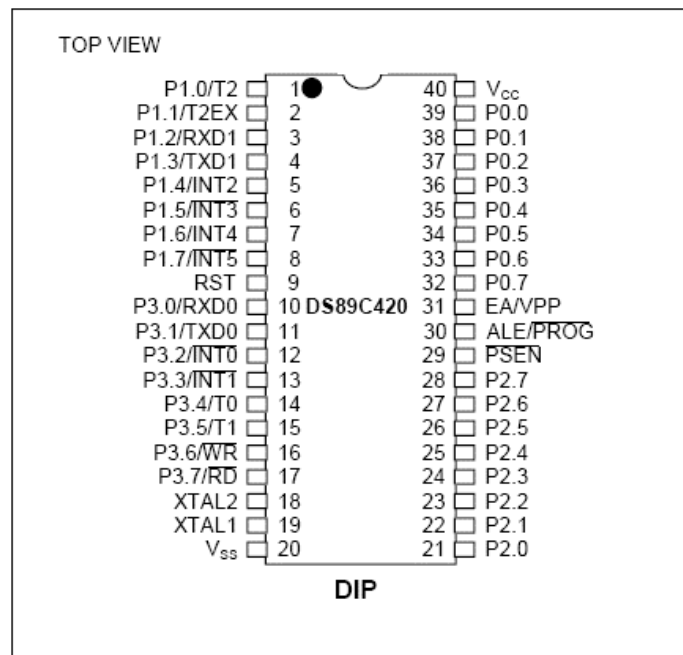
Μετά από σύγκριση με αποτελέσματα μετρήσεων που είχε κάνει το εργαστήριο Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις με τη κατασκευή είχαν πολύ μεγάλη ακρίβεια.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### DATA SHEETS, ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΕΣ

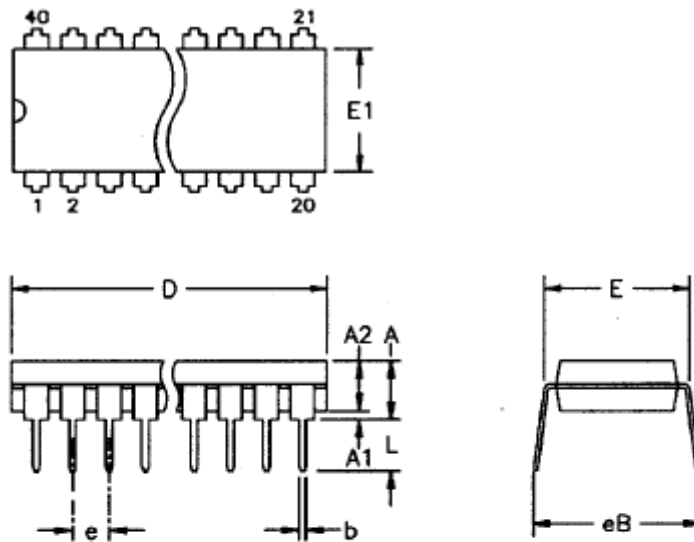
#### Α) Αναπτυξιακό κύκλωμα

Παρακάτω βλέπουμε σε ποιους ακροδέκτες συνδέονται το πληκτρολόγιο (ακροδέκτες 1,2,3,4,5,6,7,8), η οθόνη (ακροδέκτες 23,24,26, 32,33 ,34,35, 36,37 , 38,39)και το πλήκτρο RESET (ακροδέκτης 9)στον 89C420. Επίσης φαίνονται και οι ακροδέκτες στους οποίους έρχονται οι παλμοί έναρξης και παύσης του μετρητή οι οποίοι είναι ο P3.4 (T0 ακροδέκτης 14) και ο P3.5(T1 ακροδέκτης 15).



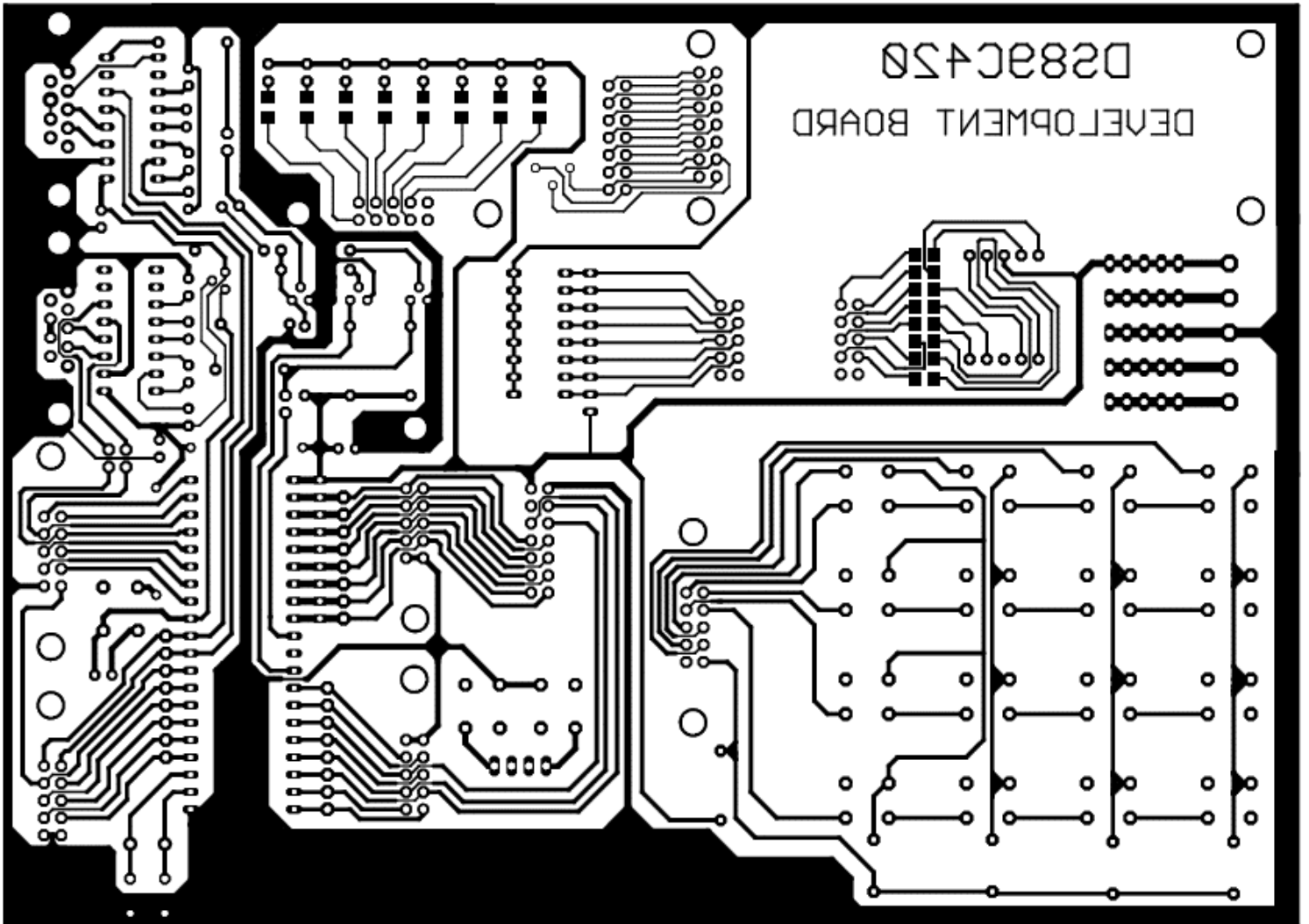
Σχήμα 18 Ολοκληρωμένο





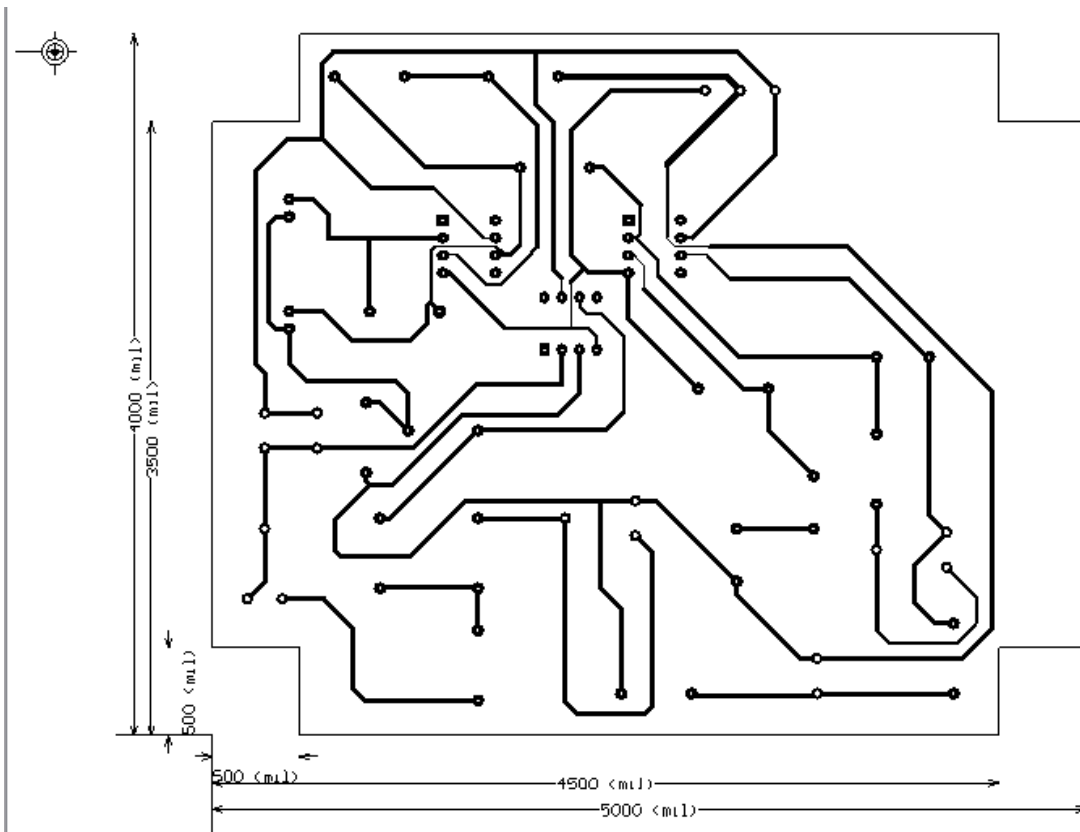
PKG DIM	40-PIN	
	MIN	MAX
A	—	0.200
A1	0.015	—
A2	0.140	0.160
b	0.014	0.022
c	0.008	0.012
D	1.980	2.085
E	0.600	0.625
E1	0.530	0.555
e	0.090	0.110
L	0.115	0.145
eB	0.600	0.700

Σχήμα 19 Ολοκληρωμένο

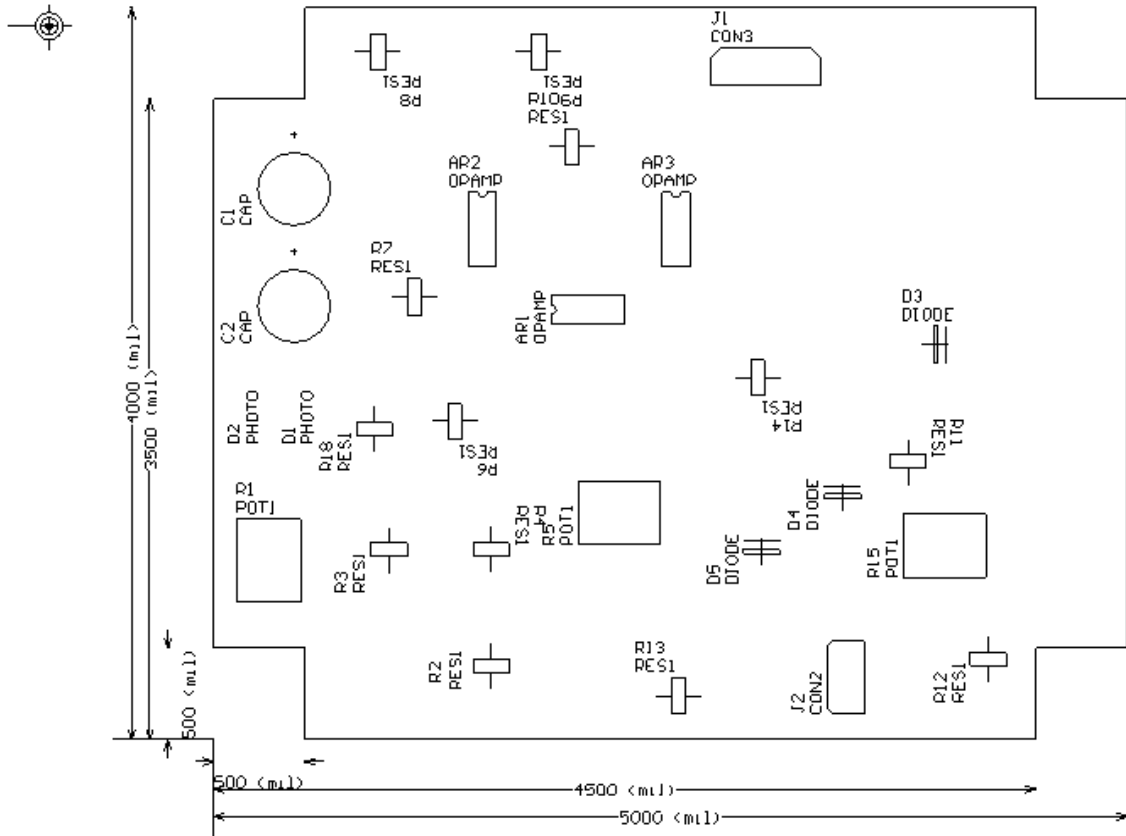


Σχήμα 20 PCB Αναπτυξιακού Κυκλώματος

## B) Φωτοανιχνευτής



Σχήμα 21 Κυκλωματικό σχέδιο Φωτοανιχνευτή



Σχήμα 22 Εξαρτήματα Φωτοανιχνευτή

## Γ) Laser

Τα laser που χρησιμοποιήσαμε έχουν επιλεγεί με βασικό κριτήριο το υγρό που θα περιέχει η δεξαμενή μας κι αυτό γιατί θα πρέπει να έχουν το κατάλληλο μήκος κύματος ώστε η δέσμη να διαπεράσει το δοχείο με το υγρό και να φωτίσει τις φωτοδιόδους. Έτσι λοιπόν δεδομένου ότι η δεξαμενή περιέχει διαφανές παχύρευστο υγρό επιλέξαμε laser με μήκος κύματος 635nm με ισχύ εξόδου 4.5mW. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά των laser.

### Laser Module Specifications



- Aluminum Housing:  $\varnothing 11.00\text{mm} \times 42\text{mm}$
- Beam Diameter: 4mm x 0.6mm
- Axis Deviation: 15mrad max.
- Divergence: 0.6mrad ( $\perp$ ) / 1.8mrad ( $//$ )
- Operating Temperature: -10 to 60°C
- Operating Current: 55mA typ.
- Operating Voltage: -5VDC (nominal)
- Safety Class: Class 3R

Item Number	Type	Wavelength	Power	Housing	Beam Diameter	Focal Range	Axis Deviation	Collimation	Divergence	Operating Temperature	Operating Current	Operating Voltage	Safety Class
CPS182	Visible	635nm	4.5mW	Aluminum, $\varnothing 11.00\text{mm} \times 42\text{mm}$	4mm x 0.6mm	-	15mrad max.	-	0.6mrad ( $\perp$ ) / 1.8mrad ( $//$ )	-10 to 60°C	55mA typ.	-5VDC (nominal)	3R

Σχήμα 23 Laser τεχνικά χαρακτηριστικά

## Collimator Pen

CPS182

### Description

Type number: CPS182  
Order number: 432211375971  
Date of first issue: Aug-27-98  
Date of change: Sep-01-98

### Operational Hazard Semiconductor Laser Diode

This laser pen emits radiation that is visible to the human eye. When in use, do not look directly into the device. Direct viewing of laser diode emission at close range may cause eye damage, especially in conjunction with collimating lenses. Extreme care must be taken to prevent the beam from being viewed directly or through external optics or mirrors.

### Properties

Housing: Aluminum  
Lens: Glass  
Type of laser: N-type



### Features

Operating temperature: -10 to 60 °C  
Storage temperature: -40 to 85 °C  
Application: Test & Measurement  
Alignment

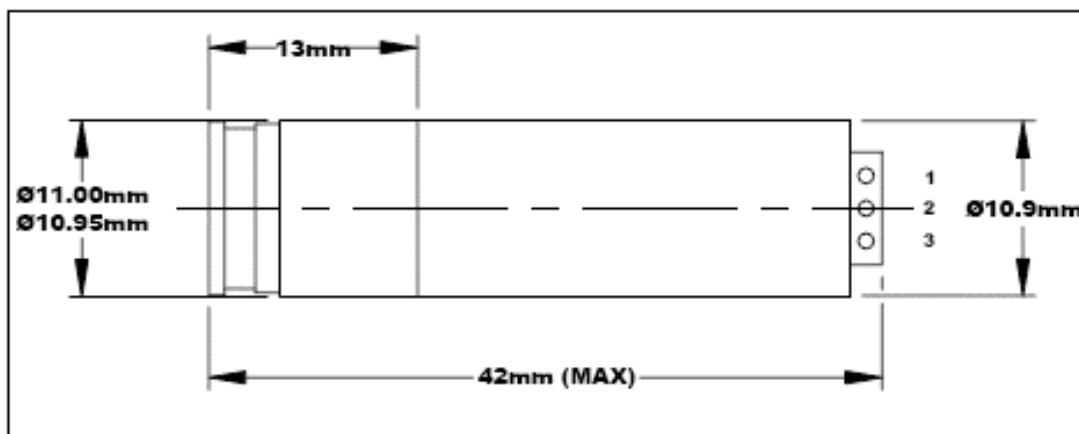
This product conforms to all applicable standards of FDA regulations (DHHS, 21 CFR subchapter J). In combination with a power supply the laser module falls within Safety Class 3B. Due to the small size of these devices, the required warning is affixed to the box containing the laser modules.

### Quick reference data

$T_{case} = (25 \pm 2) ^\circ C$   $P_o = 4.0 mW$ , unless otherwise specified

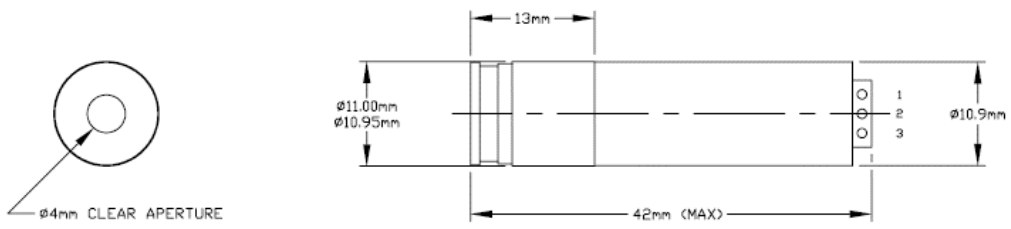
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	unit
$\lambda$	Wavelength			635	640	nm
$P_o$	Optical output power	At 100mm from pen	4.0		4.5	mW
$d_{\perp x}$	Beam diameter perpendicular x parallel to the laser stripe	FWHM at pen exit		4		mm
$d_{//}$				0.6		mm
$\theta_{\perp x}$	Beam divergence	Including natural divergence			0.6	mrad
$\theta_{//}$					1.8	mrad
$\alpha_{om}$	Optical-mechanical axis deviation			7	15	mrad
$d_{ca}$	Clear aperture			4		mm
$I_{op}$	Operating current laser pen			55		mA
$V_{op}$	Operating voltage	With reference to ground	-4.5	-5	-5.5	V

### Laser pen dimensions



### Pinning

- 1=-5V
- 2=Not connected
- 3=Ground



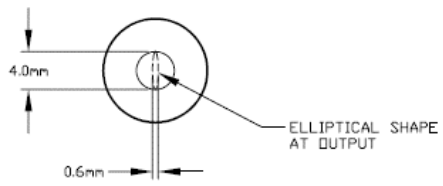
$\phi 4\text{mm}$  CLEAR APERTURE

### CPS182

$\lambda=635\text{nm}$ ,  $P=4.5\text{mW}$

### CONNECTIONS

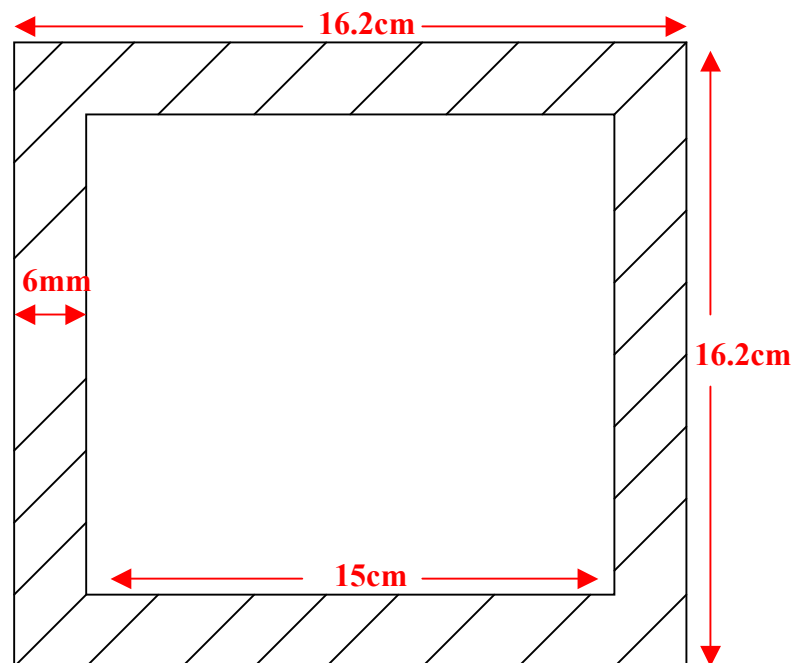
- 1 = -5V
- 2 = NOT CONNECTED
- 3 = GROUND



## Δ) Δεξαμενή

Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίστανται η δεξαμενή και οι δυο σωλήνες με τις αντίστοιχες διαστάσεις τους.

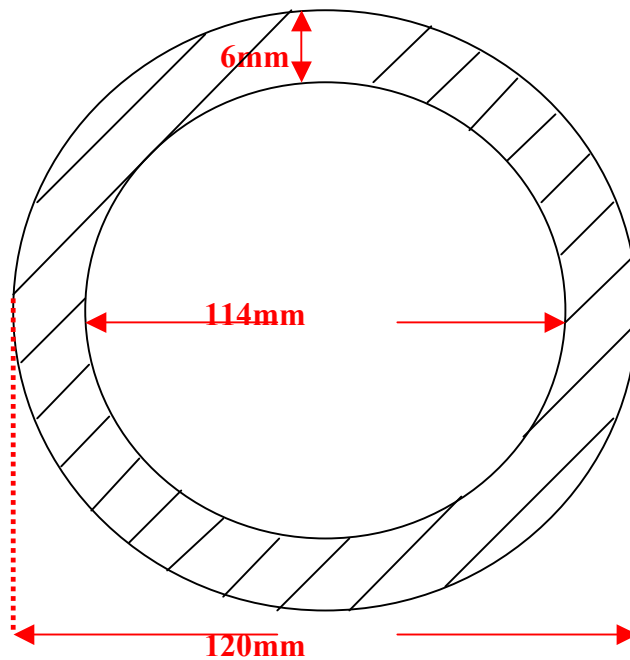
### ΔΕΞΑΜΕΝΗ



Σχήμα 24 Τεχνικά χαρακτηριστικά δεξαμενής

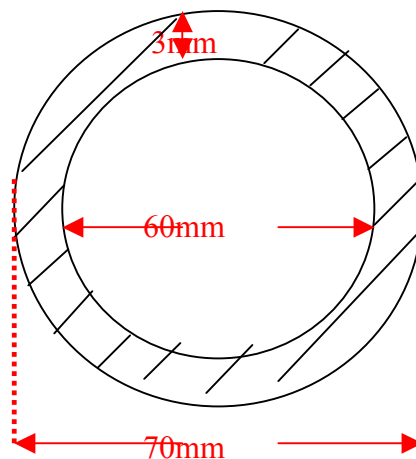


## ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ



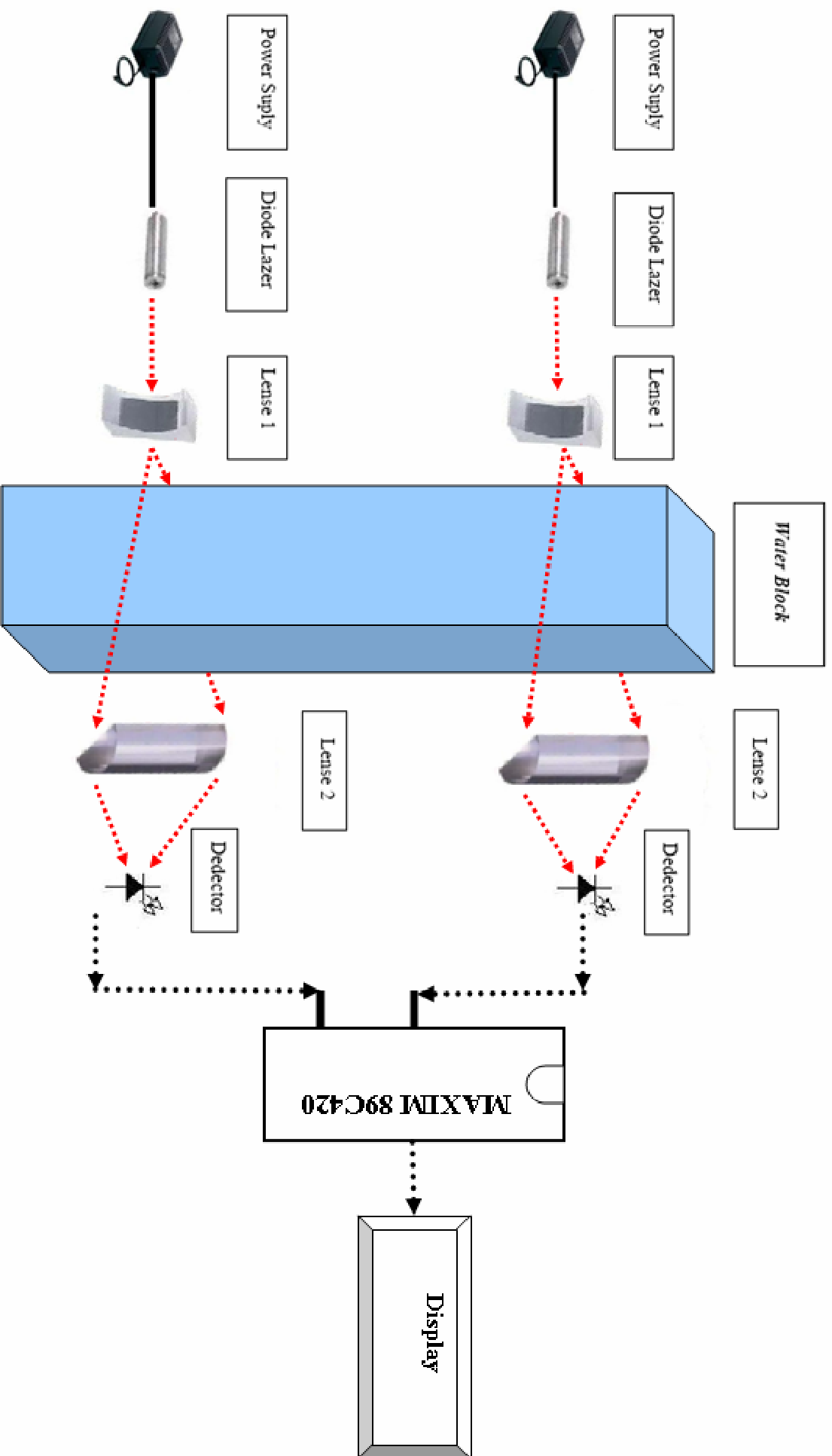
Σχήμα 25 Τεχνικά χαρακτηριστικά σωλήνα

## ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ



Η πειραματική δεξαμενή αποτελεί την τοποθεσία στην οποία πραγματοποιείται το πείραμα, είναι τοποθετημένη πάνω σε ειδική βάση πάνω στην οποία είναι σταθεροποιημένη η ίδια αλλά και το υπόλοιπο σύστημα μέτρησης. Στο κάτω μέρος της υπάρχει μια βαλβίδα η οποία χρησιμοποιείται για να βγαίνει το υγρό ώστε να καθαριστεί εσωτερικά για να μην υπάρχουν ακαθαρσίες εσωτερικά και δημιουργούν πρόβλημα στις δέσμες των Laser.

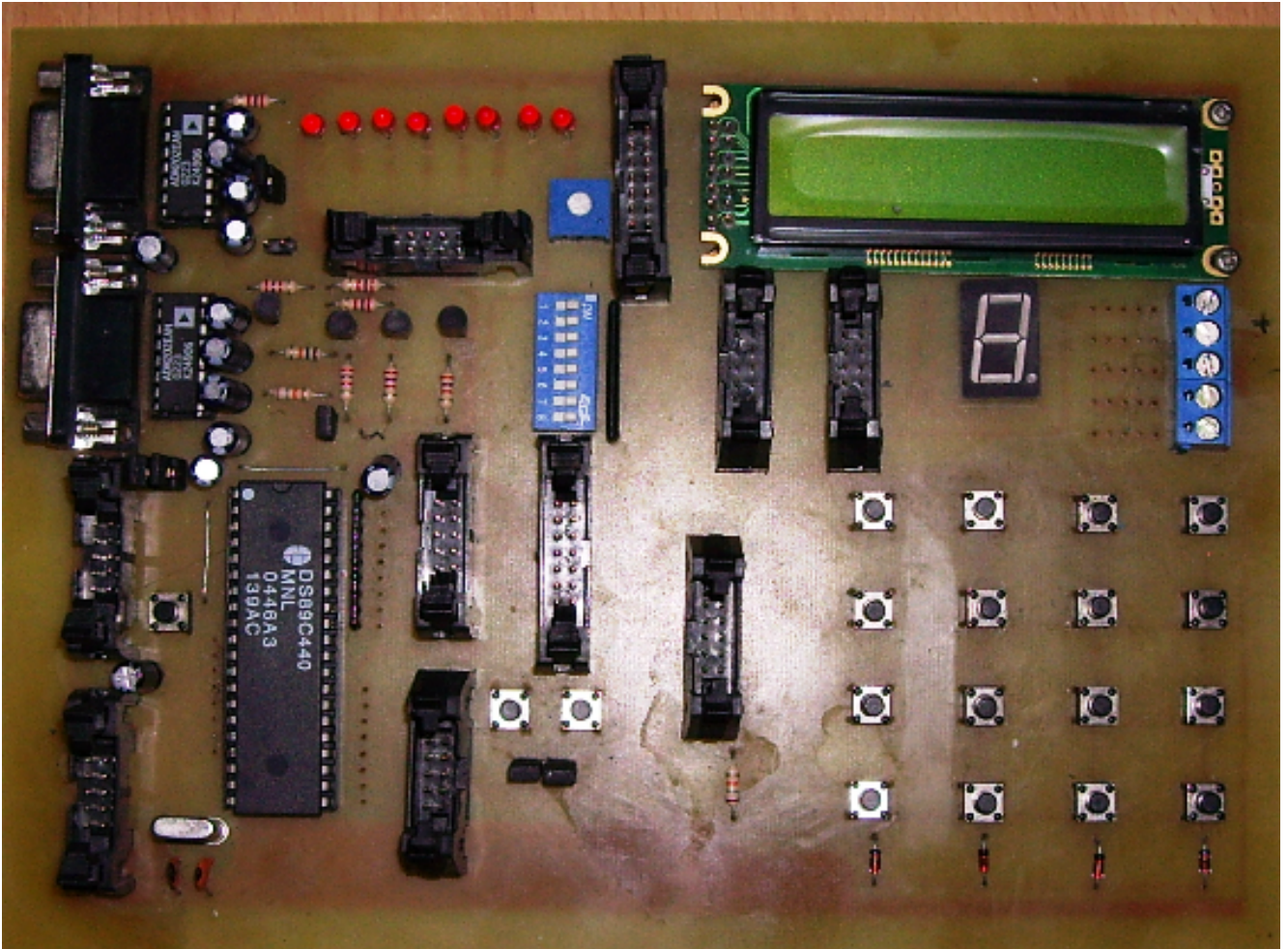




## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

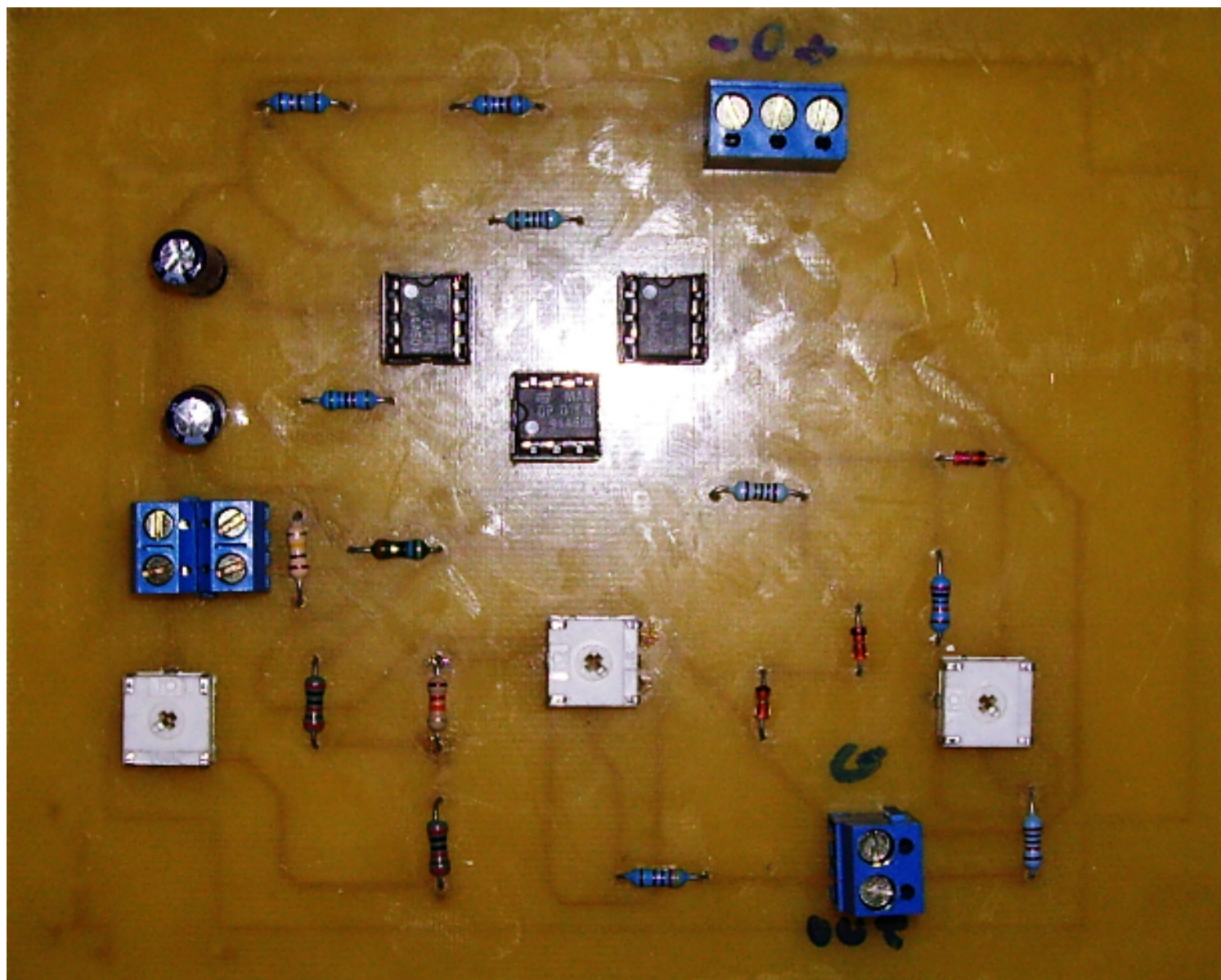
### ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ

#### Α) Φωτογραφίες αναπτυξιακού κυκλώματος



Φωτογραφία 1 Αναπτυξιακό Κύκλωμα

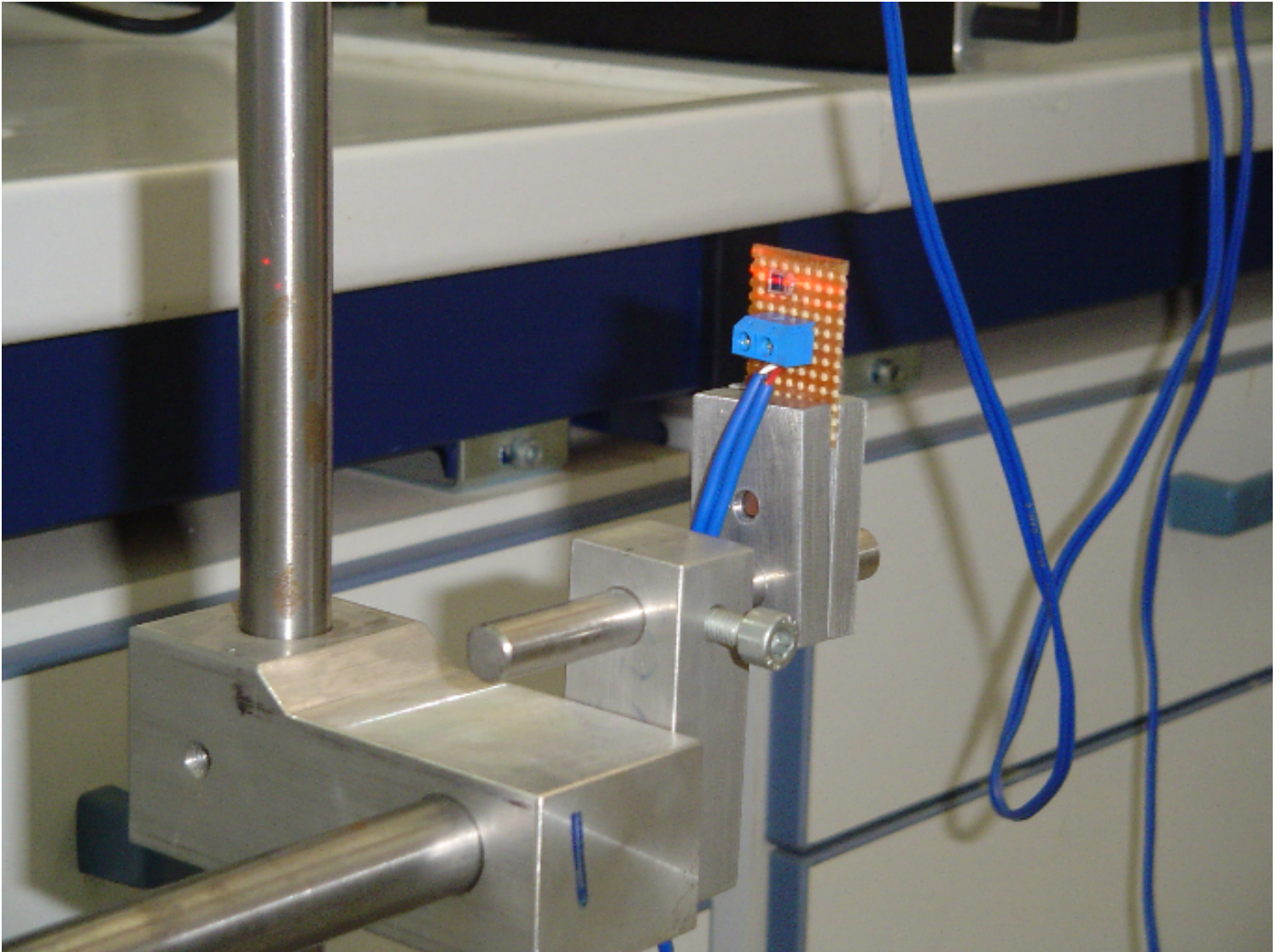
## Β) Φωτοανιχνευτής



Φωτογραφία 2 Φωτοανιχνευτής

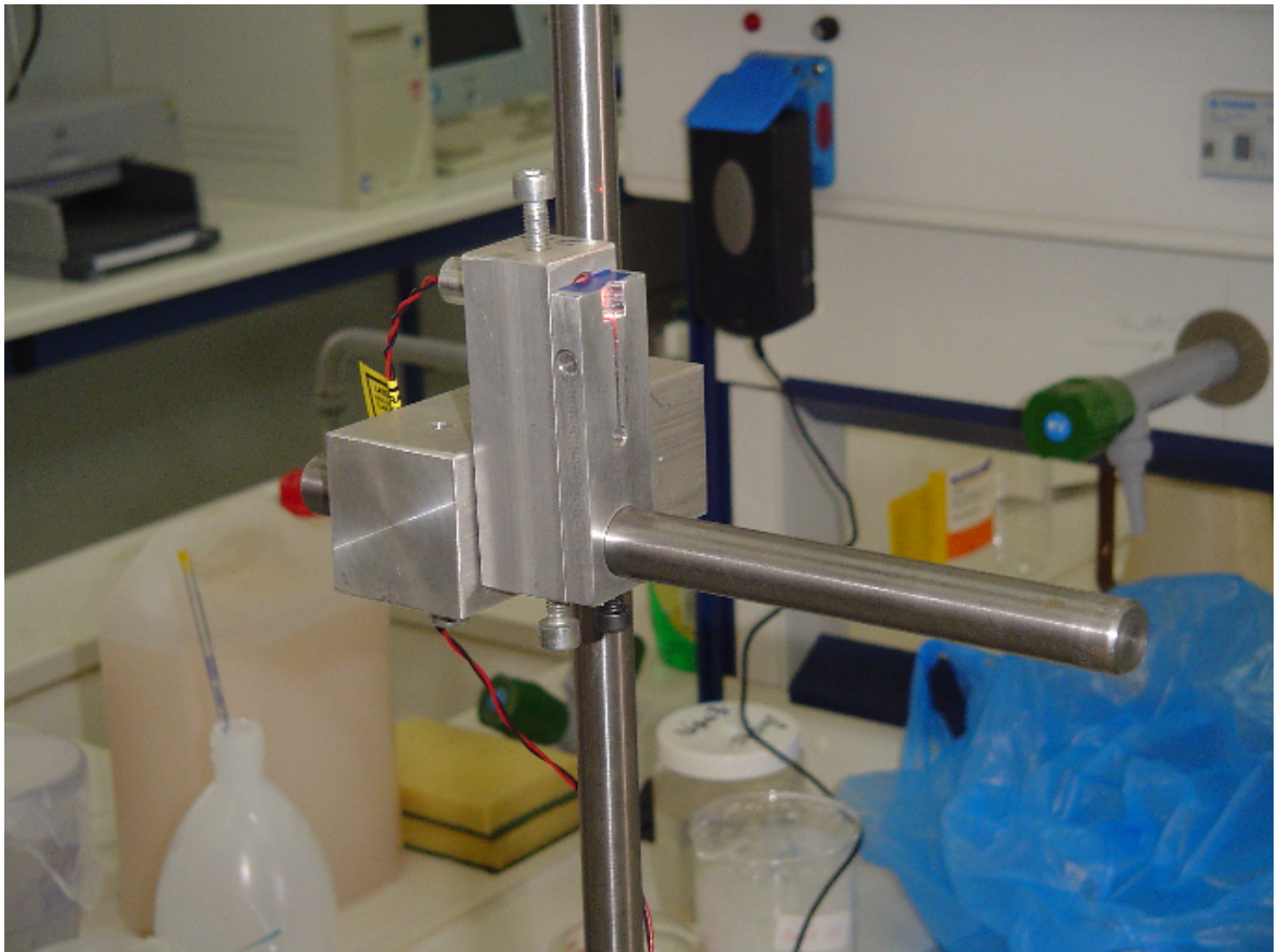


### Γ) Η Φωτοδίοδος



Φωτογραφία 3 Φωτοδίοδος στηριγμένη πάνω στη βάση

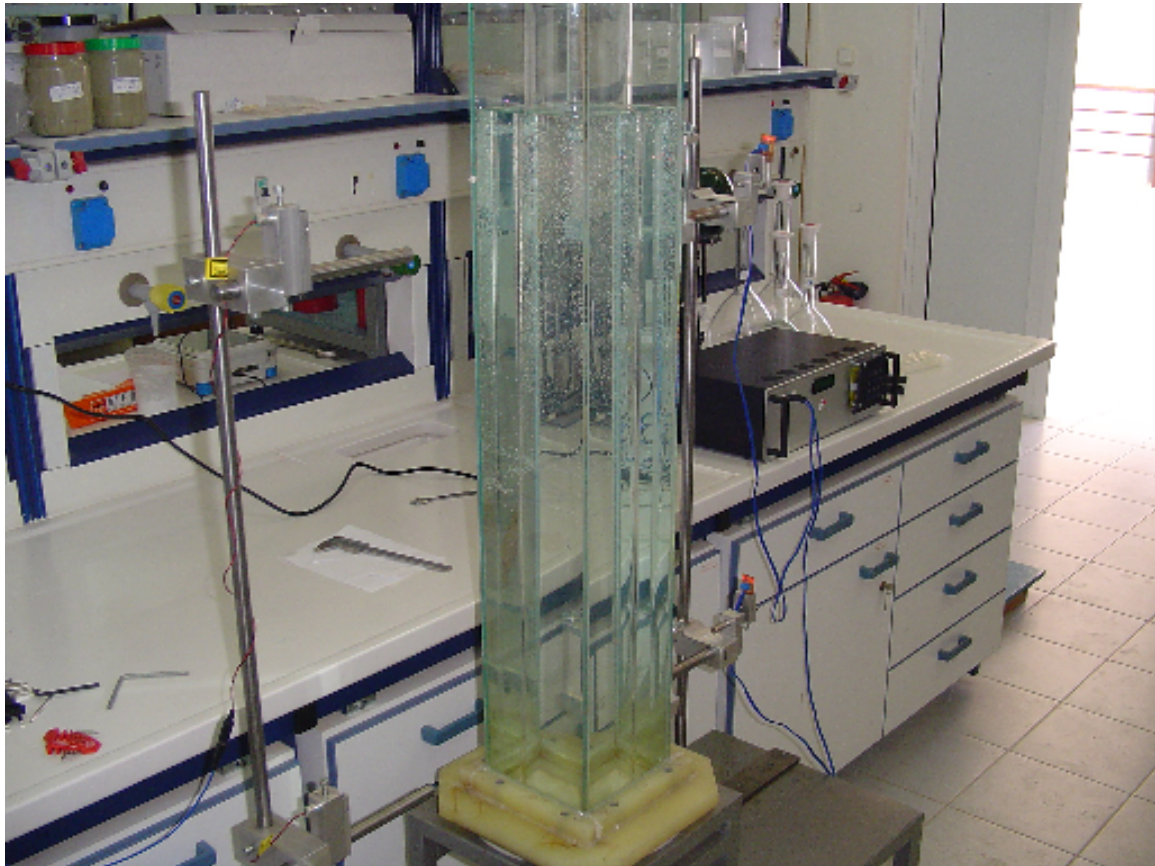
**Δ) Laser**



**Φωτογραφία 4 Laser στηριγμένο πάνω στη βάση**



## Ε) Δεξαμενή



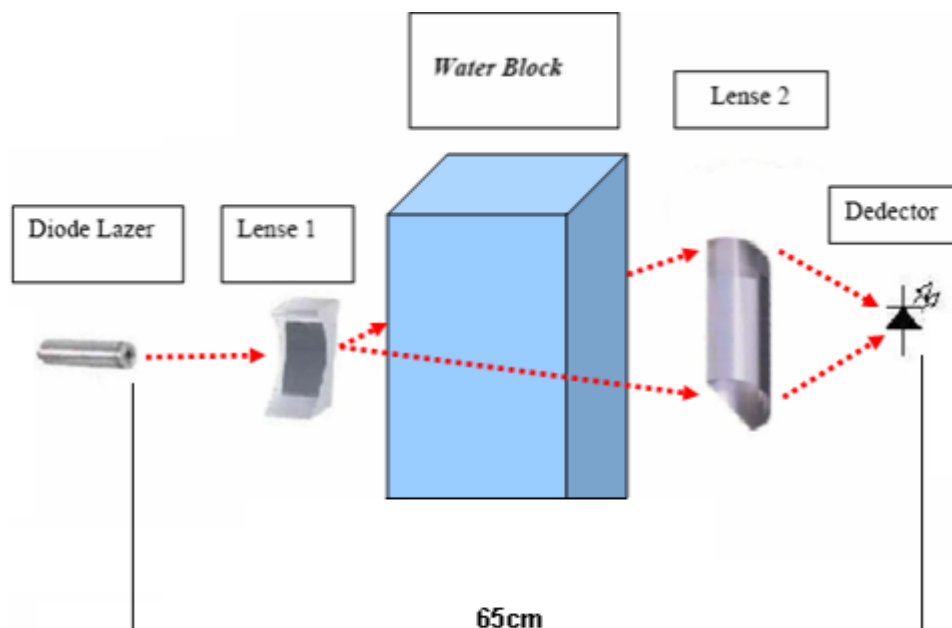
Φοτογραφία 5 Δεξαμενή



## ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ

### A) Ρύθμιση πρισμάτων και Laser και προετοιμασία λειτουργίας συσκευής.

Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε αναλυτικά τον τρόπο ρύθμισης της κατασκευής καθώς επίσης και την απαραίτητη προετοιμασία πριν ξεκινήσουμε τις πειραματικές μετρήσεις. Αρχικά πρέπει να ρυθμίσουμε τις θέσεις των Laser και των πρισμάτων. Η πηγή φωτός πρέπει να βρίσκεται καλά βιδωμένη στην τελευταία υποδοχή της ράγας στήριξης όπως επίσης και το τμήμα που περιέχει τα πρίσματα από την άλλη μεριά της κατασκευής δηλαδή οι δυο κάθετοι σωλήνες στήριξης να είναι όσο πιο κοντά γίνεται. Ενδιάμεσα παρεμβάλουμε την δεξαμενή με το υγρό η οποία πρέπει να είναι κάθετη τοποθετημένη ως προς τα πρίσματα και ως προς τις δέσμες των Laser. Το πρίσμα 1 πρέπει να εφάπτεται πάνω στην πηγή φωτός έτσι ώστε το αποτέλεσμα που θα εξέρχεται να είναι μια λεπτή οριζόντια γραμμή η οποία θα προσπίπτει πάνω στην δεξαμενή. Η δεξαμενή πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο πρίσμα 2. Η απόσταση μεταξύ τις φωτοδιοδου και του πρίσματος 2 είναι συγκεκριμένη και πρέπει να είναι καλά ρυθμισμένη ώστε να λειτουργήσει σωστά το μετρητικό σύστημα. Η εστιακή απόσταση του πρίσματος δηλαδή η απόσταση που χρειάζεται το πρίσμα από την στιγμή που προσπίπτει πάνω του η δέσμη φωτός μέχρι να την εστιάσει πάνω στην φωτοδιοδο είναι 14,2 cm. Στο σχήμα παρακάτω βλέπουμε την διάταξη των πρισμάτων και των Laser.

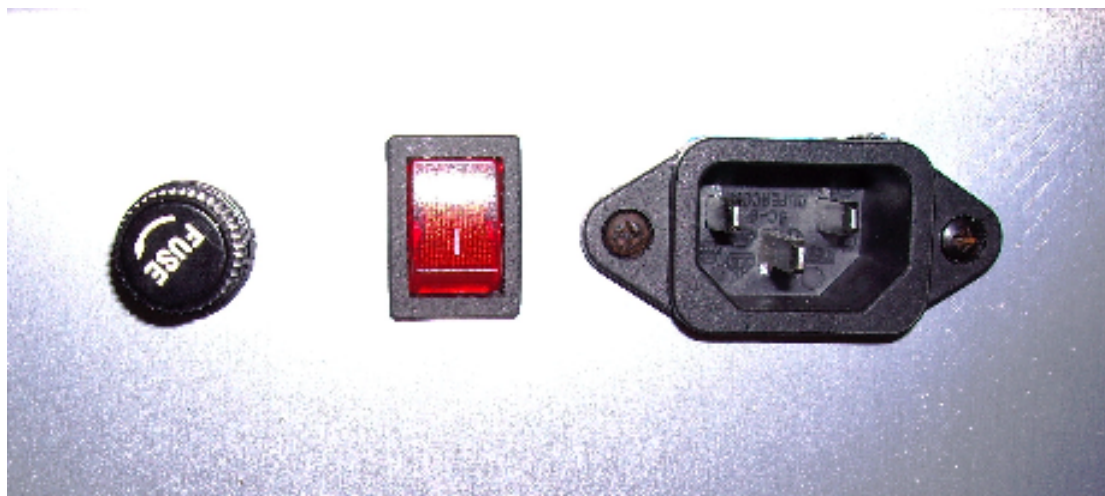


## **B) Σύνδεση Τροφοδοσίας**

Για την λειτουργία των Laser έχουμε έναν μετασχηματιστή ο οποίος έχει τάση εξόδου +5V και μπορεί να τροφοδοτήσει και τα δυο Laser με την χρήση ενός splitter. Επίσης υπάρχει ένα καλώδιο τροφοδοσίας της κεντρικής μονάδας που συνδέεται στο πίσω μέρος αυτής. Επίσης συνδέουμε τα καλώδια των φωτοдиодων στην κεντρική μονάδα, η πάνω φωτοдиодος συνδέεται στην υποδοχή START ενώ η κάτω στην υποδοχή STOP (βλέπε φωτογραφία πρόσωσης)

## **Γ) Ενεργοποίηση συσκευής**

Αφού συνδέσουμε τις τροφοδοσίες και δούμε ότι τα Laser λειτουργούν τότε ενεργοποιούμε την κεντρική μονάδα με την χρήση του πλήκτρου ON/OFF το οποίο βρίσκεται στο πίσω μέρος της, όταν το πλήκτρο πατηθεί σωστά θα πάρει κόκκινο χρώμα και θα δούμε την οθόνη που βρίσκεται στην πρόσωση να λειτουργεί.



## **Δ) Οδηγίες Λειτουργίας**

Μόλις ενεργοποιηθεί η συσκευή θα δούμε στην οθόνη τυπωμένο το μήνυμα <ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ> ,<<ΔΩΣΤΕ ΜΗΚΟΣ:>>, αυτό σημαίνει ότι βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής και περιμένει να του ορίσουμε την απόσταση που απέχουν τα δυο Laser συνεπώς το ύψος το οποίο μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε, με την χρήση του πληκτρολογίου εισάγουμε την τιμή σε cm και πατάμε το πλήκτρο ENTER το οποίο είναι στο πληκτρολόγιο με το σύμβολο #. Αμέσως μόλις το πατήσουμε στην οθόνη αναγράφεται το κείμενο START COUNTING το οποίο μας δείχνει ότι όλα είναι έτοιμα και ότι το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής και περιμένει να γίνει η εισαγωγή του σφαιριδίου για να ξεκινήσει αυτόματα την μέτρηση. Μόλις ολοκληρωθεί η καθίζηση του σφαιριδίου τυπώνεται το αποτέλεσμα της μέτρησης

στην οθόνη και την διατηρεί τυπωμένη μέχρι να πατηθεί το πλήκτρο RESET. Έπειτα κάνουμε την ίδια διαδικασία για την επόμενη μέτρηση.



**Φωτογραφία 6 Πρόσοψη κατασκευής**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. ΦΙΛΤΡΑ LC, ΕΝΕΡΓΑ, ΨΗΦΙΑΚΑ, ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ  
(Σ.Α.Σ. ΠΑΚΤΙΤΗΣ)
2. ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (JASPIT SINGH)
3. LIGHT LASERS AND OPTICS (JOHN H. MAULDIN)
4. THE PRINCIPLES OF NONLINEAR OPTICS (Y.R. SHEN)
5. OPTICS (EUGENE HECHT)
6. ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (ΑΛΕΞΑΝΔΡΗΣ Ν. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ)

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 .....	10
Σχήμα 2 .....	10
Σχήμα 3 .....	12
Σχήμα 4 .....	14
Σχήμα 5 .....	16
Σχήμα 6 .....	20
Σχήμα 7 .....	21
Σχήμα 8 .....	22
Σχήμα 9 .....	23
Σχήμα 10 .....	24
Σχήμα 11 .....	26
Σχήμα 12 .....	27
Σχήμα 13 .....	28
Σχήμα 14 .....	30
Σχήμα 15 .....	31
Σχήμα 16 .....	34
Σχήμα 17 .....	35
Σχήμα 18 Ολοκληρωμένο.....	60
Σχήμα 19 Ολοκληρωμένο.....	61
Σχήμα 20 PCB Αναπτυξιακού Κυκλώματος .....	62
Σχήμα 21 Κυκλωματικό σχέδιο Φωτοανιχνευτή .....	63
Σχήμα 22 Εξαρτήματα Φωτοανιχνευτή .....	64
Σχήμα 23 Laser τεχνικά χαρακτηριστικά .....	65
Σχήμα 24 Τεχνικά χαρακτηριστικά δεξαμενής.....	68
Σχήμα 25 Τεχνικά χαρακτηριστικά σωλήνα.....	69

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Κύκλωμα ανιχνευτή .....	45
Εικόνα 2 Φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης Δεληγιάννη.....	46
Εικόνα 3 Φίλτρο ζώνης διέλευσης Δεληγιάννη με ενίσχυση 1. ....	49
Εικόνα 4 Κύκλωμα Φίλτρου .....	51
Εικόνα 5 Μέθοδος μέτρησης του Q.....	52

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

Φωτογραφία 1 Αναπτυξιακό Κύκλωμα .....	72
Φωτογραφία 2 Φωτοανιχνευτής .....	73
Φωτογραφία 3 Φωτοдиодος στηριγμένη πάνω στη βάση .....	74
Φωτογραφία 4 Laser στηριγμένο πάνω στη βάση .....	75
Φωτογραφία 5 Δεξαμενή .....	76
Φωτογραφία 6 Πρόσοψη κατασκευής .....	79