



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών  
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Πτυχιακή εργασία

Τίτλος: ``Οπτοηλεκτρονική διάταξη για την  
απομακρυσμένη ανίχνευση ανθρώπινης φωνής και  
καρδιακών παλμών``

Φρογάκης Σταύρος

Παναγιωτόπουλος Βασίλης

Επιβλέπων: Τζιανάκη Ειρήνη



## Ευχαριστίες

Αισθανόμαστε την ανάγκη να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στο Τ.Ε.Ι Κρήτης και συγκεκριμένα στο τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών στα Χανιά και στο τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής στο Ρέθυμνο, και συγκεκριμένα το εργαστήριο ‘‘Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας’’ για την προσφορά τους στην εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας.

Θα θέλαμε ακόμα να ευχαριστήσουμε όλους τους καθηγητές και φοιτητές που συνέβαλαν στην επίτευξη της εργασίας, με τις σημαντικές και χρήσιμες πληροφορίες τους.

Επίσης, θέλουμε να ευχαριστήσουμε από καρδιάς την επιβλέπουσα καθηγήτριά μας κυρία Τζιανάκη Ειρήνη για την ανάθεση αυτής της εργασίας, την αμέριστη εμπιστοσύνη που μας έδειξε, την υπομονή της, όπως επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της καθ’ όλη τη διάρκεια της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, εκφράζουμε την ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειές μας, για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας, που πέρα από τις γνώσεις που πήραμε, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στο να αποκτήσουμε ο καθένας ξεχωριστά, μία ολοκληρωμένη προσωπικότητα.

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	
Περίληψη.....	1
Abstract.....	2
Εισαγωγή.....	3
<b>1. Κεφάλαιο – Θεωρητικό υπόβαθρο .....</b>	<b>5</b>
1.1. Χαρακτηριστικά Η/Μ κύματος .....	5
1.2. Ανάκλαση – Διάθλαση φωτός .....	6
1.2.1. Ανάκλαση.....	6
1.2.2. Διάθλαση.....	7
1.3. Ιδιότητες του φωτός .....	9
1.3.1. Πόλωση.....	9
1.3.2. Συμβολή.....	11
1.3.3. Περίθλαση.....	12
1.4. Εισαγωγή στα laser .....	13
1.5. Τα βασικά μέρη ενός laser.....	15
1.6. Ιδιότητες της ακτινοβολίας laser .....	16
1.6.1. Κατευθυντικότητα .....	16
1.6.2. Μονοχρωματικότητα.....	17
1.6.3. Συμφωνία .....	17
1.6.4. Φωτεινότητα .....	19
1.7. Κατηγορίες συστημάτων laser .....	19
1.8. Ακουστικά κύματα .....	21

<b>2. Κεφάλαιο – Ιστορική αναδρομή.....</b>	<b>24</b>
2.1. Φωτόφωνο .....	24
2.2. Συμβολομετρία .....	25
2.3 Μέθοδος ανίχνευσης της μετατόπισης .....	26
<b>3. Κεφάλαιο – Μεθοδολογία.....</b>	<b>28</b>
3.1. Ανιχνευτές φωτός.....	28
3.1.1. Φωτοαντίσταση .....	28
3.1.2. Φωτοδίοδος .....	31
3.1.3. Φωτοτρανζίστορ .....	32
3.2. Ενισχυτικά στοιχεία .....	32
3.2.1. Το τρανζίστορ 2N3904 .....	32
3.2.2. Ο τελεστικός ενισχυτής LM386 .....	32
3.3. Ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς .....	34
3.3.1. Το μικρόφωνο .....	34
3.3.2. Το μεγάφωνο .....	37
3.4. Το λογισμικό Audacity .....	37
3.5. Αρχή λειτουργίας του πειράματος .....	39
<b>4. Κεφάλαιο – Πειραματική διαδικασία.....</b>	<b>42</b>
4.1. Έλεγχος δοκιμαστικής πειραματικής διάταξης .....	42
4.2. Η κύρια πειραματική διάταξη – Αποτελέσματα .....	45
4.3. Αποτελέσματα πειράματος υπό πραγματικές συνθήκες .....	49
<b>5. Κεφάλαιο –Καταγραφή καρδιακών παλμών .....</b>	<b>52</b>
5.1. Η λειτουργία της καρδιάς .....	52

5.2. Μέθοδοι ανίχνευσης καρδιακών τόνων .....	54
5.2.1. Στήθοσκόπιο .....	54
5.2.2. Φωνοκαρδιογράφημα .....	55
5.2.3. Ηλεκτροκαρδιογράφημα .....	56
5.3. Προηγούμενες πειραματικές εργασίες .....	58
5.4. Αποτελέσματα ανίχνευσης καρδιακών παλμών .....	60
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>64</b>

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως βασικό σκοπό την κατασκευή μιας απλής και οικονομικής οπτο-ηλεκτρονικής συσκευής για την ανίχνευση και καταγραφή ηχητικών σημάτων από απόσταση αρκετών μέτρων. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιεί ως πηγή μια χαμηλής ισχύος δέσμη laser, η οποία ανακλάται από μία ανακλαστική επιφάνεια, πίσω από την οποία παράγεται το ηχητικό σήμα που πρόκειται να καταγραφεί. Το ηχητικό σήμα προκαλεί δονήσεις στην επιφάνεια, οι οποίες προκαλούν με τη σειρά τους τη μετακίνηση της ανακλώμενης δέσμης laser πάνω στον ανιχνευτή. Το ανιχνευόμενο σήμα τελικά καταγράφεται ως μεταβολές της έντασης του ανακλώμενου φωτός και στο τελικό στάδιο μετατρέπεται πάλι σε ηχητικό σήμα. Ο μοναδικός περιορισμός για την εφαρμογή της παρούσας διάταξης είναι ότι η επιφάνεια χρειάζεται να είναι ανακλαστική. Η οπτοηλεκτρονική αυτή διάταξη χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για την καταγραφή αρχικά ενός μουσικού κομματιού και στη συνέχεια των ανθρώπινων φωνών σε πραγματικές συνθήκες. Ο έλεγχος της λειτουργίας της διάταξης γίνεται για ανακλαστικές επιφάνειες από διαφορετικά υλικά, γυαλί και plexiglass. Ένας λεπτομερής έλεγχος της βέλτιστης λειτουργίας της διάταξης πραγματοποιείται σαν συνάρτηση των παραμέτρων της δέσμης laser - μέγεθος, ένταση - καθώς και της επίδρασης που έχει η απόσταση του παραγόμενου ήχου από την ανιχνευτική επιφάνεια. Ως εφαρμογή, η οπτοηλεκτρονική συσκευή χρησιμοποιήθηκε με εξαιρετικά ικανοποιητική απόδοση στην ανίχνευση και καταγραφή των παλμών της καρδιάς ενός ανθρώπου, μέσω της ενσωμάτωσης ενός λεπτού καθρέπτη πάνω από τον καρπό του χεριού του. Προβλήματα σταθεροποίησης που προκύπτουν μπορούν να λυθούν με περαιτέρω μελέτη στο μέλλον. Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα των πειραμάτων προσφέρουν τη δυνατότητα χρήσης της οπτοηλεκτρονικής αυτής διάταξης ως όργανο μέτρησης των ανθρώπινων καρδιακών παλμών.

## **Abstract**

The main purpose of this thesis is the construction of a simple and low cost opto-electronic device for the remote detection and recording of audio signals, several of meters away. This device uses a low-power laser beam, as a source, which is reflected by a reflective surface, where behind it, an audio signal is produced. The audio signal causes vibrations on the surface, which in turn causes the movement of the reflected laser beam onto the detector. The detected signal eventually is recorded as changes in the intensity of the reflected beam and finally is converted back into sound signal. The only constraint on the implementation of this device is that the surface needs to be reflective. Initially the optoelectronic device is successfully used to record a music track and then human voices under real conditions. Testing of the device operation is made for reflective surfaces of different materials, glass and plexiglass. A detailed review of the optimal operation of the device occurs as a function of the parameters of the laser beam - size, intensity - and the influence of the distance of the sound source from the probing surface. As an application, the optoelectronic device was used, with satisfactory performance in the detection and recording of the human heartbeats, by incorporating a thin mirror above the wrist of the hand. Stabilization problems that arise can be resolved with further study in the future. The encouraging results of the experiments offer the possibility of using this optoelectronic device as an instrument for the measurement of human heartbeats.



## Εισαγωγή

Η τεχνική της απομακρυσμένης ανίχνευσης ήχου μέσω φωτός, παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής συνομιλίας η οποία διεξάγεται σε απομακρυσμένα κτίρια χωρίς την ανάγκη τοποθέτησης συσκευής μέσα στο χώρο συνομιλίας και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε εκτενώς για κατασκοπευτικούς σκοπούς στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα από ομάδες ασφαλείας. Η αρχή της χρήσης φωτός για την απομακρυσμένη ανίχνευση ήχου λέγεται ότι ανακαλύφτηκε από τον Leon Theremin στη Σοβιετική Ένωση στα τέλη του 1940 πριν ακόμη ανακαλυφτεί το laser. Ο Theremin κατασκεύασε ένα κατασκοπευτικό σύστημα το οποίο έκανε χρήση μιας υπέρυθρης πηγής φωτός (όχι laser) από απόσταση για την ανίχνευση των δονήσεων του ήχου πάνω σε γυάλινα παράθυρα. Αργότερα, ως πηγή φωτός χρησιμοποιήθηκε το laser και η διάταξη είναι πλέον γνωστή ως lasermicrophone ή οπτικό μικρόφωνο. Οι μέθοδοι που υπάρχουν στις μέρες μας για την ανίχνευση ήχου από απόσταση με χρήση ακτινοβολίας laser είναι πολλές.

Η αρχή λειτουργίας του οπτοηλεκτρονικού μας συστήματος στηρίζεται στην ανίχνευση της ανάκλασης μίας δέσμης φωτός laser από ένα φωτοανιχνευτή. Οι μικρού πλάτους δονήσεις μίας ανακλαστικής επιφάνειας, οι οποίες προκαλούνται από το ανιχνευόμενο ακουστικό κύμα, προκαλούν και αυτές με τη σειρά τους τη χωρική μετατόπιση της ανακλώμενης δέσμης. Η μεταβαλλόμενη ένταση του ανιχνευόμενου σήματος μετατρέπεται σε μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα αντίστοιχα μέσω μιας αυτοσχέδιας ηλεκτρονικής διάταξης. Το ηλεκτρονικό σήμα τελικά μετατρέπεται σε ακουστικό σήμα μέσω της κάρτας ήχου του Η/Υ. Το οπτοηλεκτρονικό σύστημα είναι χαμηλού κόστους και ανιχνεύει τις μικρές δονήσεις που προκαλούνται από τα ακουστικά κύματα, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό απλών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ελεύθερου λογισμικού.

Η οπτοηλεκτρονική μας διάταξη χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για να ανιχνεύσουμε τα ηχητικά κύματα των καρδιακών παλμών μέσω των δονήσεων του ανθρώπινου σώματος. Οι δονήσεις του ανθρώπινου σώματος λόγω των καρδιακών παλμών είναι εξαιρετικά μικρές ακόμη και αόρατες από το ανθρώπινο μάτι. Επίσης η ανίχνευση τους είναι ευαίσθητη στον θόρυβο. Η αναγκαιότητα

χρήσης ανακλαστικής επιφάνειας επιβάλλει τη χρήση ενός μικρού καθρέπτη σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Τα αποτελέσματα εφαρμογής της οπτοηλεκτρονικής μας διάταξης στην ανίχνευση των καρδιακών παλμών από τον καρπό ενός ανθρώπινου χεριού είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Οι συνήθεις κυματομορφές των καρδιακών παλμών εμφανίζονται καθαρά στα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας, παρουσιάζεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια αναδρομή στις τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για την απομακρυσμένη ανίχνευση ήχου. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται τα βασικά μέρη καθώς και η αρχή λειτουργίας του πειράματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις δοκιμαστικής και κύριας οπτοηλεκτρονικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθεται η εφαρμογή για την ανίχνευση των καρδιακών παλμών, χρησιμοποιώντας την οπτοηλεκτρονική μας διάταξη.

# Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό υπόβαθρο

## 1.1: Χαρακτηριστικά Η/Μ κύματος

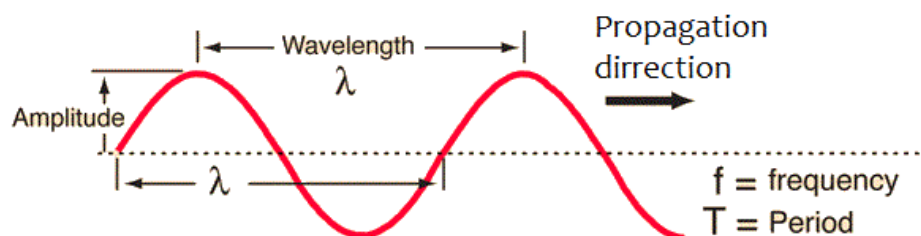
Το φως είναι ένα εγκάρσιο Η/Μ κύμα το οποίο ταξιδεύει στο κενό με σταθερή ταχύτητα  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Η ταχύτητα του μειώνεται καθώς ταξιδεύει σε ένα υλικό με δείκτη διάθλασης  $n$  κατά  $\frac{c}{n}$ . Ένα Η/Μ κύμα προκύπτει από την επιταχυνόμενη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων ή την εξαναγκασμένη εκπομπή ατόμων.

Τα χαρακτηριστικά ενός κύματος φωτός είναι το πλάτος, το μήκος κύματος  $\lambda$  και η συχνότητα  $f$ . Η ταχύτητα του κύματος συνδέεται με τα χαρακτηριστικά του σύμφωνα με τη σχέση

$$c = \lambda f \quad 1.1$$

Το μήκος κύματος είναι η χωρική περίοδος του κύματος, δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων ή ελαχίστων του κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Το χρονικό διάστημα  $t$  κατά το οποίο το κύμα διαδίδεται σε απόσταση ίση προς το ένα μήκος κύματος ονομάζεται περίοδος  $T$ . Η συχνότητα  $f$  συνδέεται με την περίοδο  $T$  του κύματος σύμφωνα με τη σχέση

$$f = \frac{1}{T} \quad 1.2$$



Σχήμα 1.1: Τα χαρακτηριστικά ενός Η/Μ κύματος

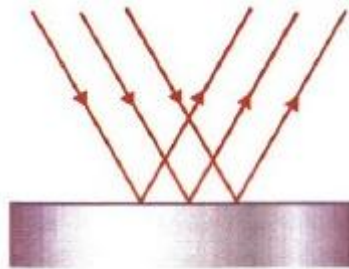
Η συχνότητα του κύματος ορίζεται ως ο αριθμός των ταλαντώσεων του κύματος, σε ένα δευτερόλεπτο. Επίσης πολλές φορές συναντάται η κυκλική συχνότητα η οποία ορίζεται με τη σχέση

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad 1.3$$

## 1.2: Ανάκλαση – Διάθλαση φωτός

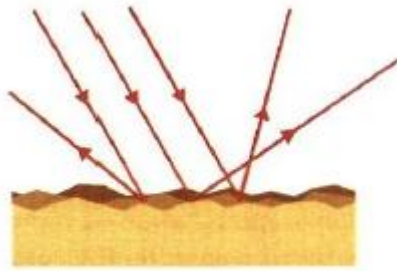
### 1.2.1: Ανάκλαση

Ανάκλαση ονομάζεται το φαινόμενο της αλλαγής διεύθυνσης διάδοσης ενός μετώπου κύματος, μέσα στο ίδιο μέσο, από μια διαχωριστική επιφάνεια. Ως ανακλώμενη ακτίνα ορίζεται η φωτεινή ακτίνα που ξεκινά από τη διαχωριστική επιφάνεια και φτάνει στον παρατηρητή. Υπάρχουν δύο είδη ανακλάσεων η κατοπτρική ανάκλαση και η ανάκλαση λόγω διάχυσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα1.2, όταν οι ακτίνες της φωτεινής δέσμης προσπίπτουν πάνω σε λεία και στιλπνή επιφάνεια τότε οι ανακλώμενες ακτίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους και η ανάκλαση αυτή ονομάζεται κατοπτρική ανάκλαση.



Σχήμα1.2: Κατοπτρική ανάκλαση

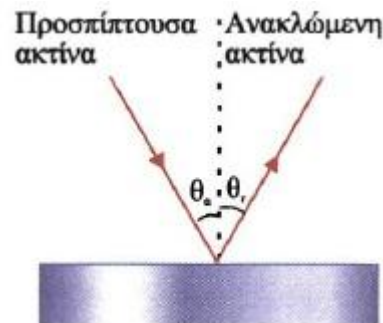
Εάν η επιφάνεια πάνω στην οποία προσπίπτει η δέσμη έχει ανωμαλίες, οι ακτίνες ανακλώνται σε διάφορες διευθύνσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα1.3 και διασκορπίζονται στο γύρω χώρο. Η ανάκλαση αυτή ονομάζεται ανάκλαση λόγω διάχυσης[1].



Σχήμα1.3: Ανάκλαση λόγω διάχυσης

Στην περίπτωση που μια φωτεινή ακτίνα προσπίπτει υπό γωνία πάνω σε μια λεία επιφάνεια και ανακλάται, η γωνία ανάμεσα στη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας και στην κάθετη στην επιφάνεια, ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης,  $\theta_a$ . Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κάθετη στην επιφάνεια και στη διεύθυνση της ανακλώμενης ακτίνας, ονομάζεται γωνία ανάκλασης,  $\theta_r$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα1.4. Πειραματικά προκύπτει ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, επομένως

$$\theta_a = \theta_r \quad 1.4$$



Σχήμα1.4: Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης

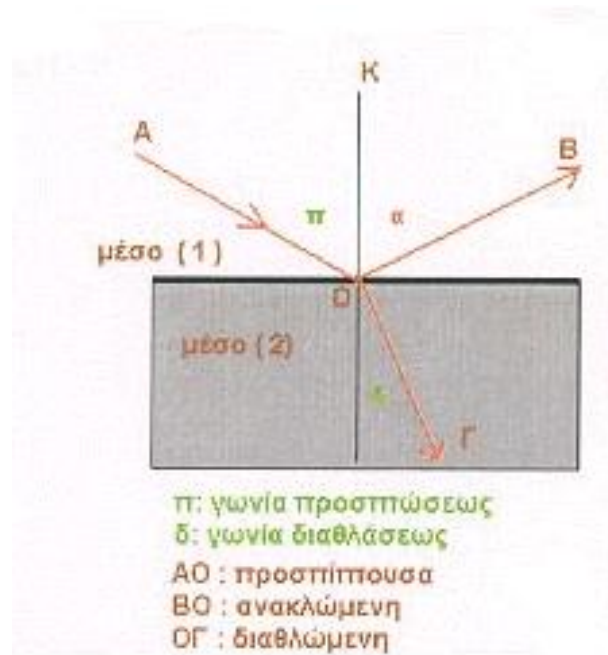
### 1.2.2: Διάθλαση

Διάθλαση φωτός χαρακτηρίζεται το φαινόμενο της εκτροπής της διεύθυνσης των φωτεινών ακτινών κατά τη μετάβασή τους από ένα διαπερατό μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης  $n_1$ , σε άλλο μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης  $n_2$  όπου  $n_2 \neq n_1$ . Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα σε διαφορετικά υλικά.

Για τη μελέτη του φαινομένου της διάθλασης ορίζεται η γωνία διάθλασης ως η γωνία που σχηματίζει η διαθλώμενη ακτίνα, ακτίνα Γ, με την κάθετο στην επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Ο νόμος του Snell εκφράζει μαθηματικά τη σχέση που συνδέει τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_a$  με τη γωνία διάθλασης  $\theta_\delta$  σε μια διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων. Ο νόμος του Snell για μία ακτίνα που προσπίπτει από ένα μέσο 1 σε ένα μέσο 2, γράφεται

$$n_1 \sin\theta_a = n_2 \sin\theta_\delta \quad 1.5$$

όπου  $n_{1,2}$  οι δείκτες διάθλασης των μέσων 1 και 2 αντίστοιχα. Όταν οι ακτίνες φωτός κινούνται από αραιότερο μέσον σε πυκνότερο, η γωνία διάθλασης είναι πάντα μικρότερη της γωνίας πρόσπτωσης. Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάδοση από πυκνότερο σε αραιότερο μέσο.



Σχήμα 1.5: Ο νόμος του Snell

Κάθε υλικό έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας που περιέχει αναφορικά διάφορα υλικά και τον δείκτη διάθλασής τους.

Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρας	1,0003
Νερό	1,33
Γλυκερίνη	1,47
Λάδι	1,515
Γυαλί	1,52
Διαμάντι	2,42
Μόλυβδος	3,91

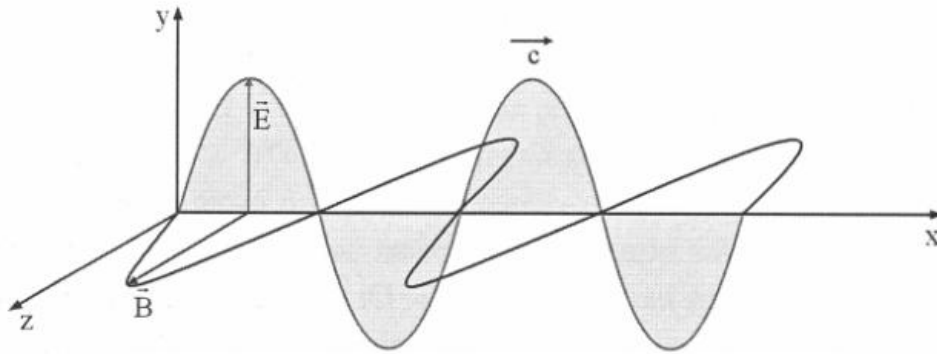
*Πίνακας 1.1: Δείκτες διάθλασης διαφορετικών υλικών*

### **1.3: Ιδιότητες του φωτός**

#### **1.3.1: Πόλωση**

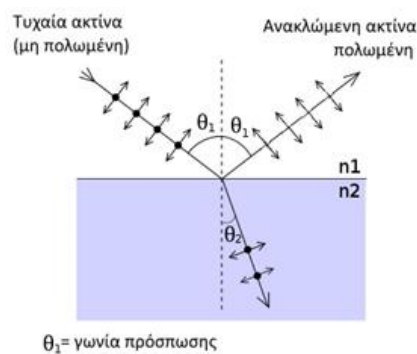
Στην περίπτωση του φωτός, ως εγκάρσιο Η/Μ κύμα, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ταλαντώνονται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Μία δέσμη φωτός αποτελείται από πολλά επιμέρους ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Όταν τα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών τους πεδίων έχουν τυχαίο προσανατολισμό τότε το φως είναι μη πολωμένο. Όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος, ταλαντώνεται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, τότε το κύμα λέγεται ότι είναι επίπεδα πολωμένο. Όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται σε μία διεύθυνση τότε το κύμα είναι γραμμικά πολωμένο.

Το φως μπορεί να πολωθεί με διαφορετικούς τρόπους και συγκεκριμένα από ανάκλαση, από σκέδαση ή χρησιμοποιώντας πολωτικό φίλτρο.



Σχήμα1.6: Ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο διαδίδεται κατά τη διεύθυνση  $x$  και είναι πολωμένο στο επίπεδο  $yz$

Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε μία υλική επιφάνεια, ένα μέρος διαθλάται και ένα άλλο μέρος ανακλάται. Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου του προσπίπτοντος κύματος μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία κάθετη και μία παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης. Έτσι το μη πολωμένο φως μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες. Η ανακλαστικότητα της επιφάνειας για την παράλληλη και την κάθετη συνιστώσα μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης. Υπάρχει μία συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης όπου η παράλληλη συνιστώσα της ανακλώμενης δέσμης, στο επίπεδο πρόσπτωσης, γίνεται μηδέν. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία Brewster και εξαρτάται από τους δείκτες διάθλασης των δύο υλικών. Η διαδικασία της πόλωσης μέσω ανάκλασης φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα1.7.

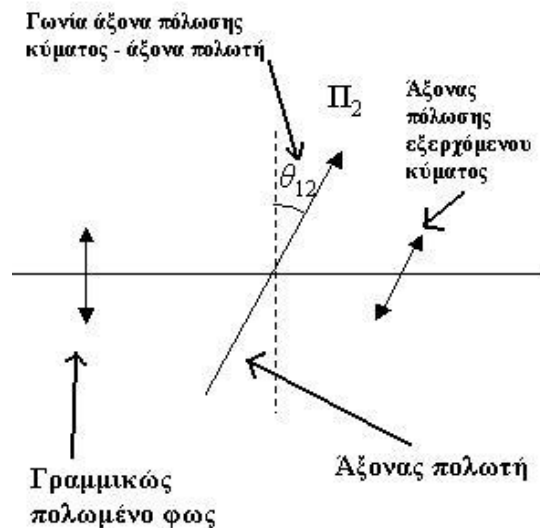


Σχήμα1.7: Μη πολωμένο φως προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών υπό γωνία Brewster.



Επίσης το φως μπορεί να πολωθεί από σκέδαση. Για παράδειγμα η πόλωση του φωτός είναι εφικτή όταν το μη πολωμένο φως προσπίπτει στα μόρια του αέρα, απορροφάται και επανεκπέμπεται σε όλες τις κατευθύνσεις. Το σκεδαζόμενο φως στην κάθετη διεύθυνση παρατήρησης είναι πλήρως πολωμένο.

Η πόλωση του φωτός μπορεί να γίνει επίσης μέσω ενός πολωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8. Όταν το φως προσπίπτει σε ένα πολωτή θα εξέλθει γραμμικά πολωμένο με διεύθυνση πόλωσης καθορισμένη από τον άξονα πόλωσης του πολωτή. Ένας πολωτής επιτρέπει την πλήρη διέλευση όλων των κυμάτων φωτός που είναι πολωμένα παράλληλα στον άξονά του, ενώ ανακόπτει εντελώς όλα τα κύματα που είναι πολωμένα κάθετα σε αυτόν.



Σχήμα 1.8: Πολωτής: καθώς προσπίπτει γραμμικά πολωμένο φως στον πολωτή τελικά εξέρχεται μόνο το μέρος του κύματος που είναι παράλληλο με τον άξονα του πολωτή.

### 1.3.2: Συμβολή

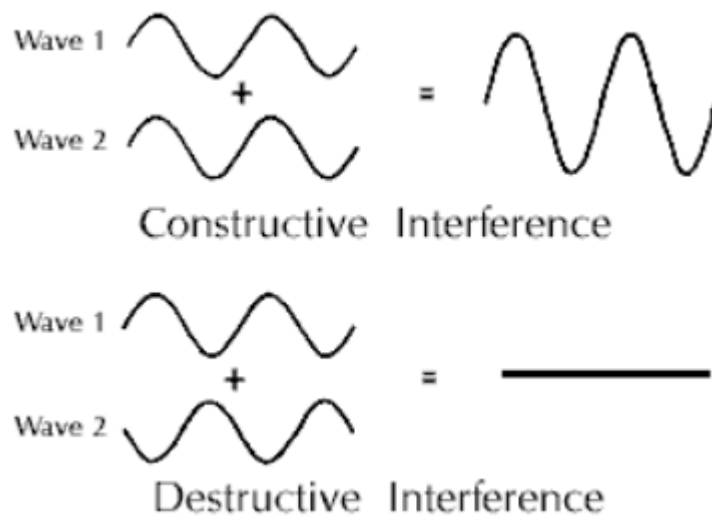
Συμβολή ονομάζεται το αποτέλεσμα της υπέρθεσης δύο κυμάτων. Για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε στάσιμη συμβολή φωτός, δηλαδή συμβολή στην οποία τα αποτελέσματα είναι σταθερά και δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο, πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

- α) οι πηγές πρέπει να είναι σύμφωνες, δηλαδή να έχουν σταθερή διαφορά

φάσης μεταξύ τους.

β) Οι πηγές πρέπει να είναι μονοχρωματικές, δηλαδή να εκπέμπουν ένα μόνο μήκος κύματος φωτός το οποίο θα είναι το ίδιο και για τις δύο πηγές.

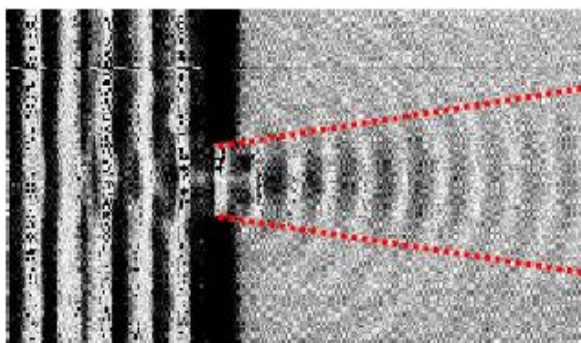
Τα κύματα φωτός μπορεί να συμβάλλουν ενισχυτικά ή καταστρεπτικά. Όταν η συμβολή είναι ενισχυτική, το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι μεγαλύτερο από το πλάτος τού ενός ή τού άλλου των συμβαλλόντων κυμάτων. Αντίθετα, στην καταστρεπτική συμβολή, το πλάτος τού συνισταμένου κύματος είναι μικρότερο όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Το φαινόμενο της ενισχυτικής και καταστρεπτικής συμβολής

### **1.3.3: Περίθλαση**

Περίθλαση είναι η ιδιότητα του φωτός, να αποκλίνει από την ευθύγραμμη πορεία του. Τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα της περίθλασης μπορούν να εξηγηθούν με την αρχή του Huygens η οποία δηλώνει ότι κάθε σημείο του μετώπου κύματος ενεργεί ως πηγή δευτερογενών κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.



*Σχήμα1.10: Το φαινόμενο της περίθλασης*

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την απόκλιση του φωτός, είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το μέγεθος της σχισμής. Για να παρατηρηθεί το φαινόμενο της περίθλασης θα πρέπει το μέγεθος της σχισμής να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στο Σχήμα1.10 φαίνεται σχηματικά το φαινόμενο της περίθλασης.

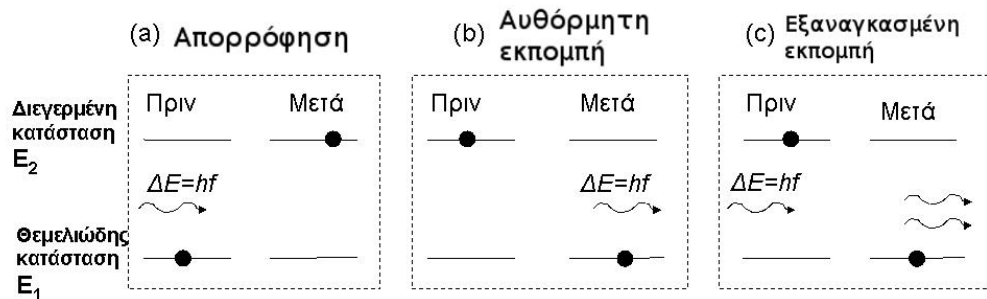
#### **1.4: Εισαγωγή στα laser**

Ο όρος laser προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation που αποδίδεται στα ελληνικά ως ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Ο όρος αυτός καλύπτει τόσο τις συσκευές που την παράγουν όσο και την αντίστοιχη ακτινοβολία.

Τα laser παράγουν σύμφωνο, μονοχρωματικό φως, δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος, το οποίο διαδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Αντίθετα, οι συμβατικές πηγές φωτός, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, παράγουν μη-σύμφωνο φως προς όλες τις διευθύνσεις και επιπλέον έχουν μεγάλο φασματικό εύρος.

Η λειτουργία των laser ερμηνεύεται από την θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής. Πολλά υλικά έχουν βρεθεί ότι έχουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να αποτελέσουν ενεργό υλικό των λέιζερ, με αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών τύπων λέιζερ με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η εφεύρεση των laser στηρίχθηκε στην κατασκευή των Μείζερ. Το πρώτο laser κατασκευάστηκε το 1960 από τον T. Maiman. Στα επόμενα χρόνια τα laser

βρήκαν εφαρμογή στις θετικές επιστήμες, στην βιομηχανία, στην ιατρική καθώς και στην ηλεκτρονική.



Σχήμα1.11: Διαδικασίες αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας laser με την ύλη

Όσον αφορά τις διαδικασίες αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας laser με την ύλη αυτές είναι η απορρόφηση, η αυθόρμητη και η εξαναγκασμένη εκπομπή. Κατά τη διαδικασία της απορρόφησης, ένα φωτόνιο ενέργειας  $\Delta E = E_2 - E_1$ , προσπίπτει στο ενεργό υλικό και απορροφάται, μεταφέροντας ένα δέσμο ηλεκτρόνιο από τη στάθμη  $E_1$  σε διεγερμένη στάθμη  $E_2$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα1.11(α). Η αυθόρμητη εκπομπή είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα άτομο που βρίσκεται σε μία διεγερμένη κατάσταση  $E_2$  αποδιεγείρεται στην  $E_1$ , εκπέμποντας ένα φωτόνιο ίσης ενέργειας με την ενεργειακή διαφορά των δύο επιπέδων,  $\Delta E$ . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας γιατί συμβαίνει χωρίς καμία εξωτερική παρέμβαση. Η εξαναγκασμένη εκπομπή πραγματοποιείται όταν ένα φωτόνιο ενέργειας  $\Delta E$  προσπίπτει σε ένα διεγερμένο άτομο στην κατάσταση  $E_2$  και το αναγκάζει να αποδιεγερθεί εκπέμποντας ένα νέο φωτόνιο της ίδιας συχνότητας, διεύθυνσης και φάσης με το αρχικό. Προκύπτουν έτσι δύο όμοια φωτόνια, καθένα από τα οποία θα προκαλέσει με τη σειρά του την αποδιέγερση ενός ακόμη ατόμου, διπλασιάζοντας έτσι κάθε φορά τον αριθμό των παραγόμενων φωτονίων, κ.ο.κ. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται το φαινόμενο της οπτικής ενίσχυσης, στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των lasers.

### 1.5: Τα βασικά μέρη ενός laser

Τα βασικά μέρη ενός laser είναι α) η εξωτερική πηγή διέγερσης, β) το ενεργό υλικό και γ) η οπτική κοιλότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.12.

α) Η πηγή διέγερσης – πηγή άντλησης παρέχει την ενέργεια η οποία είναι απαραίτητη για την αντιστροφή πληθυσμού και τη δράση laser. Η άντληση μπορεί να γίνει είτε με τη μέθοδο της ηλεκτρικής εκφόρτισης είτε με οπικές μεθόδους. Παραδείγματα πηγών άντλησης είναι οι λαμπτήρες, η ακτινοβολία από ένα άλλο laser και οι χημικές αντιδράσεις.



Σχήμα 1.12: Τα βασικά μέρη ενός laser: η εξωτερική πηγή διέγερσης, το ενεργό υλικό και η οπτική κοιλότητα

β) Το ενεργό υλικό διεγείρεται από την εξωτερική πηγή ενέργειας. Όταν ο αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων που βρίσκεται στην βασική κατάσταση, επιτυγχάνεται η αντιστροφή πληθυσμού. Τότε, συμβαίνει εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων, που οδηγεί στο φαινόμενο του οπτικού κέρδους ή ενίσχυσης. Συνήθως ως ενεργά υλικά χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί, οργανικές χρωστικές, αέρια (He, Ne, CO<sub>2</sub>, κ.λπ.), στερεοί κρύσταλλοι (YAG, ζαφείρι (ρουμπίνι)).

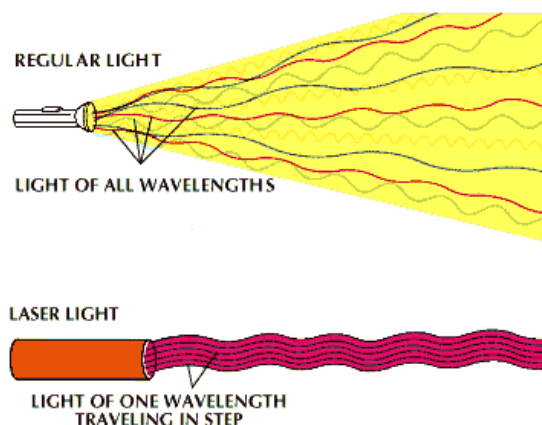
γ) Η κοιλότητα είναι εκείνη όπου παρέχει την καθοδήγηση σχετικά με τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής. Στα περισσότερα από τα συστήματα η κοιλότητα αποτελείται από δύο κάτοπτρα. Ο ένας καθρέπτης είναι πλήρως ανακλαστικός και ο άλλος είναι μερικώς ανακλαστικός. Και οι δύο καθρέπτες είναι παράλληλοι ο ένας στον άλλο καθώς και στον ίδιο άξονα και το ενεργό υλικό χρησιμοποιείται ανάμεσα τους. Η ελάχιστη τιμή ισχύς άντλησης που απαιτείται για την παραγωγή λέιζερ ονομάζεται κατώφλι λέιζερ. Το ενεργό υλικό ενισχύει οποιοδήποτε φωτόνιο περάσει μέσα από αυτό, αλλά μόνο τα φωτόνια που είναι ευθυγραμμισμένα με την κοιλότητα μπορεί να περάσουν περισσότερο από μια φορά μέσα από το ενεργό υλικό για να επιτευχθεί σημαντική ενίσχυση. Η συνθήκη όπου η ισχύς άντλησης γίνεται περίπου ίση με την τιμή κορεσμού της ενίσχυσης και με τις απώλειες της κοιλότητας, οδηγεί σε κατάσταση ισορροπίας της ισχύς του λέιζερ μέσα στην κοιλότητα. Αυτή η τιμή ισορροπίας καθορίζει και το σημείο λειτουργίας του laser.

## **1.6: Ιδιότητες της ακτινοβολίας laser**

Οι βασικές ιδιότητες της δέσμης laser είναι η κατευθυντικότητα, η μονοχρωματικότητα, η συμφωνία, και η φωτεινότητα.

### **1.6.1: Κατευθυντικότητα**

Τα lasers εκπέμπουν ακτινοβολία σε μία πολύ λεπτή, κατευθυνόμενη δέσμη, με μικρή γωνία απόκλισης, σε αντίθεση με τις συμβατικές λάμπες πυρακτώσεως που εκπέμπουν ακτινοβολία σε όλες τις διευθύνσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13. Η κατευθυντικότητα είναι άμεση απόρροια του γεγονότος ότι η διαδικασία της ενίσχυσης του φωτός γίνεται μέσα στην κοιλότητα laser.



Σχήμα1.13: Η κατευθυντικότητα της ακτινοβολίας laser

### **1.6.2: Μονοχρωματικότητα**

Το laser εκπέμπει σε μία εξαιρετικά στενή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μερικά nm, σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές οι οποίες εκπέμπουν σε όλη την περιοχή του ορατού φάσματος και στο υπέρυθρο. Η ιδιότητα αυτή προκύπτει από τα εξής δύο γεγονότα που συνδέονται με την οπτική κοιλότητα: α) μόνο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που έχει την κατάλληλη συχνότητα μπορεί να ενισχυθεί και β) η συχνότητα αντιστοιχεί στις συχνότητες συντονισμού της οπτικής κοιλότητας, οι οποίες είναι συγκεκριμένες.

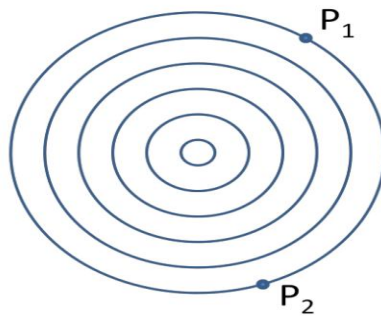
### **1.6.3: Συμφωνία**

Κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα περιέχει τις έννοιες της χωρικής και χρονικής συμφωνίας. Συγκεκριμένα:

α) Χωρική συμφωνία πάνω στο μέτωπο του κύματος, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης μιας δέσμης laser συμβαίνει όταν δύο σημεία παρουσιάζουν σταθερή διαφορά φάσης.

Έστω δύο σημεία P1 και P2 στο χώρο που την χρονική στιγμή  $t=0$  βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα1.14. Εξ' ορισμού η διαφορά φάσης των δύο σημείων είναι μηδέν. Εάν η

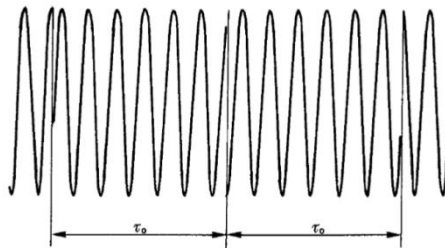
διαφορά φάσης των δύο σημείων P1 και P2 παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή,  $t > 0$  τότε λέμε πως υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων. Όταν η διαφορά φάσης δύο οποιονδήποτε σημείων του μετώπου κύματος παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή  $t > 0$  τότε λέμε πως υπάρχει τέλεια χωρική συμφωνία. Στην πράξη για να συμβαίνει αυτό, τα σημεία P1 και P2 πρέπει να βρίσκονται σχετικά κοντά και τότε μιλάμε για μερική χωρική συμφωνία. Η μέγιστη απόσταση δύο σημείων για τα οποία η διαφορά φάσης διατηρείται σταθερή ονομάζεται μήκος συμφωνίας.



Σχήμα 1.14: Μέτωπα σφαιρικών επίπεδων κυμάτων

β) Χρονική συμφωνία: χρονική συμφωνία κατά τη διεύθυνση διάδοσης μιας δέσμης laser συμβαίνει όταν δύο σημεία παρουσιάζουν σταθερή διαφορά φάσης.

Εάν η διαφορά φάσης μεταξύ δύο κυμάτων παραμένει σταθερή για κάθε  $t$ , τότε λέμε πως έχουμε χρονική συμφωνία για το διάστημα  $\tau_{coh}$  (μερική χρονική συμφωνία). Ο χρόνος  $\tau_{coh}$  ονομάζεται χρόνος συμφωνίας. Στο Σχήμα 1.15 φαίνεται ένα παράδειγμα μερικής χρονικής συμφωνίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως η χρονική και χωρική συμφωνία είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες.



Σχήμα 1.15: Παράδειγμα μερικής χρονικής συμφωνίας με χρόνο συμφωνίας  $\tau_0$



#### **1.6.4: Φωτεινότητα**

Η φωτεινότητα μιας πηγής laser ορίζεται ως η ισχύς που εκπέμπεται από την πηγή ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Η στερεά γωνία ορίζεται από τον κώνο μέσα στον οποίο απλώνεται η δέσμη. Επειδή η ισχύς του laser μεταφέρεται μέσα σε μία λεπτή, κατευθυντική (μικρή στερεά γωνία) δέσμη, η φωτεινότητα του laser είναι τελικά πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός. Η φωτεινότητα είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος-ιδιότητα της δέσμης laser και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται ότι η φωτεινότητα του ήλιου είναι  $\sim 10^6 \text{W/m}^2 \text{Sr}$  ενώ για ένα συνήθες He-Ne laser είναι  $10^{10} \text{W/m}^2 \text{Sr}$ .

#### **1.7: Κατηγορίες συστημάτων laser**

Τα διάφορα συστήματα laser μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το ενεργό υλικό σε:

- Laser στερεάς κατάστασης
- Laser υγρών
- Laser αερίων
- Laser ελευθέρων ηλεκτρονίων

Ανάλογα με το μήκος κύματος σε:

- Laser υπέρυθρης ακτινοβολίας
- Laser ορατής ακτινοβολίας
- Laser υπεριώδους ακτινοβολίας
- Laser ακτινών X

Ανάλογα με τη χρονική διάρκεια σε:

- Laser συνεχούς (CW laser)
- ns laser
- ps laser
- fs laser

Ανάλογα με την επικινδυνότητα τους σε:

- CLASS 1
- CLASS 2
- CLASS 3a
- CLASS 3b
- CLASS 4

Τα laser της κλάσης 1, δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια ακόμη κι αν η δέσμη προσπέσει τυχαία στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, συνεχόμενη απευθείας έκθεση με γυμνό μάτι θα πρέπει να αποφεύγεται. Η ισχύς των laser κλάσης 1 είναι μικρότερη από 0.4  $\mu\text{W}$  για CW laser με μήκος κύματος στο ορατό.

Τα laser που κατηγοριοποιούνται στην κλάση 2, δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια κατά τη διάρκεια ενός διαδοχικού ανοίγματος και κλεισίματος του ματιού (blink), δηλ. περίπου 250 msec. Ωστόσο μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στην περίπτωση που ο παραπάνω χρόνος παραταθεί. Τα laser κλάσης 2 έχουν μήκη κύματος στο ορατό (400 - 700 nm) και ισχύ εξόδου μεταξύ 0.4  $\mu\text{W}$  και 1 mW για CW laser.

Στην κλάση 3a, τα laser δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια κατά τη διάρκεια ενός blink. Ωστόσο, είναι πιθανή η ζημιά στην περίπτωση που κοιτάξουμε τη δέσμη με κάποιο φακό ή και απευθείας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η ισχύς εξόδου για CW laser με μήκη κύματος στο ορατό είναι μεταξύ 1-5 mW.

Πιο επιβλαβή είναι τα laser που βρίσκονται στην κλάση 3b, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στα μάτια στην περίπτωση που κοιτάξουμε τη δέσμη απευθείας ή ακόμη και κάποια ανακλώμενη δέσμη της. Η ισχύς εξόδου για CW laser είναι μεταξύ 5 - 500 mW, εξαιρώντας τα μεγάλης ισχύος laser αυτής της κατηγορίας όπου μία διαχεόμενη δέσμη laser δεν είναι επικίνδυνη εκτός κι αν την κοιτάξουμε με κάποιο φακό.

Τέλος, η πιο σημαντική και επικίνδυνη κατηγορία laser είναι αυτά της τέταρτης κλάσης. Η έκθεση στη δέσμη τους ή ακόμη και σε ανάκλασή της καθώς και διάχυσή αυτής, είναι ενδεχόμενα επικίνδυνη τόσο για τα μάτια όσο και για το δέρμα. Επιπλέον μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη εύφλεκτων υλικών. Η ισχύς

εξόδου για CW laser για όλα τα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερη από τα 500 mW ενώ όλα τα παλμικά laser που λειτουργούν στα μήκη κύματος 400-1,400nm θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στην κλάση 4.

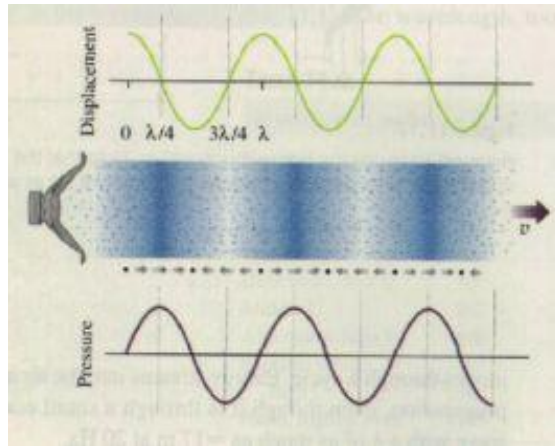
### **1.8: Ακουστικά κύματα**

Τα ακουστικά κύματα παράγονται από την κίνηση σωματιδίων όπου εκτελούν μηχανικές ταλαντώσεις (δονήσεις), και επομένως χαρακτηρίζονται ως μηχανικά κύματα (ελαστικότητας) που μεταφέρουν μηχανική ενέργεια. Κατά τη διάδοση ενός ακουστικού κύματος, για παράδειγμα στον ατμοσφαιρικό αέρα, δημιουργούνται κινήσεις των μορίων του αέρα κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Οι διαμήκεις αυτές κινήσεις των μορίων του ατμοσφαιρικού αέρα γύρω από τη θέση ισορροπίας τους, προκαλούν μεταβολή της πυκνότητας και της πίεσης του μέσου σε διάφορα σημεία με αποτέλεσμα τη δημιουργία πυκνωμάτων (περιοχές υψηλής πίεσης) και αραιωμάτων (περιοχές χαμηλής πίεσης), όπως φαίνεται στο Σχήμα1.16. Η αρμονική συνάρτηση που παρουσιάζεται στο Σχήμα1.16 αντιστοιχεί στη μετατόπιση των μορίων του αέρα που προκαλείται από ένα παλλόμενο μεγάφωνο και η κάτω αρμονική συνάρτηση αντιστοιχεί στη μεταβολή της πίεσης των μορίων του αέρα που δημιουργεί τις περιοχές πυκνωμάτων (έντονη σκίαση) και αραιωμάτων (λευκές λωρίδες). Για τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου, σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά που διαδίδονται ακόμη και στο κενό.

Τα ακουστικά κύματα διακρίνονται σε εγκάρσια και διαμήκη. Εγκάρσια κύματα ονομάζονται τα κύματα των οποίων η διεύθυνση διάδοσής τους είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης. Στα εγκάρσια κύματα εμφανίζονται μέγιστα και ελάχιστα που ονομάζονται «όροι» και «κοιλίες» αντίστοιχα. Εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο στα στερεά σώματα και κατά προσέγγιση στην επιφάνεια υγρών.

Διαμήκη κύματα ονομάζονται τα κύματα των οποίων η διεύθυνση διάδοσής τους είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης. Με την κίνηση που πραγματοποιούν τα σωματίδια του μέσου στα διαμήκη κύματα παρατηρούνται πυκνώματα και αραιώματα, όπως

φαίνεται στο Σχήμα1.17. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται και στα στερεά και στα υγρά και στα αέρια σώματα.



Σχήμα1.16: Αρμονικές συναρτήσεις των μορίων του αέρα

Οι μεταβολές της πίεσης που προκαλούνται στο μέσο διάδοσης, είναι μεν πάρα πολύ μικρές αλλά μπορεί να γίνουν αισθητές από το ανθρώπινο αυτί εάν η συχνότητα διάδοσης τους είναι στο εύρος συχνοτήτων που ερεθίζει το αισθητήριο της ακοής στον άνθρωπο. Το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 20 Hz έως περίπου 20 KHz. Για συχνότητες χαμηλότερες από 20 Hz τα ηχητικά κύματα καλούνται υπόηχοι, π.χ τα σεισμικά κύματα, ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες των 20KHz ονομάζονται υπέρηχοι π.χ. κύματα που παράγονται από κρυστάλλους χαλαζία που εκτελούν εξαναγκασμένη ταλάντωση μέσω της διέγερσής τους από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο.



Σχήμα1.17: Εγκάρσιο και διαμήκες ακουστικό κύμα

Ένα ακουστικό κύμα χαρακτηρίζεται από φυσικές ιδιότητες όπως συχνότητα, περίοδος, μήκος κύματος, πλάτος ταλάντωσης, και χρόνος σύμφωνα με την κυματομορφή. Από αυτές τις ιδιότητες πηγάζουν τέσσερα χαρακτηριστικά που αποσκοπούν στην περιγραφή ενός ήχου από μουσικοακουστικής προσέγγισης οι οποίες είναι: το ύψος, η ένταση, η διάρκεια και η χροιά.

Η συχνότητα εκφράζει την ταχύτητα ταλάντωσης και μετράται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο Hz. Γρηγορότερες ταλαντώσεις επιφέρουν υψηλότερους, οξύτερους ήχους, ενώ βραδύτερες ταλαντώσεις επιφέρουν χαμηλότερους, βαρύτερους ήχους. Ο μουσικά εξειδικευμένος όρος 'ύψος' δηλώνει πόσο υψηλός ή χαμηλός είναι ένας ήχος και συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα του ήχου. Η σχέση αυτή διακρίνει τους ήχους σε δύο μορφές, σε οξείς με μεγάλη συχνότητα, όπως τους ήχους ενός βιολιού και σε βαρείς με μικρή συχνότητα, όπως τους ήχους που παράγει το μπάσο τύμπανο. Και στις δύο περιπτώσεις η συχνότητα εξαρτάται από το πάχος και το μήκος της χορδής, με αποτέλεσμα όσο πιο μεγάλη σε μήκος και διάμετρο είναι η χορδή, τόσο μικρότερη συχνότητα παράγεται, ενώ όσο πιο πολύ μειώνεται το πάχος και το μήκος τόσο αυξάνεται η συχνότητα.

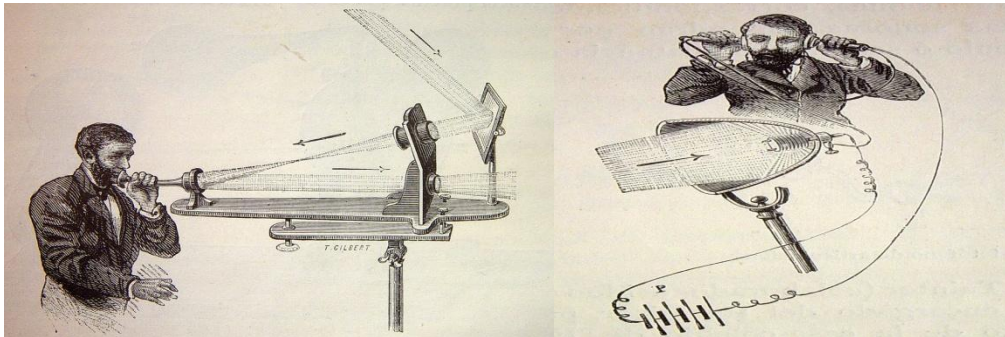
Ως ένταση αποκαλείται το πόσο ισχυρή ή ασθενής είναι η ταλάντωση του ηχητικού κύματος. Η διάρκεια ορίζει τον συνολικό χρόνο για τον οποίο ένας ήχος γίνεται αντιληπτός. Ένας ήχος είναι μακρύτερος από έναν άλλο βραχύτερο, όταν η αντιληπτή διάρκεια είναι συγκριτικά μεγαλύτερη. Με βάση την κυματομορφή, οι ήχοι ταξινομούνται σε απλούς ή σύνθετους, και σε περιοδικούς ή μη περιοδικούς. Το ημιτονοειδές κύμα είναι ένα παράδειγμα απλού και περιοδικού ηχητικού κύματος, ενώ ο λευκός θόρυβος είναι ήχος σύνθετος και μη περιοδικός.

Από την κυματομορφή ενός ήχου πηγάζει το χαρακτηριστικό της χροιάς, το οποίο εκφράζει την ποιότητα ενός ηχητικού κύματος. Πρόκειται για το χαρακτηριστικό εκείνο που προσδιορίζει την ταυτότητα της ηχητικής πηγής και κάνει εφικτό τον διαχωρισμό μεταξύ δύο διαφορετικών ηχητικών πηγών. Χάρη στη χροιά ο ήχος ξεχωρίζει ακόμη και αν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του είναι τα ίδια.

## Κεφάλαιο 2: Ιστορική Αναδρομή

### 2.1: Φωτόφωνο

Η αρχή της απομακρυσμένης ανίχνευσης ήχου, έγινε γνωστή το 1880 με την ανακάλυψη του λεγόμενου φωτόφωνα, μιας συσκευής τηλεπικοινωνίας η οποία επέτρεπε τη μετάδοση ήχου μέσω μίας δέσμης φωτός. Το φωτόφωνο ανακαλύφθηκε από τον Graham Bell, το 1880 και αποτελεί στις μέρες μας τον προκάτοχο της τηλεπικοινωνίας μέσω οπτικών ινών.



Σχήμα2.1:

Στην αριστερή εικόνα φαίνεται η αναπαράσταση του πομπού του φωτόφωνα όπου φαίνεται η πορεία της ανακλώμενης δέσμης φωτός πριν και μετά την διαμόρφωση. Δεξιά φαίνεται η αναπαράσταση του δέκτη που απεικονίζει την μετατροπή του διαμορφωμένου φωτός σε ήχο, όπως επίσης και την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας “P”

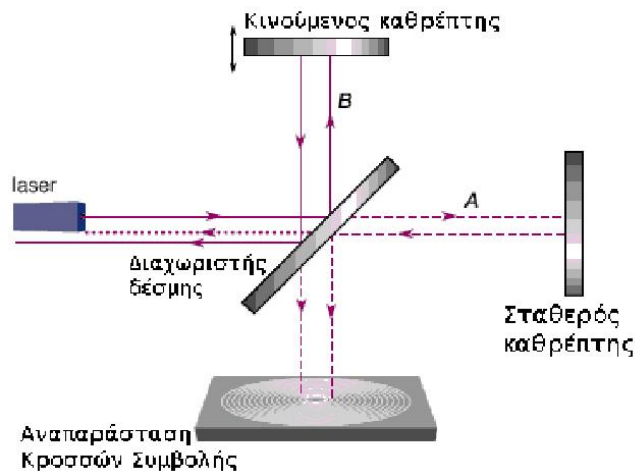
Στο φωτόφωνο του Bell, η εκπεμπόμενη δέσμη φωτός δημιουργείται από το φως του ήλιου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα2.1, αποτελείται από ένα σύστημα καθρεφτών, φακών και ένα κέλυφος για την αφαίρεση της θερμικής ακτινοβολίας. Οι ακτίνες του φωτός έπεφταν σε έναν ευαίσθητο στην κίνηση καθρέφτη που αισθανόταν και ανακλούσε τις ηχητικές δονήσεις. Η κίνηση του καθρέφτη δημιουργούσε αλλοιώσεις στη δέσμη φωτός που ανακλόταν προς ένα παραβολικό κάτοπτρο το οποίο εστίαζε την παραμορφωμένη δέσμη φωτός στο κέντρο ενός ανιχνευτή σεληνίου. Ο ανιχνευτής αντιδρούσε με τη δημιουργία

αντίστοιχων διακοπόμενων ηλεκτρικών σημάτων. Αυτά τα σήματα στέλνονταν στο μαγνήτη του τηλεφώνου και μετατρέπονταν ξανά σε ήχο μέσω ενός ηλεκτρομαγνήτη συνδεδεμένο με ένα διάφραγμα. Η εμβέλεια χρήσης του φωτόφωου του Bell ποτέ δεν επεκτάθηκε πέρα από μερικές εκατοντάδες μέτρα, λόγω του ότι η συσκευή ήταν αδύναμη να προστατευθεί από εξωτερικές παρεμβολές, όπως τα σύννεφα. Οι αρχές του φωτόφωου χρησιμοποιήθηκαν από τον Guglielmo Marconi, όταν ανέπτυξε με επιτυχία την ασύρματη τηλεγραφία[2].

## 2.2: Συμβολομετρία

Η χρήση συμβολομετρίας στην απομακρυσμένη ανίχνευση ήχου αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή τεχνικής λόγω της αυξημένης ευαισθησίας της. Η τεχνική χρησιμοποιεί το συμβολόμετρο Michelson – Morley. Το συμβολόμετρο Michelson – Morley, αποτελείται από μία δέσμη laserη οποία διαχωρίζεται σε δύο δέσμες (οι δύο κλάδοι του συμβολόμετρου), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, από ένα διαχωριστή δέσμης. Οι δύο δέσμες αφού ακολουθήσουν διαφορετική διαδρομή, ανακλώνται, ξαναπερνάνε από το διαχωριστή όπου και τελικά ξαναενώνονται. Όταν οι οπτικοί δρόμοι είναι ίσοι και οι δέσμες ενώνονται στην ίδια διαδρομή, τότε λαμβάνει χώρα χρονική και χωρική συμφωνία και στο σημείο ένωσης τους παρατηρούνται κροσσοί συμβολής.

Για τη χρήση της συμβολομετρικής μεθόδου στην ανίχνευση ήχων, η μία από τις δύο δέσμες ανακλάται από την ανακλαστική επιφάνεια (γυαλί, plexiglass) πίσω από την οποία παράγεται το ζητούμενο ηχητικό σήμα. Το ηχητικό σήμα δονεί την επιφάνεια με αποτέλεσμα να εισάγονται μικρές μετατοπίσεις στον ένα κλάδο του συμβολόμετρου. Ο άλλος κλάδος του συμβολόμετρου παραμένει σταθερός. Το αποτέλεσμα είναι να πραγματοποιούνται αλλαγές στο καταγραφόμενο σήμα της συμβολής οι οποίες είναι ανάλογες των μετατοπίσεων της επιφάνειας και επομένως ανάλογες του ηχητικού σήματος.



Σχήμα2.2: Το συμβολόμετρο Michelson-Morley

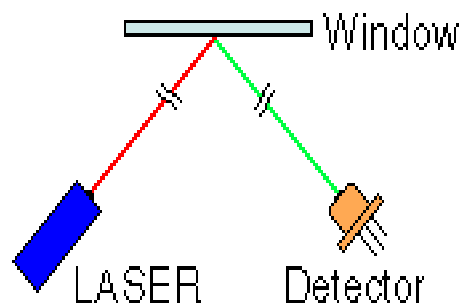
### 2.3: Μέθοδος Ανίχνευσης της Μετατόπισης

Το σύστημα που βασίστηκε η μέθοδος της μετατόπισης, λέγεται ότι χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Leon Theremin στην Σοβιετική Ένωση περίπου το 1947. Κατά τη διάρκεια της εργασίας του στο Sharashka, δημιούργησε το σύστημα παρακολούθησης Buran, έναν πρόδρομο του σύγχρονου τρόπου παρακολούθησης με laser. Λειτουργούσε χρησιμοποιώντας μία υπέρυθρη δέσμη laser χαμηλής ισχύος για να ανιχνεύει τις ηχητικές δονήσεις στα τζάμια. Ο Lavrentiy Beria, επικεφαλής της μυστικής αστυνομικής οργάνωσης NKVD (ο πρόδρομος της KGB), χρησιμοποίησε τη συσκευή Buran για να κατασκοπεύσει τις Βρετανικές, Γαλλικές και Αμερικανικές πρεσβείες στη Μόσχα. Σύμφωνα με τον Galeyn, ο Beria κατασκόπευε επίσης και τον Στάλιν. Το 1947, ο Theremin τιμήθηκε με το βραβείο Στάλιν για την επινόηση της προχωρημένης τεχνολογίας για την Σοβιετική κατασκοπία.

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στον τριγωνισμό. Σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται ένα τρίγωνο μεταξύ της συσκευής laser, της ανακλαστικής επιφάνειας πίσω από την οποία αναπαράγεται το εξεταζόμενο σήμα και του συστήματος ανίχνευσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα2.3.



Πιο αναλυτικά, τα ηχητικά κύματα που δημιουργούνται από μία συζήτηση ή από ένα σύστημα αναπαραγωγής ήχου, προσπίπτουν πάνω στην ανακλαστική επιφάνεια ενός παραθύρου, η οποία αρχίζει και πάλλεται. Η δέσμη του laser προσπίπτει στην ανακλαστική επιφάνεια και ανακλάται. Η ανακλώμενη αυτή δέσμη μετατοπίζεται ανάλογα με τις δονήσεις της επιφάνειας. Η ανακλώμενη δέσμη δηλαδή φέρει την πληροφορία που αναπαράγεται πίσω από την ανακλαστική επιφάνεια. Οι μετατοπίσεις της δέσμης στη συνέχεια μεταφέρονται ως γραμμική μετατόπιση πάνω στην επιφάνεια του οπτικού αισθητήρα. Αυτός, με την σειρά του δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα το οποίο θα ενισχυθεί από το ηλεκτρονικό σύστημα και θα εισαχθεί στη συνέχεια σε ένα μεγάφωνο για την αναπαραγωγή. Το σύστημά μας, εκμεταλλεύεται τη συγκεκριμένη μέθοδο ανίχνευσης της μετατόπισης.



Σχήμα2.3: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου ανίχνευσης της μετατόπισης

## Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

### 3.1: Ανιχνευτές φωτός

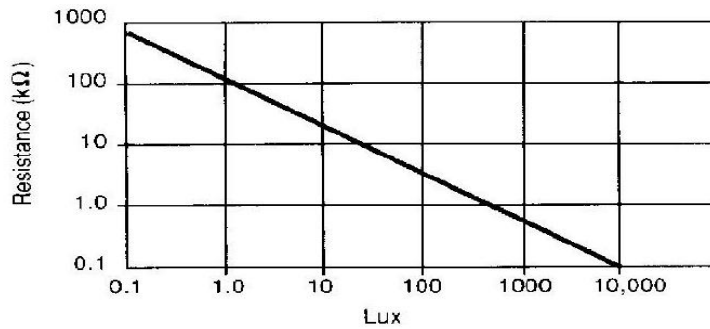
#### 3.1.1: Φωτοαντίσταση

Η φωτοαντίσταση ή φωτοκύτταρο είναι μια μεταβλητή αντίσταση η οποία ελέγχεται από την ένταση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η λειτουργία της φωτοαντίστασης βασίζεται στη μεταβολή της τιμής της αντίστασης που παρουσιάζει, ανάλογα με την ένταση του φωτός που προσπίπτει πάνω της. Συγκεκριμένα, η αντίσταση της μειώνεται με την αύξηση της έντασης του προσπίπτοντος φωτός. Η φωτοαντίσταση είναι κατασκευασμένη από ένα ημιαγώγιμο υλικό υψηλής αντίστασης[3].

Η αρχή λειτουργίας του φωτοκυττάρου στηρίζεται στο φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας. Η φωτοαγωγιμότητα είναι φαινόμενο της οπτικής, κατά το οποίο η αγωγιμότητα των υλικών αυξάνεται ως συνέπεια της έκθεσής τους σε Η/Μ ακτινοβολία. Όταν τα φωτόνια που προσπίπτουν σε μια φωτοαντίσταση, έχουν συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα του bandgap του ημιαγωγού, πραγματοποιείται απορρόφηση φωτός οπότε τα ηλεκτρόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να μεταβούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Όσο περισσότερα τα φωτόνια (μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας) που προσπίπτουν στην φωτοαντίσταση, τόσο περισσότερα τα προκύπτοντα ελεύθερα ηλεκτρόνια, επομένως τόσο μεγαλύτερο και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Επομένως τόσο μικρότερη η προκύπτουσα αντίσταση.

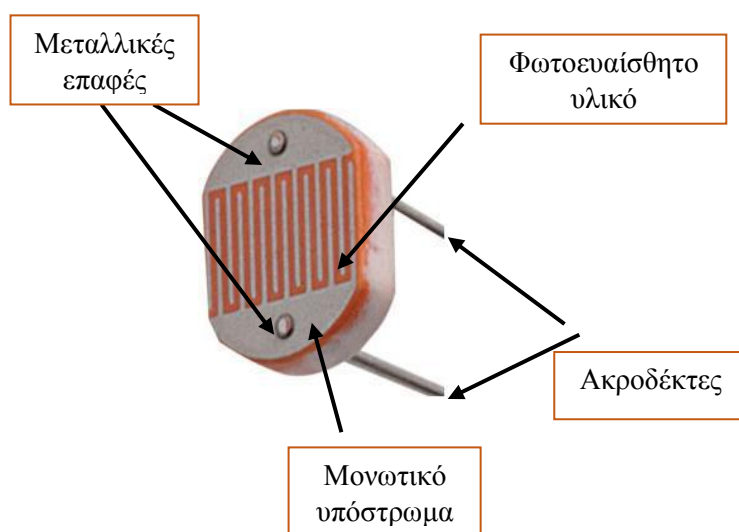
Στο σκοτάδι, το φωτοκύτταρο παρουσιάζει υψηλή αντίσταση  $\sim M\Omega$ , ενώ στο φως η αντίσταση του μειώνεται σε μερικές 100αδες  $\Omega$ . Το εύρος της αντίστασης και της ευαισθησίας του, μπορούν να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο.

Στο Σχήμα3.1 φαίνεται το διάγραμμα της αντίστασης συναρτήσει της έντασης του φωτός. Όπως φαίνεται, σε απόλυτο σκοτάδι η αντίσταση είναι μέγιστη. Με την αύξηση της έντασης του φωτός, η αντίσταση του υλικού μειώνεται λόγω δημιουργίας μεγάλων ρευμάτων.



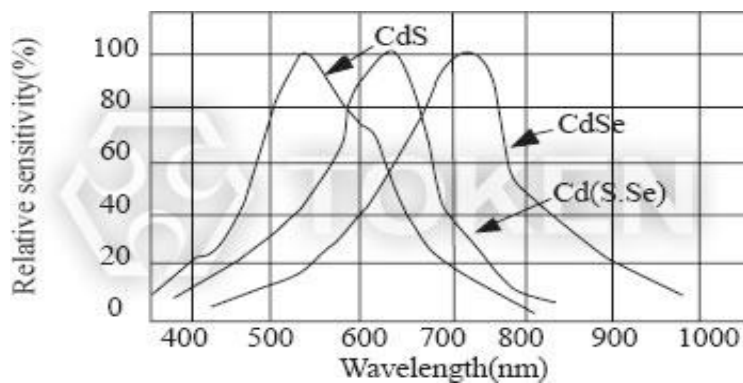
Σχήμα3.1: Διάγραμμα αντίστασης συναρτήσει έντασης φωτός

Η φωτοαντίσταση, αποτελείται από ένα φωτοευαίσθητο υλικό το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα μονωτικό υπόστρωμα που συνήθως είναι κατασκευασμένο από κεραμικό. Το υλικό τοποθετείται σε σχήμα ζιγκ – ζαγκ προκειμένου να ληφθεί η επιθυμητή αντίσταση και η ονομαστική ισχύς[4]. Ο λόγος που τοποθετείται σε τέτοιο σχήμα είναι για το διαχωρισμό της μεταλλικής περιοχής του εξαρτήματος σε δύο μέρη. Στη συνέχεια δημιουργούνται ωμικές επαφές σε κάθε πλευρά αυτής της περιοχής. Η αντίσταση αυτών των επαφών θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή, ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι αλλαγές οφείλονται μόνο στην επίδραση του φωτός.



Σχήμα3.2: Δομή της φωτοαντίστασης CdS

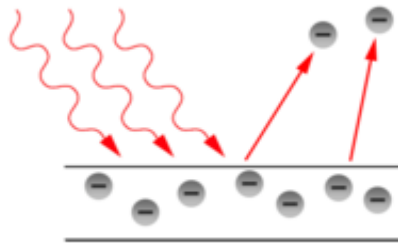
Η ευαισθησία του φωτοκυττάρου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του καθώς και από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας[5]. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του φωτοκυττάρου είναι η φασματική απόκριση, η οποία εκφράζει το ποσοστό ευαισθησίας του ημιαγώγιμου υλικού σαν συνάρτηση του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα3.3, το μήκος κύματος μέγιστης ευαισθησίας του CdS είναι 515nm, ενώ αλλάζοντας το λόγο σύστασης του CdS και του CdSe, η μέγιστη ευαισθησία μπορεί να αλλάξει από τα 515nm στα 730nm.



Σχήμα3.3: Φασματική καμπύλη απόκρισης για τρία διαφορετικά φωτοκύτταρα.

### 3.1.2: Φωτοδίοδος

Η αρχή λειτουργίας της φωτοδιόδου είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο όταν προσπίπτουν φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας σε μία μεταλλική επιφάνεια, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η ενέργεια των φωτονίων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με το έργο εξαγωγής του υλικού. Στα συνήθη μεταλλικά υλικά, το έργο εξαγωγής κυμαίνεται από 3 – 5eV. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα3.4.



Σχήμα3.4: Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Η σχέση που περιγράφει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι

$$h\nu = W + E_{\text{κιν}} \quad 2.2$$

όπου  $h\nu$  είναι η ενέργεια του φωτονίου,  $W$  το έργο εξαγωγής ηλεκτρονίου και  $E_{\text{κιν}}$  είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου.

Η φωτοδίοδος αποτελείται από μία δίοδο επαφής pn. Συγκεκριμένα, η φωτοδίοδος είναι δίοδος pn ανάστροφα πολωμένη. Το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο στην περίπτωση αυτή είναι πολύ μικρό της τάξεως των  $\mu\text{A}$ . Όταν φωτόνια προσκρούουν στην επαφή, δημιουργούνται ελεύθεροι φορείς, ηλεκτρόνια και οπές στην περιοχή απογύμνωσης. Το ρεύμα που προκύπτει είναι ανάλογο του αριθμού των φωτονίων, δηλαδή υπάρχει γραμμική αύξηση του ρεύματος με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός.

### **3.1.3: Φωτοτρανζίστορ**

Η λειτουργία του φωτοτρανζίστορ βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με αυτή της φωτοδιόδου αλλά επιπλέον προχωράει σε ενίσχυση του ρεύματος με αποτέλεσμα την αύξηση της ευαισθησίας του φωτοανιχνευτή. Στην περίπτωση αυτή η επαφή βάση-εκπομπός πολώνεται ορθά ενώ η επαφή βάση-συλλέκτης είναι ανάστροφα πολωμένη και τελικά ενισχύεται το ρεύμα του συλλέκτη.

## **3.2: Ενισχυτικά στοιχεία**

### **3.2.1: Το τρανζίστορ 2N3904**

Το 2N3904 είναι ένα κοινό NPN διπολικό τρανζίστορ γενικής χρήσης που χρησιμοποιείται για ενίσχυση χαμηλής ισχύος ή για διακοπτικές εφαρμογές. Είναι σχεδιασμένο για ρεύματα της τάξεως των 200mA, τιμές τάσης έως 40V και ισχύς 625mW. Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τρανζίστορ είναι το χαμηλό κόστος, η εύκολη διαθεσιμότητα και η ισχύς του. Στο Σχήμα3.5 φαίνεται το τρανζίστορ 2N3904 στην φυσική του μορφή.

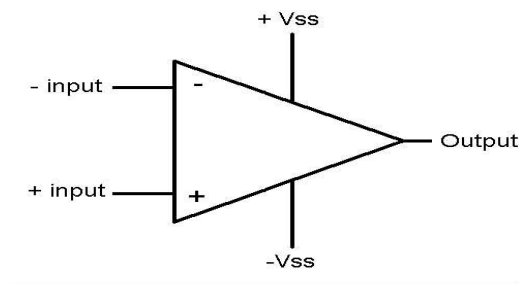


*Σχήμα3.5: Το τρανζίστορ 2N3904*

### **3.2.2: Ο τελεστικός ενισχυτής LM386**

Ένας τελεστικός ενισχυτής είναι ένας υψηλής απολαβής ενισχυτής, με διαφορετική είσοδο και συνήθως, μία έξοδο. Ένας τελεστικός ενισχυτής παράγει μια δυναμική έξοδο (σε σχέση με τη γείωση του κυκλώματος) που είναι συνήθως

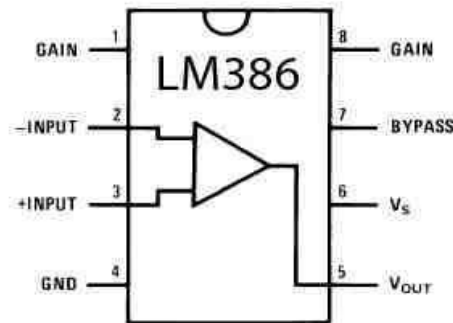
εκατοντάδες χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του. Οι τελεστικοί ενισχυτές χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για να κάνουν μαθηματικές πράξεις σε πολλά γραμμικά, μη-γραμμικά κυκλώματα και σε κυκλώματα εξαρτώμενα από τη συχνότητα. Τα χαρακτηριστικά ενός κυκλώματος που χρησιμοποιεί έναν τελεστικό ενισχυτή καθορίζονται από εξωτερικά εξαρτήματα με μικρή εξάρτηση από τις αλλαγές της θερμοκρασίας ή τις διακυμάνσεις στον ίδιο τον τελεστικό ενισχυτή, γεγονός που καθιστά τους τελεστικούς δημοφιλή δομικά στοιχεία για το σχεδιασμό ενός κυκλώματος. Στο Σχήμα3.6 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός τελεστικού ενισχυτή.



Σχήμα3.6: Το σχηματικό διάγραμμα του τελεστικού ενισχυτή

Ο τελεστικός ενισχυτής LM386 είναι ένας ενισχυτής ισχύος ακουστικών συχνοτήτων σχεδιασμένος για χρήση σε εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης τάσης[6]. Το κέρδος έχει οριστεί από τον κατασκευαστή στο 20 χωρίς εξωτερικά εξαρτήματα, αλλά η προσθήκη ενός πυκνωτή 10 $\mu$ F μεταξύ των ακίδων 1 και 8 μπορεί να αυξήσει το κέρδος στην τιμή 200. Η καταναλισκόμενη ισχύς είναι μόνο 24mW όταν λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας 6V κάνοντας το LM386 ιδανικό για χρήση σε εφαρμογές με μπαταρία. Κάποια από τα χαρακτηριστικά που τον κάνουν κατάλληλο για ακουστικές εφαρμογές είναι: η λειτουργία με χρήση ελάχιστων εξωτερικών εξαρτημάτων, το μεγάλο εύρος της τάσης τροφοδοσίας (4V–12V ή 5V–18V), το ρυθμιζόμενο κέρδος τάσης από 20 έως 200, το χαμηλό ρεύμα διαρροής εν ηρεμία, η γείωση εισόδου καθώς και η χαμηλή παραμόρφωση. Στο Σχήμα3.7 φαίνεται το διάγραμμα του ολοκληρωμένου κυκλώματος LM386. Οι κύριες χρήσεις του ενισχυτή LM386 είναι στους AM-FM ενισχυτές ραδιοφώνου, στους φορητούς ενισχυτές κασετόφωνων, στις ενδοεπικοινωνίες,

στα συστήματα ήχου της τηλεόρασης, σε μικρούς οδηγούς σερβομηχανών και στους μετατροπείς ισχύος.



Σχήμα3.7: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα LM386

### 3.3: Ηλεκτροακουστικοί Μετατροπείς

#### 3.3.1: Το μικρόφωνο

Το μικρόφωνο είναι μία ηλεκτρονική διάταξη που μετατρέπει μηχανικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα. Το μεγάφωνο, από την άλλη επιτελεί την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, το μεγάφωνο και το μικρόφωνο είναι γνωστά ως ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς.



Σχήμα3.8: Σχηματικό διάγραμμα αρχής λειτουργίας μικροφώνου

Η αρχή λειτουργίας του μικροφώνου αποδίδεται στο Σχήμα3.8. Το μικρόφωνο αποτελείται από ένα λεπτό ελαστικό διάφραγμα, το οποίο δονείται από τα ηχητικά κύματα που προσπίπτουν πάνω του[7]. Το διάφραγμα βρίσκεται



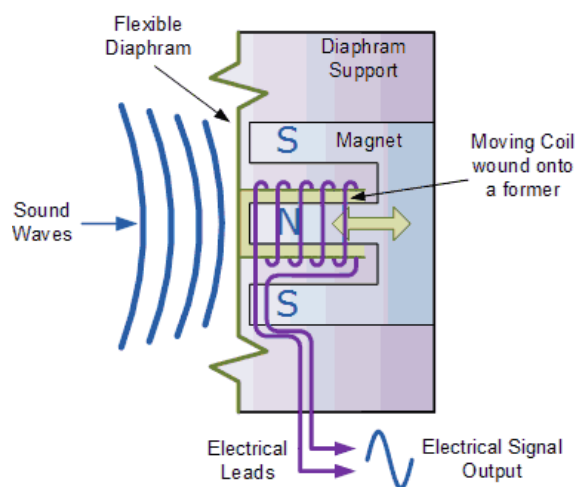
σε επαφή με ένα μικρό πηνίο το οποίο πάλλεται και αυτό. Το πηνίο βρίσκεται μέσα στο πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη. Κατά την ταλάντωση του διαφράγματος το πηνίο ταλαντώνεται και αυτό μέσα στο μαγνητικό πεδίο και έτσι δημιουργείται, λόγω του φαινομένου της Η/Μ επαγωγής (Νόμος Faraday), ένα ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα του πηνίου. Το επαγόμενο ηλεκτρικό σήμα οδηγείται μέσω ενός καλωδίου στη συσκευή που είναι συνδεδεμένη με το μικρόφωνο π.χ. στην κάρτα ήχου ενός Η/Υ.

Με βάση τη μέθοδο μετατροπής του ηχητικού σήματος σε ηλεκτρικό, τα μικρόφωνα διακρίνονται στις εξής τρεις βασικές κατηγορίες:

- Δυναμικά μικρόφωνα: η μετατροπή βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, όπως προαναφέρθηκε. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μικρόφωνα κινητού πηνίου, στα οποία το διάφραγμα είναι ενωμένο με ένα μικρό κινητό πηνίο τοποθετημένο μέσα στο πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και τα μικρόφωνα ταινίας, στα οποία όμως στη θέση του πηνίου υπάρχει μεταλλική ταινία, συνήθως από αλουμίνιο. Στο Σχήμα3.9 εικονίζεται η αρχή λειτουργίας του δυναμικού μικροφώνου όπου διακρίνονται καθαρά τα επιμέρους μέρη που το αποτελούν.

- Χωρητικά μικρόφωνα: η μετατροπή βασίζεται σε φαινόμενα της ηλεκτροστατικής. Το διάφραγμα παίζει το ρόλο ενός ταλαντούμενου οπλισμού πυκνωτή, του οποίου η κίνηση προκαλεί μεταβολές στην απόσταση των δύο οπλισμών του πυκνωτή. Οι μεταβολές της απόστασης των οπλισμών του πυκνωτή, λόγω του σταθερού φορτίου, προκαλούν αλλαγές στην τελική τάση.

- Πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα: η μετατροπή βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο συγκεκριμένοι κρύσταλλοι όταν δεχθούν πίεση, παράγουν ηλεκτρική τάση στα άκρα τους. Στα μικρόφωνα αυτά, η μηχανική ταλάντωση του διαφράγματος από τον ήχο, ασκεί την απαραίτητη πίεση στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, με τελικό αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του κρυστάλλου.



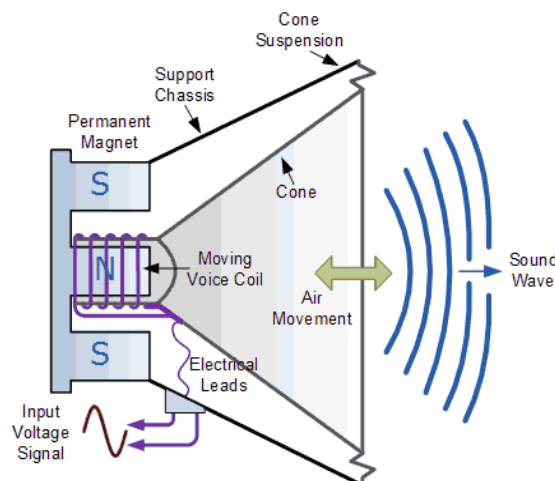
Σχήμα3.9: Εικονίζεται η αρχή λειτουργίας του δυναμικού μικροφώνου. Φαίνεται το ελαστικό διάφραγμα, το πηνίο, ο σταθερός μαγνήτης και το επαγόμενο ηλεκτρικό σήμα στα άκρα του πηνίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός μικροφώνου είναι:

- Ευαισθησία: η ικανότητα του μικροφώνου να δημιουργεί ικανοποιητικού πλάτους μεταβολές τάσεις από τις μικρές ηχητικές πιέσεις που ασκούνται στην επιφάνειά του.
- Απόκριση συχνοτήτων: το μέγεθος το οποίο εκφράζει την ομοιομορφία στην ευαισθησία του μικροφώνου για ολόκληρη την περιοχή ακουστικών συχνοτήτων με εύρος από 20Hz έως 20KHz.
- Πιστότητα: η ικανότητα του μικροφώνου να μετατρέπει τις μεταβολές πίεσης σε μεταβολές τάσης χωρίς να προκαλούνται αλλοιώσεις στο τελικό σήμα
- Σύνθετη αντίσταση: είναι μία τιμή από 50Ω έως 50kΩ και αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει ένα μικρόφωνο, ανάλογα πάντα με το είδος του. Η προσαρμογή αντιστάσεων μεταξύ μικροφώνου και ενισχυτή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την σύνθετη αντίσταση.

### **3.3.2: Το μεγάφωνο**

Το μεγάφωνο είναι μία διάταξη, η οποία έχει ως σκοπό τη μετατροπή της λαμβανόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ακουστική ενέργεια, δηλαδή την ακριβώς αντίστροφη φυσική διαδικασία από ένα μικρόφωνο. Στο Σχήμα3.10 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του μεγαφώνου. Το παραγόμενο αναλογικό ηλεκτρικό σήμα μέσω των καλωδίων, περνάει στο πηνίο όπου δημιουργείται ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η επαγόμενη ηλεκτρομαγνητική δύναμη αντιτίθεται στο σταθερό μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη με αποτέλεσμα την μετακίνηση του πηνίου. Η μετακίνηση του πηνίου προκαλεί με τη σειρά της τη μετακίνηση του διαφράγματος – κώνου του μεγαφώνου. Η ταλάντωση του κώνου προκαλεί τη διαταραχή των μορίων του αέρα που βρίσκεται τριγύρω με αποτέλεσμα την παραγωγή ακουστικών κυμάτων.



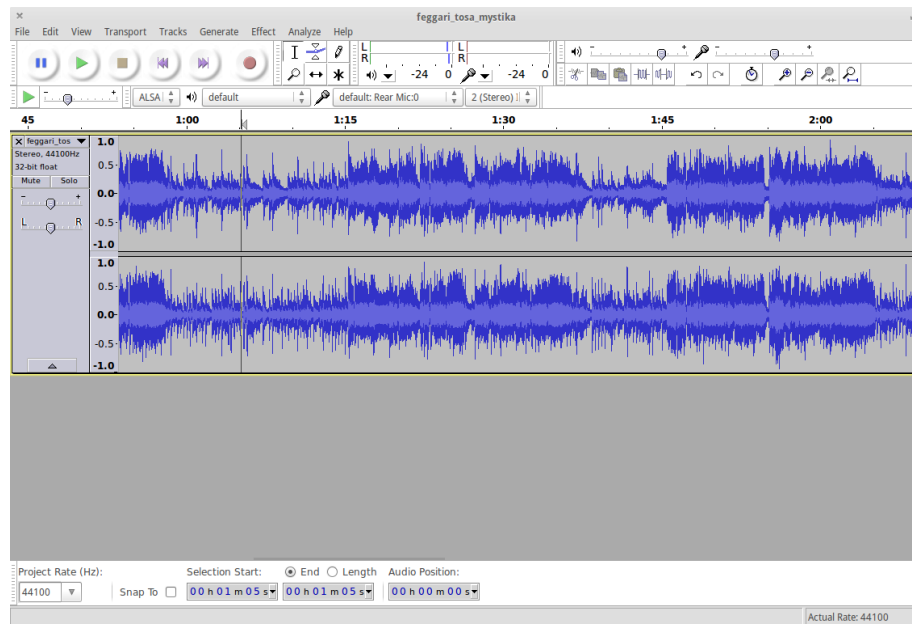
*Σχήμα3.10: Εικονίζεται η αρχή λειτουργίας του μεγαφώνου. Φαίνεται η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε ακουστικό σήμα.*

### **3.4: Το λογισμικό Audacity**

Το Audacity είναι ένα δωρεάν πρόγραμμα ανοικτού κώδικα επεξεργασίας και καταγραφής ψηφιακού ήχου, διαθέσιμο για Windows, MacOSX, Linux και άλλα λειτουργικά συστήματα. Το Audacity δημιουργήθηκε από τους Dominic

Mazzoni και Roger Dannenberg στο Carnegie Mellon University[8]. Μερικά από τα πλεονεκτήματα - δυνατότητες της εφαρμογής Audacity είναι:

- Καταγραφή ήχου σε πραγματικό χρόνο
- Ηχογράφηση από μικρόφωνο, είσοδο γραμμής, USB / Firewire συσκευές και άλλα
- Εγγραφή σε συχνότητες δειγματοληψίας έως 192.000 Hz (ανάλογα με κατάλληλο υλικό)
- Καταγραφή πολλαπλών κανάλια ταυτόχρονα
- Συμβατότητα με πολλά διαφορετικά είδη αρχείων
- Εξαγωγή σε ακόμη περισσότερες μορφές αρχείων
- Εύκολη επεξεργασία με Αποκοπή, Αντιγραφή, Επικόλληση και Διαγραφή
- Επεξεργασία και μίξη με μεγάλο αριθμό καναλιών
- Πολλά είδη “εφέ” για επεξεργασία
- Δυνατότητα εγκατάστασης πρόσθετων λειτουργιών
- Φασματογράφηση για την οπτικοποίηση των συχνοτήτων
- Φασματική ανάλυση κυματομορφών για την ανάλυση των συχνοτήτων



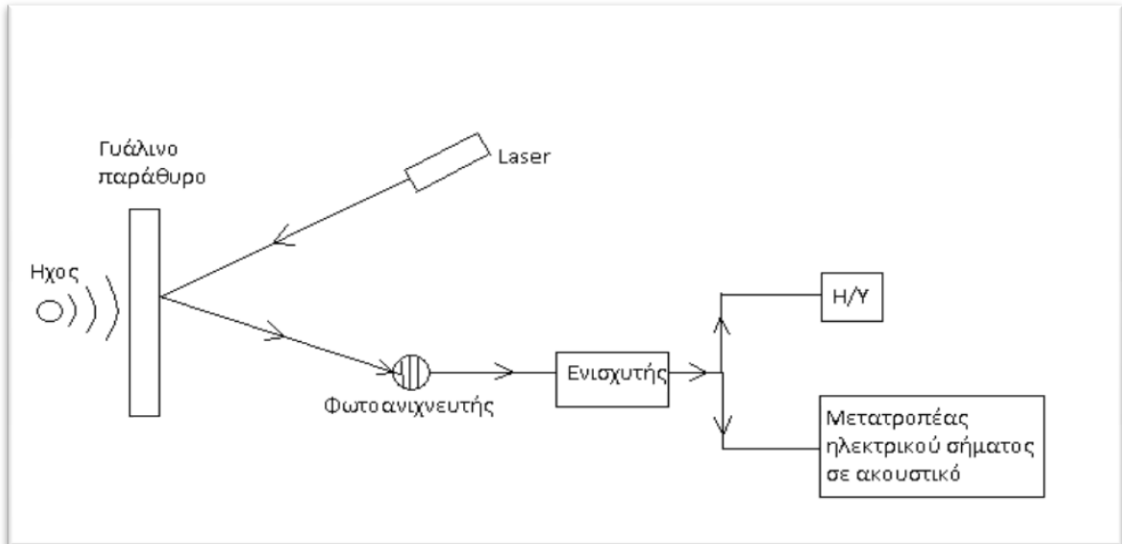
Σχήμα3.11: Στιγμιότυπο του λογισμικού Audacity σε λειτουργία

Για την ψηφιακή αποθήκευση και επεξεργασία όλων των ηχητικών αρχείων που δημιουργήθηκαν κατά την λήψη των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά το λογισμικό Audacity. Ο συνδυασμός των σχεδόν αμέτρητων δυνατοτήτων και εργαλείων που προσφέρει καθώς και της “ελεύθερης φύσεως” ως προς την χρήση του, το καθιστά χρήσιμο εργαλείο για την εκπόνηση της εργασίας μας. Στο Σχήμα3.11 φαίνεται ένα στιγμιότυπο του λογισμικού σε λειτουργία ηχογράφησης των πειραματικών αποτελεσμάτων.

### 3.5: Αρχή λειτουργίας του πειράματος

Η λειτουργία του συστήματος απομακρυσμένης ανίχνευσης ήχου μέσω της χρήσης laser, ή αλλιώς οπτικό μικρόφωνο, φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα3.12[9]. Το παραγόμενο ακουστικό σήμα διαδίδεται στον αέρα και προσπίπτει στην πίσω πλευρά μίας ανακλαστικής επιφάνειας. Η ανακλαστική επιφάνεια δονείται ανάλογα με το πλάτος και τη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων που προσπίπτουν πάνω σε αυτή. Στην μπροστινή επιφάνεια της ανακλαστικής επιφάνειας προσπίπτει υπό γωνία, η δέσμη ενός laser, η οποία στη συνέχεια ανακλάται έτσι ώστε η γωνία πρόσπτωσης (ως προς την κάθετο στην επιφάνεια) να ισούται με τη

γωνία ανάκλασης. Η μετακίνηση της ανακλαστικής επιφάνειας προκαλεί τη μετακίνηση της ανακλώμενης δέσμης laser. Η ανίχνευση και καταγραφή της μετακίνησης της ανακλώμενης δέσμης laser θα οδηγήσει στην ανάκτηση του ηχητικού σήματος.



Σχήμα3.12: Η αρχή λειτουργίας του οπτοηλεκτρονικού συστήματος για την απομακρυσμένη ανίχνευση ηχητικών κυμάτων.

Η ανακλώμενη δέσμη laser προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φωτοκυττάρου, το οποίο λειτουργεί ως φωτοανιχνευτής. Η μετακίνηση της δέσμης προκαλεί μεταβολές στην ανιχνευόμενη ένταση ακτινοβολίας από το φωτοκύτταρο οι οποίες μεταφράζονται σε αλλαγές στην αντίσταση του φωτοκυττάρου. Οι αλλαγές της αντίστασης μεταβάλλουν το ρεύμα στην είσοδο ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος το οποίο παράλληλα παρέχει και ενίσχυση του ηλεκτρικού σήματος. Τελικά παράγεται ένα ενισχυμένο, χρονομεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα το οποίο μέσω των ακουστικών μεταφέρεται στην κάρτα ήχου του H/Y. Εκεί γίνεται η ψηφιοποίηση του σήματος όπου τελικά μέσω του προγράμματος καταγραφής, το σήμα αποκωδικοποιείται και αποθηκεύεται τελικά σε αρχείο ήχου. Αν δεν είναι επιθυμητή η αποθήκευση του τελικού σήματος, τότε η έξοδος του ηλεκτρονικού κυκλώματος μπορεί να συνδεθεί απευθείας στην είσοδο ενός μεγαφώνου, για άμεση αναπαραγωγή του ηχητικού σήματος[10].

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται σ' αυτού του είδους τα πειράματα είναι η ύπαρξη ανεπιθύμητων πηγών θορύβου. Οι κυριότερες πηγές θορύβου είναι ο περιβάλλον φωτισμός, ο κυκλοφοριακός θόρυβος, η αστάθεια του οπτοηλεκτρονικού συστήματος και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα π.χ. καλώδια, ποτενσιόμετρα. Η αποφυγή του θορύβου επιτυγχάνεται με τη μείωση του φωτισμού, ή αν αυτό δεν είναι εφικτό, η διεξαγωγή μετρήσεων θα πρέπει να γίνεται βραδινές ώρες. Η βελτίωση της σταθερότητας ολόκληρου του συστήματος είναι πολύ σημαντική για την όσο το δυνατό μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση του θορύβου από τη διαδικασία. Όσον αφορά την ηλεκτρονική συσκευή, χρειάζεται να έχουν χρησιμοποιηθεί ποιοτικά εξαρτήματα και τα ελάχιστα απαιτούμενα μήκη καλωδίων για ελαχιστοποίηση του θορύβου.

Το οπτοηλεκτρονικό σύστημα για την απομακρυσμένη ανίχνευση ήχου, με χρήση Η/Μ ακτινοβολίας laser, είναι απλό και εύκολο στην κατασκευή, χρήζει όμως προσοχής και σταθερότητας κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων. Επίσης είναι οικονομικό και μπορεί εύκολα να συγκριθεί στο αποτέλεσμα με πολύπλοκα και δαπανηρά συστήματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

## Κεφάλαιο 4: Πειραματική Διαδικασία

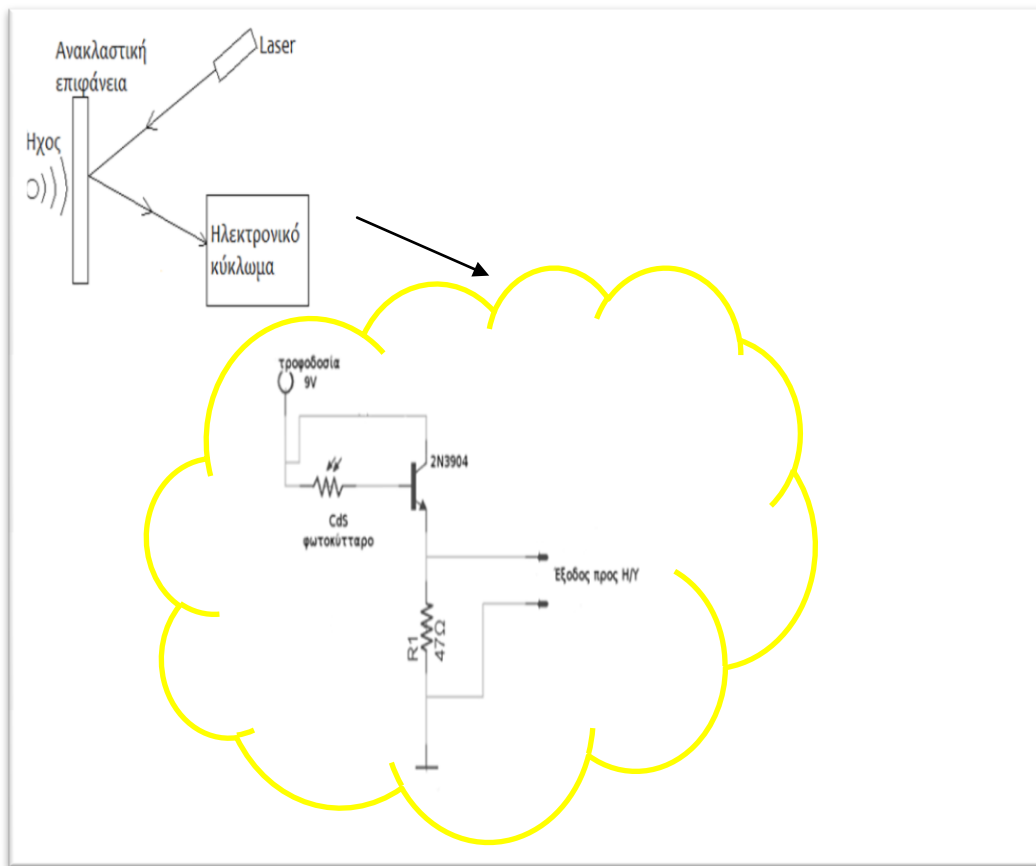
### 4.1: Έλεγχος δοκιμαστικής πειραματικής διάταξης

Αρχικά, κατασκευάστηκε μια προκαταρκτική, δοκιμαστική διάταξη για την επιβεβαίωση της αρχής λειτουργίας του οπτοηλεκτρονικού συστήματος δηλαδή ότι το φως μπορεί να μεταφέρει τον ήχο. Η διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, αποτελείται από ένα laser pointer χαμηλής ισχύος, 25mW, το οποίο εκπέμπει στα 532nm, ένα καθρέπτη (ανακλαστική επιφάνεια), μία μπαταρία 9V, ένα φωτοκύτταρο CdS, ένα ηρη τρανζίστορ 2N3904, μία αντίσταση 47Ω και ένα σετ ακουστικών τα οποία συνδέονται σε έναν Η/Υ. Ο ήχος που πρόκειται να καταγραφεί προέρχεται από ένα ηχείο το οποίο τοποθετείται ακριβώς πίσω από την ανακλαστική επιφάνεια. Η δοκιμαστική αυτή διάταξη είναι ικανή να οδηγήσει στην επιβεβαίωση ότι ο ήχος προκαλεί την μετακίνηση της φωτεινής δέσμης και ταυτόχρονα μπορεί να ανακατασκευαστεί.

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας laser επιλέχθηκε στην ορατή περιοχή του φάσματος. Συνήθως, η πηγή ακτινοβολίας στις κατασκοπευτικές εφαρμογές είναι μη ορατή αλλά για τους σκοπούς της πτυχιακής μας εργασίας και για διευκόλυνση των ευθυγραμμίσεων, επιλέχθηκε  $\lambda=532\text{nm}$  και συγκεκριμένα στο πράσινο. Ως ανακλαστική επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε ένας στρογγυλός καθρέπτης διαμέτρου 2 ιντσών και πάχους 12mm. Η απόσταση του ηχείου από τον καθρέπτη επιλέχθηκε αρχικά μικρή, 5cm ώστε η ένταση του ήχου που δονεί την επιφάνεια να είναι μεγάλη. Ως ανιχνευτής της ακτινοβολίας laser λειτουργεί το φωτοκύτταρο CdS το οποίο είναι εύκολα προσιτό και αποκρίνεται στα 532nm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Η διάμετρος του φωτοκυττάρου είναι περίπου 13mm και η διάμετρος της δέσμης του laser pointer περίπου η ίδια. Το transistor δίνει ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα το οποίο μεταφέρεται τελικά στην κάρτα ήχου του Η/Υ προκειμένου να γίνει η ψηφιακή μετατροπή καθώς και η αποθήκευση σε ακουστικό σήμα.



Κατά την προετοιμασία του πειράματος το laser pointer τοποθετείται σε μια βάση ρυθμιζόμενου ύψους. Έπειτα ελέγχονται όλες οι επιμέρους συνιστώσες της πειραματικής διάταξης, καθρέπτης, ηλεκτρονικό κύκλωμα, laser, ώστε να βρίσκονται στο ίδιο ύψος. Ο καθρέπτης τοποθετείται σε μικρομετρική βάση, η οποία είναι απαραίτητη για τη ρύθμιση της θέσης της ανακλώμενης δέσμης στην επιφάνεια του φωτοκυττάρου. Μια φωτογραφία του ηλεκτρονικού κυκλώματος, υλοποιημένο πάνω στο breadboard, φαίνεται στο Σχήμα4.2.



Σχήμα4.1: Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμαστικής οπτοηλεκτρονικής διάταξης

Κατά την εκτέλεση του πειράματος, επιλέχθηκε ως πηγή ακουστικού σήματος από το ηχείο, ένα μουσικό κομμάτι. Αφού η διάταξη ευθυγραμμίστηκε, ώστε όλη η δέσμη του laser να προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φωτοκυττάρου, ελέγχθηκε το ηχητικό αποτέλεσμα της πειραματικής διάταξης. Η διάταξη πράγματι ανίχνευε το μουσικό κομμάτι μέσω των αλλαγών στην ένταση

της ανιχνευόμενης οπτικής ακτινοβολίας. Εξαιτίας των μεγάλων επιπέδων θορύβου, η απόδοση του καταγραφόμενου ήχου ήταν αρκετά χαμηλή. Στη συνέχεια, μετακινώντας μικρομετρικά τον καθρέπτη, αλλάζοντας έτσι το ποσοστό της ανακλώμενης δέσμης που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φωτοκυττάρου, η ποιότητα του παραγόμενου ακουστικού σήματος, αυξήθηκε σημαντικά. Συγκεκριμένα, για το 50% της δέσμης να προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοκυττάρου, το ανακτώμενο σήμα βρέθηκε βέλτιστο.

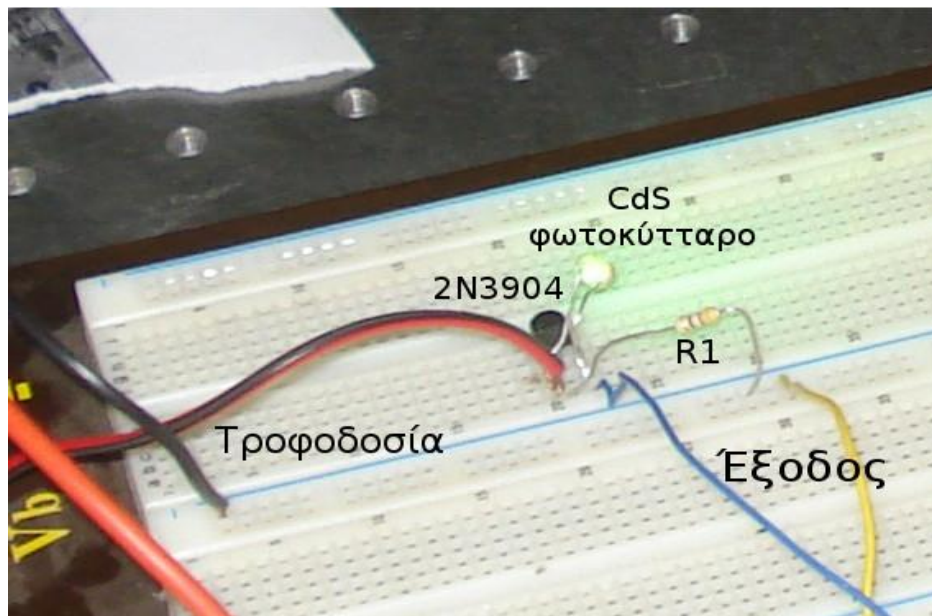
Στο αρχείο ήχου <<test\_100%beam\_5cm.mp3>>

[https://www.dropbox.com/s/9ttwklr0qqt5na3/test\\_100%25beam\\_5cm.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/9ttwklr0qqt5na3/test_100%25beam_5cm.mp3?dl=0)

και στο επόμενο αρχείο <<test\_50%beam\_5cm.mp3>>

[https://www.dropbox.com/s/gd011na75130sky/test\\_50%25beam\\_5cm.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/gd011na75130sky/test_50%25beam_5cm.mp3?dl=0)

είναι διαθέσιμα τα καταγραφόμενα μουσικά κομμάτια για ποσοστά 100% και 50% δέσμης laser πάνω στο φωτοκύτταρο, αντίστοιχα. Όπως διαπιστώνεται η απόδοση του δεύτερου ηχητικού σήματος με 50% ποσοστό δέσμης, είναι σαφώς καλύτερη.



Σχήμα4.2: Φωτογραφία του ηλεκτρονικού κυκλώματος στο breadboard. Πάνω στο CdS φωτοκύτταρο διακρίνεται η πράσινη ακτινοβολία του laser pointer

Έπειτα, διατηρώντας το ποσοστό της προσπίπτουσας δέσμης στο 50%, ελέγχθηκε η επίδραση που έχει η αύξηση της απόστασης μεταξύ ηχείου και καθρέπτη, στο ανακτώμενο σήμα. Έτσι η απόσταση ηχείου – καθρέπτη αυξήθηκε από τα 5cm στα 30cm. Καταγράφηκε αύξηση των επιπέδων θορύβου και μικρή μείωση της ολικής απόδοσης, όχι σε επίπεδο τέτοιο ώστε να επηρεαστεί το τελικό αποτέλεσμα. Στο αρχείο <<test\_50%beam\_30cm.mp3>>

[https://www.dropbox.com/s/9udqymx49vy59rw/test\\_50%25beam\\_30cm.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/9udqymx49vy59rw/test_50%25beam_30cm.mp3?dl=0)

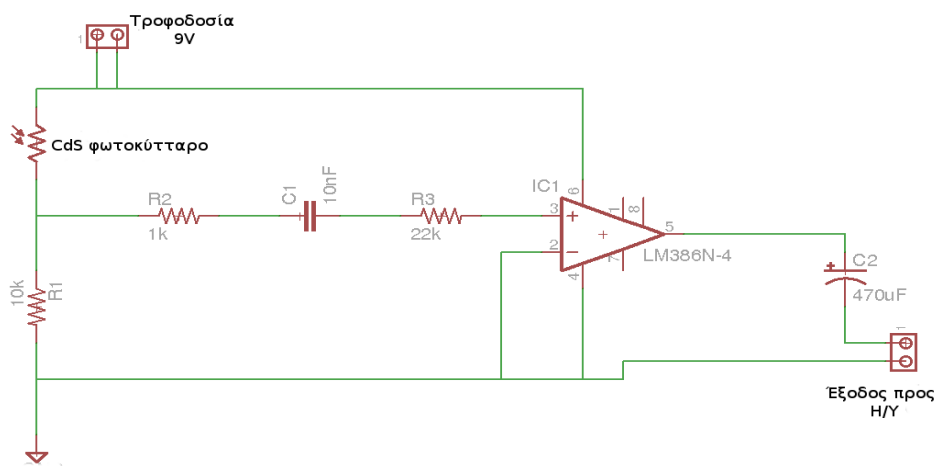
είναι διαθέσιμο το καταγραφόμενο ακουστικό σήμα για τη μεγαλύτερη απόσταση, 30cm. Όπως προκύπτει, το καταγραφόμενο αποτέλεσμα δίνει τη δυνατότητα χρήσης της διάταξης ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις.

Συνοψίζοντας, ο έλεγχος αυτός της δοκιμαστικής, πειραματικής διάταξης επιβεβαιώνει την επιτυχημένη ικανότητα ανίχνευσης του ήχου με την χρήση φωτεινής πηγής laser. Μάλιστα βρέθηκε ότι στην περίπτωση όπου ένα μέρος της δέσμης, ~ 50% και όχι ολόκληρη, προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του ανιχνευτή, το καταγραφόμενο ακουστικό σήμα είναι ιδιαίτερα βελτιωμένο. Επίσης η αύξηση της απόστασης του ήχου από την ανακλαστική επιφάνεια, στο αποτέλεσμα, δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την εφαρμογή της διάταξης σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

#### **4.2: Η κύρια πειραματική διάταξη – Αποτελέσματα**

Μετά την επιτυχή επιβεβαίωση της αρχής λειτουργίας του οπτοηλεκτρονικού συστήματος, σειρά πήρε η κατασκευή της κύριας πειραματικής διάταξης για την απομακρυσμένη ανίχνευση ήχου. Η κύρια οπτοηλεκτρονική διάταξη, η οποία φαίνεται στο Σχήμα4.3, περιέχει τον γνωστό ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων σε ολοκληρωμένη μορφή, LM386. Το σημαντικό πλεονέκτημα της νέας αυτής διάταξης είναι ότι παρέχει επιπλέον ενίσχυση στο ανιχνευόμενο ακουστικό σήμα. Η συνδεσμολογία του LM386 είναι αρκετά απλή αφού απαιτεί μόνο τέσσερα εξωτερικά εξαρτήματα για την λειτουργία του. Το laser pointer αντικαθίσταται με ένα εργαστηριακό συνεχές

διοδικό laser ισχύος 500mW, με μήκος κύματος 532nm. Ο φωτοανιχνευτής παραμένει ο ίδιος, το CdS φωτοκύτταρο. Η αντίσταση R3 που συνδέεται στην είσοδο του LM386 χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της έντασης του παραγόμενου ήχου σε σταθερή τιμή, θα μπορούσε αντί αυτής να χρησιμοποιηθεί μία μεταβαλλόμενη αντίσταση ώστε να υπάρχει η δυνατότητα της ρύθμισης της έντασης. Στην προκειμένη περίπτωση δεν θεωρήθηκε λειτουργική η χρήση ποτεσιόμετρου, λόγω του ότι η μηχανική φύση του, εισαγάγει επιπλέον θόρυβο στο σύστημα. Τελικά, η έξοδος του LM386 οδηγεί την κάρτα ήχου του ηλεκτρονικού υπολογιστή στον οποίο γίνεται η καταγραφή του ανιχνευόμενου ηχητικού σήματος, μέσω του λογισμικού Audacity.



Σχήμα4.3: Το σχηματικό του κύριου ηλεκτρονικού κυκλώματος

Επίσης, για την ρεαλιστικότερη απόδοση των συνθηκών του πειράματος, ο καθρέπτης αντικαταστάθηκε από γυάλινη/πλαστική ανακλαστική επιφάνεια. Ο καθρέπτης έχει ανακλαστικότητα περίπου 99% αλλά δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές απαιτήσεις της απομακρυσμένης ανίχνευσης ήχου π.χ. σε κτίρια με γυάλινα ή πλαστικά παράθυρα. Το γυαλί με μόνο 4% ανακλαστικότητα, αποτελεί το κατάλληλο υλικό για τον έλεγχο της απόδοσης της ανίχνευσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές ανακλαστικές επιφάνειες, μία γυάλινη και μία από plexiglass, για τον έλεγχο της κύριας οπτοηλεκτρονικής διάταξης.

Κατά την εκτέλεση του πειράματος τοποθετήθηκε αρχικά η plexiglass επιφάνεια σε σταθερή βάση πάνω σε ένα τραπέζι. Πίσω από αυτή, σε απόσταση 15cm, τοποθετήθηκαν τα δύο ηχεία τα οποία παρήγαγαν το ακουστικό σήμα. Το ηχητικό σήμα σε αυτή την περίπτωση ήταν μία ηχογραφημένη ανθρώπινη ομιλία η οποία μετρούσε από τον αριθμό ένα έως τον αριθμό δεκαπέντε. Το πρωτότυπο ακουστικό σήμα όπως καταγράφηκε από το Audacity, φαίνεται στο Σχήμα4.4α. Για δέσμη laser ~50% πάνω στην επιφάνεια του φωτοκυττάρου, το αναπαραγόμενο/καταγραφόμενο ακουστικό σήμα φαίνεται στο Σχήμα4.4β. Φαίνεται η εξαιρετική ταύτιση μεταξύ των πρωτότυπων και ανακτημένων κυματομορφών. Στο αρχείο <<main\_plexiglass\_15cm.mp3>>

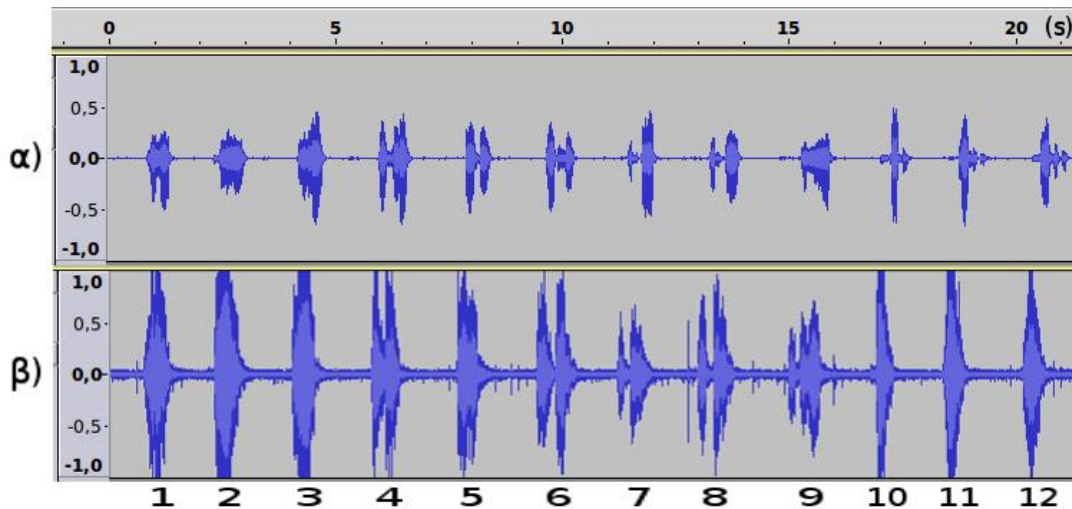
[https://www.dropbox.com/s/enyzj969ue70yvx/main\\_plexiglass\\_15cm.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/enyzj969ue70yvx/main_plexiglass_15cm.mp3?dl=0)

είναι διαθέσιμο το καταγραφόμενο ακουστικό σήμα, όπως προκύπτει με την κύρια οπτοηλεκτρονική διάταξη. Το σήμα είναι αρκετά καθαρό ώστε να συμπεράνουμε ότι η απόδοση είναι εξαιρετικά ικανοποιητική.

Στην συνέχεια του πειράματος αυξήθηκε η απόσταση των ηχείων από την plexiglass επιφάνεια, στο 1m για τον έλεγχο του τρόπου επιρροής της απόστασης αλλά και της χαμηλότερης έντασης του ακουστικού σήματος στην απόδοση της διάταξης. Στην περίπτωση αυτή το πλάτος έντασης του ήχου πάνω στην επιφάνεια είναι μικρότερο, επομένως και οι δονήσεις που προκαλούνται στην plexiglass επιφάνεια. Ο ήχος που καταγράφηκε είναι διαθέσιμος στο αρχείο <<main\_plexiglass\_100cm.mp3>>

[https://www.dropbox.com/s/xtjbs7bv3vzypus/main\\_plexiglass\\_100cm.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/xtjbs7bv3vzypus/main_plexiglass_100cm.mp3?dl=0)

Όπως προκύπτει το καταγραφόμενο ηχητικό σήμα είναι πιο ασθενές, όμως ικανοποιητικά καθαρό.



Σχήμα 4.4: α) Το πρωτότυπο ακουστικό σήμα από ηχογραφημένη ανθρώπινη φωνή μετρώντας από 1-15 και β) το ανακτημένο ακουστικό σήμα με την κύρια πειραματική διάταξη. Τα σήματα είναι με το ελεύθερο λογισμικό Audacity. Η ταύτιση είναι εξαιρετική.

Στη συνέχεια έγινε η αντικατάσταση της ανακλαστικής επιφάνειας με μία γυάλινη επιφάνεια, ενώ οι υπόλοιποι παράμετροι του πειράματος διατηρήθηκαν οι ίδιοι. Στο αρχείο << main\_glass\_15cm.mp3 >>

[https://www.dropbox.com/s/mq4n012ux9revsk/main\\_glass\\_15cm.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/mq4n012ux9revsk/main_glass_15cm.mp3?dl=0)

είναι διαθέσιμο το ανακτώμενο ηχητικό σήμα. Η απόδοση του ήχου όπως προκύπτει, βρίσκεται σε εξίσου ικανοποιητικό επίπεδο. Επομένως η οπτοηλεκτρονική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία τόσο σε γυάλινες όσο και plexiglass ανακλαστικές επιφάνειες.

Τέλος, όπως έχει προαναφερθεί, η απόδοση του αναπαραγόμενου ακουστικού σήματος είναι καλύτερη όταν ο θόρυβος που εισάγεται από τον περιβάλλοντα φωτισμό, είναι ελαχιστοποιημένος. Στην περίπτωση που ο φωτισμός δεν μπορεί να αποφευχθεί αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σημαντικού ποσού θορύβου στο καταγραφόμενο σήμα. Έτσι στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση του φωτισμού στο ανακτώμενο ηχητικό σήμα. Πραγματοποιήθηκε το ίδιο πείραμα με διαφορετικές συνθήκες θορύβου, τόσο με μηδενικό (κλειστά φώτα εργαστηρίου) όσο και με ισχυρό φωτισμό (ανοιχτά

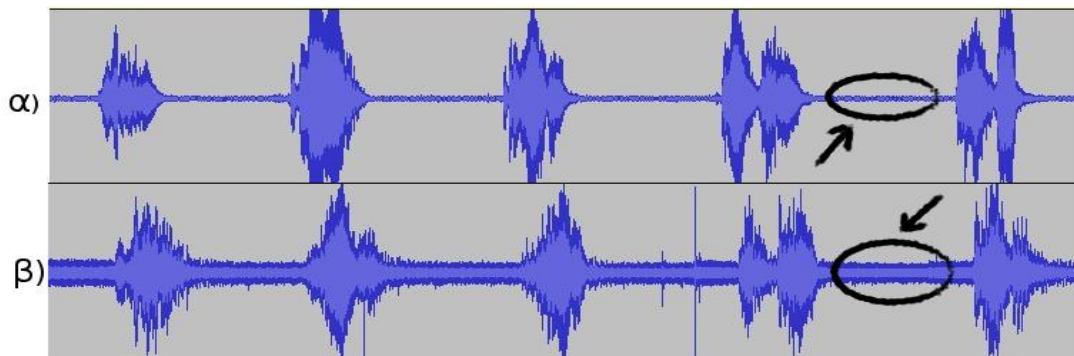
φώτα εργαστηρίου). Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η plexiglass επιφάνεια και απόσταση ήχου – επιφάνειας 15cm. Στο Σχήμα4.5 παρουσιάζεται το ανακτώμενο σήμα υπό συνθήκες α) μηδενικού φωτισμού και β) ισχυρού φωτισμού. Φαίνεται ότι το εισαγόμενο πλάτος του θορύβου είναι αρκετά μεγαλύτερο στην περίπτωση του ισχυρού φωτισμού. Στα αρχεία <<main\_plexiglass\_15cm.mp3>>

[https://www.dropbox.com/s/enyzj969ue70yvx/main\\_plexiglass\\_15cm.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/enyzj969ue70yvx/main_plexiglass_15cm.mp3?dl=0)

και στο επόμενο <<main\_plexiglass\_15cm\_light.mp3>>

[https://www.dropbox.com/s/acuiazm6e6vp72r/main\\_plexiglass\\_15cm\\_light.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/acuiazm6e6vp72r/main_plexiglass_15cm_light.mp3?dl=0)

είναι διαθέσιμα τα ανακτώμενα ηχητικά σήματα υπό συνθήκες μηδενικού και έντονου φωτισμού, αντίστοιχα. Η διαφορά στα επίπεδα θορύβου είναι σαφής.

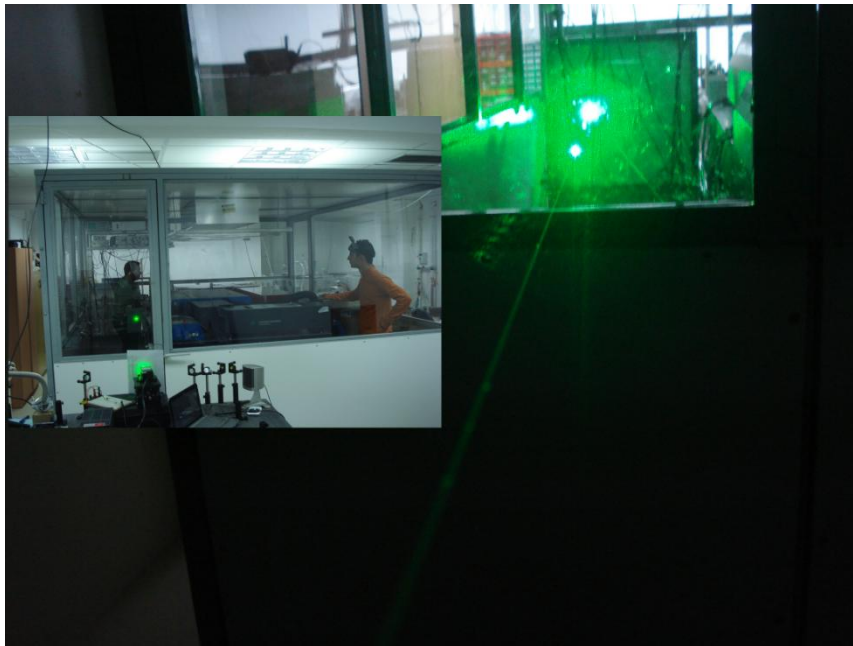


Σχήμα4.5: Το ακουστικό σήμα υπό συνθήκες α) μηδενικού φωτισμού και β) ισχυρού φωτισμού. Τα βέλη δείχνουν τα διαφορετικά επίπεδα θορύβου στα δύο σήματα

#### 4.3: Αποτελέσματα πείραματος υπό πραγματικές συνθήκες

Στην συνέχεια, επιλέχθηκε ως πηγή του ήχου η πραγματική ανθρώπινη φωνή αντί για κάποιο ηχογραφημένο ήχο ο οποίος παραγόταν από τα ηχεία. Για το συγκεκριμένο μέρος του πειράματος, η διάταξη μετακινήθηκε σε άλλο σημείο του εργαστηρίου έτσι ώστε να εκμεταλλευτεί ένα δωμάτιο μέσα στο ήδη υπάρχον

εργαστήριο, κατασκευασμένο από plexiglass τοιχώματα. Η διάταξη τοποθετήθηκε περίπου δύο μέτρα μακριά από την μπροστινή ανακλαστική επιφάνεια του δωματίου. Μέσα στο δωμάτιο τοποθετήθηκαν δύο άνθρωποι (εμείς) των οποίων η πραγματική συνομιλία επρόκειτο να καταγραφεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ομιλία δεν κατευθυνόταν προς την ανακλαστική επιφάνεια του δωματίου αλλά προς τυχαίες κατεύθυνσεις. Το γεγονός αυτό προσομοιάζει ρεαλιστικά τις συνθήκες που επικρατούν σε οποιοδήποτε απομακρυσμένο χώρο όπου απαιτείται η ανίχνευση συνομιλίας. Επιπλέον, η ανθρώπινη ομιλία παρουσιάζει αυξομειώσεις έντασης, γεγονός που επίσης αποδίδει ρεαλιστικά τις συνθήκες αλλά ταυτόχρονα δυσχεραίνει τη συλλογή καθαρών ακουστικών σημάτων.



*Σχήμα 4.6: Φωτογραφία του δωματίου από plexiglass κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος.*

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας είναι διαθέσιμα στο αρχείο <<real\_conversation.mp3>>

[https://www.dropbox.com/s/iwyogz01tzw1ire/real\\_conversation.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/iwyogz01tzw1ire/real_conversation.mp3?dl=0)



Επίσης μερικά ακόμη ηχητικά αποτελέσματα για την απομακρυσμένη ανίχνευση ήχου σε ρεαλιστικές συνθήκες είναι διαθέσιμα στα παρακάτω αρχεία ήχου: <<talk.mp3>>

<https://www.dropbox.com/s/hx894dk078qwlsv/talk.mp3?dl=0>

και <<talk\_3m.mp3>>

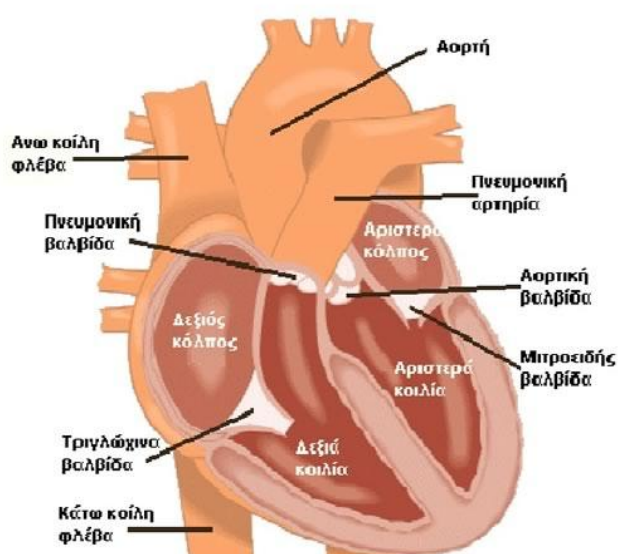
[https://www.dropbox.com/s/x3de9doa8ytrvrys/talk\\_3m.mp3?dl=0](https://www.dropbox.com/s/x3de9doa8ytrvrys/talk_3m.mp3?dl=0)

Όπως διαπιστώνεται, τα αποτελέσματα υπό πραγματικές συνθήκες πειράματος είναι εξαιρετικά. Η χροιά, ένα απο τα βασικά χαρακτηριστικά του ήχου, μπορεί να γίνει αντιληπτή στα ανακτώμενα σήματα.

## Κεφάλαιο 5

### 5.1: Η λειτουργία της καρδιάς

Η καρδιά είναι ένα μυώδες όργανο και αποτελεί το κεντρικό όργανο της κυκλοφορίας του αίματος στον ανθρώπινο οργανισμό. Η καρδιά παίζει το ρόλο μυϊκής αντλίας, όπου παίρνει το αίμα από το φλεβικό σύστημα και το διοχετεύει στο αρτηριακό σύστημα. Εσωτερικά, η καρδιά διαιρείται σε δεξιά και αριστερή πλευρά μέσω ενός μυϊκού τοιχώματος που ονομάζεται μεσοκοιλιακό διάφραγμα. Αποτελείται από τέσσερις κοιλότητες, δύο κόλπους και δύο κοιλίες όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Ο κόλπος και η κοιλία της ίδιας πλευράς επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κολποκοιλιακής βαλβίδας. Η βαλβίδα επιτρέπει την κατευθυνόμενη διόδο του αίματος από τον κόλπο στη κοιλία. Η δεξιά πλευρά με την αριστερή δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, δηλαδή το αίμα της δεξιάς πλευράς δεν αναμειγνύεται με αυτό της αριστερής.



Σχήμα 5.1: Η καρδιά του ανθρώπινου οργανισμού

Η κυκλοφορία του αίματος ξεκινάει από το δεξιό κόλπο, στον οποίο εισέρχεται το φλεβικό αίμα μέσω της άνω και κάτω κοίλης φλέβας. Από το δεξιό κόλπο το αίμα οδηγείται στη δεξιά κοιλία και ακολούθως στην πνευμονική

αρτηρία η οποία το μεταφέρει στους πνεύμονες. Εκεί εμπλουτίζεται με οξυγόνο και από φλεβικό αίμα μετατρέπεται σε αρτηριακό. Έπειτα μέσω της πνευμονικής αρτηρίας επιστρέφει στον αριστερό κόλπο. Ακολούθως, από τον αριστερό κόλπο οδηγείται στην αριστερή κοιλία και από εκεί μέσω της αορτής, σε ολόκληρο τον οργανισμό.

Η καρδιά για να επιτελέσει τη λειτουργία της πρέπει να διαστείλει τις κοιλότητες της ώστε να προσλάβει το αίμα και στη συνέχεια να τις συμπιέσει ώστε το αίμα να διοχετευτεί στις αρτηρίες. Οι φάσεις αυτές ονομάζονται διαστολή και συστολή και συμβαίνουν συνεχόμενα κατά τη φυσιολογική λειτουργία της καρδιάς.

Συγκεκριμένα κατά τη φάση της συστολής των κόλπων, το αίμα εξωθείται προς τις κοιλίες. Έπειτα πραγματοποιείται η συστολή των κοιλιών όπου το αίμα εξωθείται από τη δεξιά κοιλία στην πνευμονική αρτηρία και από την αριστερή κοιλία στην αορτή. Κατά την κοιλιακή συστολή οι κόλποι της καρδιάς βρίσκονται σε διαστολή και αντίστροφα. Επίσης, κατά τη φάση αυτή οι κολποκοιλιακές βαλβίδες παραμένουν κλειστές, γιατί διαφορετικά το αίμα θα επέστρεφε πίσω στους κόλπους. Στην τρίτη φάση πραγματοποιείται η καρδιακή ανάπαυλα όπου η καρδιά ξεκουράζεται.

Ο χρόνος ο οποίος περιλαμβάνει μια καρδιακή συστολή και διαστολή ονομάζεται καρδιακός κύκλος. Καρδιακός παλμός είναι η επαναλαμβανόμενη λειτουργία της καρδιάς, που αποτελείται από τη συστολή των κόλπων, των κοιλιών και την καρδιακή ανάπαυλα. Η μέση καρδιακή συχνότητα για έναν ενήλικα είναι 60-100 παλμοί/λεπτό[11].

Ένας καρδιακός κύκλος αποτελείται από δύο κύριους (πρώτος S1 και δεύτερος S2) και δύο δευτερεύοντες τόνους (τρίτος και τέταρτος). Ο πρώτος καρδιακός ήχος παράγεται με το κλείσιμο των κολποκοιλιακών βαλβίδων, κατά την έναρξη της κοιλιακής συστολής. Ονομάζεται συστολικός τόνος. Ο δεύτερος καρδιακός ήχος παράγεται όταν τελειώσει η κοιλιακή συστολή, από τις δονήσεις που δημιουργούνται κατά το κλείσιμο της αορτικής και πνευμονικής βαλβίδας. Ονομάζεται διαστολικός τόνος. Ο τόνος S2 είναι υψηλότερης συχνότητας και μικρότερης διάρκειας, συγκριτικά με τον S1.

Ο τρίτος καρδιακός ήχος συμβαίνει αμέσως μετά το δεύτερο και αντιστοιχεί με το χρόνο πλήρωσης των κοιλιών. Ο τέταρτος καρδιακός ήχος αντιστοιχεί στη συστολή των κόλπων και παράγεται λίγο πριν από τον πρώτο. Οι δευτερεύοντες τόνοι σε φυσιολογικές καταστάσεις, σπάνια μπορούν να ακουστούν με το σύνηθες στηθοσκόπιο.

## **5.2: Μέθοδοι ανίχνευσης καρδιακών τόνων**

### **5.2.1: Στηθοσκόπιο**

Το στηθοσκόπιο είναι μια ακουστική ιατρική συσκευή για την ακρόαση των εσωτερικών ήχων του ανθρωπίνου σώματος. Συχνότερα χρησιμοποιείται για την ακρόαση των καρδιακών ήχων και των αναπνευστικών, αν και χρησιμοποιείται επίσης για την ακρόαση της ροής του αίματος στις αρτηρίες και τις φλέβες.

Μέχρι το 19ο αιώνα η ακρόαση της καρδιάς και των πνευμόνων γινόταν με το αυτί του γιατρού τοποθετημένο πάνω στο θώρακα του ασθενούς. Ο Rene Laennec, Γάλλος ιατρός, εφηύρε το στηθοσκόπιο το 1816 καθώς δούλευε στο νοσοκομείο του Necker. Ο Laennec σκέφθηκε να παρεμβάλλει μεταξύ του αυτιού του και του ασθενούς φύλλα χαρτιού τυλιγμένα σε ρολό. Εντυπωσιασμένος από το αποτέλεσμα κατασκεύασε το πρώτο μονό (ακρόαση μόνο από το ένα αυτί) στηθοσκόπιο, που καθιστούσε τους ήχους διαυγέστερους. Αργότερα, μετά το θάνατό του το 1826, κατασκευάστηκε το διπλό στηθοσκόπιο, περίπου το 1850, που αποτελεί έκτοτε απαραίτητο εξεταστικό εργαλείο κάθε γιατρού[12].

Υπάρχουν δύο είδη στηθοσκοπίων, το ακουστικό και το ηλεκτρονικό στηθοσκόπιο. Το ακουστικό στηθοσκόπιο είναι το πιο διαδεδομένο και η λειτουργία του βασίζεται στη μετάδοση του ήχου από μία μεμβράνη, μέσω ενός διπλού σωλήνα, στα αυτιά του ιατρού. Η μεμβράνη αποτελείται από δύο πλευρές, το διάφραγμα και το κουδούνι, που μπορούν να τοποθετηθούν επάνω στον ασθενή για την ανίχνευση του ήχου. Το διάφραγμα τοποθετείται στον ασθενή, οι ήχοι του σώματος δονούν το διάφραγμα, δημιουργώντας τα ακουστικά κύματα τα οποία ταξιδεύουν διαμέσου του σωλήνα και φτάνουν τελικά στα αυτιά του ιατρού. Το κουδούνι διαβιβάζει τους ήχους χαμηλής συχνότητας, ενώ το

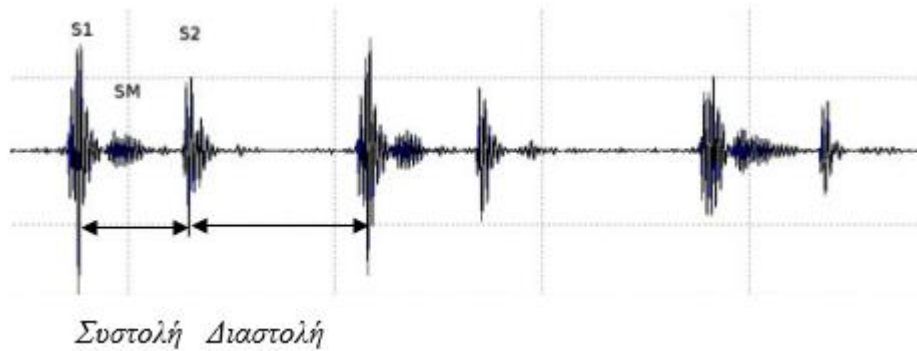
διάφραγμα διαβιβάζει τους ήχους υψηλότερης συχνότητας. Αυτό το διπλά πλαισιωμένο στηθοσκόπιο εφευρέθηκε από τον Rappaport και Sprague περίπου το 1940. Το πρόβλημα με τα ακουστικά στηθοσκόπια είναι ότι η ένταση του ήχου είναι εξαιρετικά χαμηλή, καθιστώντας τη διάγνωση δύσκολη.

Το στηθοσκόπιο χρησιμοποιείται στη διάγνωση ορισμένων ασθενειών. Προτού την εφεύρεση του στηθοσκοπίου, οι γιατροί τοποθετούσαν το αυτί τους δίπλα στο σώμα του ασθενή με την ελπίδα της ακρόασης κάποιων ήχων ενδεικτικών της πάθησης.

### **5.2.2: Φωνοκαρδιογράφημα**

Το φωνοκαρδιογράφημα (ΦΚΓ) είναι οι καταγραφόμενες κυματομορφές που προκύπτουν από τους ήχους της καρδιάς, μέσω της χρήσης ενός οργάνου, του φωνοκαρδιογράφου. Ο φωνοκαρδιογράφος αποτελείται από ένα μικρόφωνο (συνήθως πιεζοηλεκτρικό), ένα ενισχυτή, ηλεκτρονικό φίλτρο υψηλών συχνοτήτων και το καταγραφικό. Το ΦΚΓ εφαρμόζεται με επεμβατικές μεθόδους, σύμφωνα με τις οποίες το μικρόφωνο τοποθετείται στην καρδιά και τις γειτονικές αρτηρίες. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί μη επεμβατικά με τοποθέτηση μικροφώνων στην επιφάνεια του σώματος και γύρω από την καρδιά. Οι ήχοι που καταγράφονται από την επιφάνεια του σώματος εξαρτώνται κυρίως από το σημείο που βρίσκεται η πηγή και τις ακουστικές εκπομπές των γειτονικών ιστών με την καρδιά[13].

Το βασικό πλεονέκτημα του ΦΚΓ είναι η καταγραφή των ήχων της καρδιάς σε χρονική κυματομορφή με δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας, π.χ. ανάλυση Fourier. Έτσι τελικά διαχωρίζονται και καταγράφονται οι κύριοι καρδιακοί τόνοι S1 και S2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ του S1 και του S2 καρδιακού τόνου, ορίζει τη διάρκεια της συστολής. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ του S2 και του επόμενου S1 ορίζει τη χρονική διάρκεια της διαστολής, όπου διακρίνονται στο καταγραφόμενο ΦΚΓ.



*Σχήμα5.2: Τυπικό φωνοκαρδιογράφημα όπου απεικονίζει τους δύο κύρους καρδιακούς ήχους (S1, S2), καθώς και την παθολογική περίπτωση του συστολικού φυσήματος (SM)*

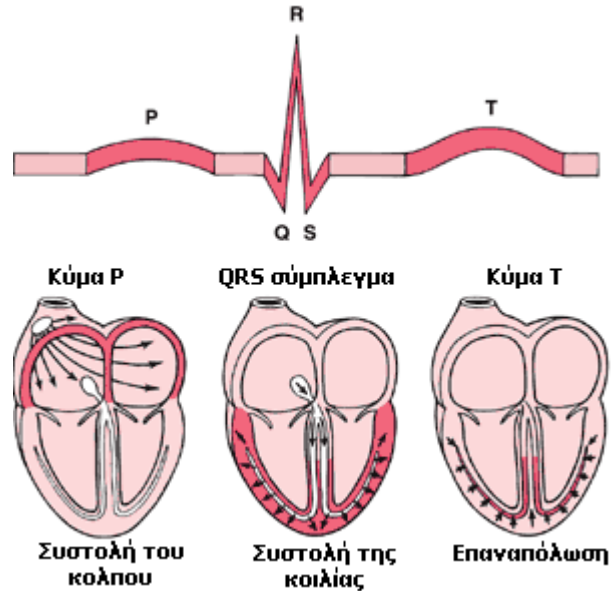
### **5.2.3: Ηλεκτροκαρδιογράφημα**

Το ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ) είναι η γραφική παρουσίαση της ηλεκτρικής δραστηριότητας της καρδιάς, μέσω της τεχνικής του ηλεκτροκαρδιογράφου, η οποία γίνεται μέσω σύνδεσης δύο ή περισσότερων ηλεκτροδίων σε συγκεκριμένα σημεία του ανθρώπινου σώματος. Το ΗΚΓ είναι το πιο αναγνωρίσιμο βιολογικό σήμα και το πιο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο στην κλινική πρακτική.

Το ΗΚΓ αποτελείται από έξι κορυφές και κοιλάδες οι οποίες χαρακτηρίζονται με τα έξι γράμματα P,Q,R,S,T,U. Όπως φαίνεται στο Σχήμα5.3 η μεγάλη κορυφή (QRS) η οποία αντιστοιχεί στην συστολή των κοιλιακών μυών, είναι το ισχυρότερο σήμα. Οι δευτερεύουσες κορυφές, εκτός της U, η οποία είναι μικρότερη και δεν εμφανίζεται, αντιστοιχούν στην συστολή και διαστολή διαφορετικών ομάδων των καρδιακών μυών[14].

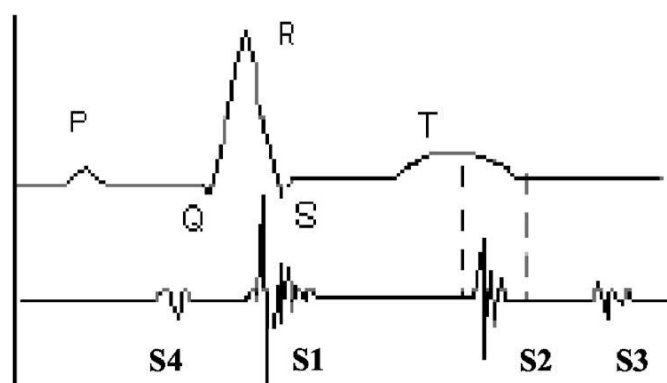
Το ηλεκτροκαρδιογράφημα, όπως προαναφέρθηκε γίνεται με ειδικό μηχάνημα που ονομάζεται ηλεκτροκαρδιογράφος. Ο ηλεκτροκαρδιογράφος είναι ένα ευαίσθητο βολτόμετρο που καταγράφει μέσω ηλεκτροδίων τις διαφορές δυναμικού στην επιφάνεια του σώματος που προκύπτουν κατά την λειτουργία της καρδιάς. Αποτελείται από μια κεντρική μονάδα και ένα καλώδιο με 10

ηλεκτρόδια τα οποία συνδέονται στο σώμα του ανθρώπου. Τα 4 πρώτα συνδέονται από ένα στα χέρια και στα ποδιά και τα υπόλοιπα 6 μπροστά στο θώρακα.



Σχήμα5.3: Συνοπτική αναπαράσταση του ηλεκτροκαρδιογραφήματος

Ένα φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα αποτελείται από ένα έπαρμα P, ένα «σύμπλεγμα» QRS και ένα έπαρμα T. Το έπαρμα P προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία παράγονται κατά τη συστολή των κόλπων, ενώ το σύμπλεγμα QRS προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία παράγονται κατά τη συστολή των κοιλιών. Το σύμπλεγμα QRS συνήθως αποτελείται από τρία διαφορετικά επάρματα, το έπαρμα Q, το έπαρμα R και το έπαρμα S. Το έπαρμα T προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία παράγονται κατά την ανάνηψη των κοιλιών από την κατάσταση της συστολής. Η διεργασία αυτή επιτελείται στο μυοκάρδιο των κοιλιών 0,25 ως 0,35s μετά τη συστολή αυτό δε το έπαρμα χαρακτηρίζεται ως έπαρμα ανάπαυλας. Δηλαδή, το ηλεκτροκαρδιογράφημα αποτελείται τόσο από επάρματα συστολής όσο και από επάρματα ανάπαυλας (επαναπόλωσης), όπως φαίνεται στο Σχήμα5.3. Στο Σχήμα5.4 φαίνεται η αντιστοιχία του ΦΚΓ και του ΗΚΓ[15].



*Σχήμα5.4: Αντιστοιχία ΦΚΓ με ΗΚΓ. Διακρίνονται τόσο οι κύριοι S1, S2 όσο και οι δευτερεύοντες S3, S4 τόνοι*

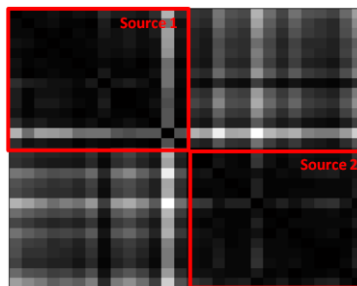
### **5.3: Προηγούμενες πειραματικές εργασίες**

Στο παρελθόν έχουν γίνει προσπάθειες για την απομακρυσμένη ανίχνευση καρδιακών παλμών και την αποφυγή του υποκειμενικού παράγοντα που προέρχεται από τη χρήση του κλασικού ακουστικού στηθοσκοπίου. Από τις πρώτες προσπάθειες που έγιναν στα πλαίσια ακαδημαϊκής εργασίας για την ανίχνευση των καρδιακών παλμών, ήταν αυτή του Shih – YuSun από το MIT. Η μέθοδος που χρησιμοποίησε για την ανίχνευση των παλμών ήταν αυτή της μετατόπισης της δέσμης laser. Χρησιμοποιώντας μία συσκευή laser pointer, έναν καθρέπτη ο οποίος ήταν σε επαφή με τον καρπό ενός ανθρώπινου χεριού και ένα ηλεκτρονικό σύστημα ανίχνευσης, κατέγραφε το ηλεκτρικό σήμα στον Η/Υ, σε αρχείο .wav.

Για τη μείωση του θορύβου στο καταγεγραμμένο σήμα, χρησιμοποίησε επιπρόσθετα τη μέθοδο Single – Mixed Source Separation η οποία έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό του σήματος σε επιμέρους πηγές. Στη συνέχεια, μέσω μετασχηματισμού Fourier μετασχηματίζεται η πληροφορία από το πεδίο του χρόνου, όπου βρίσκεται, στο πεδίο των συχνοτήτων. Έπειτα, αναλύονται οι κύριες συνιστώσες του σήματος (PrincipalComponentAnalysis – PCA), με τη



μέθοδο Singular Value Decomposition, η οποία είναι μία μέθοδος παραγοντοποίησης ενός πραγματικού ή μιγαδικού πίνακα. Οι κύριες συνιστώσες του σήματος στο πρόγραμμα απεικονίζονται με την μορφή πινάκων *ixegram*, στους οποίους το κάθε στοιχείο της πληροφορίας έχει την μορφή ενός *pixel*, όπως φαίνεται στο Σχήμα5.5. Με την παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται η ομαδοποίηση των όμοιων στοιχείων, που συνεπάγεται ο διαχωρισμός της πληροφορίας σήματος από τον θόρυβο[16].



*Σχήμα5.5: Πίνακας ixegram με την ομαδοποίηση των κύριων συνιστωσών. Τα σκούρα pixels υποδηλώνουν μεγάλη ομοιότητα ανάμεσα στις συνιστώσες, δηλαδή θόρυβο, ενώ τα ανοιχτόχρωμα, μικρές ομοιότητες, δηλαδή χρήσιμη πληροφορία*

Μία ακόμη προσπάθεια για την απομακρυσμένη ανίχνευση των καρδιακών παλμών ήταν αυτή του JingBai από το πανεπιστήμιο της Minnesota. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση ήταν η ίδια, της μετατόπισης της δέσμης laser. Αντί για άνθρωπο, χρησιμοποίησε μία συσκευή προσομοίωσης των καρδιακών παλμών. Η συσκευή αποτελούνταν από ένα ηχείο και μία λαστιχένια μεμβράνη η οποία εξομοίωνε τις δονήσεις που προκαλούνται από την καρδιά. Επίσης, η συσκευή αποτελούνταν από έναν λεπτό καθρέπτη ο οποίος ήταν προσκολλημένος στην επιφάνεια της συσκευής, μία συσκευή laser, έναν οπτικό αισθητήρα κίνησης, μία συσκευή συλλογής δεδομένων, έναν μικροελεγκτή ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) και έναν Η/Υ για την επεξεργασία του σήματος.

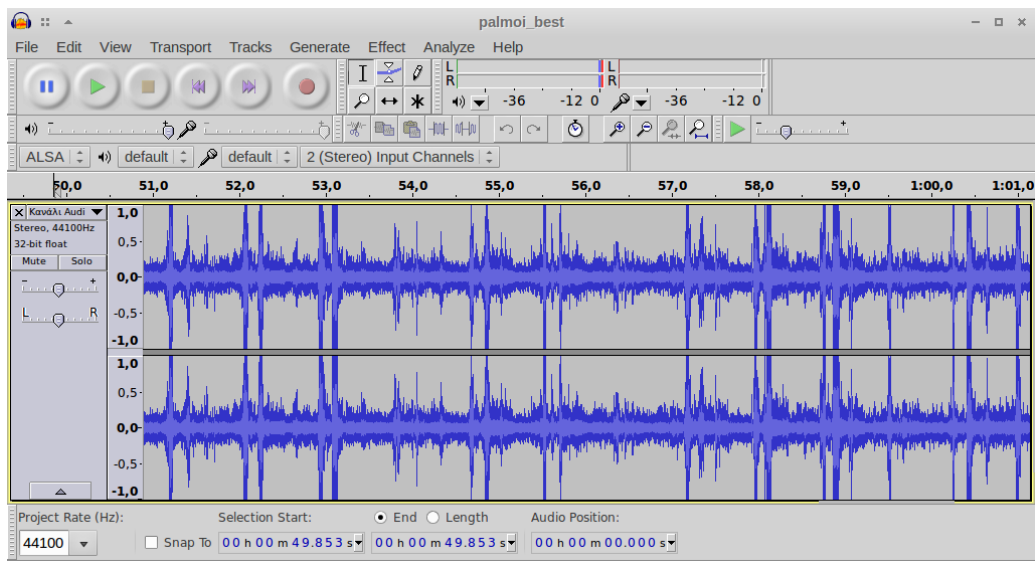
Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η οπτικοποίηση του λαμβανόμενου σήματος και μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier η μετατροπή του στο πεδίο των συχνοτήτων, έτσι ώστε να μελετηθούν οι εξής περιπτώσεις: α) καρδιακός παλμός υγιούς ασθενή, β) παθολογική περίπτωση στένωσης της μιτροειδούς βαλβίδας και γ) παθολογική περίπτωση ανεπάρκειας της μιτροειδούς βαλβίδας. Η συγκεκριμένη μέθοδος, επιτρέπει την αναπαράσταση του σήματος σε μορφή γραφήματος στον υπολογιστή, χωρίς να υπάρχει ηχητικό αποτέλεσμα. Όμως η αναπαραγωγή των καρδιακών παλμών γίνεται μέσω εξομοίωσης με ελαστικό κουτί, γεγονός που δεν επιτρέπει ακόμη την άμεση εφαρμογή του σε πραγματικές συνθήκες[17].

#### **5.4: Αποτελέσματα ανίχνευσης καρδιακών παλμών**

Για την πραγματοποίηση αυτού του μέρους του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο οπτοηλεκτρονικό σύστημα, ένα laser pointer  $\lambda=532\text{nm}$  και το ηλεκτρονικό σύστημα, ενώ το ακουστικό σήμα προερχόταν από τους ανθρώπινους καρδιακούς παλμούς. Για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων τοποθετήθηκε στον καρπό του χεριού του ανθρώπου, ένας λεπτός καθρέπτης, κολλημένος με ταινία διπλής όψευς, ώστε να είναι σε επαφή με το χέρι. Ο εξεταζόμενος είχε παρατεταμένο το χέρι του, κάθετα με το σύστημα, με τον καρπό σε γωνία τέτοια που η ανακλώμενη δέσμη να προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοανιχνευτή. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, ένας σημαντικός παράγοντας όπου έπρεπε να διασφαλιστεί ήταν η σταθερότητα του καρπού του ανθρώπου.

Η επιλογή της θέσης της ανακλαστικής επιφάνειας στον καρπό του χεριού και όχι για παράδειγμα στο στήθος, επιλέχθηκε με γνώμονα τη μικρότερη εισαγωγή θορύβου στο ανιχνευόμενο σήμα. Στην περίπτωση χρήσης του στήθους για την ανάκτηση των καρδιακών παλμών, θα προέκυπταν τελικά δύο κινήσεις. Μία κίνηση από τη λειτουργία της καρδιάς και μία άλλη από την αναπνοή, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να διαχωριστούν, με αποτέλεσμα την εισαγωγή θορύβου στη μέτρηση.

Αφού ελέγχθηκαν όλα τα παραπάνω, η λήψη της πληροφορίας έγινε μέσω της ανακλώμενης δέσμης η οποία προσπίπτει στον αισθητήρα του συστήματος. Το ανιχνευόμενο ηλεκτρικό σήμα οδηγήθηκε στον υπολογιστή για καταγραφή, αποθήκευση και επεξεργασία, με την χρήση του προγράμματος Audacity. Κατά τη διάρκεια του πειράματος υπήρχε η δυνατότητα της ταυτόχρονης αναπαραγωγής και καταγραφής του σήματος, πράγμα που διευκόλυνε αρκετά το έργο μας.



Σχήμα5.6: Οι κυματομορφές των καρδιακών παλμών, έτσι όπως καταγράφηκαν με το πρόγραμμα Audacity

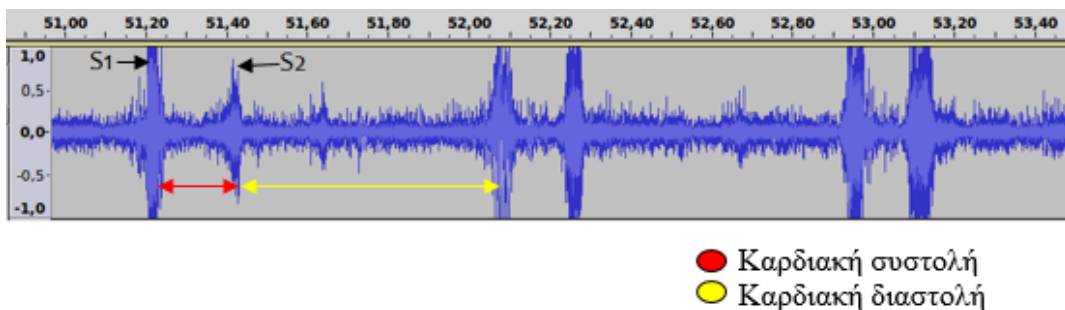
Στο Σχήμα5.6 φαίνεται η καταγραφόμενη κυματομορφή κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Η επαναλαμβανόμενη εμφάνιση χαρακτηριστικών κυματομορφών, κάθε περίπου 1s καθώς και η ταυτόχρονη ακρόαση των καρδιακών παλμών, καθιστούν την προσπάθεια καταγραφής των καρδιακών παλμών, πραγματικά επιτυχή. Η παρουσία θορύβου είναι εμφανής στο αποτέλεσμα, παρόλα αυτά η ανάκτηση των καρδιακών παλμών κατέστη εφικτή, με πολύ ικανοποιητική απόδοση. Στο αρχείο ήχου <<heartbeat.mp3>>

<https://www.dropbox.com/s/oo3b9d0qf97uxpc/heartbeat.mp3?dl=0>

είναι διαθέσιμο το αποτέλεσμα καταγραφής καρδιακών παλμών.

Στο παρακάτω Σχήμα5.7 παρουσιάζονται σε μεγέθυνση, τρεις από τις επαναλαμβανόμενες καταγραφόμενες κυματομορφές. Διακρίνονται, σε αντιστοιχία με το ΦΚΓ, οι δύο κύριοι τόνοι της καρδιάς S1 και S2. Από την καταγραφόμενη κυματομορφή μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διάρκεια της καρδιακής συστολής είναι περίπου 200ms, ενώ η διάρκεια της διαστολής είναι περίπου 660ms. Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι ένας πλήρης καρδιακός κύκλος στον εθελοντή όπου έγινε η μέτρηση, έχει διάρκεια 860ms. Αυτό αντιστοιχεί σε 70 παλμούς/λεπτό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ένα υγιή άνθρωπο, το φυσιολογικό εύρος τιμών του καρδιακού κύκλου είναι 600 – 1000ms, το οποίο αντιστοιχεί σε 60-100 παλμούς/λεπτό.

Επομένως, με τα αποτελέσματα μας και συγκεκριμένα καταγράφοντας τις χρονικές κυματομορφές καθώς και τους χαρακτηριστικούς χρόνους του καρδιακού κύκλου για τον υγιή άνθρωπο, μπορεί να γίνει σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενός άλλου ανθρώπου. Έτσι ενδέχεται, οι διαφορές που πιθανόν να προκύψουν, να οδηγήσουν στη διάγνωση πιθανών παθολογικών συμπεριφορών όπως ταχυκαρδίες, βραδυκαρδίες ή κοιλιακές αρρυθμίες.



Σχήμα5.7: Αποτελέσματα του πειράματος ανίχνευσης καρδιακών παλμών σε άνθρωπο. Η διάρκεια του καρδιακού κύκλου του ανθρώπου προκύπτει 860ms. Συγκεκριμένα, η διάρκεια της συστολής προκύπτει ~200ms ενώ της διαστολής, ~660ms.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η οπτοηλεκτρονική διάταξη είναι πλήρως εφαρμόσιμη στην ανίχνευση και καταγραφή ανθρώπινων καρδιακών παλμών. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων, ξεπέρασαν κατά πολύ τις αρχικές μας

προσδοκίες και συγκριτικά με προηγούμενες εργασίες πετύχαμε την ανάκτηση ακουστικού σήματος από ανθρώπινη καρδιά. Η περαιτέρω επεξεργασία του καταγραφόμενου σήματος, επιτρέπει την εύρεση των χαρακτηριστικών χρόνων ενός πλήρη καρδιακού κύκλου καθώς και τη διάκριση των δύο βασικών τόνων S1 και S2 της ανθρώπινης καρδιάς.

## Βιβλιογραφία

- [1] "Οπτοηλεκτρονική", Σύγγραμμα, Αλεξανδρής Α., ΤΖΙΟΛΑ, 2004
- [2] <http://inventors.about.com/od/pstartinventions/a/photophone.htm>
- [3] "Τεχνολογία ηλεκτρονικών εξαρτημάτων", Σύγγραμμα, Καραγιάννης Α., ΤΖΙΟΛΑ, 2002
- [4] <http://electrical4u.com/light-dependent-resistor-ldr-working-principle-of-ldr/>
- [5] [www.selcoproducts.com](http://www.selcoproducts.com)
- [6] "Ηλεκτρονική", Σύγγραμμα, Malvino, ΤΖΙΟΛΑ, 2010
- [7] <http://physics.teiath.gr/physics/pdf/A4.pdf>
- [8] <http://audacity.sourceforge.net>
- [9] <http://www.lucidscience.com>
- [10] V. Amendolare, 'Laser Audio Surveillance Device', Degree of Bachelor of Science, Worcester Polytechnic Institute, 2005
- [11] [www.incardiology.gr](http://www.incardiology.gr)
- [12] <http://www.noesis.edu.gr/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1/%CE%B9%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE/%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%B1/%CF%84%CE%BF-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%B8%CE%BF%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B9%CE%BF/>
- [13] [http://artemis.cslab.ntua.gr/el\\_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0018/DT2010-0018.pdf](http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0018/DT2010-0018.pdf)
- [14] [http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/ecg\\_02.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/ecg_02.pdf)

[15]

[http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/%5B1%5D%20signal introduction 7%CE%BFexam 1.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/%5B1%5D%20signal%20introduction%207%CE%BFexam%201.pdf)

[16] Shih-Yu Sun, '*Single-Pixel Laser Microphone*', MIT - Massachusetts Institute of Technology

[17] Jing Bai et al. '*Development of Laser - based heart sound detection system*', J. Biomedical Science and Engineering, **5**, 34-37, 2012