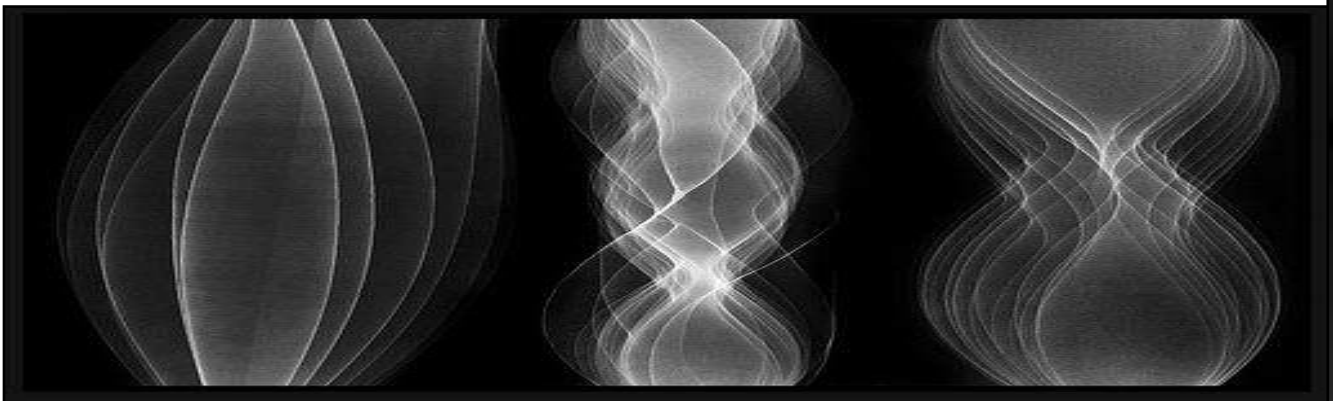


Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΧΟΡΔΩΝ ΚΑΙ
ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΤΟΥ ΑΝΤΗΧΕΙΟΥ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΜΟΥΣΙΚΩΝ
ΟΡΓΑΝΩΝ**

ΒΑΛΙΑ ΒΛΑΧΑΚΗ
ΣΤΕΛΛΑ ΜΗΝΑΔΑΚΗ



Επιβλέποντες Καθηγητές:

Δρ. Ευθύμιος Μπακαρέζος
Δρ. Νεκτάριος Παπαδογιάννης

ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ – Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ

Δρ. Παναγιώτης Τζανετάκης

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ – ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΡΕΘΥΜΝΟ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά,θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Ευθύμιο Μπακαρέζο για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του, καθώς και για την ηθική υποστήριξη που μας προσέφερε, όπως και τον Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη για τα εύστοχα σχόλιά του και την καθοδήγησή του. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Παναγιώτη Τζανετάκη για την πολύτιμη βοήθεια, συμπαράσταση, και επίβλεψη του κατά την διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής αυτής εργασίας, και για την παραχώρηση του Εργαστηρίου Νανοδομών του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειές μας για την ουσιαστική στήριξη και βοήθειά τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
SUMMARY	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ & ΔΙΟΔΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ	7
1.1 ΤΟ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	7
1.2 ΤΟ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΟ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	8
1.2.1 Duty cycle και συχνότητα επανάληψης των παλμών	12
1.3 Η ΔΙΟΔΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ (LIGHT EMITTING DIODE – LED)	13
1.3.1 Αρχή λειτουργίας των LEDs	13
1.3.2 Κυκλώματα οδήγησης των LEDs	15
1.3.3 Εφαρμογές – Πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα των LEDs	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΝΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	20
2.1 Η ΔΟΝΟΥΜΕΝΗ ΧΟΡΔΗ	20
2.1.1 Η μονοδιάστατη κυματική εξίσωση	21
2.1.2 Εξαναγκασμένη ταλάντωση πακτωμένης χορδής	23
2.1.3 Ιδιορυθμοί και ιδιοσυχνότητες πακτωμένης χορδής	24
2.2 Η ΚΙΘΑΡΑ: ΔΟΜΗ & ΔΟΝΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	27
2.2.1 Δομή κιθάρας και παραγωγή ήχου	27
2.2.2 Δονητικά χαρακτηριστικά της κιθάρας: το καπάκι και το αντηχείο	29
2.2.3 Διαγράμματα Chladni	31
2.2.4 Ο συντονιστής Helmholtz	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	34
3.1 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ LEDs	34
3.2 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΧΟΡΔΩΝ ΚΙΘΑΡΑΣ ΣΥΝΕΠΕΙΑ ΝΥΚΤΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	37
3.2.1 Καταγραφή εκπεμπόμενου ήχου	37
3.2.2 Στροβосκοπική ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών	40
3.3 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΧΟΡΔΩΝ ΚΙΘΑΡΑΣ ΣΥΝΕΠΕΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΜΕ ΗΧΟΒΟΛΙΣΗ	41
3.3.1 Στροβосκοπική ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών	41
3.3.2 Ανίχνευση με χρήση ηχογραφημένων ηχητικών δειγμάτων	43
3.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΜΕΡΩΝ ΚΙΘΑΡΑΣ	46
3.4.1 Ανίχνευση με τη μέθοδο διαγραμμάτων Chladni	47
3.4.2 Στροβосκοπική ανίχνευση δονήσεων	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	52
4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52
4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	56

Επίσης με τη μορφή Ηλεκτρονικού Παραρτήματος (δίσκος CD) δίνονται πειραματικά αποτελέσματα βιντεοσκοπήσεων που αφορούν σε πειραματικές μελέτες των παραγράφων 3.2.2, 3.3.1, 3.4.1 και 3.4.2.

Ανάπτυξη Οπτοηλεκτρονικών Διατάξεων Και Εφαρμογή Τους Στην Ανίχνευση Των Ταλαντώσεων Των Χορδών Και Των Επιφανειών Του Αντηχείου Εγχόρδων Μουσικών Οργάνων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στροβοσκοπικός φωτισμός είναι ένας μηχανισμός παρατήρησης της κίνησης οποιουδήποτε αντικειμένου με την βοήθεια διακοπτόμενου φωτισμού. Ο στροβοσκοπικός φωτισμός έχει πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως είναι η βιομηχανία και η ιατρική. Επίσης, χρησιμοποιείται ευρέως σε επιστημονικές μελέτες.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την ανίχνευση των ταλαντώσεων των χορδών κιθάρας με χρήση στροβοσκοπικού φωτισμού, αλλά και την ανίχνευση των δονήσεων μερών του αντηχείου της κιθάρας τόσο με χρήση στροβοσκοπικού φωτισμού όσο και χρήση της μεθόδου διαγραμμάτων Chladni. Για την στροβοσκοπική ανίχνευση σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε διάταξη στροβοσκοπικού φωτισμού με συστοιχία LED καθώς και κύκλωμα οδηγού LED.

Η διέγερση των χορδών έγινε τόσο με νυκτική διέγερση αλλά και με ηχοβόλιση. Σε κάθε περίπτωση έγινε καταγραφή των ηχητικών φασμάτων εκπομπής και μετασχηματισμός Fourier αυτών. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν κατάλληλα αρχεία wav στις συχνότητες δόνησης των χορδών της κιθάρας με σκοπό την διέγερση τους μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και ηχοβόλισης. Η διέγερση του αντηχείου της κιθάρας έγινε με ηχοβολιστικά με χρήση μεγαφώνου.

Τέλος, γίνεται παράθεση των κύριων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων καθώς και προτάσεις για μελλοντική εργασία με βάση ολοκληρωμένο κύκλωμα συγκριτή, το οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μερικώς.

Λέξεις κλειδιά: Στροβοσκοπικό φαινόμενο, Δίοδος εκπομπής φωτός, Ταλαντώσεις χορδών, Ταλάντωση Αντηχείου, Διαγράμματα Chladni.

Development of optoelectronic arrangements and their application in the detection of the oscillations of the strings and of the soundbox surfaces of string musical instruments.

SUMMARY

Stroboscopic illumination is a method of observation of the movement of objects, which finds applications in various fields, such as in industry and in medicine. It is also used for research purposes.

This thesis deals with the detection of the oscillations of guitar strings using stroboscopic illumination, and with the detection of the vibration of the guitar's resonator using stroboscopic illumination as well as Chladni patterns. For the stroboscopic detection a stroboscopic illumination arrangement was designed and developed, using a LED array and a LED driver circuit.

The excitation of the strings was performed both by plucking and by the sound field of a loudspeaker. In both cases, the emitted sound spectra were recorded and their Fourier transform was extracted. In addition, .wav files were constructed for the frequencies of the oscillations of the guitar strings, in order to be used for excitation purposes. The guitar's resonator was excited by the sound field of a loudspeaker.

Finally, the main results are reviewed and useful conclusions are drawn, based on the experimental data, while there are suggestions for improvement in the framework of future work, towards the construction of an integrated comparator circuit, which here was partially implemented.

Key words: Stroboscopic effect, Light-emitting diode (LED), Strings' oscillations, Resonator's vibrations, Chladni patterns.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θέμα της εργασίας είναι η εφαρμογή στροβοσκοπικού φωτισμού (ΣΦ) με χρήση διόδων εκπομπής φωτός (Light Emitting Diodes – LEDs) στην πειραματική μελέτη της ταλάντωσης των χορδών και της δόνησης του αντηχείου εγχόρδων μουσικών οργάνων. Όλα τα πειράματα έγιναν με χρήση κιθάρας αλλά οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν είναι εφαρμόσιμες σε όλα τα έγχορδα, ακόμα και σε όσα έχουν μεγαλύτερο αντηχείο από αυτό της κιθάρας, όπως το λαούτο, το βιολοντσέλο και το κοντραμπάσο. Σχετικά με το αντηχείο είναι άμεσα εφαρμόσιμες σε δονήσεις χαμηλής συχνότητας προκειμένου η δόνηση να είναι ορατή με γυμνό μάτι αλλά και να είναι δυνατόν να βιντεοσκοπηθεί με ικανή ευκρίνεια.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει πολύ μεγάλη ανάπτυξη εφαρμογών των LEDs ως πηγές φωτός υψηλής φωτεινότητας σε ευρύ φάσμα μηκών κύματος, που σήμερα καλύπτει όλο το ορατό φάσμα, πράγμα που επιτρέπει την δημιουργία λευκού φωτός με συνδυασμό πολλών ημιαγωγικών υλικών άρα και των αντίστοιχων επιμέρους χρωμάτων στο ίδιο LED. Η αποδοτικότητα της μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε ορατό φως είναι μεγαλύτερη στις πηγές LED από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία και φτάνει στο εντυπωσιακό 30%. Το φως οποιουδήποτε LED μπορεί, με κατάλληλο κύκλωμα, να διαμορφωθεί χρονικά με μεγάλη ακρίβεια και πολύ υψηλή ταχύτητα απόκρισης κάνοντας τις πηγές αυτές ιδανικές για στροβοσκοπικές εφαρμογές με φωτεινότητα που θα ήταν αδύνατο να επιτευχθεί πριν λίγα χρόνια. Η διαθεσιμότητα LED υψηλής φωτεινότητας ήταν βασική αφετηρία στην εργασία αυτή.

Εκτός από το ενδιαφέρον του αντικειμένου της εργασίας ως εποπτικό εργαλείο στη μελέτη των μουσικών οργάνων, στόχος επίσης ήταν και η διερεύνηση της πιθανής χρησιμότητάς του σε κατασκευαστές μουσικών οργάνων σαν οδηγός στην βελτιστοποίηση του οργάνου, αλλά και σε μουσικούς για το εύκολο χόρδισμα του συνόλου των χορδών εγχόρδων, χωρίς να απαιτείται μεγάλη εμπειρία και εκπαιδευμένη ακοή, ενώ δεν προϋποθέτει χαμηλό επίπεδο ηχητικού θορύβου στον χώρο που χορδίζεται το όργανο.

Στο πλαίσιο της εργασίας σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν στροβοσκοπικές πηγές με LED κατάλληλες για τον φωτισμό κιθάρας σε όλο το μήκος της χωρίς να χρειάζεται πλήρης συσκότιση του περιβάλλοντος χώρου και με φωτεινότητα αρκετή για βιντεοσκόπηση των ταλαντώσεων σε αργή ταχύτητα. Αναπτύχθηκε επίσης κύκλωμα χαμηλού κόστους που επιτρέπει την δημιουργία των παλμών οδήγησης από οποιοδήποτε φορητό υπολογιστή και επιλογή, μέσω αυτού, από τον χρήστη όλων των απαραίτητων παραμέτρων της στροβοσκοπικής πηγής, και παρέχει τη δυνατότητα συγχρονισμένης παράλληλης παραγωγής κυματομορφών για διέγερση του μουσικού οργάνου με ηχοβόλιση.

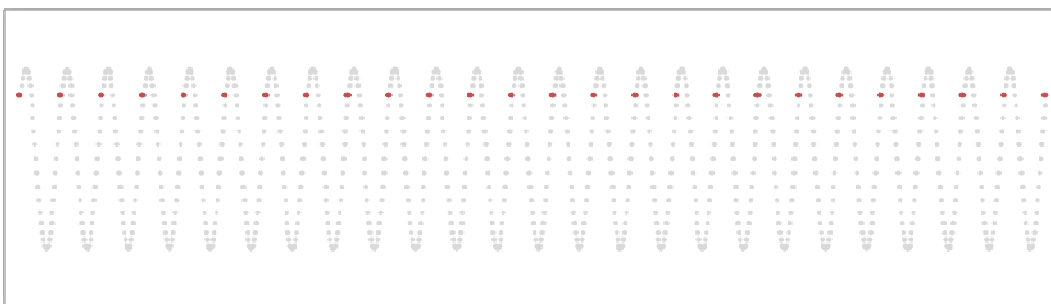
Παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραμάτων που έγιναν πάντα με κιθάρα αλλά με δύο διαφορετικούς τρόπους για την διέγερση των χορδών και του αντηχείου του οργάνου: (α) με **νύξη**, που είναι το κτύπημα ή τράβηγμα της χορδής με το νύχι ή με πενάκι, και (β) με **ηχοβόλιση**, που είναι η τοποθέτηση του οργάνου σε ισχυρό ηχητικό κύμα που παράγεται από κατάλληλο ηχείο. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αλλά και τα σχετικά βίντεο καταγραμμένα κάτω από ΣΦ, αναλύονται οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα από τα πειράματα αυτά, σχολιάζονται πιθανές εφαρμογές, και προτείνονται βήματα μελλοντικής εργασίας και βελτιώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ & ΔΙΟΔΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ

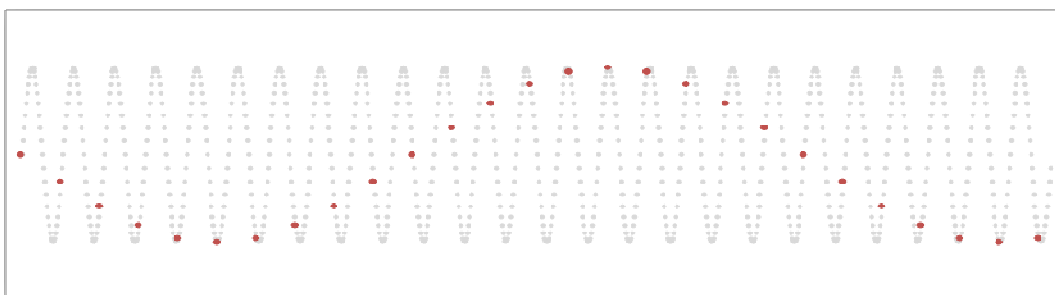
1.1 ΤΟ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι ένα οπτικό φαινόμενο κατά το οποίο κινούμενα αντικείμενα φαίνονται τελείως ακίνητα ή φαίνονται ότι κινούνται σε διαφορετική κατεύθυνση από αυτήν την κινούνται πραγματικά. Ένα πολύ οικείο σε όλους παράδειγμα είναι οι ρόδες ενός ποδηλάτου, όπου σε μερικές στιγμές φαίνονται ότι στρέφονται αντίθετα από την φορά που κινείται το ποδήλατο. Γνωρίζουμε ότι η κάμερα καταγράφει 24 frames το δευτερόλεπτο. Παρ' όλο που οι τροχοί του ποδηλάτου δεν κάνουν 24 περιστροφές το δευτερόλεπτο, ο κάθε τροχός έχει 12 ακτίνες οι οποίες περιστρέφονται σε μόλις 2 περιστροφές του τροχού το δευτερόλεπτο. Καταγράφοντας με 24 frames το δευτερόλεπτο οι ακτίνες σε κάθε frame εμφανίζονται ακριβώς στην ίδια θέση. Γι αυτό το λόγο ο τροχός θα εμφανίζεται ακίνητος. Αν ο τροχός περιστρέφεται με λιγότερες από 2 περιστροφές το δευτερόλεπτο η θέση των ακτινών φαίνεται να αλλάζει λίγο προς τα πίσω σε κάθε διαδοχικό frame, και ως αποτέλεσμα ο τροχός θα φαίνεται να στρέφεται σε αντίθετη κατεύθυνση από την φορά που κινείται το ποδήλατο. Το στροβοσκοπικό φαινόμενο διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην αναπαραγωγή ήχου από οπτικούς δίσκους, όπου η λειτουργία βασίζεται σε στροβοσκοπικές αντανάκλασεις του λέιζερ από την επιφάνεια του δίσκου, προκειμένου να υποβληθούν σε επεξεργασία. Παρόμοια χρήση γίνεται σε δεδομένα του υπολογιστή, αλλά και σε DVD και Blu-ray discs.

Η χρήση, λοιπόν, στροβοσκοπικού φωτισμού επιτρέπει να βλέπουμε σε ακινησία ή σε αργή κίνηση αντικείμενα που περιστρέφονται ταχέως γύρω από έναν άξονα, ή που ταλαντώνονται ή δονούνται με αρκετά μεγάλη συχνότητα, και που δεν είναι δυνατό να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι. Ο στροβοσκοπικός φωτισμός συνίσταται παλμούς φωτός που επαναλαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Για να καταφέρουμε να δούμε ακίνητο ένα αντικείμενο το οποίο ταλαντώνεται ή δονείται, θα πρέπει η συχνότητα του αντικειμένου αυτού να συμπέσει, να είναι δηλαδή απολύτως η ίδια, με την συχνότητα που επαναλαμβάνονται οι παλμοί φωτός. Αν, για παράδειγμα, έχουμε μία χορδή η οποία ταλαντώνεται με συχνότητα 150Hz, για να μπορέσουμε να την δούμε σε πλήρη ακινησία θα πρέπει η συχνότητα του στροβοσκοπικού φωτισμού να είναι και αυτή 150Hz. Να είναι, δηλαδή, απολύτως ίδια με την συχνότητα που ταλαντώνεται η χορδή, ή ισοδύναμα η περίοδος της ταλάντωσης της χορδής θα πρέπει να είναι ίση με την περίοδο φωτισμού. Στις εικόνες 1.1 και 1.2 φαίνεται αναλυτικά ο λόγος για τον οποίο βλέπουμε ένα κινούμενο αντικείμενο σε ακινησία ή σε αργή κίνηση, αντίστοιχα, με την χρήση στροβοσκοπικού φωτισμού.



Εικόνα 1.1: Περίπτωση όπου η περίοδος του φωτισμού (κόκκινο) συμπίπτει με την περίοδο της ταλάντωσης (γκρι). Αυτός είναι και ο λόγος που βλέπουμε το υπό μελέτη αντικείμενο ακίνητο.



Εικόνα 1.2: Περίπτωση όπου η περίοδος του φωτισμού (κόκκινο) είναι λίγο μικρότερη από την περίοδο της ταλάντωσης (γκρι). Για αυτόν τον λόγο θα βλέπουμε το αντικείμενο να κινείται αργά και σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν που κινείται κανονικά.

1.2 ΤΟ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΟ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ο στροβοσκοπικός φωτισμός επιτυγχάνεται με το στροβοσκόπιο, το οποίο είναι μία συσκευή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή παλμών φωτός. Είναι, δηλαδή, ένα όργανο το οποίο χρησιμοποιείται για να μπορεί να παρατηρηθεί η κίνηση ή η ταλάντωση ενός πολύ γρήγορα κινούμενου ή ταλαντούμενου αντικειμένου, η οποία δεν είναι δυνατό να παρατηρηθεί με γυμνό μάτι. Η αρχή του στροβοσκοπίου χρησιμοποιείται για την μελέτη περιστρεφόμενων αντικειμένων, ταλαντούμενων αντικειμένων ή δονούμενων αντικειμένων.

Η ανακάλυψη του στροβοσκοπίου αποδίδεται στον Joseph Plateau το 1832 στο Βέλγιο, όταν χρησιμοποίησε ένα δίσκο με ακτινωτές σχισμές, τον οποίο περιέστρεφε ενώ κοιτούσε εικόνες σε ένα ξεχωριστό περιστρεφόμενο τροχό. Ο Plateau ονόμασε την συσκευή του *phenakistoscope*. Επίσης υπήρξε μία ταυτόχρονη και ανεξάρτητη εφεύρεση του στροβοσκοπίου από τον Αυστραλό Simon von Stampfer, ο οποίος το ονόμασε τελικά στροβοσκόπιο και του οποίου η αρχή χρησιμοποιείται σήμερα. Η λέξη στροβοσκόπιο προέρχεται από την ελληνική λέξη *στρόμβος*, ο οποίος είναι η γνωστή σε όλους μας σβούρα.

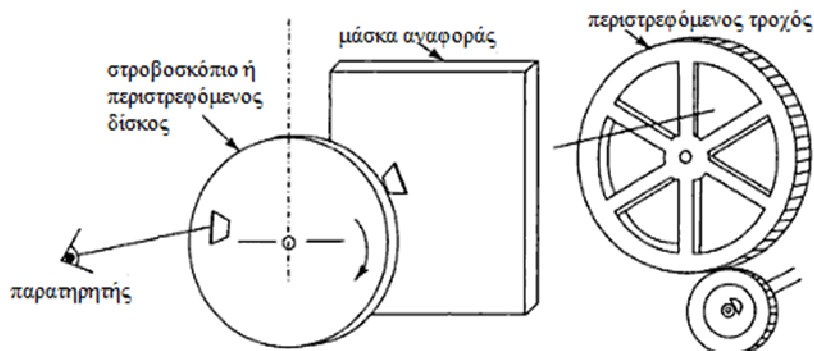
Από την στιγμή που το στροβοσκόπιο είχε σημαντικές εφαρμογές πάνω στις επιστημονικές έρευνες, οι μεταγενέστερες εξελίξεις του στροβοσκοπίου έγιναν αμέσως δημοφιλείς ως μέθοδοι για την παραγωγή κινούμενων εικόνων. Το 1917 ο Γάλλος Etienne Oehmichen κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρονικό στροβοσκόπιο, ενώ ταυτόχρονα κατασκεύασε μία κάμερα η οποία μπορούσε να καταγράψει 1000 frames

το δευτερόλεπτο. Το 1931 εφευρέθηκε το πρώτο ηλεκτρονικό στροβοσκόπιο με στροβοσκοπικό φωτισμό από τον Harold Eugene Edgerton, όταν χρησιμοποίησε μία λάμπα η οποία εξέπεμπε παλμούς φωτός, για να μελετήσει μηχανικά μέρη τα οποία βρίσκονταν σε κίνηση. Ο Edgerton αργότερα χρησιμοποίησε πολύ σύντομους παλμούς φωτός για την παραγωγή ακίνητων φωτογραφιών αντικειμένων τα οποία κινούνταν πολύ γρήγορα, όπως οι σφαίρες κατά την πτήση τους.

Οι τύποι του στροβοσκοπίου είναι δύο. Υπάρχουν τα μηχανικά στροβοσκόπια και τα ηλεκτρονικά στροβοσκόπια. Το μηχανικό στροβοσκόπιο αποτελείται κυρίως από έναν περιστρεφόμενο δίσκο, ο οποίος είναι προσκολλημένος σε ένα μοτέρ, η ταχύτητα του οποίου ποικίλει και μπορεί να μετρηθεί. Στην πιο απλή του μορφή, αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο με μία ή περισσότερες συμμετρικές οπές, από έναν περιστρεφόμενο τροχό, στον οποίο έχει γίνει κάποιο σημάδι ώστε να μπορούμε να το παρατηρήσουμε αργότερα, και από μία μάσκα αναφοράς. Ο περιστρεφόμενος δίσκος είναι τοποθετημένος μεταξύ του παρατηρητή και του περιστρεφόμενου τροχού. Η μάσκα αναφοράς τοποθετείται ανάμεσα στον περιστρεφόμενο δίσκο και στον περιστρεφόμενο τροχό έτσι ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί μέσω της οπής του περιστρεφόμενου δίσκου. Η περιστροφική ταχύτητα του δίσκου προσαρμόζεται έτσι ώστε να συγχρονιστεί με την κίνηση του περιστρεφόμενου τροχού, κάνοντας το σημάδι που υπάρχει πάνω στον τροχό να φαίνεται ακίνητο, ενώ στην πραγματικότητα ο δίσκος κινείται. Όταν συμβαίνει αυτό, η ταχύτητα του τροχού, u_{τ} , είναι ίση με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου δίσκου, u_{δ} , ή με κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο της ταχύτητας, και μπορεί να εκφραστεί με τον παρακάτω τύπο:

$$u_{\tau} = \frac{u_{\delta} \cdot n_o}{n_e} \quad (1.1)$$

όπου n_o είναι ο αριθμός των οπών του δίσκου, και n_e είναι ο αριθμός των εικόνων, δηλαδή ο αριθμός των φορών που διακρίνεται η μάσκα αναφοράς όταν κοιτάμε μέσα από τις οπές του δίσκου όταν οι εικόνες αυτές φαίνεται να είναι ακίνητες. Ένα παράδειγμα μηχανικού στροβοσκοπικού φωτισμού φαίνεται στην εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3: Μηχανικό στροβοσκόπιο.

Στην ηλεκτρονική εκδοχή του, ο διάτρητος δίσκος αντικαθιστάται από μία λάμπα η οποία είναι ικανή να εκπέμπει σύντομους και γρήγορους παλμούς φωτός. Η συχνότητα των παλμών ελέγχεται από έναν ηλεκτρονικό ταλαντωτή συχνοτήτων. Κατά την λειτουργία, οι παλμοί φωτός πέφτουν πάνω στο υπό εξέταση αντικείμενο, και ο ρυθμός των παλμών προσαρμόζεται έτσι ώστε να είναι ίσος με την συχνότητα της κίνησης ή της ταλάντωσης του αντικειμένου που εξετάζεται. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται τελικά παρατήρηση του αντικειμένου σε πλήρη ακινησία. Εάν η συχνότητα των παλμών είναι μικρότερη από αυτήν του κινούμενου αντικειμένου, τότε το φως θα «ανάβει» μετά από μία πλήρη περιστροφή του αντικειμένου και κατά συνέπεια το αντικείμενο θα εμφανίζεται σε αργή κίνηση να κινείται προς τα εμπρός. Αντίθετα, εάν η συχνότητα των παλμών είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα του κινούμενου αντικειμένου, τότε το φως θα «ανάβει» πριν το αντικείμενο ολοκληρώσει την περιστροφή του και ως αποτέλεσμα το αντικείμενο θα εμφανίζεται σε αργή κίνηση να κινείται προς τα πίσω.

Γενικά, η συχνότητα της αργής αυτής κίνησης θα ισούται με τη διαφορά $f_\varphi - f_\tau$, όπου f_φ η συχνότητα φωτισμού και f_τ η συχνότητα ταλάντωσης του αντικειμένου, με αρνητική συχνότητα να σημαίνει ότι κινείται προς την αντίθετη φορά. Αν η διαφορά είναι μηδέν τότε το αντικείμενο εμφανίζεται ως ακίνητο. Η περίπτωση ενός δίσκου, πάνω στον οποίο έχει χαραχτεί μία ακτίνα αναφοράς που περιστρέφεται γύρω από τον άξονα συμμετρίας του με γωνιακή ταχύτητα ω , είναι πιο απλή στην ανάλυση που ακολουθεί και είναι απόλυτα ισοδύναμη με την περίπτωση ταλάντωσης με χρονική εξάρτηση $\cos(\omega t)$ ή $\sin(\omega t)$.

Αρχίζουμε από την ακινησία κάτω από τον στροβοσκοπικό φωτισμό. Για να φανεί ακίνητος ο δίσκος θα πρέπει η ακτίνα αναφοράς να εμφανίζεται ακριβώς στην ίδια γωνιακή θέση σε κάθε παλμό του στροβοσκοπικού φωτισμού που σημαίνει να έχει στραφεί κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π στην περίοδο T_s του στροβοσκοπικού φωτισμού. Έχουμε τότε ότι:

$$\omega T_s = 2\pi n \quad (1.2)$$

όπου n ακέραιος. Ορίζοντας την γωνιακή συχνότητα, ω_s , του στροβοσκοπικού φωτισμού ως $2\pi/T_s$, προκύπτει ότι η συνθήκη ακινησίας κατά τον στροβοσκοπικό φωτισμό είναι:

$$\frac{\omega}{\omega_s} = n \quad (1.3)$$

Αν η ω_s αποκλίνει λίγο από την συνθήκη αυτή παρατηρείται αργή κίνηση κάτω από στροβοσκοπικό φωτισμό. Έστω ότι:

$$\frac{\omega}{\omega_s} = n + \delta \quad (1.4)$$

όπου $|\delta| \ll 1$. Σε μία περίοδο, T_s , του στροβοσκοπικού φωτισμού, η ακτίνα αναφοράς έχει γωνιακή μετατόπιση $2\pi\delta$. Αν το δ είναι θετικό η μετατόπιση είναι κατά την φορά του γεωμετρικού κύκλου, δηλαδή αντίθετη της φοράς του ρολογιού, και αν το δ είναι αρνητικό η κίνηση γίνεται σύμφωνα με την φορά του ρολογιού. Εφ' όσον γενικά

ισχύει $\Delta\theta = \omega\Delta t$, η κίνηση κάτω από τον στροβοσκοπικό φωτισμό θα φαίνεται να έχει γωνιακή ταχύτητα:

$$\omega_a = \frac{2\pi\delta}{T_s} = \omega_s d \quad (1.5)$$

και κατά συνέπεια, σε συνδυασμό με την (1.4), θα ισχύει:

$$\omega_a = \omega - n\omega_s \quad (1.6)$$

Αν $n > 1$ ο περιστρεφόμενος δίσκος φωτίζεται μία στιγμή σε μία περίοδο στις n , κάτι που μειώνει την φωτεινότητα της παρατηρούμενης εικόνας πράγμα μη επιθυμητό. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι χρήσιμο να παρατηρούνται δύο (ή και περισσότερες) εικόνες σε κάθε περίοδο της κίνησης, δηλαδή δύο στιγμιότυπα με διαφορά φάσης 180° μεταξύ τους. Για περιστρεφόμενο δίσκο αυτό σημαίνει παρατήρηση της χαραγμένης ακτίνας αναφοράς σε δύο αντιδιαμετρικές θέσεις, οπότε η συνθήκη ακινησίας τότε γίνεται:

$$\frac{\omega}{\omega_s} = \frac{1}{2} \quad (1.7)$$

Στα στροβοσκόπια συνήθως χρησιμοποιούνται λάμπες εκκένωσης αερίου ή στερεάς κατάστασης επειδή έχουν την ικανότητα όταν το ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται να εκπέμπουν φως σχεδόν ακαριαία, όπως επίσης εξίσου γρήγορα σβήνουν όταν το ηλεκτρικό ρεύμα σταματά. Συγκριτικά οι λαμπτήρες πυρακτώσεως θερμαίνονται γρήγορα όταν ενεργοποιηθούν και αντίστοιχα ψύχονται γρήγορα όταν απενεργοποιηθούν. Αυτές οι καθυστερήσεις συντελούν στο να βλέπουμε θολά τις λεπτομέρειες των αντικειμένων τα οποία φωτίζονται μερικώς κατά την διάρκεια των περιόδων θέρμανσης και ψύξης. Οι λάμπες αερίου Νέου (λάμπες Ne) και τα LEDs χρησιμοποιούνται κοινώς για χαμηλής έντασης στροβοσκοπικές εφαρμογές. Οι λάμπες Ne χρησιμοποιούνταν περισσότερο πριν την ανάπτυξη των λαμπτήρων στερεάς κατάστασης, αλλά σιγά-σιγά αντικαθίστώνται από τα LEDs στις περισσότερες στροβοσκοπικές εφαρμογές χαμηλής έντασης. Οι λάμπες αερίου Ξένου (λάμπες Xe) χρησιμοποιούνται για μέτριας και υψηλής έντασης στροβοσκοπικές εφαρμογές. Στην περίπτωση μας θα ασχοληθούμε με το ηλεκτρονικό στροβοσκόπιο το οποίο είναι κατασκευασμένο με βάση τα LEDs.

Το στροβοσκόπιο συχνά χρησιμοποιείται για την μελέτη μουσικών οργάνων με σκοπό την εύρεση της γωνιακής συχνότητας. Μία άλλη εφαρμογή του στροβοσκοπίου μπορεί να παρατηρηθεί στον δίσκο του πικάπ. Η άκρη του δίσκου του γραμμοφώνου έχει σημάδια ανά συγκεκριμένα διαστήματα έτσι ώστε όταν προβληθούν κάτω από λαμπτήρες φθορισμού σε συγκεκριμένη ταχύτητα, υπό τον όρο βέβαια ότι ο δίσκος του γραμμοφώνου περιστρέφεται στην σωστή ταχύτητα, τότε τα σημάδια εμφανίζονται ακίνητα. Μία άλλη χρήση του στροβοσκοπίου είναι για το χόρδισμα των μουσικών οργάνων. Σε αυτήν την περίπτωση το στροβοσκόπιο μπορεί να δείξει την διαφορά μεταξύ της συχνότητας αναφοράς και της συχνότητας της νότας. Και η μικρότερη διαφορά των δύο μπορεί να γίνει αντιληπτή ως μία περιστροφική κίνηση στο στροβοσκόπιο. Η ακρίβεια του συγκεκριμένου

στροβοσκοπίου περιορίζεται μόνο από την εσωτερική γεννήτρια συχνοτήτων. Το στροβοσκόπιο εντοπίζει τον τόνο είτε μέσω μίας εισόδου jack είτε μέσω ενός εξωτερικού μικροφώνου το οποίο είναι συνδεδεμένο με το στροβοσκόπιο. Τα στροβοσκόπια επίσης χρησιμοποιούνται από δύτες ως συσκευές εκδήλωσης κινδύνου όπως επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως στους φάρους των αυτοκίνητων των σωμάτων ασφαλείας. Επιπροσθέτως στροβοσκόπια χρησιμοποιούνται σε νυχτερινά κέντρα για να δίνουν την εντύπωση στους θαμώνες ότι χορεύουν σε αργή κίνηση. Στην Ιατρική, τα στροβοσκόπια χρησιμοποιούνται για την εξέταση των φωνητικών χορδών. Οι ασθενείς κατά την διάρκεια της εξέτασης μιλούν σε ένα μικρόφωνο το οποίο με την σειρά του ενεργοποιεί το στροβοσκόπιο στην ίδια ή σε πολύ κοντινή συχνότητα με αυτή των φωνητικών χορδών ώστε να καταφέρει ο γιατρός μέσω μίας κάμερας να παρατηρήσει τις φωνητικές χορδές σε αργή κίνηση ή σε ακινησία.

Η χρήση του στροβοσκοπίου όμως μπορεί να προκαλέσει επιληπτικές κρίσεις σε άτομα που πάσχουν από φωτοευαίσθητη επιληψία. Ένα αξιοσημείωτο γεγονός συνέβη το 1997 στην Ιαπωνία κατά την διάρκεια προβολής ενός επεισοδίου μίας παιδικής ταινίας, η οποία περιείχε μία σκηνή με μία έκρηξη στην οποία είχαν χρησιμοποιηθεί μπλε και κόκκινοι παλμοί φωτός, με αποτέλεσμα 685 παιδιά από αυτά που παρακολουθούσαν την ταινία να μεταφερθούν στα νοσοκομεία.

1.2.1 Duty cycle και συχνότητα επανάληψης των παλμών

Ως duty cycle ορίζεται η σχέση μεταξύ της διάρκειας του παλμού προς την περίοδο ενός τετραγωνικού παλμού. Δηλαδή σε μία ηλεκτρική συσκευή, ένα 60% duty cycle σημαίνει ότι η συσκευή λειτουργεί για το 60% της περιόδου ενώ για το υπόλοιπο 40% παύει να λειτουργεί. Για παράδειγμα, εάν ένας παλμός έχει διάρκεια 1μs και η περίοδος του παλμού είναι 4μs τότε το duty cycle είναι 25%. Το duty cycle, D , εκφράζεται ως:

$$D = \frac{\Delta t}{T} (\%) \quad (1.8)$$

όπου Δt είναι η διάρκεια που η συσκευή είναι ενεργή και T η περίοδος λειτουργίας. Εάν το duty cycle είναι μεγάλο, για παράδειγμα της τάξης του 40%, τότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερη φωτεινότητα όμως θα υπάρχει και ασάφεια στην παρατήρηση λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που μένει φωτισμένο το υπό μελέτη αντικείμενο. Στην περίπτωση που το duty cycle είναι μικρό, για παράδειγμα της τάξεως του 5%, τότε η φωτεινότητα είναι πολύ μικρή και πάλι το υπό μελέτη αντικείμενο δεν θα παρατηρείται ξεκάθαρα. Πάλι δηλαδή θα υπάρχει ασάφεια. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι για τις ανάγκες των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι ένα duty cycle της τάξεως του 10% είναι απολύτως ικανοποιητικό.

1.3 Η ΔΙΟΔΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ (LIGHT EMITTING DIODE – LED)

Δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode – LED) αποκαλείται μια ημιαγώγιμη δομή τύπου pn, η οποία εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος όταν της παρέχεται μία ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης (forward-bias). Με p συμβολίζεται το μέρος που είναι εμπλουτισμένο με οπές και n το μέρος που είναι εμπλουτισμένο με ηλεκτρόνια.

Το χρώμα, ή ισοδύναμα το μήκος κύματος, του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση των ημιαγώγιμων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή LED, και ειδικότερα από το ενεργειακό χάσμα, E_g , των υλικών αυτών, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο.

1.3.1 Αρχή λειτουργίας των LEDs

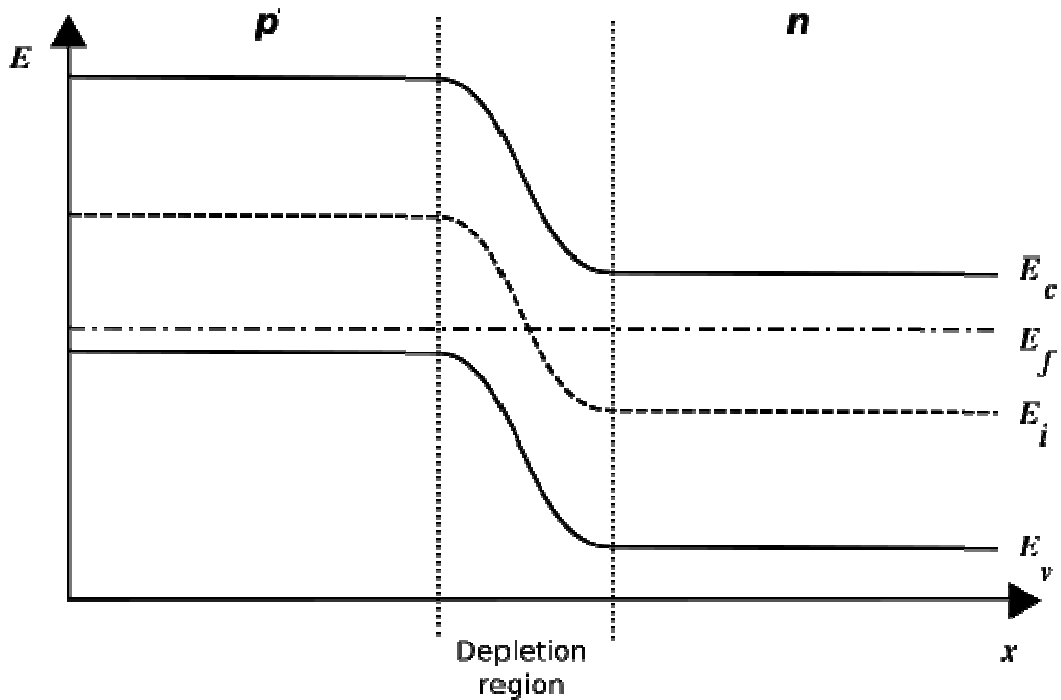
Η λειτουργία των LEDs βασίζεται στην ορθή πόλωση της επαφής pn, ώστε ηλεκτρόνια και οπές να διέρχονται στις περιοχές p και n αντίστοιχα. Σε ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού χάσματος η επανασύνδεση οδηγεί σε εκπομπή φωτός αφού η ακτινοβολία επανασύνδεσης κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας. Σε υλικά έμμεσου χάσματος, η απόδοση εκπομπής φωτός είναι αρκετά φτωχή και οι περισσότερες από τις διαδρομές επανασύνδεσης ακτινοβολούν με παραγωγή θερμότητας παρά φωτός.

Στην περίπτωση ενώσεων pn με χρήση ημιαγωγών άμεσου ενεργειακού χάσματος, όπως για παράδειγμα το GaAs, η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων, E_{ph} , ισούται κατά προσέγγιση με το ενεργειακό χάσμα E_g :

$$E_g = E_{ph} = h\nu \quad (1.9)$$

όπου h η σταθερά του Planck, και ν η συχνότητα των παραγόμενων φωτονίων, που συνδέεται με το μήκος κύματος τους, λ , μέσω της σχέσης $c = \lambda\nu$, όπου c η ταχύτητα του φωτός. Στην εικόνα 1.4 φαίνεται το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών μιας τυπικής μη πολωμένης επαφής pn, στην οποία η n-περιοχή είναι πιο έντονα εμπλουτισμένη από την p-περιοχή. Με E_v και E_c συμβολίζονται οι ζώνες σθένους και αγωγιμότητας, αντίστοιχα, με E_f το επίπεδο Fermi της επαφής και με E_i το ενδογενές επίπεδο Fermi του μη-εμπλουτισμένου ημιαγωγού. Μεταξύ των περιοχών p και n βρίσκεται η περιοχή απογύμνωσης (depletion region), η περιοχή δηλαδή που έχει απογυμνωθεί από φορείς (ηλεκτρόνια και οπές) λόγω γρήγορης διάχυσής τους ένθεν της επαφής (ηλεκτρόνια από την n-περιοχή περνούν στην p-περιοχή, αντίστροφα για οπές) αφήνοντας πίσω τους φορτία χώρων (ιόντα). Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κατά κύριο λόγο εντός της p-περιοχής, λόγω του χαμηλότερου εμπλουτισμού της σε σχέση με την n-περιοχή. Το ενεργειακό χάσμα είναι $E_g = E_c - E_v$.

Για την μετάβαση φορέων από την μια περιοχή στην άλλη χρειάζεται να υπερπηδηθεί ένα φράγμα δυναμικού, V_k , όπως φαίνεται και από την κλίση των ζωνών στην περιοχή απογύμνωσης. Αυτό το φράγμα δυναμικού αποτρέπει την περαιτέρω διάχυση των φορέων. Στη συνέχεια θα αναφερόμαστε στην κίνηση / ιδιότητες ηλεκτρονίων, με τα αντίστοιχα να ισχύουν για τις οπές,

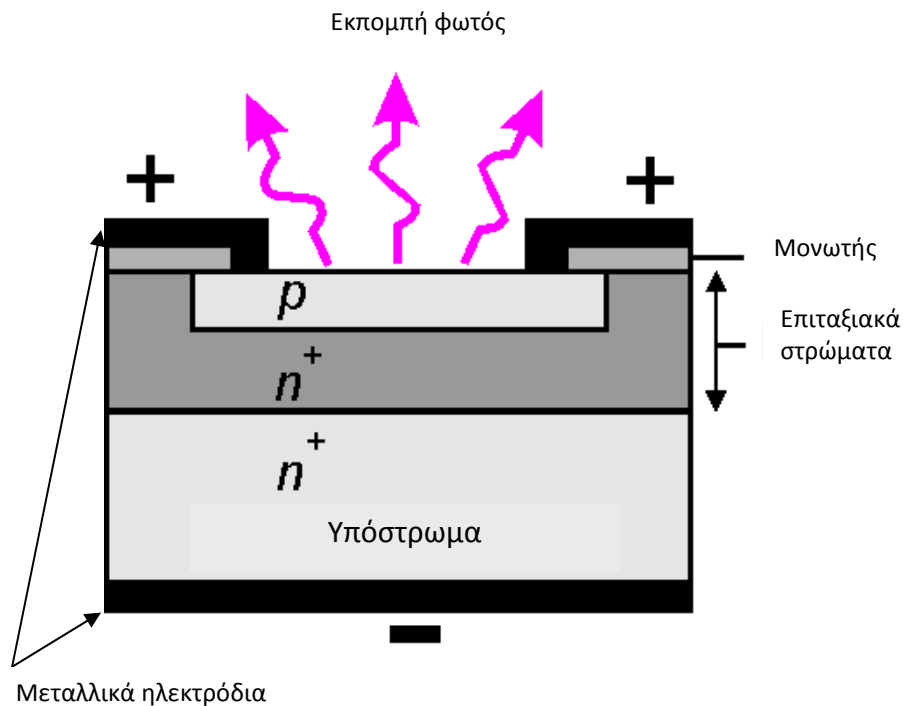


Εικόνα 1.4: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών μίας μη πολωμένης ένωσης pn.

Όταν εφαρμοστεί μια ορθή πόλωση, V , τότε ενεργειακά μπορεί να θεωρήσει κανείς ότι το φράγμα δυναμικού μειώνεται, και αν η τιμή της είναι ίση ή μεγαλύτερη από V_k τα ηλεκτρόνια αποκτούν ικανή ενέργεια ώστε να περάσουν στην περιοχή p , να επανασυνδεθούν με οπές και έτσι να έχουμε εκπομπή φωτεινής ακτινοβολίας με χαρακτηριστικά που εξηγήθηκαν παραπάνω. Λόγω της στατιστικής φύσης της διαδικασίας επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων με τις οπές, τα εκπεμπόμενα φωτόνια κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις. Το καθένα είναι το αποτέλεσμα μιας διαδικασίας αυθόρμητης εκπομπής. Η δομή ενός LED πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μπορούν να απομακρύνονται από τη διάταξη χωρίς να επαναπορροφώνται από το ημιαγωγίμο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η p -περιοχή πρέπει να είναι επαρκώς ρηχή, ή διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διατάξεις ετεροδομών.

Στην εικόνα 1.5 απεικονίζεται μία απλή δομή ενός LED. Καταρχήν, επάνω σε ένα κατάλληλο υπόστρωμα (για παράδειγμα GaAs ή GaP για LED GaAs/GaAlAs) αναπτύσσεται ένα εμπλουτισμένο ημιαγωγίμο στρώμα (GaAs/GaAlAs). Η ανάπτυξη του στρώματος γίνεται επιταξιακά, δηλαδή κάθε νέο κρυσταλλικό επίπεδο αναπτύσσεται έτσι ώστε να ακολουθεί την κρυσταλλική δομή του κρυστάλλου του υποστρώματος. Το υπόστρωμα είναι απαραίτητα ένας αρκετά παχύς κρύσταλλος, ο οποίος λειτουργεί και ως μηχανικό υποστήριγμα της ένωσης pn (δηλαδή των εμπλουτισμένων στρωμάτων), και μπορεί να είναι διαφορετικού τύπου υλικό από το υλικό των στρωμάτων που προστίθενται στη συνέχεια. Η ένωση $pn+$ δημιουργείται με την ανάπτυξη άλλου ενός επιταξιακού στρώματος, τύπου p αυτή τη φορά. Τέλος υπάρχουν μεταλλικά ηλεκτρόδια για την εφαρμογή πόλωσης, προστατευμένα με μονωτικό υλικό. Υπό ορθή πόλωση, τα φωτόνια που εκπέμπονται προς την n -περιοχή,

είτε απορροφώνται, είτε ανακλώνται προς τη διεπιφάνεια του υποστρώματος, ανάλογα με το πάχος του υποστρώματος και την ακριβή δομή του LED.



Εικόνα 1.5: Απλή δομή LED.

Η παρουσία κρυσταλλικών ατελειών ευνοεί την επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών χωρίς την εκπομπή ακτινοβολίας. Με άλλα λόγια, οι ατέλειες λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης. Αυτού του είδους οι ατέλειες μειώνονται με το συνταίριασμα του επιταξιακού στρώματος του LED και του υποστρώματος.

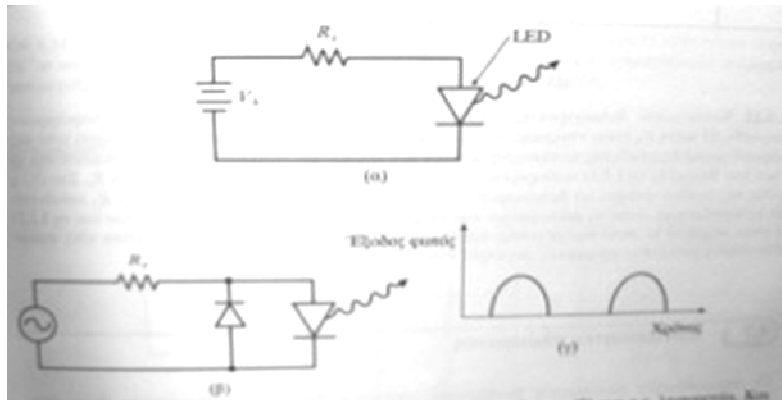
Η εξωτερική απόδοση, $\eta_{εξ}$, ενός LED είναι ένα μέτρο της απόδοσης της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε εκπεμπόμενη εξωτερικά φωτεινή ενέργεια. Στο μέγεθος αυτό συνυπολογίζονται η εσωτερική απόδοση της ακτινοβόλου διαδικασίας επανασύνδεσης και η επακόλουθη απόδοση της εξόδου φωτονίων από τη διάταξη. Αν η φωτεινή ισχύς που εκπέμπεται από τη διάταξη είναι P_{out} τότε:

$$\eta_{εξ} = \frac{P_{out}}{IV} (\%) \quad (1.10)$$

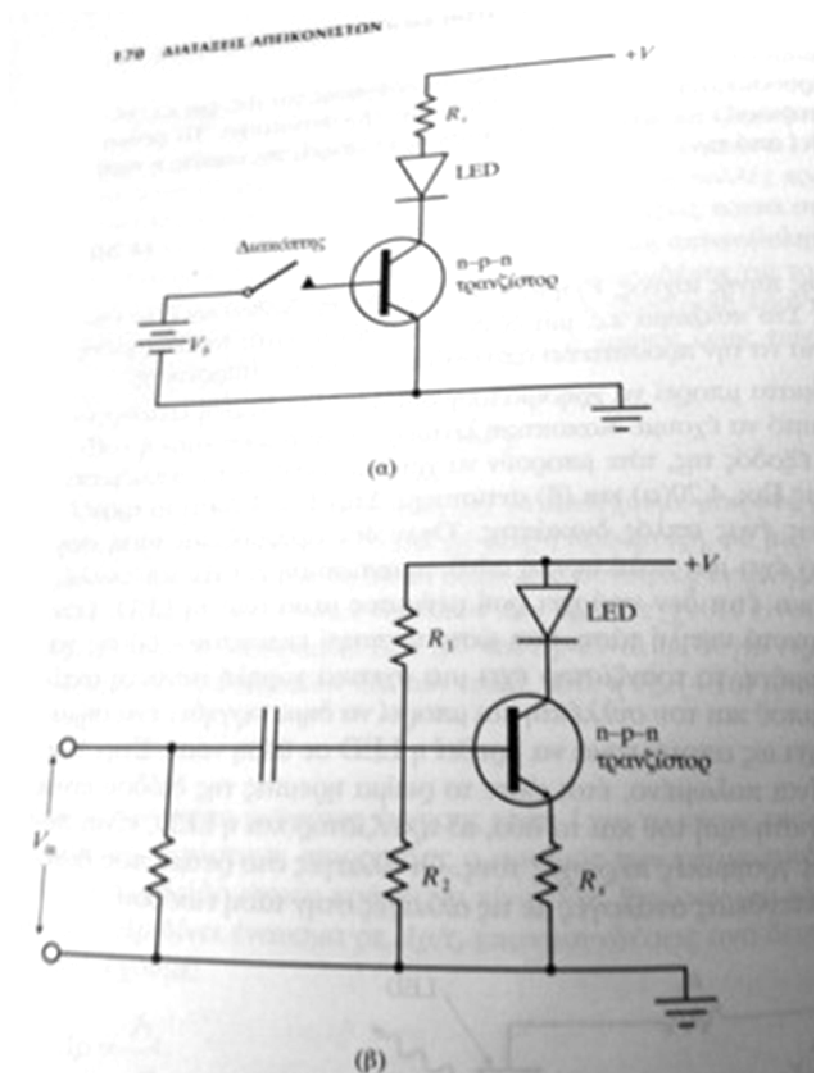
όπου I και V το ρεύμα και η τάση της διόδου, αντίστοιχα.

1.3.2 Κυκλώματα οδήγησης των LEDs

Τα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά των LED είναι ουσιαστικά αυτά των συνηθισμένων διόδων ανόρθωσης. Τυπικά ρεύματα λειτουργίας είναι μεταξύ των 20mA και των 100mA, ενώ οι ορθές τάσεις ποικίλουν από 1.2V για το GaAs σε 2V για το GaP. Βασικά κυκλώματα οδήγησης για DC και AC τάσης λειτουργίας παρουσιάζονται στις εικόνες 1.6.α και 1.6.β αντίστοιχα.



Εικόνα 1.6: (α) βασικό DC κύκλωμα οδήγησης LED, (β) βασικό AC κύκλωμα οδήγησης LED, και (γ) έξοδος του AC κυκλώματος.



Εικόνα 1.7: Κυκλώματα οδήγησης LED με επιπλέον λειτουργίες "on", "off", και διαμόρφωσης, σε (α) DC, και (β) AC πόλωση.

Το ρεύμα μέσα από τη δίοδο περιορίζεται από μια αντίσταση R_s εν σειρά, της οποίας η τιμή μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση:

$$R_s = \frac{V_b - V_d}{I_d} \quad (1.11)$$

όπου V_b είναι η τάση της πηγής ισχύος, V_d η τάση λειτουργίας της διόδου και I_d το επιθυμητό ρεύμα διόδου. Στο κύκλωμα AC μια δίοδος ανόρθωσης είναι τοποθετημένη παράλληλα στο LED για να το προστατεύει από ανάστροφη τάση κατάρρευσης.

Αυτά τα δυο κυκλώματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο για λειτουργία “on”. Εάν είναι επιθυμητό να έχουμε διακόπτη λειτουργία της διόδου “on” ή “off”, ή και να διαμορφώνεται η έξοδός της, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα κυκλώματα που παρουσιάζονται στις εικόνες 1.7.α και 1.7.β αντίστοιχα. Στην εικόνα 1.7.α το τρανζίστορ χρησιμοποιείται ως ένας απλός διακόπτης. Όταν δεν εφαρμόζεται τάση στην βάση του, το τρανζίστορ έχει μια πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση μεταξύ του συλλέκτη και του εκπομπού και έτσι δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσα από το LED. Εάν εφαρμοστεί τότε μια αρκετά υψηλή τάση, έτσι ώστε η επαφή εκπομπού-βάσης να γίνει ισχυρά ορθά πολωμένη, το τρανζίστορ έχει μια σχετικά χαμηλή σύνθετη αντίσταση, μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη και μπορεί να δημιουργηθεί ένα σημαντικό ρεύμα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να βρεθεί η LED σε θέση “on”. Στην εικόνα 1.7.β το τρανζίστορ είναι πολωμένο έτσι ώστε το ρεύμα ηρεμίας της διόδου είναι περίπου μισό από τη μέγιστη τιμή του και τα δυο, το τρανζίστορ και το LED, είναι πολωμένα σαφώς μέσα στις γραμμικές περιοχές τους. Οι αλλαγές στο ρεύμα που διαρρέει το LED είναι τότε απευθείας ανάλογες με τις αλλαγές στην τάση εισόδου.

1.3.3 Εφαρμογές – Πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα των LEDs

Γενικά, οι εφαρμογές των LEDs μπορούν να χωριστούν σε τρεις ευρείες κατηγορίες:

- **Εφαρμογές απεικόνισης/κατάδειξης**, όπου το φως κατευθύνεται περισσότερο ή λιγότερο στο ανθρώπινο μάτι για να μεταφέρει ένα μήνυμα ή μια έννοια.

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το χαμηλό κόστος συντήρησης και το μικρό μέγεθος των σημερινών LED έχει οδηγήσει στην εφαρμογή τους σε μια πληθώρα εγκαταστάσεων και εξοπλισμού για την ορατή απεικόνιση. Τοποθετούνται σε μεγάλες επιφάνειες για την αποτύπωση δεδομένων και μηνυμάτων στα στάδια, στους σταθμούς των τρένων και των λεωφορείων, στα αεροδρόμια, στα λιμάνια, στους δρόμους ως πινακίδες ή ως σηματοδότες, στις συναυλίες. Εξ' αιτίας της μεγάλης διάρκειας ζωής τους και των μικρών χρόνων απόκτησης, τα LED χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία ως σηματοδότες φρένων και στροφής (φλας). Έτσι αυξάνεται και ο παράγοντας ασφάλειας που μπορεί να παρέχει ένα όχημα αφού ο οδηγός έχει στην διάθεσή του περισσότερο χρόνο αντίδρασης.

- **Εφαρμογές φωτισμού**, όπου το φως από τα LED ανακλάται από αντικείμενα για να μπορούν αυτά να είναι ορατά.

Με την εξέλιξη των LED υψηλής απόδοσης και ισχύος έγινε δυνατή η χρήση τους για φωτισμό και φωταγώγηση. Τα LED χρησιμοποιούνται στα φώτα των δρόμων ή σε

αρχιτεκτονικές κατασκευές που απαιτείται φωτισμός με εναλλαγή χρωμάτων. Επίσης χρησιμοποιούνται και ως κύρια φώτα στα αυτοκίνητα, στις μοτοσυκλέτες και στα ποδήλατα. Επίσης τα LED χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στον φωτισμό ενυδρείων. Μπορούν να παρέχουν το απαιτούμενο φως με μικρότερη εκπομπή θερμότητας και έτσι βοηθούν στην συντήρηση της βέλτιστης θερμοκρασίας του ενυδρείου. Επειδή μπορούν να παράγουν φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος είναι ιδανικά για να παρέχουν ένα συγκεκριμένο χρώμα-φάσμα για τον χρωματισμό των κοραλλιών, των ψαριών, των ανεμώνων κ.α. Τα LED είναι ακόμα ιδανικά για χρήση στις τηλεοράσεις, στους φορητούς υπολογιστές και στους προβολείς (projectors) DLP.

- **Εφαρμογές μέτρησης,** και αλληλεπίδραση με διαδικασίες που δεν γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο μάτι.

Το φως έχει και άλλες χρήσεις εκτός από την όραση. Τα LED χρησιμοποιούνται για μερικές από αυτές της εφαρμογές. Αυτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: (i) επικοινωνία, (ii) αισθητήρες, και (iii) αλληλεπίδραση φωτός με την ύλη. Το φως των LED μπορεί να τροποποιηθεί πολύ γρήγορα και έτσι χρησιμοποιείται στις οπτικές ίνες και στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου. Αυτές περιλαμβάνουν τα τηλεχειριστήρια των τηλεοράσεων και των βίντεο, όπου χρησιμοποιούνται τα LED υπερύθρου. Οι οπτομονωτές χρησιμοποιούν ένα LED και μια φωτοδίοδο ή ένα φωτοτρανζίστορ για να παρέχουν ένα «μονοπάτι» σήματος με ηλεκτρική μόνωση μεταξύ δυο διαδρομών. Αυτοί είναι αρκετά χρήσιμοι στον ιατρικό εξοπλισμό, όπου τα σήματα από τον αισθητήρα χαμηλής τάσης που είναι συνδεδεμένος με τον ανθρώπινο οργανισμό πρέπει να είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Πολλά συστήματα αισθητήρων χρησιμοποιούν το φως ως πηγή σήματος. Τα LED είναι ιδανική πηγή για να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις των αισθητήρων. Χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες κίνησης ή στις οθόνες αφής εντοπίζοντας το φως που ανακλάται από το δάχτυλο ή την ακίδα. Μια άλλη χρήση των LED είναι στις καλλιέργειες φυτών κυρίως γιατί είναι ενεργειακά αποδοτικά, παράγουν θερμότητα που δεν είναι ικανή να τα καταστρέψει γιατί είναι μικρή, και μπορούν να παρέχουν την βέλτιστη οπτική συχνότητα για την ανάπτυξή τους.

Μπορούμε να συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των LED στις παραπάνω εφαρμογές ως ακολούθως:

Πλεονεκτήματα:

- **Απόδοση:** Τα LEDs παράγουν περισσότερο φως ανά Watt συγκριτικά με τις λάμπες πυράκτωσης.
- **Χρώμα:** Τα LEDs εκπέμπουν φως συγκεκριμένου χρώματος χωρίς την χρήση φίλτρων που απαιτούν οι παραδοσιακοί μέθοδοι φωτισμού. Είναι πιο αποδοτικά και χαμηλώνουν το αρχικό κόστος.
- **Μέγεθος:** Τα LEDs είναι πολύ μικρά (μικρότερα από 2mm) και μπορούν να τοποθετηθούν σε πινάκες αποτύπωσης.
- **Χρόνος on/off:** Τα LEDs έχουν γρήγορη απόκριση. Ένα τυπικό κόκκινο LED μπορεί να έρθει σε κατάσταση πλήρους φωτεινότητας σε χρόνο λίγων μς. Τα LEDs που χρησιμοποιούνται ως συσκευές επικοινωνίας έχουν ακόμα μικρότερους χρόνους απόκρισης.

- **«Ψυχρό φως»:** Σε αντίθεση με τις κοινές πηγές φωτός, τα LEDs εκπέμπουν πολύ λίγη θερμότητα σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας που μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε ευαίσθητα αντικείμενα ή κατασκευές. Η ενέργεια που χάνεται διαχέεται ως θερμότητα μέσω της βάσης του LED.
- **Χρόνος ζωής:** Τα LEDs έχουν μεγάλους χρόνους ζωής. Οι ώρες λειτουργίας τους κυμαίνονται από 35000 έως 50000 ώρες, αριθμός πολύ μεγαλύτερος συγκριτικά με αυτόν των λαμπτήρων πυράκτωσης που κυμαίνεται από 1000 έως 2000 ώρες και των λαμπτήρων φθορισμού που κυμαίνεται από 10000 έως 15000 ώρες.
- **Αντίσταση σε κραδασμούς:** Τα LEDs, όντας στοιχεία στερεάς κατάστασης, είναι δύσκολο να υποστούν ζημιά από κραδασμούς όπως συμβαίνει με τις λάμπες πυράκτωσης και φθορισμού.
- **Εστίαση:** Τα LEDs μπορούν να εύκολα να σχεδιαστούν ώστε να εστιάζουν το φως σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή περιοχή. Οι λάμπες πυράκτωσης και φθορισμού απαιτούν ειδικούς εξωτερικούς ανακλαστήρες για να συλλέγουν το φως και να το κατευθύνουν με ένα χρήσιμο τρόπο.
- **Τοξικότητα:** Τα LEDs δεν περιέχουν υδράργυρο όπως οι λάμπες φθορισμού.

Μειονεκτήματα:

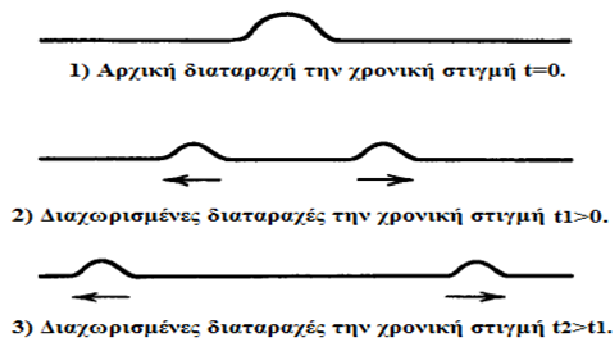
- **Σχετικά υψηλό αρχικό κόστος:** Τα LEDs σήμερα παραμένουν σχετικά ακριβότερα στην αγορά τους απ' ό,τι οι κοινές τεχνολογίες φωτισμού. Όμως αυτό το κόστος αντισταθμίζεται με την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που έχουν, και ολόένα ελαττώνεται όσο περισσότερο επενδύουν οι κατασκευάστριες εταιρείες σε αυτά και όσο περισσότερο αυτά βρίσκουν εφαρμογές.
- **Ευαισθησία από την θερμοκρασία:** Η λειτουργία των LEDs έχει ισχυρή εξάρτηση από τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν στον χώρο που τα περιβάλλει. Σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, τα LEDs μπορούν να υπερθερμανθούν και να υποστούν ζημιά. Αυτός ο παράγοντας είναι πολύ σημαντικός αν σκεφτούμε ότι αυτοκινητιστικές, στρατιωτικές και ιατρικές εφαρμογές απαιτούν η συσκευή να λειτουργεί σε ένα επαρκώς μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και να είναι ανθεκτική στις βλάβες. Όμως ολόένα και περισσότερες λύσεις εφαρμόζονται προς αυτή την κατεύθυνση.
- **Ευαισθησία στην τάση:** Τα LEDs είναι αρκετά ευαίσθητα στην τάση και κατ' επέκταση στο ρεύμα που τα τροφοδοτεί. Έτσι πολλές φορές χρησιμοποιούνται σειρές αντιστάσεων ή πηγές ελέγχου του ρεύματος.
- **Ποιότητα φωτός:** Τα περισσότερα «ψυχρού λευκού» φωτός LEDs έχουν φάσμα που διαφέρει σημαντικά από αυτό ενός ακτινοβόλου μελανού σώματος όπως ο ήλιος ή ο λαμπτήρας πυράκτωσης. Αυτό σημαίνει ότι το χρώμα κάποιων αντικειμένων μπορεί να φαίνεται διαφορετικό κάτω από ένα LED «ψυχρού λευκού» απ' ό,τι θα φαίνονταν κάτω από το φως του ήλιου ή κάτω από μια λάμπα πυράκτωσης.
- **Μόλυνση από το μπλε:** Επειδή τα μπλε LEDs και αυτά του «ψυχρού λευκού» είναι πλέον ικανά να εκπέμπουν περισσότερο μπλε φως απ' ό,τι οι κοινές πηγές φωτός, όπως οι λάμπες Νάτριου υψηλής πίεσης, η ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος της σκέδασης Rayleigh σημαίνει ότι τα LED μπορούν να προκαλέσουν περισσότερη φωτορύπανση απ' ό,τι οι άλλες πηγές φωτός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΝΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

Καθώς στην εργασία αυτή μελετώνται οι δονήσεις των χορδών και των αντηχείων εγχόρδων μουσικών οργάνων, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν στο κεφάλαιο αυτό τα κύρια δονητικά χαρακτηριστικά και ο τρόπος παραγωγής ήχου από τα όργανα αυτά, και συγκεκριμένα από την κιθάρα που ήταν και το υπό εξέταση όργανο, τα κύρια δομικά χαρακτηριστικά της οποίας επίσης παρουσιάζονται.

2.1 Η ΔΟΝΟΥΜΕΝΗ ΧΟΡΔΗ

Ας θεωρήσουμε μια τεντωμένη χορδή, όπως στην εικόνα 2.1. Όταν το ένα άκρο μίας χορδής μετατοπίζεται από την θέση ισορροπίας της και απελευθερώνεται, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η μετατόπιση δεν μένει σταθερή στην αρχική της θέση αλλά χωρίζεται σε δύο ξεχωριστές διαταραχές οι οποίες διαδίδονται κατά μήκος της χορδής, όπου η μία κινείται προς τα δεξιά και η άλλη προς τα αριστερά με την ίδια ταχύτητα.



Εικόνα 2.1: Διάδοση εγκάρσιας διαταραχής σε τεντωμένη χορδή.

Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα διάδοσης μίας μικρής διαταραχής είναι ανεξάρτητη του σχήματος και του πλάτους της αρχικής μετατόπισης, και εξαρτάται μόνο από την γραμμική πυκνότητα της χορδής καθώς και από την τάση της. Η ταχύτητα διάδοσης, c , της διαταραχής δίνεται από την σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{T}{\rho_L}} \quad (2.1)$$

όπου T η τάση της χορδής και ρ_L η γραμμική πυκνότητα της χορδής. Η διαδιδόμενη εγκάρσια αυτή διαταραχή είναι τα εγκάρσια διαδιδόμενα κύματα.

2.1.1 Η μονοδιάστατη κυματική εξίσωση

Σκεπτόμενοι τις δυνάμεις οι οποίες συμβάλλουν στο να επιστρέψει η χορδή στην αρχική θέση ισορροπίας της, μπορούμε να καταλήξουμε στην κυματική εξίσωση που διέπει την διαταραχή. Οι λύσεις της κυματικής εξίσωσης που ικανοποιούν τις κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες περιγράφουν πλήρως την κίνηση της χορδής.

Έστω ότι έχουμε μια χορδή με ομοιόμορφη γραμμική πυκνότητα και με αμελητέα δυσκαμψία, η οποία είναι τεντωμένη με τάση, T , σε τέτοιο βαθμό ώστε οι δυνάμεις της βαρύτητας να είναι αμελητέες. Υποθέτουμε επίσης ότι δεν υπάρχουν άλλες δυνάμεις που να ασκούνται όπως αυτές που συνδέονται με την τριβή ή την ακτινοβολία της ακουστικής ενέργειας. Ας θεωρήσουμε ένα απειροελάχιστο στοιχείο της χορδής με θέση ισορροπίας x και μήκος dx . Εάν η εγκάρσια μετατόπιση αυτού του στοιχείου από την θέση ισορροπίας του y είναι μικρή, η τάση T παραμένει σταθερή κατά μήκος της χορδής, και η διαφορά μεταξύ των y -συνιστωσών της τάσης στις δύο άκρες του στοιχείου είναι:

$$df_y = (T \sin \vartheta)_{x+dx} - (T \sin \vartheta)_x \quad (2.2)$$

όπου ϑ είναι η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης της χορδής με τον x -άξονα. Εφαρμόζοντας ανάπτυγμα κατά Taylor και διατηρώντας μόνο της χαμηλότερης τάξης μη μηδενικούς όρους παίρνουμε:

$$df_y = \left[(T \sin \vartheta)_x + \frac{\partial(T \sin \vartheta)}{\partial x} dx + \dots \right] - (T \sin \vartheta)_x = \frac{\partial(T \sin \vartheta)}{\partial x} dx \quad (2.3)$$

Εάν τώρα η γωνία ϑ είναι μικρή, η καθαρή εγκάρσια δύναμη στο στοιχείο γίνεται:

$$df_y = \frac{\partial}{\partial x} (T \frac{\partial y}{\partial x}) dx = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad (2.4)$$

Με βάση τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα, θα έχουμε:

$$df_y = \rho_L dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

όπου $\rho_L dx$ είναι η μάζα του στοιχείου και $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ η επιτάχυνσή του κατά τον y -άξονα.

Με συνδυασμό των (2.4) και (2.5) καταλήγουμε στην μονοδιάστατη κυματική εξίσωση:

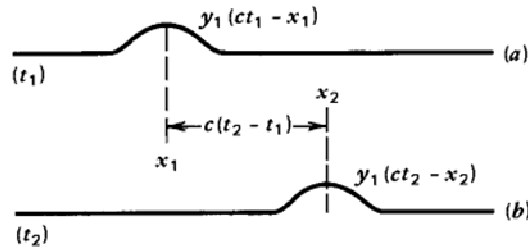
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Η εξίσωση αυτή είναι μία δεύτερης τάξης διαφορική εξίσωση. Η γενική λύση της είναι:

$$y(x,t) = y_1(ct - x) + y_2(ct + x) \quad (2.7)$$

και περιέχει δύο διπλά διαφορίσιμους παράγοντες, $y_1(ct - x)$ και $y_2(ct + x)$ οι οποίοι ουσιαστικά αντικατοπτρίζουν δύο εγκάρσια κύματα που οδεύουν προς την $+x$ και την $-x$ κατεύθυνση, αντίστοιχα.

Ας επικεντρωθούμε στο κομμάτι $y_1(ct - x)$ και στη χρονική εξέλιξή του με τη βοήθεια της εικόνας 2.2:



Εικόνα 2.2: Εγκάρσιο κύμα σε χορδή που οδεύει προς την $+x$ διεύθυνση, και η μορφή του σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές (α) t_1 , και (β) t_2 . Το κύμα θεωρείται ότι διαδίδεται χωρίς παραμόρφωση, και με φασική ταχύτητα $c = (x_2 - x_1)/(t_2 - t_1)$.

Σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές t_1 και t_2 η διαταραχή αποκτά μέγιστο πλάτος, y_1 στις θέσεις x_1 και x_2 αντίστοιχα, και κατά συνέπεια ισχύει:

$$ct_1 - x_1 = ct_2 - x_2 \Rightarrow c = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (2.8)$$

Θεωρούμε ότι το σχήμα της διαταραχής παραμένει το ίδιο και «ταξιδεύει» κατά μήκος της χορδής χωρίς παραμόρφωση. Η ταχύτητα διάδοσης, c , είναι σταθερή και ονομάζεται φασική ταχύτητα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ενώ η κυματομορφή διαδίδεται με φασική ταχύτητα c , τα υλικά στοιχεία (σωματίδια) της χορδής κινούνται εγκάρσια γύρω από την θέση ισορροπίας τους με ταχύτητα, u , που ονομάζεται σωματιδιακή ταχύτητα και δίνεται από την σχέση:

$$u(x, t) = \frac{\partial y_1}{\partial t} \quad (2.9)$$

Τα παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν και στα κύματα τα οποία οδεύουν προς την $-x$ κατεύθυνση.

Στην παραπάνω μαθηματική περιγραφή θεωρήσαμε ότι το σχήμα του κύματος παραμένει σταθερό καθώς η αρχική διαταραχή εξελίσσεται κατά μήκος της χορδής. Αυτό δεν μπορεί να διαπιστωθεί ακριβώς κατά την διάρκεια ενός πειράματος, καθώς οι υποθέσεις που κάνουμε για να καταλήξουμε στην κυματική εξίσωση δεν εκπληρώνονται πλήρως ποτέ για την πραγματικές χορδές, οι οποίες έχουν πάντα μία μερική ακαμψία όπως επίσης ενεργούν πάνω τους κάποιες δυνάμεις τις οποίες δεν μπορούμε να συμπεριλάβουμε. Τα κύματα τα οποία ταξιδεύουν κατά μήκος μίας πραγματικής χορδής παραμορφώνονται. Οι σχετικά ευέλικτες χορδές και η χαμηλή απόσβεση όπου συναντάμε στα μουσικά όργανα,

οδηγεί σε ρυθμό παραμόρφωσης αρκετά μικρό αν το πλάτος της διαταραχής είναι μικρό. Για μεγαλύτερη πλάτη το σχήμα του κύματος μπορεί να αλλάξει αρκετά.

Οι παράγοντες y_1 και y_2 καθορίζονται από τις αρχικές τιμές και από τις συνοριακές συνθήκες. Για μία ελεύθερα δονούμενη χορδή, οι αρχικές τιμές την χρονική στιγμή $t = 0$ καθορίζονται από τον τύπο και το σημείο εφαρμογής της δύναμης που εφαρμόζεται στην χορδή. Για παράδειγμα, το αρχικό σχήμα του κύματος που προκύπτει από το χτύπημα μίας χορδής (π.χ. όταν παίζουμε πιάνο), είναι ελαφρώς διαφορετικό από αυτό που προκύπτει όταν τραβάμε μία χορδή (π.χ. όταν παίζουμε κιθάρα) και από αυτό που προκύπτει όταν διεγείρουμε την χορδή με ένα δοξάρι (π.χ. όταν παίζουμε βιολί). Οι παράγοντες που αναπαριστούν το σχήμα του κύματος είναι κατά συνέπεια διαφορετικοί. Οι παράγοντες καθορίζονται επίσης και από τις συνοριακές συνθήκες στα άκρα της χορδής. Οι πραγματικές χορδές είναι πάντα περιορισμένου μήκους και πρέπει να συγκρατούνται κατά κάποιο τρόπο στις άκρες τους. Για παράδειγμα εάν τα στηρίγματα της χορδής είναι άκαμπτα, το άθροισμα είναι αναγκασμένο να έχει την τιμή μηδέν σε κάθε χρονική στιγμή στα άκρα της χορδής τα οποία με κάποιο τρόπο συγκρατούνται. Όταν μία χορδή οδηγείται σε «σταθερής κατάστασης» συνθήκες από μία περιοδική εξωτερική δύναμη, οι παράγοντες y_1 και y_2 είναι περιοδικοί με ίδια συχνότητα, αλλά όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους καθορίζονται από το σημείο εφαρμογής της δύναμης και από τις συνοριακές συνθήκες.

2.1.2 Εξαναγκασμένη ταλάντωση πακτωμένης χορδής

Σε μία χορδή πακτωμένη στα δύο άκρα της το κύμα που ανακλάται από το αριστερό άκρο της χορδής στο δεξί συνυπάρχει με το κύμα το οποίο ταξιδεύει από το δεξί άκρο της χορδής και το οποίο με την σειρά ανακλάται προς το αριστερό άκρο της χορδής. Ωστόσο, όταν επιτευχθεί η «σταθερή κατάσταση» της χορδής, η λύση πρέπει να εκφραστεί ως δύο αρμονικά κύματα τα οποία ταξιδεύουν προς αντίθετες κατευθύνσεις:

$$y(x,t) = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)} \quad (2.10)$$

όπου ω η γωνιακή συχνότητα, k ο κυματάριθμος, και τα πλάτη A και B καθορίζονται από τις συνοριακές συνθήκες.

Υποθέτουμε ότι έχουμε μία χορδή μήκους L , η οποία είναι πακτωμένη στο δεξί άκρο ($x = L$) και οδηγείται από το αριστερό άκρο ($x = 0$) με δύναμη F . Στο αριστερό άκρο η συνοριακή συνθήκη είναι:

$$Fe^{i\omega t} + T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (2.11)$$

για σε κάθε χρονική στιγμή. Με αντικατάσταση στην (2.10) προκύπτει:

$$F + T(-ikA + ikB) = 0 \quad (2.12)$$

Στο δεξί άκρο η μετατόπιση είναι πάντα μηδέν άρα έχουμε:

$$Ae^{-ikL} + Be^{ikL} = 0 \quad (2.13)$$

Λύνοντας τις (2.12) και (2.13) ταυτόχρονα για τα A και B αντίστοιχα έχουμε:

$$A = \frac{F e^{ikL}}{2ikT \cos kL} \quad B = \frac{F e^{-ikL}}{2ikT \cos kL} \quad (2.14)$$

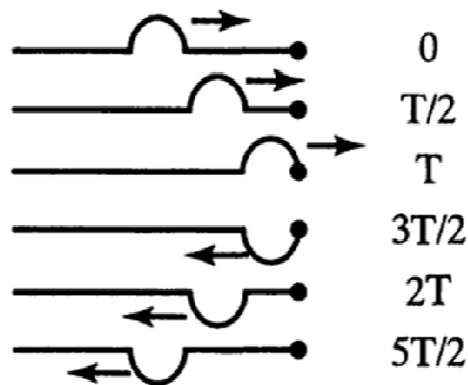
Με αντικατάσταση των δύο αυτών σταθερών στην (2.10) και με παραγοντοποίηση των μιγαδικών εκθετικών όρων έχουμε:

$$y(x,t) = \frac{F}{2kT} \frac{\sin[k(L-x)]}{\cos kL} e^{i\omega t} \quad (2.15)$$

Η (2.15) περιγράφει μία κυματομορφή η οποία δεν οδεύει κατά μήκος της χορδής. Αντί αυτού η χορδή ταλαντώνεται ενώ η κυματομορφή παραμένει σταθερή, παραμένει δηλαδή στην ίδια θέση. Ένα τέτοιο κύμα ονομάζεται στάσιμο κύμα και χαρακτηρίζεται μαθηματικά από κάποιο πλάτος, το οποίο πλάτος εξαρτάται από την θέση του κύματος πάνω στην χορδή. Οι δύο αυτές περιγραφές φανερώνουν ότι ο συνδυασμός κυμάτων, τα οποία έχουν ίσα πλάτη και ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις δημιουργούν μία στάσιμη δόνηση με χωρικά εξαρτώμενο πλάτος.

2.1.3 Ιδιορυθμοί και ιδιοσυχνότητες πακτωμένης χορδής

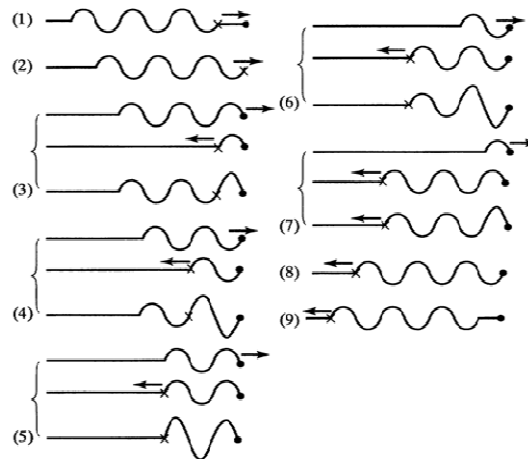
Ας δούμε τώρα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις μορφές των στασίμων κυμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έστω ότι έχουμε ένα εγκάρσιο παλμό που αποτελείται από το ήμισυ της περιόδου της ταλάντωσης και ανακλάται από το ένα άκρο της χορδής. Η εικόνα 2.3 αναπαριστά ένα τέτοιο παλμό για την περίπτωση ενός πακτωμένου άκρου. Η δύναμη του παλμού, ο οποίος «χτυπάει» πάνω στο πακτωμένο άκρο της χορδής, αναγκάζει τον παλμό να αλλάξει κατεύθυνση από τα θετικά προς τα αρνητικά με διαφορά φάσης 180° .



Εικόνα 2.3: Ανάκλαση ενός εγκάρσιου παλμού σε πακτωμένο άκρο της χορδής σε διαφορετικές στιγμές της περιόδου, T .

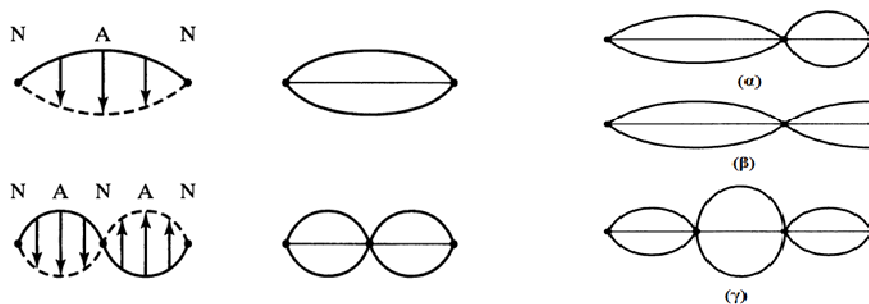
Έστω τώρα ότι έχουμε τρία ημιτονοειδή κύματα τα οποία ανακλώνται από ένα πακτωμένο άκρο όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4. Το σημείο «x» μας δείχνει την αρχή του κύματος. Τα διαδοχικά στιγμιότυπα στην εικόνα 2.4 είναι χρονικά τοποθετημένα

ανά μισή περίοδο, έτσι το κύμα κινείται με το μισό του μήκους κύματος σε κάθε στιγμιότυπο. Και τα προσπίπτοντα κύματα και τα ανακλώμενα απεικονίζονται μεμονωμένα και ακολουθούνται από το άθροισμά τους, το οποίο είναι το συνολικό σχήμα της χορδής. Στο στιγμιότυπο 1 παρατηρούμε ότι ο πρώτος παλμός του προσπίπτοντος κύματος είναι αρνητικός, ενώ στο στιγμιότυπο 9 ο πρώτος παλμός του ανακλώμενου κύματος είναι θετικός. Επίσης αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι το άθροισμα των δύο κυμάτων έχει το διπλάσιο πλάτος.



Εικόνα 2.4: Ανάκλαση ενός εγκάρσιου παλμού ο οποίος αποτελείται από 3 περιόδους σε πακτωμένο άκρο. Το κύμα παρουσιάζει διαφορά φάσης κατά την ανάκλαση. Το άθροισμα του προσπίπτοντος κύματος με το ανακλώμενο παράγει ένα στάσιμο κύμα με ο διπλό πλάτος. Το σημείο «x» υποδεικνύει την αρχή του προσπίπτοντος κύματος.

Τα δύο πιο απλά πιθανά στάσιμα κύματα σε μία τεντωμένη χορδή φαίνονται αριστερά στην εικόνα 2.5, με τα σχήματα να δείχνουν δύο ακραίες θέσεις της χορδής για κάθε κύμα και τα βέλη τους δείχνουν τις κατευθύνσεις της κίνησης. Τα στάσιμα κύματα συνεχίζουν και ταλαντώνονται μπρος και πίσω μεταξύ αυτών των ακραίων θέσεων.

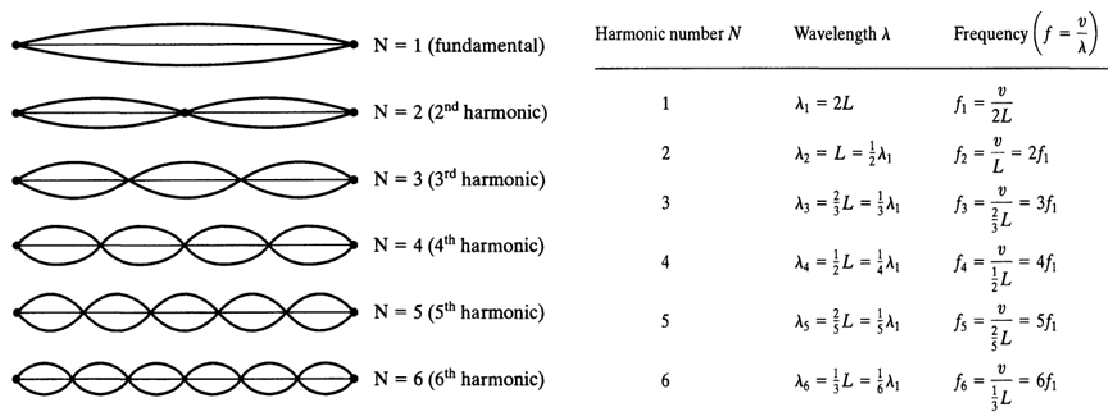


Εικόνα 2.5: Αριστερά: απλά πιθανά στάσιμα κύματα, δεξιά: μη υπαρκτά στάσιμα κύματα.

Επίσης στα δεξιά της εικόνας 2.5 βλέπουμε κάποια στάσιμα κύματα τα οποία δεν πληρούν τις βασικές αρχές των στάσιμων κυμάτων και άρα δεν μπορούν να υπάρξουν. Στο στιγμιότυπο α παρατηρούμε ένα κύμα το οποίο έχει άνισο μήκος

κοιλιών, στο στιγμιότυπο β παρατηρούμε ένα κύμα το οποίο παραβιάζει τις συνθήκες των άκρων αφού έχει υπάρξει μία κοιλία στο σημείο που τελειώνει το κύμα, και στο στιγμιότυπο γ παρατηρούμε ένα κύμα του οποίου οι κοιλίες έχουν άνισο πλάτος. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι αυτά τα κύματα λόγω του ότι παραβιάζουν τις βασικές αρχές των στάσιμων κυμάτων δεν μπορούν να υπάρξουν.

Η εικόνα 2.6 περιέχει την γραφική αναπαράσταση των πρώτων 6 πιθανών στάσιμων κυμάτων (αρμονικών) σε μία τεντωμένη χορδή όπου N η τάξη της κάθε αρμονικής. Οι δεσμοί θα πρέπει να είναι ίσα χωρικά κατανεμημένοι κατά μήκος της χορδής με μία κοιλία στην μέση, μεταξύ των δύο διαδοχικών δεσμών. Παρατηρούμε ότι το πρώτο στάσιμο κύμα έχει μήκος το μισό του μήκους κύματος, το δεύτερο έχει μήκος ίσο με το μήκος κύματος κ.ο.κ.



Εικόνα 2.6: Γραφικές αναπαραστάσεις (αριστερά), και μήκη κύματος και συχνότητες (δεξιά) των πρώτων 6 πιθανών στάσιμων κυμάτων σε μία χορδή.

Γνωρίζουμε ότι η συχνότητα, f , και το μήκος κύματος, λ , σχετίζονται μέσω της σχέσης:

$$c = f\lambda \quad (2.16)$$

Η τάξη της αρμονικής, N , πέραν του ότι είναι ίση με τον αριθμό των κοιλιών στο στάσιμο κύμα, μας λέει την συχνότητα στο στάσιμο κύμα. Η συχνότητα της κάθε διαδοχικής αρμονικής είναι ίση με την συχνότητα του πρώτου τρόπου ταλάντωσης πολλαπλασιασμένου και με την τάξη της αρμονικής. Το πιο απλό στάσιμο κύμα που υπάρχει σε μία χορδή ονομάζεται θεμελιώδης ή πρώτη αρμονική. Τα υπόλοιπα στάσιμα κύματα ονομάζονται αρμονικές και έχουν συχνότητα ίση με N φορές της θεμελιώδους συχνότητας. Οι διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης ονομάζονται ιδιορυθμοί, και κάθε ιδιορυθμός έχει την δική του συχνότητα η οποία ονομάζεται ιδιοσυχνότητα. Μία χορδή μπορεί να ταλαντώνεται σε πολλούς ιδιορυθμούς ταυτόχρονα, έτσι το σχήμα της χορδής σε αυτήν την περίπτωση καθορίζεται από το άθροισμα των σχημάτων των ιδιορυθμών στους οποίους ταλαντώνεται. Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθούν τα παρακάτω:

- Στην χορδή δεν μπορεί να διεγερθεί μία αρμονική όταν έλκεται σε ένα σημείο όπου αυτή η αρμονική παρουσιάζει κομβικό σημείο (δεσμό). Έτσι οι αρμονικές για τις οποίες συμβαίνει αυτό δεν θα υπάρχουν στην δόνηση της χορδής.

- Όταν η χορδή έλκεται σε ένα σημείο που συμπίπτει με το σημείο μέγιστης μετατόπισης κάποιας αρμονικής, τότε παρουσιάζεται μέγιστη διέγερση αυτής της αρμονικής.
- Η διέγερση μιας αρμονικής είναι ανάλογη προς την μετατόπιση της συγκεκριμένης αρμονικής στο σημείο έλξης της χορδής.
- Το πλάτος της διέγερσης της N -στής αρμονικής είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της τάξης N της αρμονικής.

2.2 Η ΚΙΘΑΡΑ: ΔΟΜΗ & ΔΟΝΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.2.1 Δομή κιθάρας και παραγωγή ήχου

Το σώμα της κιθάρας είναι μια σύνθετη κατασκευή. Μια τυπική κιθάρα, όπως αυτή της εικόνας 2.7, αποτελείται από το εμπρός μέρος (καπάκι ή ηχητική πλάκα) και το πίσω μέρος (πλάτη). Η ταστιέρα προσαρμόζεται στο καπάκι και στα πλαϊνά. Η πλάτη γίνεται άκαμπτη τοποθετώντας σε αυτήν λεπτές τραβέρσες. Στο πάνω μέρος του καπακιού υπάρχει ένα άνοιγμα, η ηχητική οπή. Πάνω και κάτω από την οπή το καπάκι δένεται με ακτίνες, που υποβαστάζουν τον βραχίονα και την ταστιέρα. Οι ακτίνες και η ταστιέρα καθιστούν το πάνω μέρος του καπακιού πολύ σταθερό. Η περιοχή του καπακιού, που κυρίως δονείται, είναι κάτω από το άνοιγμα και καλείται ελεύθερο άκρο τμήμα του καπακιού. Στο ελεύθερο τμήμα του καπακιού παρουσιάζεται προσθετή ενίσχυση της ακαμψίας του, λόγω της γέφυρας, η οποία προσθετή αξιόλογη ακαμψία. Το μήκος του βραχίονα της κιθάρας είναι το μισό του μήκους της χορδής. Η γέφυρα τοποθετείται στην μέση του ελευθέρου τμήματος και λίγο πιο πάνω.



Εικόνα 2.7: Τα μέρη της κιθάρας.

Η κιθάρα παίζεται τραβώντας την χορδή προς μια διεύθυνση και αφήνοντας την μετά ελεύθερη έτσι ώστε να αρχίσει να ταλαντώνεται. Το πλάτος των ταλαντώσεων είναι μεγάλο, αλλά λόγω της μικρής επιφάνειας της χορδής δεν ακούγεται ήχος. Ωστόσο ένα μεγάλο μέρος ενέργειας ταλάντωσης της χορδής μετατρέπεται σε ενέργεια ταλάντωσης του καπακιού.

Η μεγάλη επιφάνεια ταλάντωσης του καπακιού το καθιστά ικανοποιητική πηγή εκπομπής ήχου. Το σώμα της κιθάρας λειτουργεί σαν ενισχυτής των δονήσεων των χορδών. Έχει αποδειχθεί πως το σώμα δεν ενισχύει όλες τις συχνότητες αλλά υπάρχει μια καμπύλη ενίσχυσης η καμπύλη απόκρισης συχνότητας, το οποίο δίνει μια ικανοποιητική σε πρώτη προσέγγιση της λειτουργίας της κιθάρας. Το μοντέλο υποθέτει πως η χορδή και το σώμα ενεργούν ανεξάρτητα.

Η απόκριση συχνότητας του σώματος λαμβάνεται διεγείροντας το με μια ημιτονοειδή δύναμη σταθερού πλάτους και μετρώντας την ακουστική απόκριση του οργάνου με ένα μικρόφωνο καθώς η συχνότητα διέγερσης μεταβάλλεται. Οι εγκάρσιες ταλαντώσεις των χορδών εξασκούν μια μεταβαλλόμενης, ως προς τον χρόνο δύναμη στην γέφυρα. Αυτή η δύναμη έχει αποδειχτεί πως μπορεί να παρασταθεί, ως προς την συχνότητα, σαν ένα σύνολο ημιτονοειδών δυνάμεων αρμονικά συνδεμένων. Τα σχετικά ύψη των αρμονικών στο φάσμα της ταλάντωσης της χορδής καθορίζονται από τον οργανοπαίκτη. Αν οι χορδές εκπέμπουν λίγο απευθείας ήχο η δύναμη, που εξασκείται στην γέφυρα, ενεργοποιεί το σώμα και η κίνηση του σώματος επαυξάνει την εκπομπή ενέργειας από την χορδή. Ωστόσο επειδή το σώμα δεν αποκρίνεται γραμμικά, το φάσμα του εκπεμπόμενου ήχου είναι πολύ διαφορετικό από αυτό της ταλαντωμένης χορδής. Επομένως, η τελική ποιότητα του ήχου της κιθάρας, που περιγράφεται από το φάσμα του εκπεμπόμενου ήχου, εξαρτάται από την αρχική διέγερση των χορδών και την μηχανική απόκριση του σώματος.

Ο ήχος της κιθάρας πηγάζει από τις ταλαντώσεις των χορδών, οι οποίες εφαρμόζονται στη γέφυρα. Επίσης, είναι γνωστό ότι η ταλάντωση κάθε χορδής περιέχει τη θεμελιώδη και τις αρμονικές της. Οι συχνότητες αυτές αρχικά διεγείρονται έντονα και εν συνεχεία το πλάτος της ταλάντωσης τους μειώνεται με ένα διαφορετικό ρυθμό. Οι μετρήσεις που περιγράφουν το φαινόμενο αυτό είναι δύο: η αρχική στάθμη και η πτώση της αρχικής στάθμης. Η πτώση της αρχικής στάθμης ορίζεται ως η πτώση της στάθμης σε ένα δευτερόλεπτο από την χρονική στιγμή της μέγιστης στάθμης. Η ενέργεια δεν δίνεται συνεχώς στην χορδή και έτσι η κίνηση της και ο εκπεμπόμενος από αυτήν ήχος μειώνονται. Η μείωση αυτή τις περισσότερες φορές είναι γραμμική.

Ο ρυθμός πτώσης της ενέργειας των αρμονικών της χορδής ρυθμίζεται από δύο παράγοντες: α) την απόσβεση στη χορδή και β) τη σύζευξη με το σώμα του οργάνου, όπου η ενέργεια χάνεται λόγω απόσβεσης από το υλικό του σώματος και λόγω εκπομπής. Η σύζευξη με το σώμα αυξάνει το ρυθμό πτώσης μιας αρμονικής, ο οποίος γίνεται μέγιστος όταν οι συντονισμοί της χορδής και του σώματος ταυτίζονται. Σε αυτές τις περιπτώσεις η σύζευξη χορδής-σώματος γίνεται εξαιρετικά ισχυρή έτσι ώστε δημιουργείται ένα συζευγμένο σύστημα συντονισμού. Η κίνηση του σώματος με την χορδή δεν μπορεί να θεωρηθεί πλέον σαν κομβικό σημείο. Επομένως η κίνηση της χορδής δεν μπορεί να καθορισθεί ανεξάρτητα από την κίνηση του σώματος, αλλά πρέπει να θεωρηθεί ένα σύστημα ταλάντωσης. Αυτό το σύστημα παρουσιάζει δύο τρόπους ταλάντωσης: έναν στον οποίο η χορδή και το σώμα δονούνται σε φάση και

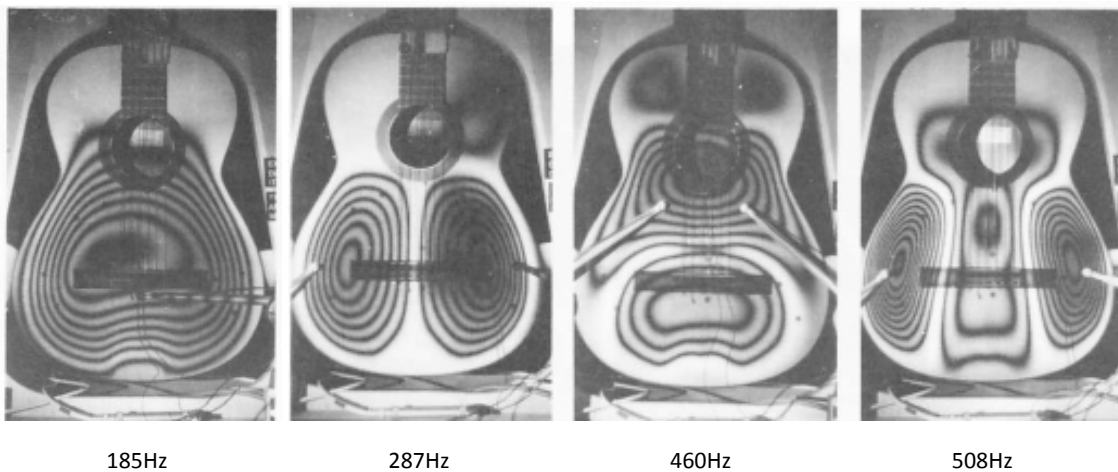
έναν στον οποίο βρίσκονται εκτός φάσης. Ο ρυθμός πτώσης αυτών των συντονισμών μπορεί να είναι 10 έως 20 φορές μεγαλύτερος από ότι ο αντίστοιχος για έναν μη συζευγμένο συντονισμό χορδής. Οι δύο συντονισμοί, που αναφέρθηκαν πριν, διαφέρουν σε συχνότητα κατά ένα μικρό ποσό και κατά την πτώση τους δημιουργούν διακρότημα. Οι θεωρητικοί συντονισμοί της χορδής της κιθάρας είναι για την νότα ΜΙ2 τα 82Hz, για την ΛΑ τα 110Hz, για την ΡΕ τα 147Hz, για τη ΣΟΛ τα 196Hz, για την ΣΙ τα 246Hz και για την ΜΙ4 τα 329Hz.

2.2.2 Δονητικά χαρακτηριστικά της κιθάρας: το καπάκι και το αντηχείο

Η σπουδαιότητα του καπακιού της κιθάρας και η επίδραση του στον ήχο της κιθάρας έχει ήδη αναφερθεί. Η παραγωγή του ήχου από το ταλαντούμενο καπάκι μπορεί να αναλυθεί σε τρία βήματα:

1. Την διέγερση του καπακιού,
2. Την απόκριση του καπακιού στην διέγερση, και
3. Την εκπομπή του ήχου από το καπάκι.

Η διέγερση του καπακιού καθορίζει την συχνότητα και το πλάτος των ταλαντώσεων. Η διέγερση αυτή γίνεται ανεξάρτητα από την συχνότητα και τις ταλαντώσεις του καπακιού και χωρίς να επηρεάζει τις ιδιότητες του. Η θέση του σημείου διέγερσης επιδρά μόνο στο πλάτος των ταλαντώσεων. Η απόκριση του καπακιού στην διέγερση δίνει τον τρόπο ταλάντωσης μιας συχνότητας συντονισμού. Οι κύριες μετρήσεις είναι η συχνότητα και ο παράγοντας ποιότητας Q. Απαραίτητα στοιχεία θεωρούνται επίσης ο καταμερισμός του πλάτους ταλάντωσης και της διαφοράς φάσης στην επιφάνεια του καπακιού. Ο εκπεμπόμενος ήχος εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από το πλάτος και την διαφορά φάσης των ταλαντώσεων και διαφέρει με την θέση του ακροατή στο χώρο και με τη συχνότητα. Γνωρίζοντας την ύπαρξη και την σπουδαιότητα των συχνοτήτων συντονισμού του καπακιού, η έρευνα στράφηκε προς την κατεύθυνση εξακρίβωσης των τρόπων συντονισμού του καπακιού. Με την βοήθεια της ολογραφικής απεικόνισης παίρνουμε πληροφορίες για την κατανομή πάνω στην επιφάνεια του πλάτους ταλάντωσης. Κάθε σκούρα περιοχή είναι κομβική επιφάνεια. Στην εικόνα 2.8 έχουν ολογραφηθεί οι πέντε πρώτοι συντονισμοί του καπακιού κιθάρας.

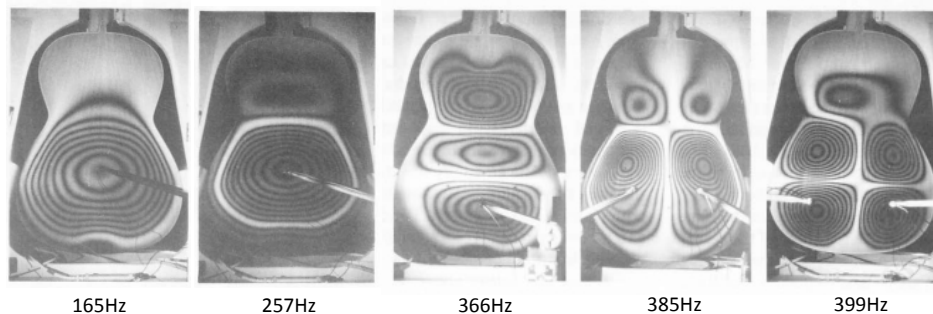


Εικόνα 2.8: Οι πέντε πρώτοι κανονικοί τρόποι δόνησης, και οι αντίστοιχες συχνότητες, του καπακιού μιας κιθάρας καταγεγραμμένοι με την μέθοδο της ολογραφικής συμβολομετρίας.

Παρατηρούμε ότι οι συντονισμοί βρίσκονται κυρίως στο ελεύθερο τμήμα του καπακιού. Ο πρώτος τρόπος δόνησης αποτελείται από μια δονούμενη περιοχή, ενώ ο δεύτερος από δυο και μια κομβική γραμμή ανάμεσα τους που τα σημεία της παραμένουν ακίνητα. Ο δεύτερος συντονισμός θεωρείται από τους ερευνητές ότι παρουσιάζει μικρή σπουδαιότητα. Στα επόμενα σχήματα οι τρόποι δόνησης γίνονται πιο πολύπλοκοι. Οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης αυτοί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η επιλογή και η κατάσταση (π.χ. υγρασία) των ξύλων και των λεπτομερειών κατασκευής, οι διαστάσεις της κιθάρας, οι τρόποι συναρμογής των μερών, η επιλογή του τρόπου διέγερσης, κα. Για μια τυπική κιθάρα, οι συχνότητες συντονισμού του καπακιού αναμένεται να είναι για τον 1^ο τρόπο δόνησης τα 185Hz, για τον 2^ο τρόπο δόνησης τα 287Hz, για τον 3^ο τρόπο δόνησης τα 460Hz, και για τον 4^ο τρόπο δόνησης τα 508Hz.

Αξίζει να σημειωθεί πως γενικά οι ταλαντώσεις συμβαίνουν στο ελεύθερο τμήμα του καπακιού και πως είναι μικρές στην περιοχή της γέφυρας εκτός από τον πρώτο συντονισμό. Όταν το καπάκι προσαρμόζεται πιο στέρεα στις πλευρές του οργάνου, οι συχνότητες συντονισμού του μετατοπίζονται ελαφρά προς τα πάνω. Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στις δονήσεις του καπακιού είναι το πάχος του ξύλου.

Όσον αφορά την πλάτη της κιθάρας τώρα, και για μια τυπική κιθάρα, οι συχνότητες συντονισμού αναμένεται να είναι για τον 1^ο τρόπο δόνησης τα 165Hz, για τον 2^ο τρόπο δόνησης τα 257Hz, για τον 3^ο τρόπο δόνησης τα 366Hz, για τον 4^ο τρόπο δόνησης τα 385Hz, και για τον 5^ο τρόπο δόνησης τα 399Hz. Στην εικόνα 2.9 έχουν ολογραφηθεί οι πέντε πρώτοι συντονισμοί του καπακιού κιθάρας



Εικόνα 2.9: Οι πέντε πρώτοι κανονικοί τρόποι δόνησης, και οι αντίστοιχες συχνότητες, της πλάτης μιας κιθάρας καταγεγραμμένοι με την μέθοδο της ολογραφικής συμβολομετρίας.

Στον αέρινο όγκο της κιθάρας συναντιούνται συντονισμοί οι οποίοι δεν μεταδίδονται μέσω της οπής και άρα δεν παράγουν ήχο. Ωστόσο η σπουδαιότητα τους βρίσκεται στην σύζευξη τους με τους υψηλότερους συντονισμούς του καπακιού. Για παράδειγμα ο πρώτος συντονισμός του αέρα στα 370Hz συμπράττει με τον τρίτο συντονισμό του καπακιού. Επίσης η κοιλότητα της κιθάρας λειτουργεί σαν ένα αντηχείο Helmholtz με συχνότητα συντονισμού γύρω στα 100Hz. Αυτός ο συντονισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός γιατί κατ' αυτόν εκπέμπεται ήχος από την κοιλότητα προς τα έξω. Έχει αποδειχθεί ότι οι κύριες ταλαντώσεις μιας κιθάρας βρίσκονται στο καπάκι της και μάλιστα στο τμήμα κάτω από την οπή. Το επάνω μέρος του καπακιού, η πλάτη και οι πλευρές δίνουν πιο ασθενείς συντονισμούς με μικρότερη σπουδαιότητα. Οι ταλαντώσεις του κάτω μέρους του καπακιού (ή ελεύθερου τμήματος) συνήθως περιέχουν πέντε συντονισμούς, περίπου στα 200Hz,

300Hz, 400Hz, 500Hz και 600Hz. Αυτοί οι συντονισμοί αποτελούν ένα σύνολο από ταλαντώσεις του καπακιού. Επιπρόσθετα υπάρχει και ο συντονισμός του αέρινου όγκου στα 100Hz όπως είπαμε παραπάνω, κατά τον οποίο ο αέρας εκπέμπεται μέσω του ανοίγματος. Σημειώνεται πως οι συντονισμοί αποτελούν μια αρμονική σειρά με τον συντονισμό του αέρα σαν θεμελιώδη. Στην συχνότητα κάθε συντονισμού υπάρχει μια ενίσχυση, η οποία εξαρτάται από τον παράγοντα ποιότητας, Q , του συντονισμού. Ο παράγοντας Q έχει τιμή περίπου 40 για τον πρώτο συντονισμό και αυξάνει έως την τιμή 80 για τον τέταρτο. Εκτός από το συχνοτικό περιεχόμενο μιας κιθάρας ο χρόνος που η διέγερση αυτών των συχνοτήτων διαρκεί είναι εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό του ήχου του οργάνου.

2.2.3 Διαγράμματα Chladni

Παραπάνω παρουσιάστηκαν παραδείγματα κανονικών τρόπων δόνησης του καπακιού κιθάρας καταγεγραμμένοι με την μέθοδο της ολογραφικής συμβολομετρίας. Για το σκοπό αυτό στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των διαγραμμάτων Chladni, και παρουσιάζεται εδώ.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε από νωρίς για να περιγράψει τους τρόπους δόνησης σε κάποιες οικογένειες οργάνων (βιολιού, κιθάρας κλπ.). Τα διαγράμματα σκόνης ή διαγράμματα Chladni, τυπικά παραδείγματα των οποίων φαίνονται στην εικόνα 2.10, χρωστούν το όνομά τους στο Γερμανό φυσικό (και ερασιτέχνη μουσικό) Ernest Florens Friedrich Chladni (1756 - 1827), ο οποίος θεωρείται και πατέρας της Ακουστικής. Ξεκίνησε να ερευνά τα ακουστικά κύματα από το 1786. Καλύπτοντας με άμμο λεπτές μεταλλικές πλάκες και δονώντας τις με ένα δοξάρι βιολιού, πέτυχε να κάνει ορατά τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται καθώς η άμμος αναπηδά από τα μέρη της επιφάνειας που πάλλονται και συγκεντρώνεται στα σημεία που παραμένουν ακίνητα. Το 1809, παρουσιάζοντας σε επιστημονική συνάθροιση στο Παρίσι τα διάφορα σχήματα που μ' αυτό τον τρόπο προέκυπταν, προκάλεσε το ζωηρό ενδιαφέρον.



Εικόνα 2.10: Κανονικοί τρόποι δόνησης του καπακιού κιθάρας καταγεγραμμένοι με την μέθοδο Chladni.

Τα διαγράμματα Chladni βρήκαν γρήγορα την εφαρμογή τους στην έρευνα πάνω στην κατασκευή των μουσικών οργάνων, αρχίζοντας από τα όργανα της οικογένειας του βιολιού και στη συνέχεια της κιθάρας. Αντικαταστάθηκε η δόνηση με το δοξάρι με τη χρήση γεννήτριας συχνοτήτων και αργότερα με τη χρήση των λέιζερ.

Αυτά τα διαγράμματα μπορούν εύκολα να γίνουν στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας πολύ απλά μέσα: μια γεννήτρια συχνοτήτων, έναν ενισχυτή, ένα ηχείο, μερικά μικρά σφουγγαράκια και λίγο τριμμένο τσάι. Στηρίζουμε το ελεύθερο καπάκι του οργάνου με τέσσερα μικρά σφουγγαράκια επάνω από το ηχείο, καταρχήν σε τυχαίες θέσεις. Απλώνουμε στη συνέχεια το τριμμένο τσάι σε όλη την επιφάνεια του καπακιού και αρχίζουμε να δίνουμε συχνότητες με τη γεννήτρια. Ξεκινάμε από μια χαμηλή συχνότητα, γύρω στα 100Hz και ανεβαίνουμε σιγά-σιγά μέχρι να δούμε τη σκόνη να αναπηδά. Μόλις αρχίσουν να σχηματίζονται οι κομβικές γραμμές, κλείνουμε εντελώς την ένταση του ήχου και διορθώνουμε τη στήριξη, μετακινώντας τα σφουγγαράκια κάτω ακριβώς από αυτές τις γραμμές, στα ακίνητα δηλαδή σημεία. Ανεβάζουμε κατόπιν λίγο την ένταση και ανεβοκατεβάζοντας σιγά τις συχνότητες βρίσκουμε την κορυφή του τρόπου δόνησης, εκεί δηλαδή που η σκόνη αναπηδά ζωηρότερα. Δίνουμε στη συνέχεια όση ένταση μας χρειάζεται για να διαγραφεί καθαρά ο συντονισμός. Αντιστρέφοντας τη διάταξη που περιγράψαμε και τοποθετώντας επάνω από το καπάκι και σε μικρή απόσταση το ηχείο, μπορούμε να σχηματίσουμε και τους τρόπους δόνησης του καπακιού του ολοκληρωμένου οργάνου.

2.2.4 Ο συντονιστής Helmholtz

Καθώς σε προηγούμενες παραγράφους αναφέρθηκαν έννοιες όπως το αντηχείο Helmholtz και διάφοροι συντονισμοί του αέρα, κρίνεται σκόπιμο σε αυτή την παράγραφο να αναλύσουμε περαιτέρω.

Ο συντονιστής Helmholtz είναι ένα είδος δονούμενου συστήματος, όπως για παράδειγμα ένα μπουκάλι όπου ο αέρας μέσα του έχει διεγερθεί και δονείται. Η συχνότητα συντονισμού (συχνότητα Helmholtz), f_H , του μπουκαλιού δίνεται από την έκφραση:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad (2.17)$$

όπου c η ταχύτητα του ήχου, V ο όγκος του συντονιστή, l το μήκος του λαιμού του συντονιστή, και S η επιφάνεια του λαιμού. Δηλαδή η αέρια μάζα μέσα στον συντονιστή ταλαντώνεται δίνοντας αυτή τη χαρακτηριστική συχνότητα Helmholtz ανάλογα με τις διαστάσεις του συστήματος. Η μάζα του αέρα στον λαιμό παίζει το ρόλο του εμβόλου και η μάζα μέσα στον συντονιστή το ρόλο του ελατηρίου.

Σημαντικές δονήσεις των οργάνων είναι αυτές του αέρινου όγκου των αντηχείων που ταλαντώνεται περιοδικά δια της ηχητικής οπής σε συγκεκριμένες συχνότητες. Όταν τα τοιχώματα του αντηχείου (καπάκι-σκάφος) θεωρηθούν ακίνητα το σύστημα αέρας-αντηχείο λειτουργεί περίπου ως ένας συντονιστής Helmholtz, μια κατασκευή που αποτελείται από μια κοιλότητα σε συνδυασμό με ένα κυλινδρικό επιστόμιο (απλοϊκά, όπως ένα γυάλινο μπουκάλι). Σε αυτήν την περίπτωση η κίνηση του αέρα μπορεί να μελετηθεί με την μορφή ενός απλού αρμονικού ταλαντωτή με έναν βαθμό ελευθερίας. Ως «ελατήριο» θεωρείται ο αέρινος όγκος (V) στο εσωτερικό

της κοιλότητας, ενώ ως «μάζα» θεωρείται το τμήμα του αέρα που ταλαντώνεται στο κυλινδρικό στόμιο του συντονιστή και ισούται με:

$$m = \rho S l \quad (2.18)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα.

Η έκφραση (2.17) δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη στα μουσικά όργανα κυρίως λόγω της γεωμετρικής ασυμφωνίας του στομίου με την ηχητική οπή. Συγκεκριμένα, για να ισχύει η σχέση υπάρχει η προϋπόθεση ότι η επιφάνεια της διατομής της οπής πρέπει να είναι πολύ μικρότερη του τετραγώνου του ύψους της επί την σταθερά του Αρχιμήδη. Στα μουσικά όργανα όμως για τις διαστάσεις των οπών ισχύει ότι το ότι το ύψος του καπακιού, l , (ουσιαστικά είναι το πάχος αλλά αποφεύγεται για να γίνει άμεση σύγκριση με τους συντονιστές), είναι της τάξης των mm ενώ η επιφάνεια S της τάξης των μερικών cm^2 . Σ' αυτή την περίπτωση η αέρινη μάζα που ταλαντώνεται εκατέρωθεν της οπής δεν περιορίζεται στα όρια που θέτει το ύψος των καπακιών αλλά το ξεπερνά τόσο εξωτερικά όσο και εξωτερικά όσο και εσωτερικά ως αποτέλεσμα της αδράνειας που αναπτύσσεται κατά την ταλάντωση. Έτσι, λόγω του ότι η «ενεργή μάζα» του αέρα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής στο ύψος προστίθεται ένας διορθωτικός παράγοντας, d , και στην έκφραση (2.17) το ύψος αντικαθίσταται από το λεγόμενο ενεργό ύψος $l_{\text{eff}} = l + d$. Η διαδικασία αυτή συναντάται στην βιβλιογραφία με τον όρο "end correction" (διόρθωση των άκρων) λόγω του ότι ο παράγοντας d προσδιορίζεται από τις συνθήκες που επικρατούν στα άκρα της οπής. Στις κιθάρες όπου η αέρινη μάζα ταλαντώνεται εκατέρωθεν μιας κυκλικής οπής που «τερματίζει» σε επίπεδη επιφάνεια το συνολικό ενεργό μήκος προσδιορίζεται ως $d = 1.7r$, όπου r η ακτίνα της οπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων της εργασίας αυτής σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν οπτοηλεκτρονικές και άλλες διατάξεις τόσο για την ανίχνευση των ταλαντώσεων χορδών της κιθάρας όσο και για την ανίχνευση των δονήσεων μερών της κιθάρας. Η διέγερση των χορδών έγινε τόσο με νυκτική διέγερση όσο και με ηχοβόλιση. Τα μέρη της κιθάρας διεγέρθηκαν με ηχοβόλιση. Εδώ παρουσιάζονται τόσο οι υλοποιηθείσες διατάξεις όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους.

3.1 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ LEDs

Εδώ παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και τα χαρακτηριστικά της υλοποιηθείσας διάταξης στροβοσκοπικού φωτισμού με χρήση LEDs, που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση των ταλαντώσεων των χορδών της κιθάρας και των δονήσεων μερών της.

Χρησιμοποιήθηκαν ισχυρά κόκκινα LEDs, καθώς ακριβώς λόγω της υψηλής φωτεινότητάς τους δεν χρειάζεται πλήρης συσκότιση του δωματίου όπου γίνεται η μελέτη του ταλαντούμενου ή δονούμενου αντικειμένου. Η διαδικασία καταγραφής ενείχε και βιντεοσκόπηση, και επειδή αυτή δεν μπορεί να γίνει στο σκοτάδι αλλά με μόνο φωτισμό αυτόν των LEDs του στροβοσκοπίου, όσο μεγαλύτερη είναι η φωτεινότητά τους τόσο καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται. Χρησιμοποιήθηκαν διπολικά τρανζίστορ πυριτίου τύπου 2N2222 διότι έχουν καλά χαρακτηριστικά και μπορούν να δώσουν ρεύμα αρκετών δεκάδων mA το οποίο απαιτείται για την λειτουργία των LEDs. Το καλώδιο UTP συστρεμμένων ζευγών (twisted pair) χρησιμοποιήθηκε επειδή ελαχιστοποιεί την αυτεπαγωγή των αγωγών μεταξύ οδηγού και συστοιχίας LED έτσι ώστε οι χρόνοι ανόδου (rise times) και καθόδου (fall times) των παλμών να είναι πολύ μικροί σε σχέση με το (χρονικό) εύρος του παλμού.

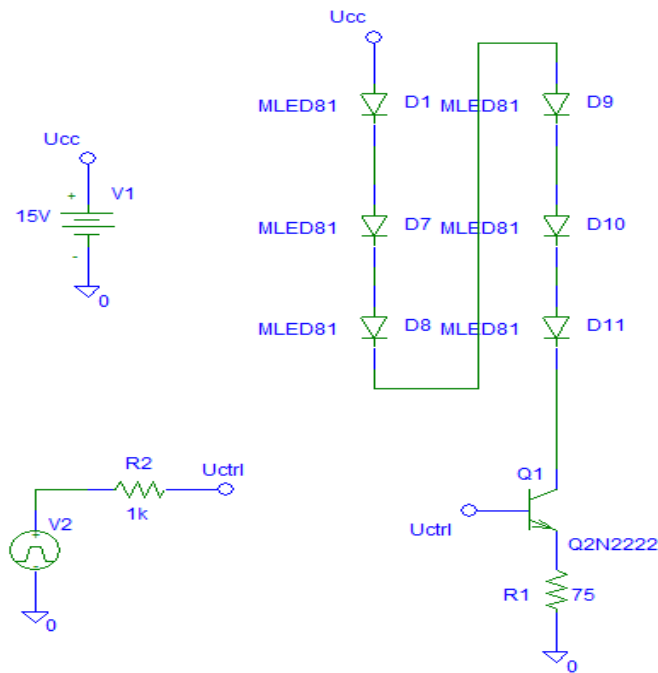
Η βασική μονάδα οδήγησης LED με πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα 3.1, και περιέχει διπολικό τρανζίστορ με κατάλληλη αντίσταση στον εκπομπό του. Τα LEDs συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους στον συλλέκτη του τρανζίστορ και στην πηγή τάσης, V_{CC} , που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Το ρεύμα που τα διαρρέει, το ρεύμα συλλέκτη, I_C , καθορίζεται από την τάση, V_{ctrl} , στην βάση του τρανζίστορ ως προς την γείωση σύμφωνα με την σχέση

$$I_C = \frac{V_{ctrl} - V_j}{R_1} \quad (3.1)$$

όπου V_j είναι η λεγόμενη τάση επαφής των διπολικών τρανζίστορ, η οποία για τρανζίστορ πυριτίου είναι προσεγγιστικά ίση με 650mV. Εφόσον πρόκειται για πηγή ρεύματος, το ρεύμα συλλέκτη είναι ανεξάρτητο της τάσης τροφοδοσίας, V_{CC} , με την προϋπόθεση ότι η τάση αυτή είναι μεγαλύτερη από ένα όριο $V_{CC,min}$ ίσο με:

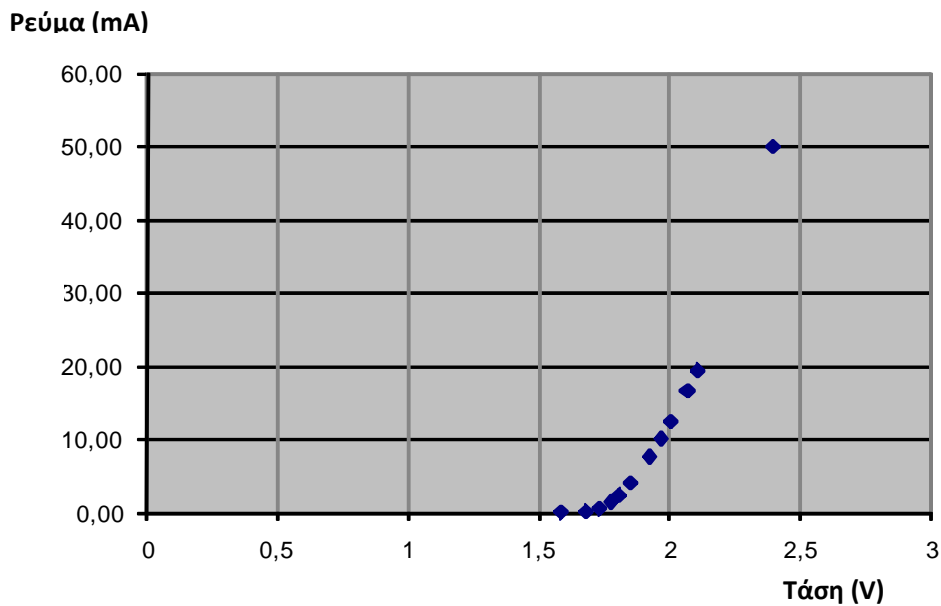
$$V_{CC,min} = V_{ctrl} + n_{LED} V_{LED}(I_C) \quad (3.2)$$

όπου n_{LED} το πλήθος των LEDs σε σειρά, και $V_{LED}(I_C)$ η τάση ενός LED όταν διαρρέεται από ρεύμα I_C .



Εικόνα 3.1: Η υλοποιηθείσα βασική μονάδα οδήγησης LED με πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση.

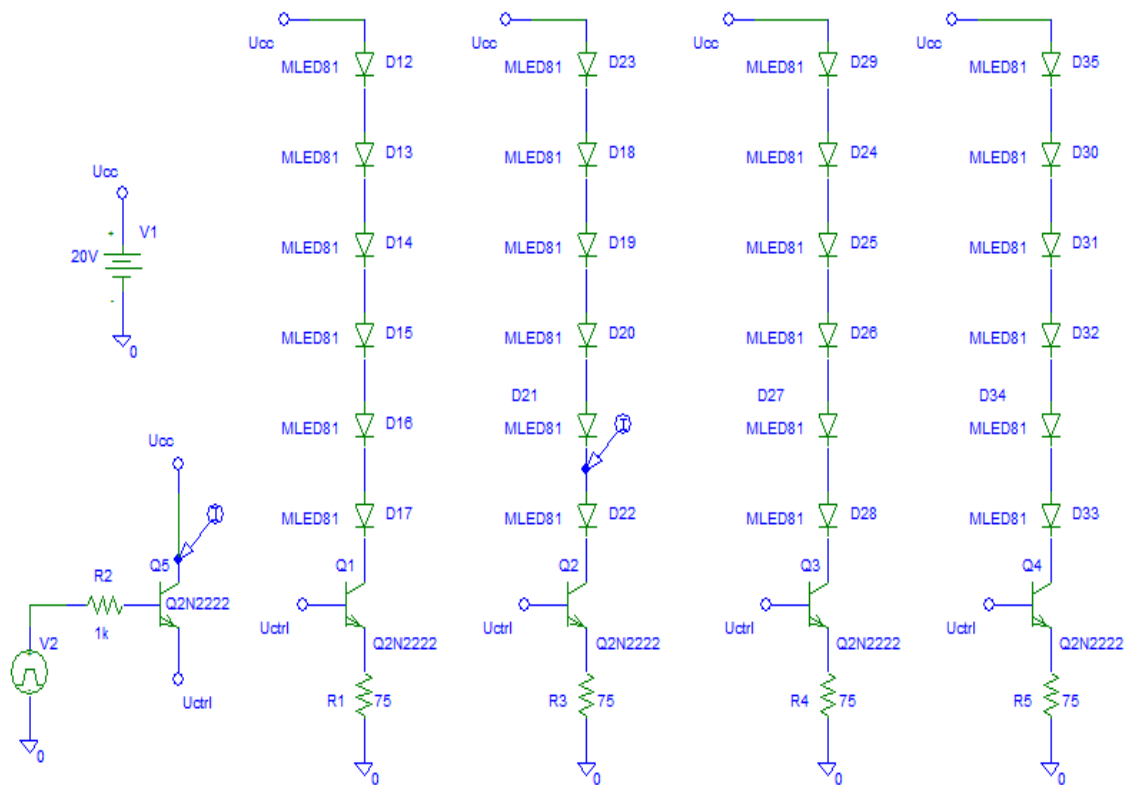
Μετρήθηκε πειραματικά χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I/V) των LEDs που χρησιμοποιήθηκαν, μέχρι 20mA σε συνεχή λειτουργία και με 50mA σε παλμική λειτουργία με duty cycle 10%. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Τυπική χαρακτηριστική I/V καμπύλη των υψηλής φωτεινότητας LEDs που χρησιμοποιήθηκαν.

Εφόσον η φωτεινότητα των LEDs με παλμικό (10% duty cycle) ρεύμα 20mA έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με την συνολική φωτεινότητα των συστοιχιών που χρησιμοποιήθηκαν θεωρήσαμε την τάση στα άκρα ενός LED σε λειτουργία ίση με 2,2V. Επιλέχθηκαν σαν τάση τροφοδοσίας τα 20V DC, με τάση ελέγχου για μέγιστο ρεύμα τα 5V και 6 LED σε σειρά από 2,5V μέγιστη τάση στο καθένα = 15V. Στο στροβοσκόπιο για κιθάρα που έχει την δυνατότητα να φωτίσει περίπου ομοιόμορφα όλο το μήκος των χορδών της κιθάρας χρησιμοποιήθηκαν 8 σειρές από 6 LEDs καθεμία.

Ένα τμήμα (το μισό) της συστοιχίας αυτής με την οδήγησή της φαίνεται στο σχήμα 3.3. Το σήμα που καθορίζει το πότε εκπέμπουν φως τα LEDs όλων των προηγούμενων κυκλωμάτων προέρχεται από την έξοδο κατάλληλης παλμογεννήτριας. Οι βάσεις όλων των τρανζίστορ σε ρόλο πηγών ρεύματος ελεγχόμενων από τάση. Τα τρανζίστορ Q1 έως και Q4 ενώνονται μεταξύ τους και τροφοδοτούνται μέσω βοηθητικού τρανζίστορ Q5 σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται το ρεύμα που απαιτείται από την παλμογεννήτρια που δίνει το παλμικό σήμα ελέγχου της συστοιχίας.



Εικόνα 3.3: Το μισό (24 LEDs) της συστοιχίας των 48 LEDs που υλοποιήθηκε.

3.2 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΧΟΡΔΩΝ ΚΙΘΑΡΑΣ ΣΥΝΕΠΕΙΑ ΝΥΚΤΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

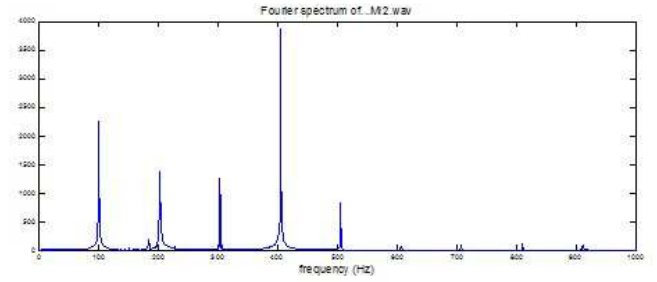
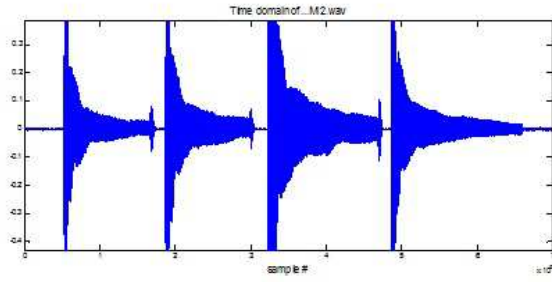
3.2.1 Καταγραφή εκπεμπόμενου ήχου

Η ηχογράφηση του εκπεμπόμενου ήχου έγινε τόσο για να καθοριστεί που θα αναμένονται οι συντονισμοί των χορδών αλλά και για να καθοριστεί το συχνοτικό περιεχόμενο των φασμάτων των χορδών, τα οποία προέκυψαν μέσω νυκτικής διέγερσης, ώστε να είναι δυνατή αργότερα η σύγκριση με τα φάσματα που προκύπτουν από την διέγερση με ηχοβόλιση.

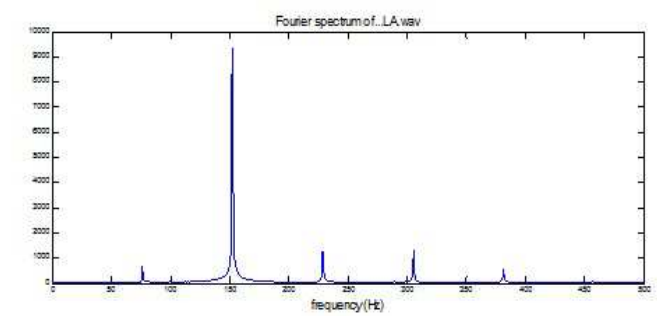
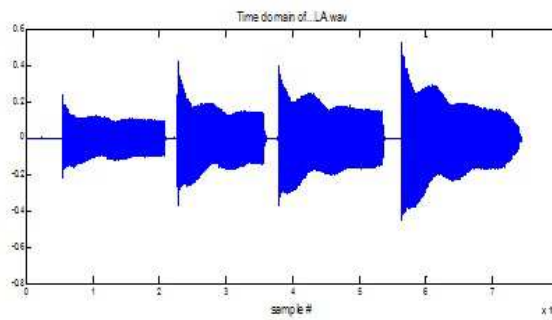
Η ηχογράφηση έγινε μέσω του προγράμματος Sony Sound Forge με δυναμικό μικρόφωνο (Electro voice MC100) το οποίο συνδέθηκε απευθείας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στη συνέχεια, μέσω του προγράμματος Matlab έγινε μετασχηματισμός Fourier των ηχογραφημένων δειγμάτων με σκοπό την δημιουργία των φασμάτων τους. Ο κώδικας που δημιουργήθηκε για τον μετασχηματισμό Fourier των δειγμάτων είναι ο ακόλουθος:

```
function wavFFT( fname )
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
global Nmax Nplotmax xfreq y y1
fname = input('file to analyse: ','s');
[y, Fs, nbits, readinfo] = wavread(fname);
Nmax = length(y);
Nplotmax = floor(Nmax);
xfreq = [1:Nplotmax];
y1 = y(1:Nplotmax,1);
figure(1)
plot(xfreq,y1);
xlabel('sample #','fontSize',14);
title(strcat('Time domain of...',fname),'fontSize',14);
wavplay(y,Fs, 'async');
user_lo_sample = input('lo limit: ');
NFFT = 2^16;
user_hi_sample = user_lo_sample + NFFT;
y2 = y(user_lo_sample:user_hi_sample,1);
Fy = fft(y2);
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
figure(2)
plot(f,2*abs(Fy(1:NFFT/2+1)));
title(strcat('Fourier spectrum of...',fname),'FontSize', 14);
xlabel('frequency (Hz)','FontSize', 14)
%readinfo
end
```

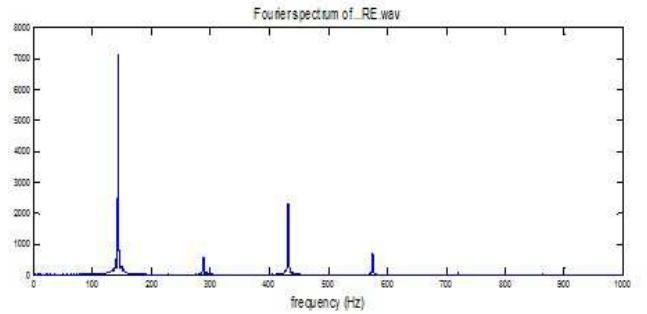
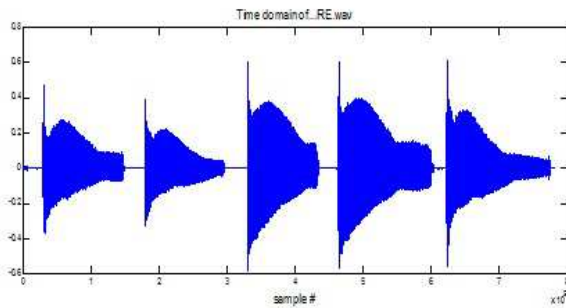
Τόσο τα ηχογραφημένα δείγματα όσο και τα φάσματα του μετασχηματισμού Fourier για τις νότες MI2, ΛΑ, ΡΕ, ΣΟΛ, ΣΙ, και ΜΙ4 παρουσιάζονται στην εικόνα 3.4 παρακάτω:



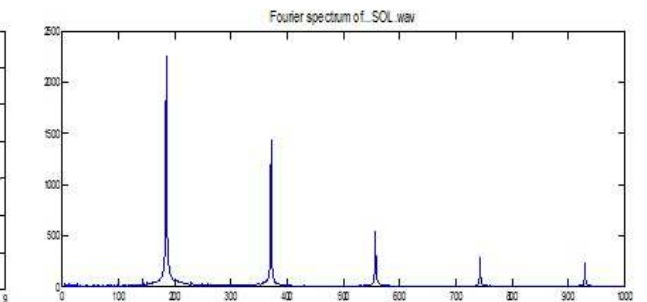
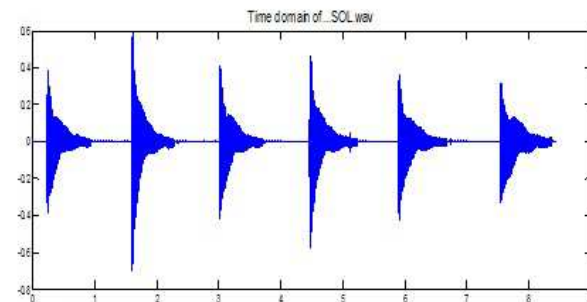
Νότα M12



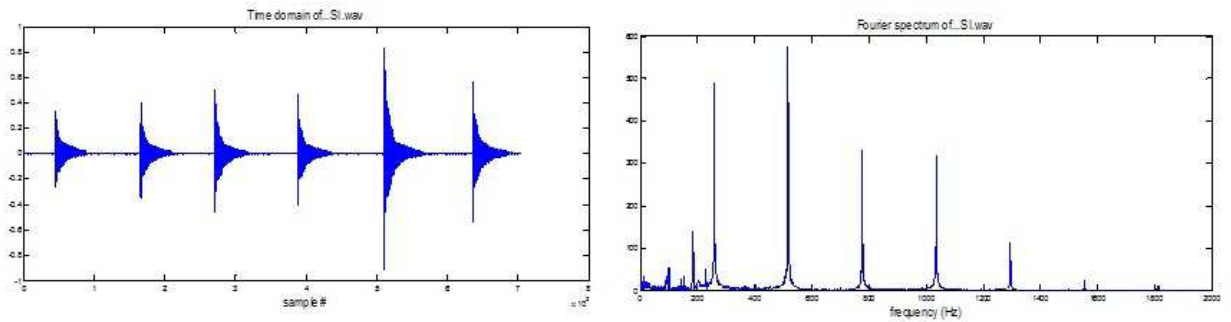
Νότα LA



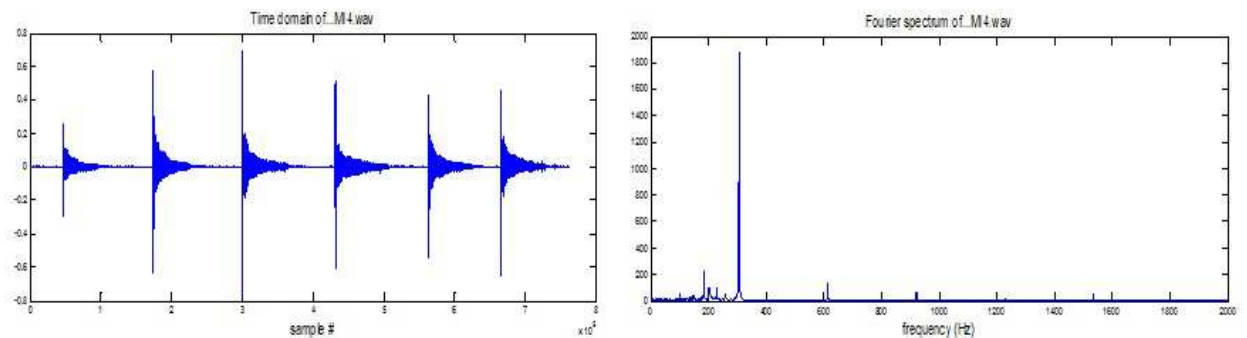
Νότα PE



Νότα ΣΟΛ



Νότα SI



Νότα MI4

Εικόνα 3.4: Ηχογραφημένα ηχητικά φάσματα (αριστερά) και αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier (δεξιά) συνέπεια νυκτικής διέγερσης για τις νότες MI2, ΛΑ, ΡΕ, ΣΟΛ, ΣΙ, και ΜΙ4.

Παρατηρώντας τα φάσματα όλων των δειγμάτων, βλέπουμε πλούσια φάσματα καθώς και πολλές αρμονικές σε κάθε φάσμα. Επίσης παρατηρούμε σε κάθε φάσμα κάποιες κορυφές πολύ μικρού πλάτους, άνευ σημασίας, οι οποίες πιθανόν οφείλονται ή σε σύζευξη χορδών ή σε σύζευξη του αντηχείου με τις χορδές.

Παρατηρώντας το φάσμα της νότας MI2 βλέπουμε ότι έχουμε τον πρώτο συντονισμό κοντά στα 80Hz όπου και τον περιμέναμε. Επίσης βλέπουμε και τις 4 επόμενες αρμονικές κοντά στα 200Hz, 310Hz, 410Hz και 520Hz, και ότι το μεγαλύτερο πλάτος το παρουσιάζει η 3^η αρμονική. Παρατηρώντας τώρα το φάσμα της νότας ΛΑ βλέπουμε την πρώτη κορυφή κοντά στα 160Hz, τιμή την οποία δεν περιμέναμε να δούμε καθώς τη νότα ΛΑ την συναντάμε σύμφωνα με την θεωρία στα 110Hz. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι δεν ήταν κουρδισμένη σωστά η χορδή. Επίσης στη νότα ΛΑ δεν έχουμε πλούσιο φάσμα. Συνεχίζοντας, βλέποντας το φάσμα της νότας ΡΕ παρατηρούμε την πρώτη κορυφή κοντά στα 150Hz, όπου και περιμέναμε να την δούμε. Επίσης βλέπουμε άλλες τρεις κορυφές κοντά στα 290Hz, 430Hz και 580Hz. Η πρώτη και η τρίτη κορυφή, μετά την κύρια, φαίνεται να είναι η πρώτη και η δεύτερη αρμονική, ενώ η μεσαία πρέπει να έχει προέλθει όπως είπαμε στην αρχή ή σε σύζευξη χορδών ή σε σύζευξη του αντηχείου με τις χορδές. Παρατηρώντας το φάσμα της νότας ΣΟΛ βλέπουμε την πρώτη κορυφή στα 190Hz, το οποίο είναι λογικό αφού σύμφωνα με την θεωρία την περιμέναμε στα 196Hz. Επίσης βλέπουμε άλλες 5 κορυφές στα 380Hz, 570Hz, 740Hz και 930Hz, οι οποίες είναι

πιθανότητα οι αρμονικές της. Στο φάσμα της νότας ΣΙ τώρα, βλέπουμε την πρώτη κορυφή στα 230Hz περίπου όπως επίσης παρατηρούμε ένα πολύ πλούσιο φάσμα. Επίσης βλέπουμε άλλες 3 κορυφές με αξιοσημείωτο πλάτος στα 460Hz, 690Hz και 1080Hz. Οι πρώτες δύο κορυφές φαίνεται να είναι η πρώτη και η δεύτερη αρμονική. Τέλος, στο φάσμα της νότας ΜΙ4 βλέπουμε την πρώτη κορυφή στα 310Hz περίπου, ενώ στην πραγματικότητα την περιμέναμε στα 329Hz. Επίσης παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ πλούσιο φάσμα στις χαμηλές συχνότητες.

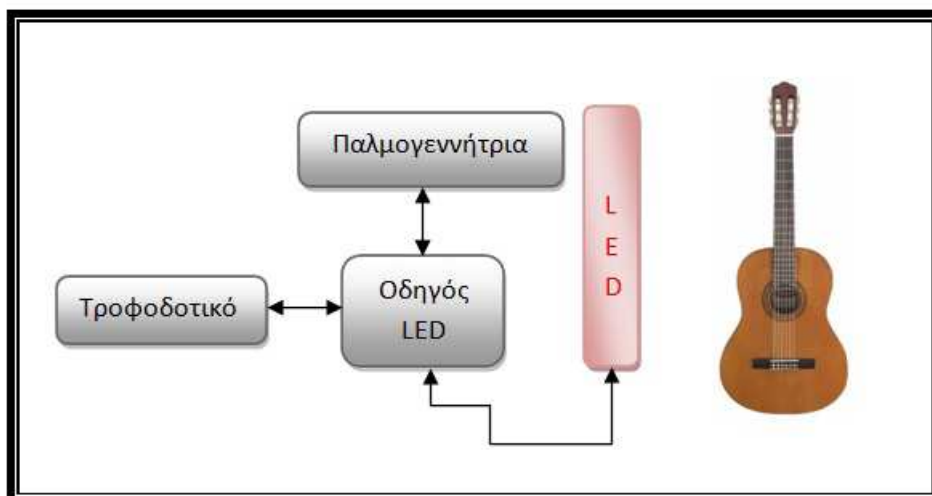
Τα παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα Α, όσο αφορά στη σύγκριση των αναμενόμενων και πειραματικά καταγεγραμμένων θεμέλιων συντονισμών νοτών.

Νότα	Αναμενόμενη συχνότητα θεμελιώδους συντονισμού (Hz)	Πειραματικά καταγεγραμμένη συχνότητα θεμελιώδους συντονισμού (Hz)	Απόκλιση (%)
ΜΙ2	82	80	2,4
ΛΑ	110	160	45,4
ΡΕ	147	150	2,0
ΣΟΛ	196	190	3,1
ΣΙ	246	230	6,5
ΜΙ4	329	310	5,8

Πίνακας Α: Σύγκριση μεταξύ των αναμενόμενων συχνοτικών τιμών για τις νότες ΜΙ2, ΛΑ, ΡΕ, ΣΟΛ, ΣΙ, και ΜΙ4 και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

3.2.2 Στροβοσκοπική ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών

Μετά τον εντοπισμό των συντονισμών μέσω των φασμάτων πραγματοποιήθηκε η ανίχνευση των συντονισμών μέσω του στροβοσκοπικού φωτισμού. Η πειραματική συνδεσμολογία δίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.5. Επίσης τα αποτελέσματα των μετρήσεων βιντεοσκοπήθηκαν, και υπάρχουν στο συνοδευτικό Ηλεκτρονικό Παράρτημα της εργασίας (δίσκος CD).



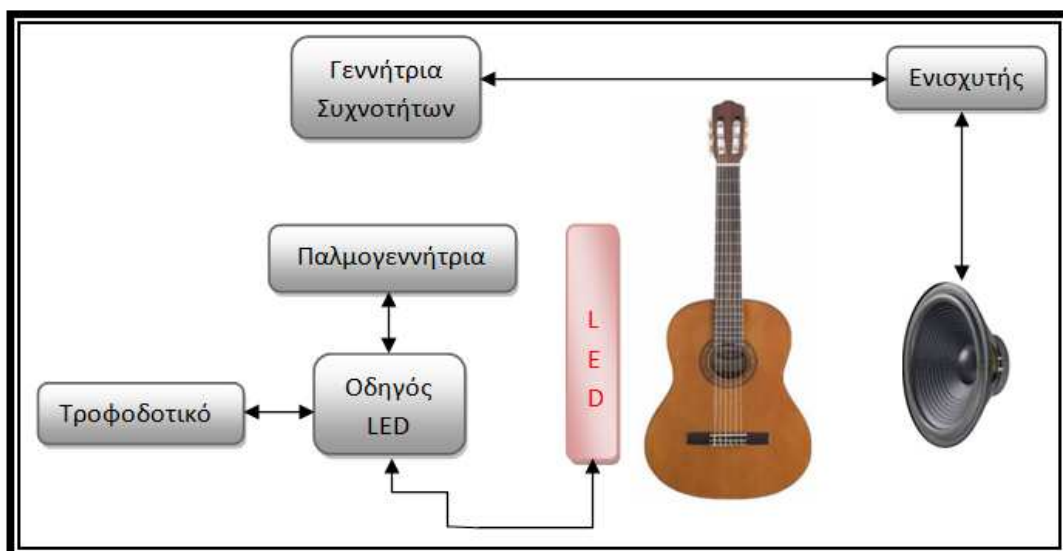
Εικόνα 3.5: Πειραματική συνδεσμολογία διάταξης για την στροβοσκοπική ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών συνέπεια νυκτικής διέγερσης.

Αρχικά συνδέθηκαν η παλμογεννήτρια με τον οδηγό LED. Έπειτα συνδέθηκε τροφοδοτικό +15V στον οδηγό των LEDs, και η συστοιχία των LEDs με τον οδηγό. Στη συνέχεια η κιθάρα τοποθετήθηκε απέναντι από την συστοιχία των LEDs, δηλαδή η συστοιχία των LEDs στόχευε τις χορδές της κιθάρας. Έπειτα η χορδή διεγέρθηκε νυκτικά, έχοντας ρυθμίσει την συχνότητα του τετραγωνικού παλμού των LEDs κοντά στην συχνότητα που περιμέναμε τον συντονισμό της χορδής, δηλαδή τα 80Hz. Ο συντονισμός της πρώτης χορδής της κιθάρας εντοπίστηκε στα 75Hz. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλες τις χορδές της κιθάρας. Ο συντονισμός της δεύτερης χορδής εντοπίστηκε στα 110Hz περίπου, της τρίτης χορδής στα 140Hz, της τέταρτης χορδής περίπου στα 200Hz, της πέμπτης στα 250Hz περίπου, και της έκτης χορδής στα 330Hz περίπου. Παρατηρώντας τον συντονισμό της δεύτερης χορδής της κιθάρας φαίνεται ξεκάθαρα ότι δονείται με τον πρώτο τρόπο ταλάντωσης. Το ίδιο συμβαίνει και με τον συντονισμό της τρίτης χορδής, δηλαδή κατά την δόνηση της ταλαντώνεται με τον πρώτο τρόπο ταλάντωσης. Συνεπώς συμπεραίνουμε ότι η χορδή διεγέρθηκε στον θεμελιώδη τρόπο ταλάντωσης και όχι σε κάποια αρμονική, πράγμα το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού την διεγείραμε στην συχνότητα του θεμελιώδους τρόπου ταλάντωσης.

3.3 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΧΟΡΔΩΝ ΚΙΘΑΡΑΣ ΣΥΝΕΠΕΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΜΕ ΗΧΟΒΟΛΙΣΗ

3.3.1 Στροβοσκοπική ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών

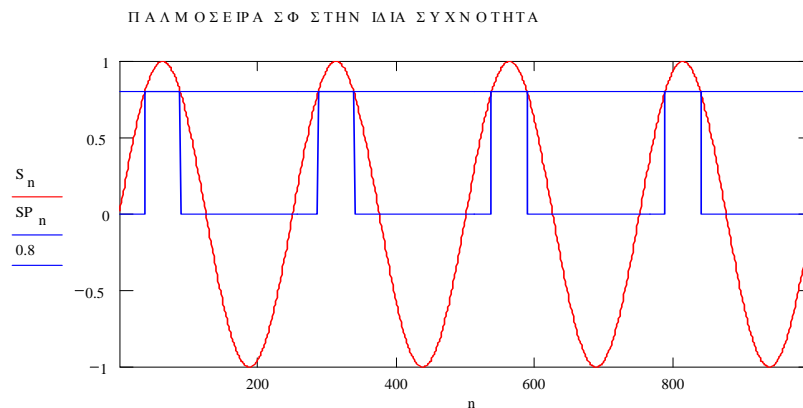
Για τη στροβοσκοπική ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών συνέπεια ηχοβλιτιστικής διέγερσής τους, χρησιμοποιήθηκε μεγάφωνο οδηγούμενο μέσω ενισχυτή από γεννήτρια ημιτονικού σήματος. Η πειραματική συνδεσμολογία δίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.6. Επίσης τα αποτελέσματα των μετρήσεων βιντεοσκοπήθηκαν, και υπάρχουν στο συνοδευτικό Ηλεκτρονικό Παράρτημα της εργασίας (δίσκος CD).



Εικόνα 3.6: Πειραματική συνδεσμολογία διάταξης για την στροβοσκοπική ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών συνέπεια ηχοβλιτιστικής διέγερσης.

Αφού έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις, η κιθάρα τοποθετήθηκε με την οπή του αντηχείου προς το μεγάφωνο και σε πολύ μικρή απόσταση από αυτό. Η συστοιχία των LEDs ήταν και αυτή τοποθετημένη στο μπροστινό μέρος της κιθάρας, μπροστά από τις χορδές και σε πολύ μικρή απόσταση από αυτές, ώστε να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός φωτισμός.

Στην αρχή δοκιμάστηκε ο συγχρονισμός του στροβοσκοπικού φωτισμού με μία γεννήτρια σήματος και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα (οδηγός LED) που έχει σαν λειτουργία την παραγωγή τετραγωνικού παλμού στροβοσκοπικού φωτισμού στην ίδια συχνότητα με το ημίτονο που παράγει η γεννήτρια συχνοτήτων. Το ολοκληρωμένο αυτό κύκλωμα σκοπό του έχει την ενίσχυση και τον καθαρισμό του σήματος έτσι ώστε να έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το σήμα που παίρνουμε από την γεννήτρια συχνοτήτων. Όπως είναι εμφανές στην εικόνα 3.7 η στάθμη σύγκρισης πρέπει να ρυθμίζεται κοντά στο μέγιστο του ημιτόνου για να επιτευχθεί σχετικά μικρό duty cycle.



Εικόνα 3.7: Παραγωγή τετραγωνικών παλμών στροβοσκοπίου με συγκριτή (comparator).

Για την επίτευξη των παραπάνω τελικά χρειάστηκαν δύο παλμογεννήτριες όπως και έγινε στη συνέχεια. Μία ημιτονικού σήματος και μία για την παλμοσειρά του στροβοσκοπικού φωτισμού. Η συχνότητα της παλμοσειράς πρέπει να ξαναρυθμίζεται μετά από κάθε αλλαγή της συχνότητας που θέλουμε να παρατηρήσουμε, κάτι που δεν επιτρέπει την αναζήτηση συντονισμών με ταυτόχρονη παρατήρηση του αντικείμενου κάτω από τον στροβοσκοπικό φωτισμό. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν δύο ξεχωριστά σήματα, ένα για τα LEDs (τετραγωνικός παλμός) και ένα για το μεγάφωνο (ημιτονικό σήμα), ήταν γιατί σε αντίθετη περίπτωση θα βλέπαμε το ταλαντούμενο αντικείμενο εντελώς ακίνητο σε συγκεκριμένη φάση. Υπάρχει η δυνατότητα διαμόρφωσης της φάσης αυτής αλλά τα πειράματά μας απέδειξαν ότι είναι προτιμότερη μία φαινόμενη κίνηση σε διαφορά συχνότητας λίγων Hz.

Αφού έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στην συχνότητα του στροβοσκοπικού φωτισμού αλλά και του ημιτόνου που αναπαρήγαγε το μεγάφωνο κοντά στην πρώτη συχνότητα όπου περιμέναμε συντονισμό, τέθηκε σε λειτουργία το μεγάφωνο παρατηρώντας την πρώτη χορδή της κιθάρας. Τελικά ο συντονισμός της πρώτης χορδής της κιθάρας (M12) εντοπίστηκε στα 79Hz. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες χορδές της κιθάρας, ρυθμίζοντας κάθε φορά την συχνότητα

τόσο του στροβοσκοπικού φωτισμού όσο και του ημιτόνου, κοντά στην συχνότητα όπου περιμέναμε συντονισμό. Ήταν δυνατή η καταγραφή των συντονισμών των τεσσάρων πρώτων χορδών της κιθάρας. Οι συχνότητες όπου καταγράφηκαν οι συντονισμοί ήταν: για την δεύτερη χορδή της κιθάρας (ΛΑ) περίπου 105Hz, για την τρίτη χορδή της κιθάρας (ΡΕ) περίπου 149Hz, και για την τέταρτη χορδή της κιθάρας (ΣΟΛ) περίπου 190Hz. Παρατηρώντας την δεύτερη χορδή της κιθάρας καθώς ταλαντώνεται υπό το φως του στροβοσκοπικού φωτισμού, παρατηρείται ότι δονείται με τον δεύτερο τρόπο ταλάντωσης, παρατηρείται δηλαδή έναν δεσμό στο μέσον περίπου της χορδής. Αντιθέτως, παρατηρώντας την τρίτη χορδή της κιθάρας καθώς ταλαντώνεται, ήταν σαφές ότι ταλαντωνόταν σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο ταλάντωσης, όπου δεν έχουμε δεσμούς.

3.3.2 Ανίχνευση με χρήση ηχογραφημένων ηχητικών δειγμάτων

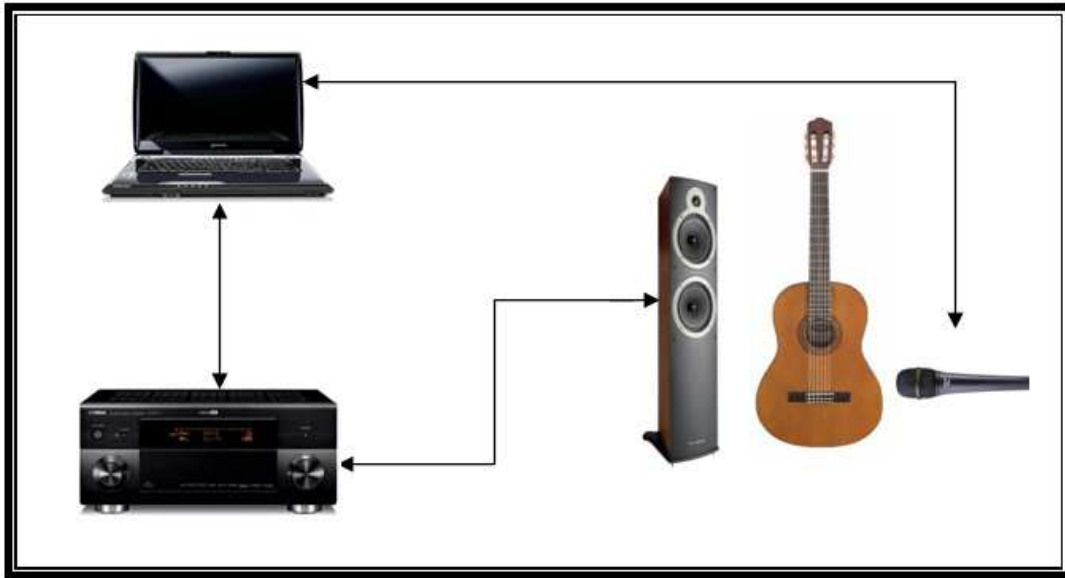
Ένας άλλος παρόμοιος τρόπος διεξαγωγής του παραπάνω πειράματος, χωρίς να χρησιμοποιηθούν τα LED όμως αυτήν την φορά, είναι αντί να δίδεται το σήμα στο μεγάφωνο μέσω της γεννήτριας συχνοτήτων, να δίδεται μέσω δειγμάτων ήχου, χρησιμοποιώντας την κάρτα ήχου οποιουδήποτε υπολογιστή για την αναπαραγωγή τους. Συνεπώς κατασκευάστηκαν 6 δείγματα ήχου, τα οποία έχουν συχνότητα ίση με αυτή που ορίζει η θεωρία ότι θα περιμέναμε συντονισμούς. Για παράδειγμα το MI2 στα 82Hz, το ΛΑ 110Hz κτλ. Λόγω του ότι τα δείγματα έχουν δημιουργηθεί στην ακριβή συχνότητα όπου θα περιμέναμε συντονισμό, οι συντονισμοί της χορδών της κιθάρας είναι τόσο δυνατοί και με μεγάλο πλάτος ώστε να είναι εμφανέστατοι με γυμνό μάτι (γι αυτό και δεν απαιτήθηκε στροβοσκοπικός φωτισμός), και να μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα δείγματα ήχου δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα Matlab υλοποιώντας τον παρακάτω κώδικα:

```
uin = input('frequency > ');
nota = input('file > ', 's');
pmax = floor(32768/uin);
ppmax= pmax;
phases = 1:pmax;
pphases = 1:ppmax;
sineperiod = uint8(127*sin(2*pi*phases/pmax)+128);
pulseperiod = uint8(1:ppmax);
for m = 1:ppmax;
    if (pphases(m)>ppmax/10)&& (pphases(m)<=ppmax/5)
        pulseperiod(m) = uint8(255);
    else
        pulseperiod(m) = uint8(0);
    end
end
display(['samples per period:', num2str(pmax), ' left ', num2str(ppmax), ' right']);
N = floor(32768*10/pmax); %10 sec duration
Np = floor(32768*10/ppmax);
yy = uint8(zeros(N*ppmax, 2));

for n = 1 : N
    yy ((n-1)*pmax+1:n*pmax,1) = sineperiod;
end
for np = 1 : Np
    yy ((np-1)*ppmax+1:np*ppmax,2) = pulseperiod;
end

fid = fopen(nota, 'w+');
frewind(fid)
wavwrite(yy, 32768, 8, nota)
fclose('all');
%sound(yy, 32768, 8)
%ffpulse = fft(yy(:,2));
%plot ffpulse
%display(pmax)
%plot (phases, sineperiod, pphases, pulseperiod);
```

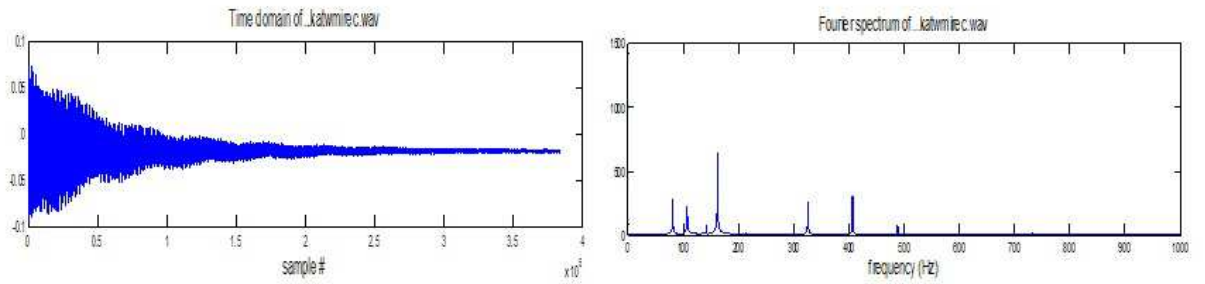
Η πειραματική συνδεσμολογία δίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.8.



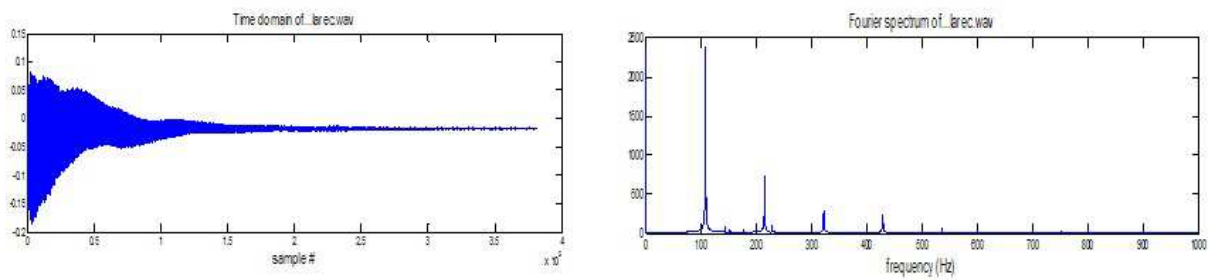
Εικόνα 3.8: Πειραματική συνδεσμολογία διάταξης για την ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών με χρήση ηχογραφημένων ηχητικών δειγμάτων.

Αφού έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, έγινε αναπαραγωγή του πρώτου δείγματος ήχου με αποτέλεσμα τον συντονισμό της πρώτης χορδής της κιθάρας MI2. Ο συντονισμός της χορδής ήταν εμφανέστατος και με πολύ μεγάλο πλάτος. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλες τις χορδές της κιθάρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του ότι τα δείγματα ήχου έχουν δημιουργηθεί στην συχνότητα που ορίζει η θεωρία για τους συντονισμούς των χορδών, δηλαδή για την νότα MI2 τα 82Hz, για την ΛΑ τα 110Hz, για την ΡΕ τα 147Hz, για τη ΣΟΛ τα 196Hz, για την ΣΙ τα 246Hz και για την ΜΙ4 τα 329Hz το πείραμα αυτό αποτελεί μία πολύ καλή μέθοδο για το κούρδισμα της κιθάρας. Στην συνέχεια έγινε προσπάθεια ηχογράφησης των χορδών μέσω της μεθόδου της ηχοβόλισης για την καταγραφή των φασμάτων τους.

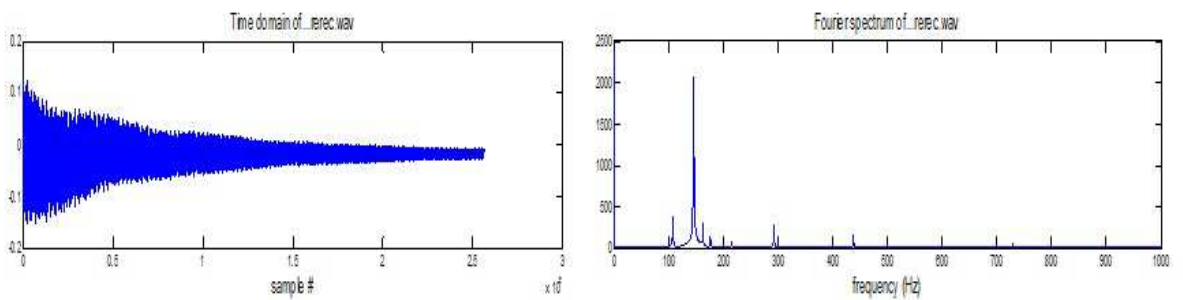
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: η αναπαραγωγή του δείγματος έγινε στο πρόγραμμα Nuendo. Έχοντας τοποθετημένο το μικρόφωνο μπροστά στο αντηχείο της κιθάρας, με την διακοπή της αναπαραγωγής του δείγματος ήχου η χορδή της κιθάρας διεγείροταν, παράγοντας ήχο, του οποίου γινόταν ηχογράφηση μέσω του προγράμματος Sony Sound Forge. Κατέστη δυνατή η ηχογράφηση των τεσσάρων πρώτων χορδών της κιθάρας. Στις υπόλοιπες χορδές της κιθάρας δεν ήταν δυνατή η ηχογράφηση καθώς βλέπαμε τον συντονισμό και με μεγάλο πλάτος αλλά ο συντονισμός δεν ήταν τόσο δυνατός ώστε να είναι σε θέση η χορδή να παράγει ήχο. Έπειτα έγινε μετασχηματισμός Fourier στα δείγματα που ηχογραφήθηκαν ώστε να πάρουμε τα φάσματα τους. Ο μετασχηματισμός έγινε στο πρόγραμμα Matlab χρησιμοποιώντας τον ίδιο κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο 3.2.1. Τα δείγματα ήχου που προέκυψαν από την ηχογράφηση καθώς και τα φάσματα τους παρουσιάζονται στην εικόνα 3.9 παρακάτω.



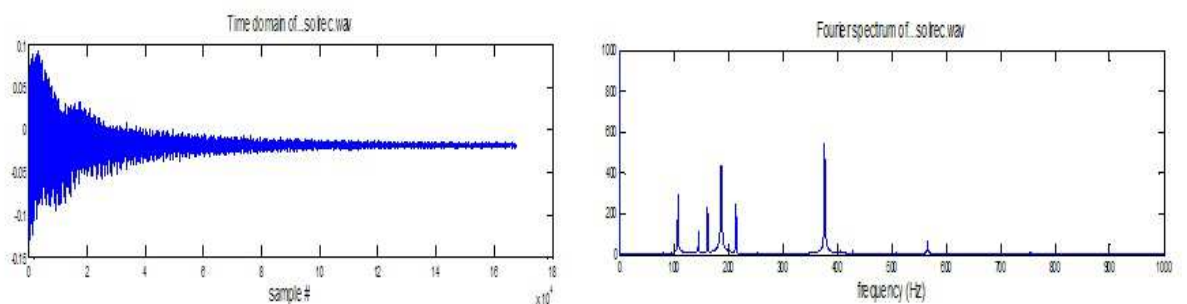
Νότα MI2



Νότα LA



Νότα PE



Νότα ΣΟ1

Εικόνα 3.9: Ηχητικά φάσματα (αριστερά) και αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier (δεξιά) των ηχογραφημένων δειγμάτων ήχου για τις νότες MI2, LA, PE, και ΣΟ1.

Πριν τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων θα πρέπει να σημειωθούν μερικοί περιορισμοί και αναπόφευκτες ατέλειες της πειραματικής διαδικασίας, που υπήρχαν παρ' όλη την καταβολή προσπαθειών βελτίωσης. Κατά πρώτον, με τον τρόπο που έγινε η ηχογράφιση έχουν ηχογραφηθεί και μερικές από τις δονήσεις του μεγαφώνου, αφού η κιθάρα έπρεπε να είναι πολύ κοντά στο μεγάφωνο ώστε να μπορούν να διεγερθούν οι χορδές, και αυτό είχε ως αποτέλεσμα, κάθε φορά που σταματούσε τον ήχο που αναπαρήγαγε το μεγάφωνο να καταγράφονται και οι δονήσεις του μεγαφώνου αφού δεν υπήρχε το χρονικό περιθώριο να τεθεί σε ακινησία το μεγάφωνο. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει θόρυβος στα σήματα που έχουν ηχογραφηθεί και αυτό οφείλεται στο ότι και τόσο καλής ποιότητας καλώδιο που υπήρχε διαθέσιμο. Τέλος, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η ηχογράφιση δεν έγινε σε στούντιο με αποτέλεσμα να έχουμε και ένα ποσοστό θορύβου βάθους, ο οποίος επηρέασε και αυτός με την σειρά του, αφού ένα ποσοστό του καταγράφηκε στην ηχογράφιση.

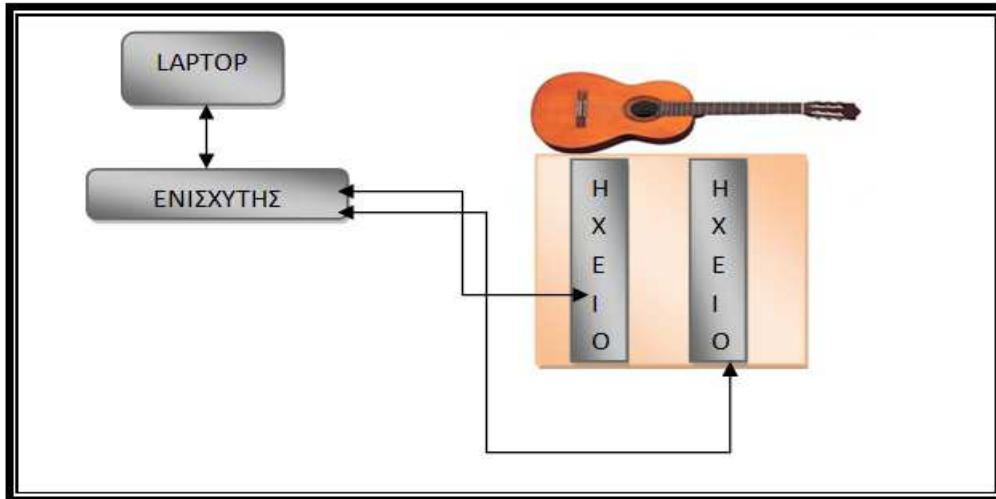
Παρατηρώντας το φάσμα της νότας MI2, βλέπουμε ένα σχετικά πλούσιο φάσμα και την πρώτη κορυφή κοντά στα 80Hz όπου και αναμενόταν. Επίσης παρατηρούνται και οι τρεις πρώτες αρμονικές της νότας MI2 κοντά στα 160Hz, 320Hz και 410Hz. Στη συνέχεια, παρατηρώντας το φάσμα της νότας ΛΑ, παρατηρείται ξεκάθαρα η πρώτη κορυφή, η οποία μάλιστα παρουσιάζει και πολύ μεγάλο πλάτος, κοντά στα 110Hz όπου και αναμενόταν. Επίσης, φαίνονται πολύ καθαρά και οι πρώτες τέσσερις αρμονικές της κοντά στα 220Hz, 330Hz, 440Hz, και 550Hz. Στο φάσμα της νότας ΡΕ τώρα, παρατηρείται μία κορυφή με μεγάλο πλάτος στα 150Hz όπου και αναμενόταν. Οι υπόλοιπες κορυφές που παρατηρούνται τόσο πριν όσο και μετά την κορυφή των 150Hz πιθανότατα οφείλονται στον θόρυβο που είπαμε ότι είχαμε ή στις δονήσεις του μεγαφώνου, εκτός από την κορυφή μικρού πλάτους βέβαια που βλέπουμε κοντά στα 290Hz, η οποία πιθανότατα είναι η πρώτη αρμονική της. Τέλος, στην ανάλυση Fourier της νότας ΣΟΛ παρατηρείται πλούσιο φάσμα, το οποίο όμως είναι πιθανότατα αποτέλεσμα τόσο του θορύβου όσο και των δονήσεων του μεγαφώνου. Παρατηρείται ότι υπάρχει μία κορυφή κοντά στα 195Hz την οποία και αναμενόταν αφού είναι η συχνότητα συντονισμού της νότας ΣΟΛ, και ακόμα μία κοντά στα 380Hz η οποία φαίνεται να είναι η πρώτη αρμονική της νότας ΣΟΛ. Παρατηρώντας και τα τέσσερα φάσματα βλέπουμε πάντα να εμφανίζεται μία κορυφή κοντά στα 100Hz, η οποία προέρχεται από τον συντονισμό του αέρινου όγκου της κιθάρας, κατά τον οποίο η κοιλότητα της κιθάρας λειτουργεί σαν ένα αντηχείο Helmholtz.

3.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΜΕΡΩΝ ΚΙΘΑΡΑΣ

Υλοποιήθηκαν διατάξεις και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την ανίχνευση δονήσεων μερών της κιθάρας συνέπεια διέγερσης με ηχοβόλιση με χρήση μεγαφώνου. Συγκεκριμένα, ανιχνεύθηκαν τρόποι δόνησης τόσο του καπακιού όσο και της πλάτης της κιθάρας με τη μέθοδο διαγραμμάτων Chladni, ενώ έγινε προσπάθεια καταγραφής ταλαντώσεων της πλάτης της κιθάρας με στροβοσκοπική διάταξη.

3.4.1 Ανίχνευση με τη μέθοδο διαγραμμάτων Chladni

Η πειραματική συνδεσμολογία της διάταξης που υλοποιήθηκε για την ανίχνευση δονήσεων με τη μέθοδο διαγραμμάτων Chladni δίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.10.

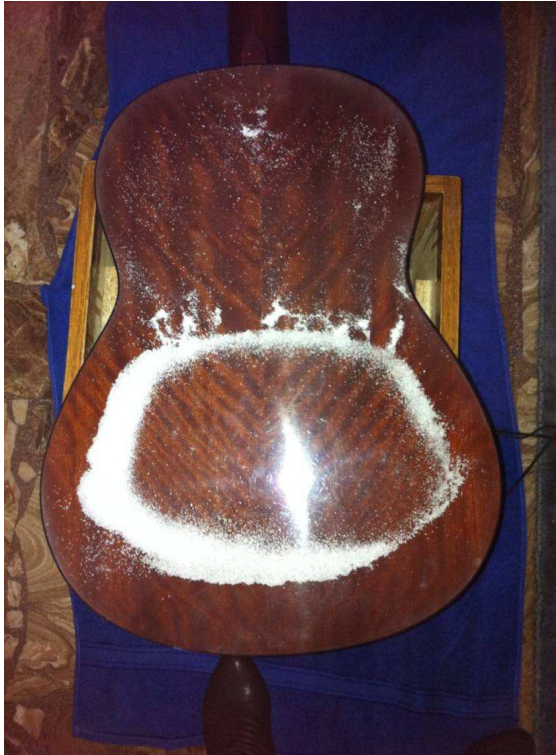


Εικόνα 3.10: Πειραματική συνδεσμολογία διάταξης για την ανίχνευση δονήσεων με τη μέθοδο διαγραμμάτων Chladni.

Αρχικά δημιουργήθηκαν 6 ημιτονοειδείς τόνοι, διάρκειας 30 δευτερολέπτων. Ο πρώτος τόνος ξεκινούσε από τα 100Hz και ολοκληρωνόταν στα 200Hz. Αντίστοιχα, ο δεύτερος τόνος ξεκινούσε από τα 200Hz ολοκληρωνόταν στα 300Hz, κοκ. Οι τόνοι δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα Sony Sound Forge 7. Έπειτα έγινε σύνδεση του laptop με τον ενισχυτή, στον οποίο ενισχυτή ήταν συνδεδεμένα τα δύο ηχεία. Τα ηχεία τοποθετήθηκαν μέσα στο ξύλινο κουτί, πάνω στο οποίο στηρίχθηκε η κιθάρα, πρώτα με την οπή προς τα ηχεία και έπειτα με την πλάτη προς τα ηχεία. Για την αποτύπωση των διαγραμμάτων Chladni χρησιμοποιήθηκε αλάτι.

Κατά πρώτον μελετήθηκε η δονητική συμπεριφορά της πλάτης της κιθάρας, με τυπικά αποτελέσματα να δίνονται στην εικόνα 3.11. Σε δονούμενες περιοχές (κοιλίες) δεν υπάρχει αλάτι (ή υπάρχει πολύ λίγο), το οποίο έχει συγκεντρωθεί σε κομβικές περιοχές μηδενικού πλάτους δόνησης (δεσμοί). Εντοπίστηκαν οι πέντε πρώτοι κανονικοί τρόποι δόνησης (ιδιορυθμοί): ο 1^{ος} εντοπίστηκε μεταξύ 150Hz και 160Hz (με την μικρή αβεβαιότητα να οφείλεται λόγω της μη χρήσης γεννήτριας συχνότητας), ο 2^{ος} μεταξύ 260Hz και 270Hz, ο 3^{ος} μεταξύ 360Hz και 370Hz, ο 4^{ος} μεταξύ 390Hz και 400Hz, και ο 5^{ος} μεταξύ 430Hz και 440Hz.

Οι τρόποι δόνησης που παρατηρήθηκαν συμφωνούν απόλυτα ως προς τη μορφή τους με τους αναμενόμενους (βλ. παράγραφο 2.2.2), γεγονός που είναι και το πιο σημαντικό όσο αφορά στην σύγκριση/σύμπτωση με δημοσιευμένες εργασίες. Παρατηρούνται, βέβαια, μικρές συχνοτικές αποκλίσεις (165Hz, 257Hz, 366Hz, 385Hz, και 399Hz αντίστοιχα / βλ. παράγραφο 2.2.2), οι οποίες είναι αναμενόμενες καθώς η κιθάρα που μελετήθηκε δεν ήταν η ίδια με εκείνη της παραγράφου 2.2.2, ούτε ως προς την κατασκευή της ούτε ως προς τις διαστάσεις της, ενώ διέφερε και ο τρόπος διέγερσης. Συνολικά, και λαμβανομένου υπ' όψη των παραπάνω, η αντιστοιχία σχολιάζεται ως άριστη.



Μεταξύ 150Hz – 160Hz



Μεταξύ 260Hz – 270Hz



Μεταξύ 360Hz – 370Hz



Μεταξύ 390Hz – 400Hz



Μεταξύ 430Hz – 440Hz

Εικόνα 3.11: Διαγράμματα Chladni που αντιστοιχούν στους πέντε πρώτους κανονικούς τρόπους δόνησης της πλάτης της κιθάρας και οι αντίστοιχες συχνότητες.

Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για τον πειραματικό προσδιορισμό των κανονικών τρόπων δόνησης του καπακιού. Τυπικά αποτελέσματα να δίνονται στην εικόνα 3.12, όπου φαίνονται οι τέσσερις πρώτοι κανονικοί τρόποι δόνησης (ιδιορυθμοί): ο 1^{ος} εντοπίστηκε μεταξύ 185Hz και 190Hz (με την μικρή αβεβαιότητα να οφείλεται λόγω της μη χρήσης γεννήτριας συχνοτήτων), ο 2^{ος} μεταξύ 250Hz και 255Hz, ο 3^{ος} μεταξύ 410Hz και 420Hz, και ο 4^{ος} μεταξύ 530Hz και 540Hz.

Ξανά, οι τρόποι δόνησης που παρατηρήθηκαν συμφωνούν απόλυτα ως προς τη μορφή τους με τους αναμενόμενους (βλ. παράγραφο 2.2.2), γεγονός που είναι και το πιο σημαντικό όσο αφορά στην σύγκριση/σύμπτωση με δημοσιευμένες εργασίες. Παρατηρούνται, βέβαια, μικρές συχνοτικές αποκλίσεις (185Hz, 287Hz, 460Hz, και 508Hz αντίστοιχα / βλ. παράγραφο 2.2.2), οι οποίες αποδίδονται στους ίδιους λόγους όπως προηγουμένως. Συνολικά, και λαμβανομένου υπ' όψη των παραπάνω, η αντιστοιχία σχολιάζεται ως άριστη.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός υψηλότερων τρόπων δόνησης με την παρούσα διάταξη, τόσο για την πλάτη όσο και για το καπάκι. Αυτό αποδίδεται: (α) στην μέθοδο διέγερσης, δηλαδή στην αδυναμία να διεγερθούν υψηλότεροι τρόποι δόνησης με το διαθέσιμο μεγάφωνο, (β) στο ότι σε υψηλές συχνότητες η απορρόφηση από το καπάκι και από την πλάτη είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στις χαμηλές συχνότητες, και (γ) στο ότι σε υψηλότερες συχνότητες τα πλάτη των δονήσεων είναι μικρότερα από αυτά σε χαμηλότερες συχνότητες, δεδομένης της ίδιας διεγερσης.



Μεταξύ 185Hz – 190Hz



Μεταξύ 250Hz – 255Hz



Μεταξύ 410Hz – 420Hz

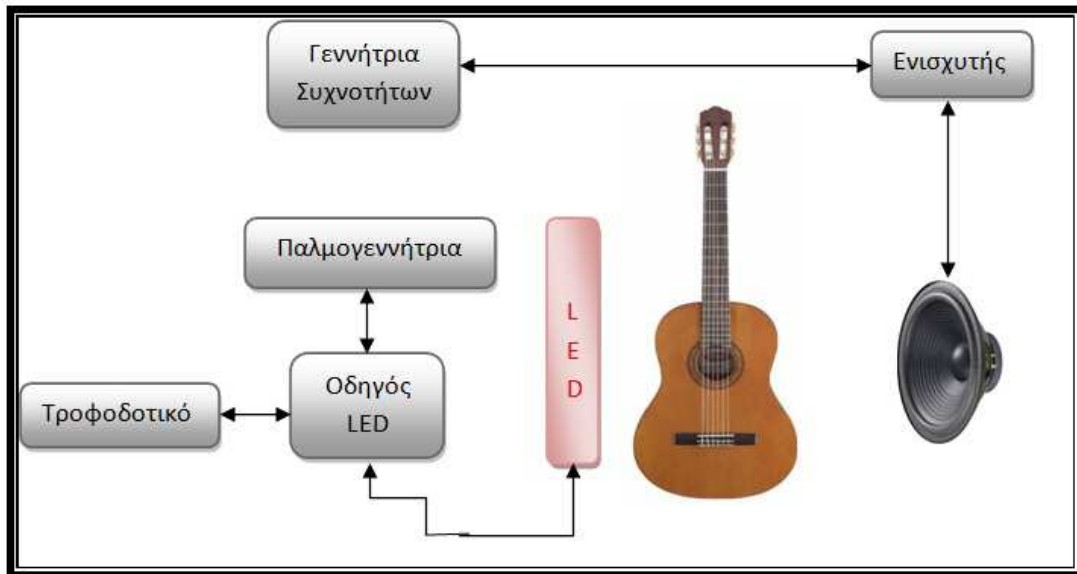


Μεταξύ 5350Hz – 540Hz

Εικόνα 3.12: Διαγράμματα Chladni που αντιστοιχούν στους τέσσερις πρώτους κανονικούς τρόπους δόνησης του καπακιού της κιθάρας και οι αντίστοιχες συχνότητες.

3.4.2 Στροβοσκοπική ανίχνευση δονήσεων

Επίσης, έγινε προσπάθεια ανίχνευσης και καταγραφής μέσω βιντεοσκόπησης των δονήσεων της πλάτης της κιθάρας με τη μέθοδο του στροβοσκοπικού φωτισμού. Η πειραματική συνδεσμολογία της διάταξης που υλοποιήθηκε για το σκοπό αυτό δίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.13.



Εικόνα 3.13: Πειραματική συνδεσμολογία διάταξης για την ανίχνευση δονήσεων με τη μέθοδο στροβοσκοπικού φωτισμού.

Αφού έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις, έγινε προσπάθεια ανίχνευσης του 1^{ου} τρόπου δόνησης της πλάτης μεταξύ 150Hz και 160Hz, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθόδου διαγραμμάτων Chladni. Πράγματι, και μέσα σε αυτή τη συχνотική περιοχή, ανιχνεύθηκε ο 1^{ος} τρόπος δόνησης και βιντεοσκοπήθηκε (σχετικά δεδομένα περιλαμβάνονται συνοδευτικό Ηλεκτρονικό Παράρτημα της εργασίας), υπό τη μορφή αντανάκλασης το φως των LEDs πάνω στην πλάτη της κιθάρας που μετατοπιζόταν σύμφωνα με τον συντονισμό. Δυστυχώς, δεν ήταν δυνατόν να ανιχνευτούν ευκρινώς υψηλότεροι τρόποι δόνησης, γεγονός που οφείλεται στο μικρό πλάτος δόνησής τους και σε συνδυασμό με τον περιορισμό στην διέγερση που έθετε το μεγάφωνο που χρησιμοποιήθηκε, που καταστά μη ορατούς από το γυμνό μάτι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΣΥΝΟΨΗ

Στην εργασία αυτή σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν πειραματικές διατάξεις και εφαρμόστηκαν με επιτυχία για την ανίχνευση ταλαντώσεων χορδών κιθάρας και τρόπων δόνησης της πλάτης και του καπακιού της κιθάρας. Συνοπτικά, κατασκευάστηκε διάταξη στροβοσκοπικού φωτισμού με συστοιχία LED, τα οποία παρείχαν φωτεινότητα αρκετή ώστε να μπορούν οι ταλαντώσεις και δονήσεις να ανιχνευθούν και να βιντεοσκοπηθούν. Επίσης υλοποιήθηκε διάταξη για εφαρμογή της μέθοδου διαγραμμάτων Chladni.

Πιο συγκεκριμένα, έγινε ανίχνευση τόσο των ταλαντώσεων της χορδής όσο και των δονήσεων του καπακιού και της πλάτης της κιθάρας. Η διέγερση των χορδών έγινε τόσο με την μέθοδο της νυκτικής διέγερσης όσο και με την μέθοδο της ηχοβόλισης. Και στις δύο περιπτώσεις κατέστη δυνατή η παρατήρηση των συχνοτήτων συντονισμών των χορδών αλλά και των αντίστοιχων τρόπων ταλάντωσής τους με τη μέθοδο του στροβοσκοπικού φωτισμού.

Η ανίχνευση της δόνησης της πλάτης, συνέπεια ηχοβολιστικής διέγερσης, έγινε τόσο με την μέθοδο του στροβοσκοπικού φωτισμού αλλά και με την μέθοδο των διαγραμμάτων Chladni. Με την πρώτη μέθοδο ήταν δυνατή η παρατήρηση μόνον του 1^{ου} τρόπου δόνησης, ενώ με τη δεύτερη μέθοδο ήταν δυνατή η ανίχνευση των πρώτων πέντε τρόπων δόνησης. Επιπρόσθετα, με τη μέθοδο των διαγραμμάτων Chladni έγινε ανίχνευση των τεσσάρων πρώτων τρόπων δόνησης του καπακιού της κιθάρας.

Μέσα από τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα, προκύπτει ότι η μέθοδος ανίχνευσης ταλαντώσεων και δονήσεων με την χρήση του στροβοσκοπικού φωτισμού είναι μία πολύ χρήσιμη μέθοδος, όταν τα υπό ανίχνευση πλάτη ταλάντωσης ή δόνησης δεν είναι πολύ μικρά. Λόγω της ευκολίας εφαρμογής της, μπορεί να παρέχει πολύ χρήσιμες πληροφορίες τόσο στους οργανοπαίκτες όσο και στους οργανοποιούς, σε περιπτώσεις, για παράδειγμα, χορδίσματος μουσικών οργάνων, χωρία να απαιτείται εμπειρία ή εξειδικευμένη ακοή, αλλά και σε περιπτώσεις βελτιστοποίησης του οργάνου κατά την διάρκεια της κατασκευής του.

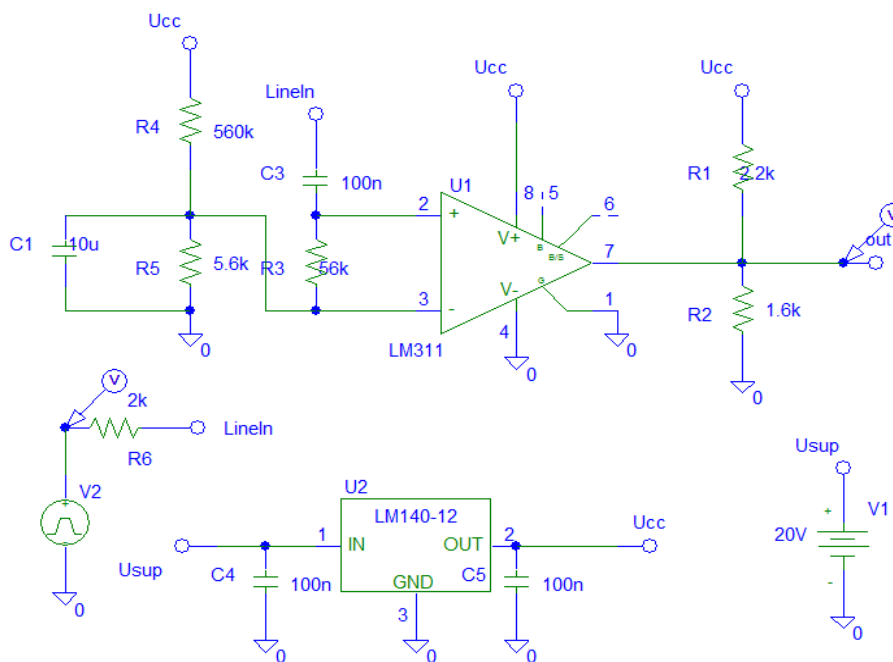
4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όσο αφορά στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, και σε πιθανές εφαρμογές στην περίπτωση διέγερσης χορδών με ηχοβόλιση, η χρήση δύο παλμογεννητριών, μία για το ημιτονικό σήμα που οδηγεί το ηχείο και μία για την τετραγωνική παλμοσειρά που οδηγεί τα LED, αποδείχτηκε στην πράξη ότι παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Είναι σχετικά δαπανηρή και παρουσιάζει κάποιο βαθμό δυσκολίας στην ρύθμιση των αντίστοιχων συχνοτήτων με διαφορά 2-3Hz μεταξύ τους, ειδικά στις μεγαλύτερες συχνότητες.

Για τη βελτίωση των παραπάνω, και στα πλαίσια πιθανής μελλοντικής εργασίας, κατόπιν μελέτης που πραγματοποιήθηκε, προτείνεται η χρήση της κάρτας ήχου υπολογιστή αντί των δύο παλμογεννητριών. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής, συνίστανται στο ότι επιτρέπει είτε την παραγωγή σε πραγματικό χρόνο από

κατάλληλο πρόγραμμα στον υπολογιστή των αναγκαίων κυματομορφών (ημιτονικής για ηχοβόλιση και παλμοσειράς για το στροβοσκόπιο), ή την καταγραφή τους σε αρχεία .wav τα οποία μπορούν να αναπαράγονται όσες φορές χρειάζεται σε οποιοδήποτε υπολογιστή.

Για το σκοπό αυτό, και ως ένα πρώτο βήμα μελλοντικής εργασίας, σχεδιάστηκε τέτοιο εργαστηριακό πρωτότυπο κύκλωμα οδήγησης, που φαίνεται στην εικόνα 4.1, του στροβοσκοπίου με LED από το ένα κανάλι της στερεοφωνικής εξόδου line της κάρτας ήχου υπολογιστή. Στο άλλο κανάλι της ίδιας εξόδου μπορεί να οδηγηθεί το ημιτονικό σήμα που, μέσω ενισχυτή ισχύος και ηχείου αποτελεί την πηγή διέγερσης με ηχοβόλιση ταλαντώσεων χορδών κιθάρας.



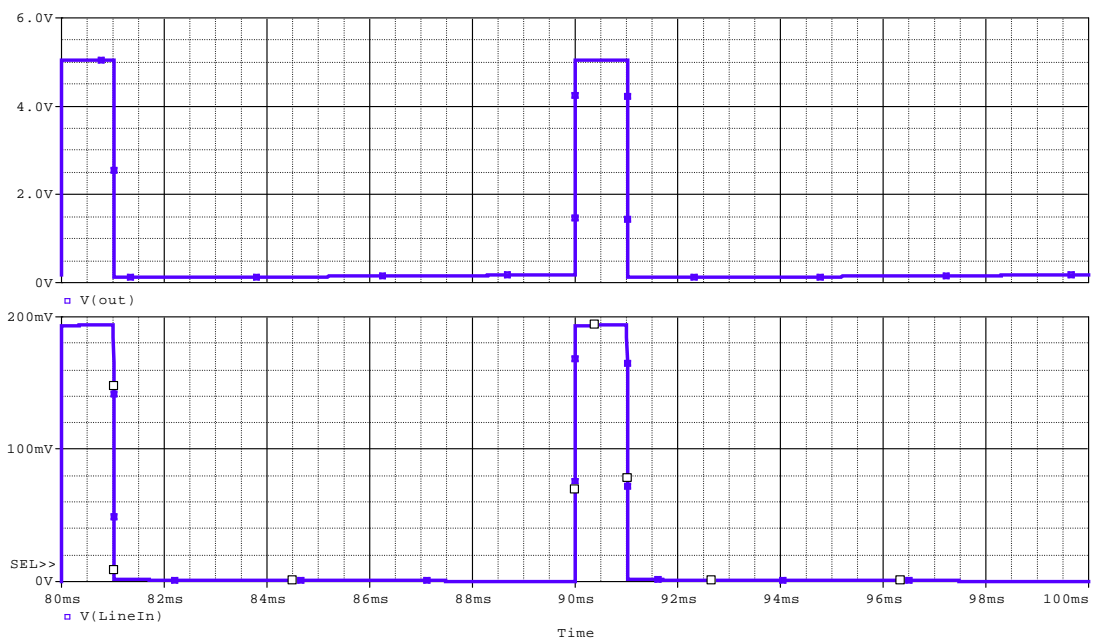
Εικόνα 4.1: Κύκλωμα οδήγησης μέσω κάρτας ήχου υπολογιστή.

Η έξοδος της που είναι στερεοφωνική μπορεί με το κατάλληλο πρόγραμμα σε πραγματικό χρόνο ή, ετεροχρονισμένα, με κατάλληλα προετοιμασμένα αρχεία .wav να δώσει στο ένα κανάλι, για παράδειγμα το αριστερό, το σήμα οδήγησης του ηχείου ηχοβόλισης και στο δεξί κανάλι την παλμοσειρά οδήγησης των LED. Επειδή προτιμήθηκε η ταύτιση των συχνοτήτων των δύο καναλιών και η διευκόλυνση της παρατήρησης και βιντεοσκόπησης της κίνησης χορδής σε συντονισμό με αλλαγή της σχετικής φάσης μεταξύ αριστερού και δεξιού καναλιού με ρυθμό περίπου 2-3Hz.

Το σήμα στην έξοδο κάρτας ήχου έχει μικρό πλάτος, τυπικά μικρότερο από 0.5V από κορυφή σε κορυφή, πολύ μικρότερο από τα 5V που χρησιμοποιήθηκαν στην έξοδο παλμογεννητριών για τα οποία είναι σχεδιασμένα τα προηγούμενα κυκλώματα. Αντί να ενισχυθεί το σήμα εξόδου της κάρτας ήχου προτιμήθηκε η δημιουργία, με την βοήθεια συγκριτή (του ολοκληρωμένου κυκλώματος LM311), παλμών ύψους 5V με ίδια χρονικά χαρακτηριστικά με το σήμα της κάρτας ήχου και με πολύ μικρούς χρόνους ανόδου (rise time) και καθόδου (fall time). Το κύκλωμα που εξασφαλίζει την λειτουργία αυτή φαίνεται επίσης στην εικόνα 4.1.

Η κυματομορφή εισόδου στο κύκλωμα της εικόνας 4.1 φαίνεται στο κάτω γράφημα της εικόνας 4.2, ενώ η κυματομορφή εξόδου στο πάνω γράφημα του της εικόνας 4.2.

Αν και η πρόθεση ήταν η αρχική επίδειξη λειτουργίας εφαρμογής της παραπάνω τεχνικής με χρήση του σχεδιασθέντος και υλοποιηθέντος κυκλώματος, διαπιστώθηκαν τεχνικά προβλήματα εφαρμογής, τα οποία απέτρεψαν την ολοκλήρωση της υλοποίησης του κυκλώματος. Συγκεκριμένα, εμφανίστηκε πρόβλημα υπερβολικού φορτίου στην έξοδο line που κατέληξε σε μόνιμη βλάβη της κάρτας ήχου του υπολογιστή κατά την διάρκεια των δοκιμών του κυκλώματος. Προτείνεται συνεπώς, ως μελλοντική εργασία, η ολοκλήρωση και τελειοποίηση του κυκλώματος συγκριτή (comparator) και η εφαρμογή του στην ανίχνευση των ταλαντώσεων των χορδών καθώς και το χόρδισμα αυτών.



Εικόνα 4.2: Οι κυματομορφές εξόδου (πάνω γράφημα) και εισόδου (κάτω γράφημα) που αναφέρονται ως “Line Out” και “Line In” στο κύκλωμα της εικόνας 4.1.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, and J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, Wiley (1999).
- ❖ R.E. Berg, and D.G. Stork, *The physics of sound*, Addison-Wesley (2004).
- ❖ T.D. Rossing, and N.H. Fletcher, *Principles of Vibration and Sound*, Springer (1994).
- ❖ Χ.Χ. Σπυρίδης, *Η Φυσική των μουσικών οργάνων*, Grapholine (2008).
- ❖ J. Wilson and J. Hawkes (επιστημονική επιμέλεια: Α.Α. Σεραφετινίδης), *Οπτοηλεκτρονική: μια εισαγωγή*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π. (2004)
- ❖ S.O. Kasap, *Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου (2007)
- ❖ <http://www.klika.gr/cms/index.php/peri-mousikis/organopoiia/240-tropoidonisis-diagrammata-chladni.html>
- ❖ <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ LED

Οι βασικοί τύποι των LED είναι:

1. Miniature
2. Mid-range
3. High-power

1. Miniature LEDs

Τα miniature LEDs υπάρχουν σε μεγέθη από 2mm μέχρι 8mm και μπορούν να δεχθούν ρεύμα από 1mA μέχρι και 20mA. Τα σχήματα τους ποικίλλουν σε στρογγυλά με καμπυλωτή ή επίπεδη κορυφή, ορθογώνια με επίπεδη κορυφή και τετράγωνο με επίπεδη κορυφή. Υπάρχουν 3 υποκατηγορίες των miniature LEDs:

- Low-current. Τα low current miniature LEDs μπορούν να δεχθούν μέχρι 2mA ρεύμα σε τάση περίπου 2V (περίπου 4mW κατανάλωση).
- Standard. Τα κόκκινα, πορτοκαλί, κίτρινα και πράσινα standard miniature LEDs μπορούν να δεχθούν μέχρι 20mA σε τάση περίπου 2V (κατανάλωση περίπου ίση με 40mW), ενώ τα μπλε, μωβ και άσπρα standard miniature LEDs μπορούν να δεχθούν μέχρι και 20mA σε τάση περίπου 4-5V (με κατανάλωση περίπου ίση με 100mW).
- Ultra-high-output. Τα Ultra-high-output LEDs έχουν σχεδιαστεί για έκθεση σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία και μπορούν να δεχθούν μέχρι και 20mA σε τάση περίπου 4-5V.

2. Mid-range LEDs

Τα Mid-range LEDs τοποθετούνται συνήθως σε κυκλώματα τα οποία απαρτίζονται από ειδικές οπές όπου και εφάπτονται τα LEDs και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται λίγες μονάδες φωτισμού. Τα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε πάνελ φωτός, σε φωτισμό έκτακτης ανάγκης και στα πίσω φανάρια των αυτοκινήτων. Εξαιτίας του μεγαλύτερου ποσοστού μετάλλων που περιέχει ο

συγκεκριμένος τύπος LED, έχουν την δυνατότητα να δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα ρεύματος της τάξης των 100mA.

3. High-power

Τα High-power LEDs μπορούν να οδηγηθούν με ρεύμα μεγαλύτερο της τάξης των 100mA μέχρι και 1A. Ένα LED τύπου High-power μπορεί εύκολα να αντικαταστήσει μία λάμπα πυρακτώσεως σε ένα φακό. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν σε σειρά ώστε να κατασκευαστεί μία ισχυρή λάμπα LED.

ΧΡΩΜΑΤΑ (nm ΚΑΙ ΔV) ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΖΟΝΤΑΙ ΤΑ LED.

Χρώμα	Μήκος Κύματος (nm)	Πτώση Τάσης (ΔV)	Υλικό Ημιαγωγών
Υπέρυθρο	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1,63$	Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) Αλουμίνιο Αρσενικούχο Γάλλιο (AlGaAs)
Κόκκινο	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta V < 2,03$	Αλουμίνιο Αρσενικούχο Γάλλιο (AlGaAs) Γάλλιο Φωσφορούχο Αρσενικούχο (GaAsP) Αλουμίνιο Γάλλιο Φωσφορούχο Ίνδιο (AlGaInP) Γάλλιο (III) Φωσφορούχο (GaP)
Πορτοκαλί	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta V < 2,10$	Γάλλιο Φωσφορούχο Αρσενικούχο (GaAsP) Αλουμίνιο Γάλλιο Φωσφορούχο Ίνδιο (AlGaInP) Γάλλιο (III) Φωσφορούχο (GaP)
Κίτρινο	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta V < 2,18$	Γάλλιο Φωσφορούχο Αρσενικούχο (GaAsP) Αλουμίνιο Γάλλιο Φωσφορούχο Ίνδιο (AlGaInP) Γάλλιο (III) Φωσφορούχο (GaP)
Πράσινο	$500 < \lambda < 570$	$1,9 < \Delta V < 4,0$	Ινδίου Νιτρίδιο Του Γαλλίου (InGaN) Γαλλίου Νιτρίδιο (GaN) Γάλλιο Φωσφορούχο (GaP) Αλουμίνιο Γάλλιο Φωσφορούχο Ίνδιο (AlGaInP) Αλουμίνιο Φωσφορούχο Γαλλίου (AlGaP)
Μπλε	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta V < 3,7$	Σεληνιούχος Ψευδάργυρος (ZnSe) Ινδίου Νιτρίδιο Του Γαλλίου (InGaN) Καρβίδιο του πυριτίου (SiC) Πυρίτιο (Si)
Βιολετί	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta V < 4,0$	Ινδίου Νιτρίδιο Του Γαλλίου (InGaN)
Υπεριώδες	$\lambda < 400$	$3,1 < \Delta V < 4,4$	Διαμάντι (235nm) Νιτρίδιο Βορίου (215nm) Νιτρίδιο Αλουμινίου (AlN) (210nm) Νιτρίδιο Αλουμινίου του Γαλλίου (AlGaN) Νιτρίδιο Αλουμινίου του Γαλλίου Ινδίου (AlGaInN)

