



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική Υλοποίηση Ενός Συστήματος Επικοινωνίας LED-to-LED



ΣΑΡΗΜΙΧΑΗΛΙΔΟΥ ΕΛΕΝΗ , 21127

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΑΜΑΛΑΚΗΣ ΘΩΜΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2015

Περιεχόμενα

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1.1 ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΟΔΩΝ	8
1.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΔΙΟΔΟΥ	9
1.2 ΔΙΟΔΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ (LED).....	11
1.2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ LED.....	11
1.2.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ	12
1.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	14
1.2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ LED	17
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ LED	22
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ I-V	23
2.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	25
3.ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ.....	30
3.1 ΤΥΠΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ	31
3.2 BJT	32
3.2.1 ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ	33
3.2.2 ΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΠΕΡΙΟΧΗ	34
3.3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ.....	35
3.3.4 BJT ΩΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ.....	36
3.3.5 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ (CE).....	36
3.3.6 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΚΟΙΝΗΣ ΒΑΣΗΣ (CB).....	38
3.3.7 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΚΟΙΝΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ (CC)	40
3.3 ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ.....	41
3.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΛΕΣΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ.....	42
3.3.2 ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΣΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ	43
3.3.3 ΜΗ ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΣΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ	44
4. ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ LEDs.....	45
4.1 ΠΟΜΠΟΣ	48
4.2 ΔΕΚΤΗΣ	53
5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	68

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος επικοινωνία καλύπτει μια ευρεία περιοχή και περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό πεδίων μελέτης. Ο σημασία του όρου επικοινωνία, όπως χρησιμοποιείται σε αυτή την πτυχιακή εργασία, επικεντρώνεται στην έννοια της μετάδοσης πληροφορίας από ένα σημείο Α σε ένα σημείο Β.

Η επικοινωνία αποτελεί μέρος της καθημερινής μας ζωής με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, όπως μέσω των τηλεφώνων που έχουμε στη διάθεσή μας ή μέσω των ραδιοφώνων και των τηλεοράσεων στα σπίτια μας. Η Ασύρματη Οπτική Επικοινωνία είναι μια τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί το φως που διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο για τη μετάδοση δεδομένων σχετικά με τις τηλεπικοινωνίες ή τα δίκτυα υπολογιστών. Η επικοινωνία μέσω φωτός προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στους χρήστες της : είναι ορατή (σε αντίθεση με την αόρατη ραδιοεπικοινωνία), και έτσι είναι εύκολο να προσδιοριστεί ποιος μπορεί να συμμετέχει. Επιπλέον, η επικοινωνία μέσω του φωτός δεν χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα που είναι αρκετά βλαβερό για το περιβάλλον. Επιπροσθέτως αυτού του είδους επικοινωνία δεν απαιτεί μέρος του (περιορισμένου) ραδιοφάσματος και μπορεί συνεπώς να θεωρηθεί ως μια κατάλληλη επέκταση σε περιπτώσεις περιορισμένου εύρους ζώνης. Επίσης υπάρχουν πολλά μέρη που το ορατό φως χρησιμοποιείται και έτσι υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού της επικοινωνίας μέσω φωτός με το φωτισμό του χώρου με αποτέλεσμα τη συνύπαρξη της Επικοινωνίας Ορατού Φωτός (VLC) με το φωτισμό που συναντάται σε πολλά σπίτια, γραφεία και ιδρύματα. Η VLC προσφέρει ένα πολύ μεγάλο χώρο έρευνας και εφαρμογών όπως τον εντοπισμό θέσης, ευφυή σούπερ μάρκετ, ευφυές σύστημα μεταφορών, επικοινωνία μέσω αισθητήρα εικόνας, καθώς και εφαρμογές ήχου .

Τα VLC συστήματα αποτελούνται από τρία κυρίως μέρη : τον πομπό, τον δέκτη και το κανάλι. Κάθε είδος πηγής φωτός μπορεί θεωρητικά να χρησιμοποιηθεί ως συσκευή εκπομπού σε ένα σύστημα VLC. Ωστόσο ορισμένα είδη είναι καταλληλότερα από άλλα. Οι Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (LEDs) θεωρούνται ιδανική πλατφόρμα σε ένα σύστημα VLC. Τα VLC συστήματα που χρησιμοποιούν LEDs δημιουργούν πιθανώς μια πολύτιμη προσθήκη στις μελλοντικές γενιές της τεχνολογίας, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν το φως για τους σκοπούς της τεχνολογικά προηγμένης επικοινωνίας σε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες που ξεπερνούν εκείνες των σημερινών ασύρματων δικτύων.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα επικοινωνίας LED-to-LED που χρησιμοποιεί Επικοινωνία Ορατού Φωτός ενώ τα δεδομένα που μεταδόθηκαν είναι στη μορφή του ήχου. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να ρυθμίζει την ένταση του φωτός με υψηλές συχνότητες

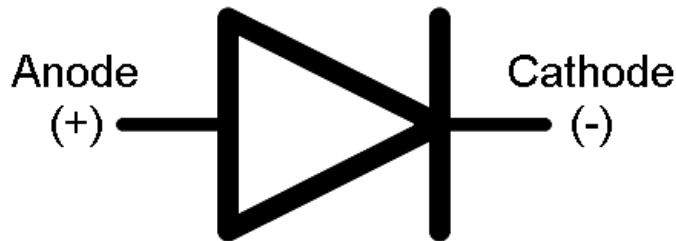
έτσι ώστε το ανθρώπινο μάτι να μην επηρεάζεται από την επικοινωνία. Η συγκεκριμένη εργασία οργανώνεται ως εξής : στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η δίοδος σαν κυκλωματικό στοιχείο και στη συνέχεια αναλύθηκε η Δίοδος Εκπομπής Φωτός (LED). Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετάται η ηλεκτρική και συμπεριφορά των LED ενώ στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι ενισχυτές και συγκεκριμένα οι ενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το τηλεπικοινωνιακό κύκλωμα που υλοποιήθηκε ενώ στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές εφαρμογές συστημάτων επικοινωνίας με LED.

1.1 ΔΙΟΔΟΣ

Οι τελευταίες δεκαετίες έχουν αποφέρει μια ραγδαία εξελισσόμενη ακολουθία τεχνολογικών επαναστάσεων , ιδίως στο ψηφιακή τομέα , ο οποία έχει αλλάξει δραματικά πολλές πτυχές της καθημερινής ζωής . Ο αγώνας ανάπτυξης μεταξύ των κατασκευαστών διόδων εκπομπής φωτός (LED) υπόσχεται να παράγει τη πιο εκτεταμένη μετάβαση μέχρι σήμερα . Οι πρόσφατες εξελίξεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή αυτών των μικροσκοπικών συσκευών ημιαγωγών μπορεί να οδηγήσει στην απαξίωση του κοινού λαμπτήρα , δηλαδή ίσως της πιο ευρέως χρησιμοποιούμενης συσκευής της σύγχρονης κοινωνίας. Γενικά, οι διόδους εκπομπής φωτός, είναι διόδους που εκπέμπουν υπέρυθρο ή ορατό φως όταν τους διαπερνά ηλεκτρικό ρεύμα. Οι LEDs χρησιμοποιούνται σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως σε λυχνίες ελέγχου, στα αυτοκίνητα ως φώτα φρένων, σε πινακίδες και επιγραφές, σε φωτογραφικές μηχανές αυτόματης εστίασης και τα τελευταία χρόνια στο τομέα των τηλεπικοινωνιών. Οι LEDs ακολουθούν τους κανόνες λειτουργίας των διόδων και απαιτείται η βαθιά κατανόηση τους έτσι ώστε να γίνει κατανοητός με τη σειρά του και ο τρόπος λειτουργίας των διόδων εκπομπής φωτός.

Υπάρχουν πολλές λειτουργίες ανάλυσης και επεξεργασίας σήματος οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με μη γραμμικά κυκλώματα. Το απλούστερο και πλέον θεμελιώδες μη γραμμικό κυκλωματικό στοιχείο είναι η δίοδος και το σύμβολο της φαίνεται στην εικόνα 1. Πρόκειται για ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών και λειτουργεί κυρίως προς μία κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι έχει χαμηλή αντίσταση στη ροή του ρεύματος προς τη μία κατεύθυνση και υψηλή αντίσταση στην άλλη. Τα κυκλώματα λοιπόν που απαιτούν ροή ηλεκτρονίων προς μία μόνο κατεύθυνση περιλαμβάνουν στη συνδεσμολογία τους μία ή περισσότερες διόδους. Ο πιο κοινός τύπος διόδου στις μέρες μας είναι η δίοδος ημιαγωγού και πρόκειται για ένα κρυσταλλικό κομμάτι ημιαγωγικού υλικού ένωσης p-n (αναλύεται παρακάτω) που είναι συνδεδεμένο με δύο ακροδέκτες. Ο θετικός ακροδέκτης της διόδου αποκαλείται άνοδος και ο αρνητικός κάθοδος. Οι

δίοδοι ημιαγωγών ήταν οι πρώτες ηλεκτρονικές συσκευές ημιαγωγών και κατασκευάστηκαν από τύπους κρυστάλλων που αντιστοιχούν σε κάποια μεταλλικά στοιχεία.. Στις μέρες μας οι περισσότερες δίοδοι κατασκευάζονται από πυρίτιο και αλλά και άλλα ημιαγωγικά υλικά όπως το γερμάνιο.

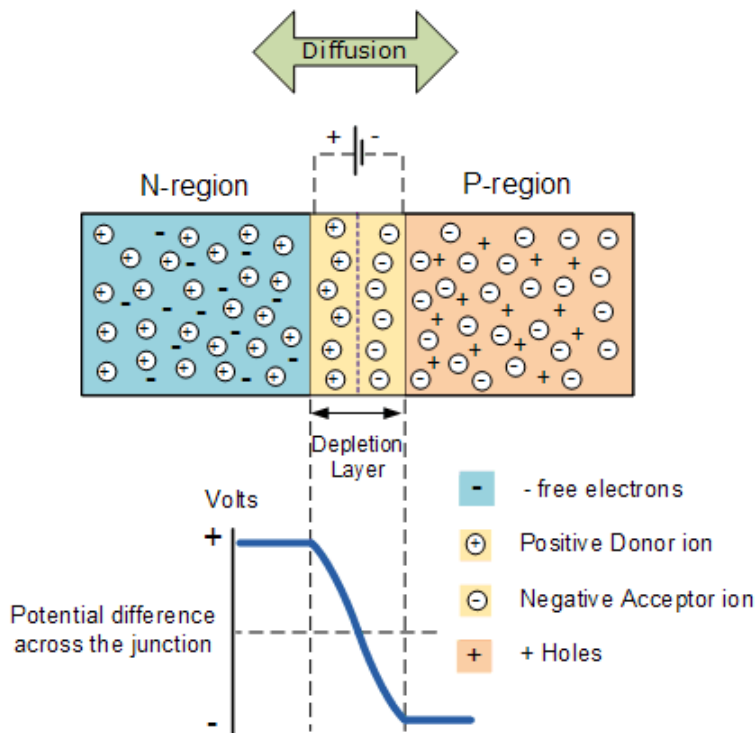


(Εικόνα 1 - Κυκλωματικό σύμβολο διόδου)

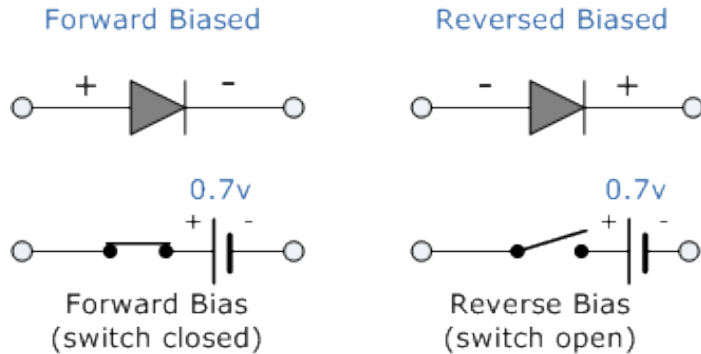
1.1.1 ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΟΔΩΝ

Οι περισσότερες σύγχρονοι δίοδοι βασίζονται στον ημιαγωγό pn επαφών, δηλαδή έναν ημιαγωγό τύπου «p» (οπές) και έναν ημιαγωγό τύπου «n» (ηλεκτρόνια). Γύρω από την επαφή pn, δημιουργείται μια στενή περιοχή («περιοχή απογύμνωσης») στην οποία, λόγω αμοιβαίας διάχυσης οπών και ηλεκτρονίων, οι εν λόγω φορείς εξουδετερώνονται (εικόνα 2). Η δίοδος θεωρείται ορθά πολωμένη όταν ο θετικός πόλος της πηγής τροφοδοσίας συνδέεται με την περιοχή τύπου «p» (και ο αρνητικός με την περιοχή τύπου «n»)(εικόνα 3). Κατά την ορθή πόλωση η δίοδος διαρρέεται από ρεύμα όταν η διαφορά δυναμικού της πηγής (V_S) υπερβαίνει την διαφορά δυναμικού του φράγματος δυναμικού (δηλαδή όταν $V_S > V_K$). Για τον λόγο αυτόν, το φράγμα δυναμικού χαρακτηρίζεται και ως «τάση κατωφλίου» V_K . Επομένως η συμβατική φορά του ρεύματος που διαρρέει την δίοδο όταν είναι ορθά πολωμένη, είναι από την περιοχή «p» στην περιοχή «n».

Κατά την ανάστροφη πόλωση (εικόνα 3) το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο είναι αμελητέο οπότε η δίοδος συμπεριφέρεται ως μονωτής .



(Εικόνα 2 – Η επαφή pn)



(Εικόνα 3 – Ορθή και ανάστροφη πόλωση διόδου)

1.1.2

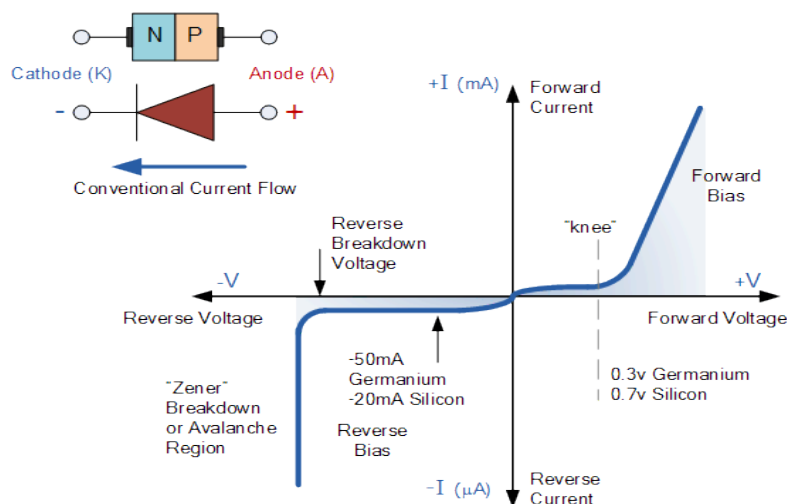
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ

ΔΙΟΔΟΥ

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας και συγκεκριμένα των περιοχών λειτουργίας της διόδου μπορούμε να μελετήσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού (εικόνα 4).

Η χαρακτηριστική της διόδου δίνει το ρεύμα I_D , που διαρρέει τη δίοδο ως συνάρτηση της τάσης V_D στα άκρα της διόδου.

- Όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα της διόδου γίνεται είναι θετική, η διόδος καλείται ορθά πολωμένη. Κατά αυτή τη κατάσταση πόλωσης το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης μειώνεται με την αύξηση του δυναμικού πόλωσης. Όταν το δυναμικό πόλωσης ξεπεράσει το δυναμικό κατωφλίου τότε αρχίζει η ροή ρεύματος και η LED φωτίζει. Το δυναμικό κατωφλίου καθορίζεται από το υλικό κατασκευής της LED, το ποσοστό προσμίξεων αλλά και την θερμοκρασία λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι το ρεύμα είναι αμελητέα μικρό ($<0.1\text{mA}$) για τάσεις κάτω του δυναμικού κατωφλίου στην πραγματικότητα αλλά αυτό δεν μεταφράζεται σε παραγωγή φωτός με γυμνό μάτι. Επίσης στην περιοχή λειτουργίας η χαρακτηριστική I-V έχει μια πολύ απότομη αλλά πεπερασμένη κλίση, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μια μικρή εσωτερική αντίσταση κατά την ορθή πόλωση. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της καμπύλης τόσο μικρότερη είναι η εσωτερική αντίσταση της διόδου.
- Η διόδος εισέρχεται στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα της γίνεται αρνητική. Αυτό που συμβαίνει εδώ είναι ότι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης αυξάνεται με την μείωση του δυναμικού πόλωσης. Τότε η διόδος διαρρέεται από ένα πολύ μικρό ρεύμα που ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου και παραμένει σχεδόν σταθερό. Όταν το δυναμικό στα άκρα της φθάσει μια ορισμένη τιμή (V_z), το οποίο ονομάζεται δυναμικό κατάρρευσης, παρατηρείται ραγδαία αύξηση του ρεύματος. Το φαινόμενο καλείται κατάρρευση της διόδου. Η ανάστροφα πολωμένη διόδος pn αντιμετωπίζεται σε κύκλωμα ως ανοικτός διακόπτης ή ως πολύ μεγάλη αντίσταση.



(Εικόνα 4 – Χαρακτηριστική I-V διόδου)

1.2 ΔΙΟΔΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΦΩΤΟΣ (LED)

Η λέξη LED προέρχεται από το αρχικά γράμματα των αγγλικών λέξεων Light Emitting Diode, δηλαδή δίοδος που εκπέμπει φως. Τα LED είναι ορισμένου τύπου συσκευές ημιαγωγών, οι οποίες διαχέουν συγκεχυμένο φως όταν διαπερνιούνται από ηλεκτρικό ρεύμα. Το αποτέλεσμα είναι μία μορφή ηλεκτροφωταύγειας. Για την κατασκευή των LED χρησιμοποιείται ημιαγωγίμο υλικό αντί για σύρμα ή αέριο νέον, όπως χρησιμοποιούνται σε άλλου είδους λαμπτήρες. Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται από τα LEDs, εξαρτάται από τη σύνθεση και την κατάσταση του υλικού που χρησιμοποιείται στον ημιαγωγό και μπορεί να περιλαμβάνει υπέρυθρες ακτίνες, ορατές ακτίνες, ή ακόμα, σχεδόν υπεριώδεις ακτίνες φωτός. Στην ουσία ένα LED είναι μία ημιαγωγίμη p-n δίοδος η οποία αν πολωθεί ορθά εκπέμπει αυθόρμητα ακτινοβολία στην ορατή, υπέρυθρη και υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος παραλείποντας τη διαδικασία της θέρμανσης των νημάτων.

Υλικό	Μήκος Κύματος	Χρώμα
Αρσενικούχο γάλλιο	850-940nm	Ροζ
Φωσφορούχο αρσενικούχο γάλλιο	630-620nm	Κόκκινο
Φωσφορούχο αρσενικούχο γάλλιο	605-620nm	Πορτοκαλί
Φωσφορούχο αρσενικούχο γάλλιο ντοπαρισμένο με άζωτο	585-595nm	Κίτρινο
Αλουμίνιο φωσφίδιο γαλλίου	550-570nm	Πράσινο
Ανθρακοπυρίτιο	430-505nm	Μπλε
Ινδογάλλιο του αζώτου	450nm	Άσπρο

1.2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ LED

Οι τύποι LED που είναι διαθέσιμες και που αναπτύσσονται ποικίλλουν. Αυτοί οι τύποι αναλύονται παρακάτω

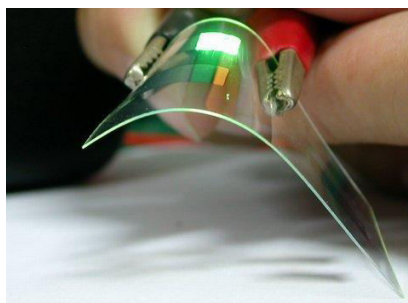
- **Ανόργανες LEDs :** Πρόκειται για το παραδοσιακό τύπο διόδου που είναι διαθέσιμος από το 1960. Κατασκευάζεται από μη οργανικά υλικά. Κυρίως χρησιμοποιούνται νοθευμένοι ημιαγωγοί όπως αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) ή γάλλιο αλουμίνιο αρσενικό (GaAlAs) καθώς και πολλά ακόμα. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας LED έχει σαν αποτέλεσμα η ισχύς

τους και η αποτελεσματικότητά τους να έχει αυξηθεί εκθετικά, με διπλασιασμό περίπου κάθε 36 μήνες από το 1960, με τρόπο παρόμοιο με το νόμο του Moore. Οι εξελίξεις αποδίδονται σε παράλληλη ανάπτυξη άλλων τεχνολογιών ημιαγωγών καθώς και στις εξελίξεις στην οπτική και στην επιστήμη των υλικών (εικόνα 5).

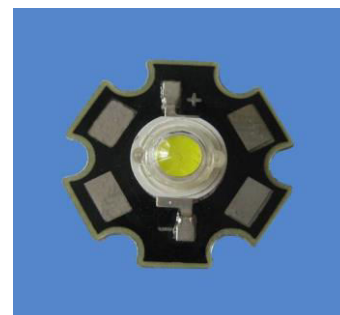
- **Οργανικές LEDs :** Οι οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός (OLEDs) τυγχάνουν μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος παγκοσμίως, κυρίως για την εφαρμογή τους ως νέου τύπου οθονών απεικόνισης. Οι οργανικοί δίοδοι OLED είναι κατασκευασμένες από ένα πολυμερές (οργανική ένωση) το οποίο είναι σαν μία λεπτή μεμβράνη ενώ είναι και ευέλικτες. Βρίσκουν εφαρμογές σε οθόνες μικρού μεγέθους όπως κινητά τηλέφωνα, PDAs και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές (εικόνα 6).
- **LEDs Υψηλής Φωτεινότητας :** Οι LEDs Υψηλής Φωτεινότητας, είναι ένας τύπος ανόργανης LED και ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές φωτισμού. Ο τύπος τους είναι κυρίως ο ίδιος όπως αυτός του παραδοσιακού ανόργανου LED, με τη διαφορά ότι οι συγκεκριμένοι τύποι LED εκπέμπουν μεγαλύτερη φωτεινότητα. Η ιδιότητά τους αυτή στηρίζεται στην ικανότητά τους να διαχειριστούν πολύ υψηλότερα επίπεδα ρεύματος και κατανάλωσης ισχύος (εικόνα 7).



(εικόνα 5 – Ανόργανες LEDs)



(εικόνα 6 – Οργανική LED)

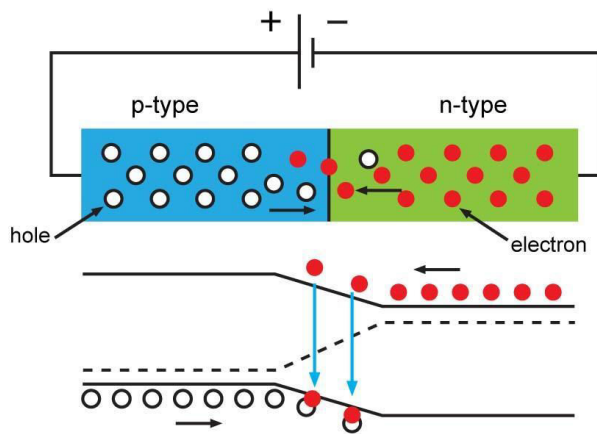


(εικόνα 7-LED Υψηλής Φωτεινότητας)

1.2.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ

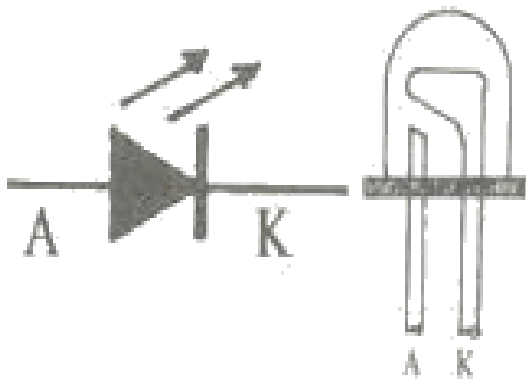
Η δίοδος εκπομπής φωτός μετατρέπει ένα ρεύμα ορθής πόλωσης σε φως. Το φως είναι μια μορφή ενέργειας που μπορεί να απελευθερωθεί από ένα άτομο. Αποτελείται από πολλά μικρά κυματοπακέτα που έχουν ενέργεια και ορμή αλλά όχι μάζα. Αυτά τα κυματοπακέτα, λέγονται φωτόνια, και αποτελούν μία από τις πιο βασικές μονάδες φωτός. Κβάντα ενέργειας απελευθερώνονται με την μετάπτωση των ηλεκτρονίων. Σε ένα άτομο, τα ηλεκτρόνια οργανώνονται σε ηλεκτρονιακά νέφη γύρω από τον πυρήνα. Ηλεκτρόνια που κινούνται σε διαφορετικά ηλεκτρονιακά νέφη έχουν και διαφορετικά μεγέθη ενέργειας ενώ τα ηλεκτρόνια τα

οποία κινούνται πιο μακριά από τον πυρήνα έχουν και τη μεγαλύτερη ενέργεια. Ένα ηλεκτρόνιο χρειάζεται ενέργεια για να μεταπηδήσει από μια χαμηλότερη στοιβάδα σε μια υψηλότερη ενώ απελευθερώνει ενέργεια όταν μετακινείται από μια υψηλότερη στοιβάδα σε ένα χαμηλότερη. Αυτή η ενέργεια απελευθερώνεται υπό μορφή φωτονίου. Μια μεγαλύτερη ενεργειακή πτώση απελευθερώνει ένα φωτόνιο υψηλότερης ενέργειας, το οποίο χαρακτηρίζεται από μια υψηλότερη συχνότητα. Όπως είδαμε στη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των διόδων, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα από μια δίοδο μπορούν να πέσουν στις κενές οπές από το στρώμα P-τύπου. Αυτό περιλαμβάνει μια πτώση από τη ζώνη αγωγιμότητας σε μια χαμηλότερη στοιβάδα, και έτσι τα ηλεκτρόνια απελευθερώνουν ενέργεια υπό μορφή φωτονίων. Αυτό συμβαίνει σε οποιαδήποτε δίοδο, αλλά τα φωτόνια είναι ορατά μόνο όταν η δίοδος αποτελείται από συγκεκριμένο υλικό. Για παράδειγμα τα άτομα σε μια δίοδο πυριτίου, οργανώνονται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η απόσταση μετάπτωσης να είναι σχετικά σύντομη για το ηλεκτρόνιο. Κατά συνέπεια, η συχνότητα του φωτονίου είναι τόσο χαμηλή που είναι αόρατη στο ανθρώπινο μάτι, ανήκει δηλαδή στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος του φωτός. Οι διόδους εκπομπής ορατού φωτός, όπως εκείνες που χρησιμοποιούνται σε ψηφιακά ρολόγια, κατασκευάζονται από υλικά που το χάσμα μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και των χαμηλότερων στοιβάδων, είναι μεγαλύτερο. Το μέγεθος του χάσματος που, καθορίζει τη συχνότητα του φωτονίου, καθορίζει το χρώμα του φωτός.



(εικόνα 8 -ηλεκτροφωταύγεια pn επαφής)

Στην εικόνα 9 φαίνεται η δομή μιας διόδου LED και το σύμβολό της. Στο πλάι του πλαστικού περιβλήματος το οποίο μπορεί να έχει διάφορες μορφές, υπάρχει ένα επίπεδο που δηλώνει την κάθοδο.



(εικόνα 9 -κυκλωματικό σύμβολο LED)

Σε άλλες διόδους η κάθοδος είναι αυτή με το μικρότερο μήκος και φυσικά σ' αυτήν συνδέεται ο αρνητικός πόλος.

Απαιτεί μικρή ισχύ λειτουργίας άρα μπορεί να συνεργαστεί με τα περισσότερα ψηφιακά κυκλώματα. Ένα LED θεωρητικά μπορεί να διαρκέσει για πολλά χρόνια ή 100.000 ώρες λειτουργίας. Ο μόνος κίνδυνος να καταστραφεί είναι να εφαρμοστεί μεγάλη ανάστροφη τάση. Ένα LED μπορεί να αντέξει από 3 μέχρι 11 volt ανάστροφης τάσης.

1.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Είναι αδιαμφισβήτητο πως οι διόδοι εκπομπής φωτός αποτελούν μια αρκετά ενδιαφέρουσα τεχνολογική εξέλιξη στο χώρο της βιομηχανίας φωτισμού. Είναι μικρές σε μέγεθος, συμπαγείς και έχουν εξαιρετικά υψηλή απόδοση και διάρκεια ζωής. Λειτουργούν διαφορετικά από τις παραδοσιακές λάμπες πυρακτώσεως. Η τεχνολογία τους προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συσκευές που χρησιμοποιούν λάμπες νέον, πυρακτώσεως και φθορισμού, όπως δηλαδή μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση (90% πιο αποτελεσματικά), μειωμένα έξοδα συντήρησης και μεγαλύτερη ασφάλεια.

- Μεγάλη διάρκεια ζωής : Η μεγάλη διάρκεια ζωής αποτελεί τον πρώτο κύριο πλεονέκτημα των LED. Οι λάμπες LED και γενικότερα οι διόδοι έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, μέχρι και 100.000 ώρες. Αυτό σημαίνει 11 χρόνια συνεχούς λειτουργίας ή 22 χρόνια λειτουργίας στο 50%.

Είναι διαφορετικά ως προς τον τρόπο λειτουργίας σε σχέση με τον παραδοσιακό φωτισμό. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα δεν καίγονται και σταματάνε να

λειτουργούν όπως μια κλασσική λάμπα, αλλά λειτουργούν με λιγότερη ενέργεια και γίνονται λιγότερο φωτεινά για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

- **Ενεργειακή απόδοση:** Αποτελούν τον πιο αποτελεσματικό τρόπο φωτισμού με εκτιμώμενη ενεργειακή απόδοση 80%-90% σε σύγκριση με τον παραδοσιακό φωτισμό των συμβατικών λαμπτήρων. Αυτό σημαίνει ότι περίπου το 80% της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε φως, ενώ το υπόλοιπο 20% χάνεται καθώς μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας όπως θερμότητα, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές λάμπες πυρακτώσεως που λειτουργούν με το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το υπόλοιπο 80% χάνεται με τη μορφή θερμότητας. Η μεγάλη διάρκεια ζωής βοηθάει στην επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης ενεργειακής αποδοτικότητας, ειδικά σε μεγάλη κλίμακα, όπως σε αστικά έργα υποδομής, πόλεις, σιδηρόδρομοι και αεροδρόμια. Άρα είναι φανερό η σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται.
- **Φιλικό προς το περιβάλλον :** Οι δίοδοι εκπομπής φωτός είναι απαλλαγμένοι από τοξικές χημικές ουσίες, σε αντίθεση με τις συμβατικές λάμπες φθορισμού που περιέχουν μια πληθώρα υλικών όπως π.χ. ο υδράργυρος που είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον. Εκτός της απουσίας τοξικών ουσιών, πρόκειται για υλικά 100% ανακυκλώσιμα και βοηθούν στην μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του κάθε ανθρώπου μέχρι και στο 1/3.
- **Ανθεκτικότητα :** Οι LEDs είναι εξαιρετικά ανθεκτικές, αφού φτιάχνονται από ανθεκτικά υλικά και μπορούν να αντέξουν και τις πιο δύσκολες συνθήκες. Επειδή είναι ανθεκτικά σε κραδασμούς και δονήσεις, αποτελούν ιδανική επιλογή για εξωτερικό φωτισμό σε κακές καιρικές συνθήκες όπως σε βροχή και άνεμο ή ακόμα και να αντέξουν σε βανδαλισμούς αλλά και έκθεση σε χώρους κατασκευής.
- **Μηδενικές εκπομπές UV :** Ο φωτισμός LED παράγει πολύ λίγο έως καθόλου υπέρυθρο φως. Για αυτό το λόγο ο φωτισμός αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα κατάλληλος όχι μόνο σε αγαθά και υλικά που είναι ευαίσθητα σε ζέστη (λόγω της πολύ μικρής εκπομπής ακτινοβολίας θερμότητας) αλλά και σε υλικά και αντικείμενα ευαίσθητα σε UV ακτινοβολία, όπως σε μουσεία, εικαστικές εκθέσεις, αρχαιολογικούς χώρους κ.α.

- Ευελιξία στο σχεδιασμό: Οι LEDs μπορούν να συνδυασθούν σε οποιοδήποτε σχήμα για να παράγουν υψηλής απόδοσης φωτισμό. Η κάθε LED ξεχωριστά μπορεί να απενεργοποιηθεί, με αποτέλεσμα τον δυναμικό έλεγχο φωτός, φωτός και διανομής του στο χώρο. Τα καλά σχεδιασμένα συστήματα φωτισμού LED μπορούν να επιτύχουν εκπληκτικά εφέ φωτισμού τα οποία κάνουν καλό στη διάθεση και στη συγκέντρωση. Ο LED φωτισμός διάθεσης χρησιμοποιείται ήδη σε αεροπλάνα, αίθουσες διδασκαλίας και σε πολλές ακόμα τοποθεσίες ενώ στο μέλλον μπορούμε να περιμένουμε πολλά περισσότερα πάνω σε αυτό τον τομέα.
- Λειτουργία σε εξαιρετικά χαμηλές η υψηλές θερμοκρασίες : Οι LED είναι ιδανικές για λειτουργία σε χαμηλές η υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Στους λαμπτήρες φθορισμού, οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργία τους και να παρουσιάσουν προβλήματα, σε αντίθεση με τις λάμπες LED που μπορούν να λειτουργήσουν σωστά και σε ψυχρές συνθήκες όπως κρύα δωμάτια και χώρους κατάψυξης.
- Διάχυση φωτός : Οι LED έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορούν να κατευθύνουν το φως τους προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση χωρίς τη χρήση ενός εξωτερικού ανακλαστήρα, επιτυγχάνοντας υψηλότερη απόδοση από ότι οι συμβατικές συσκευές φωτισμού. Καλά σχεδιασμένα συστήματα φωτισμού LED μπορούν να εκπέμπουν φως πιο αποτελεσματικά προς την επιθυμητή κατεύθυνση.
- Άμεσος Φωτισμός και Συχνή Εναλλαγή : Έχουν την δυνατότητα να φωτίσουν αμέσως μόλις τεθούν σε λειτουργία και αυτό είναι χρήσιμο σε έργα υποδομής όπως π.χ. φώτα κυκλοφορίας και σηματοδότησης. Επίσης μπορούν να απενεργοποιηθούν και να ενεργοποιηθούν συχνά και αυτό να μην επηρεάσει τη διάρκεια ζωής ή το φως που εκπέμπουν σε αντίθεση με τις παραδοσιακές λάμπες που χρειάζονται αρκετά δευτερόλεπτα για να φτάσουν την πλήρη φωτεινότητά τους, ενώ η συχνή ενεργοποίηση και απενεργοποίησή τους μειώνει το προσδόκιμο ζωής τους.
- Χαμηλή διαφορά δυναμικού: Μια πηγή ρεύματος χαμηλής τάσης είναι επαρκής για φωτισμό LED. Αυτό τον καθιστά εύκολο στη χρήση του σε εξωτερικούς χώρους, συνδέοντας μια εξωτερική πηγή ηλιακής ενέργειας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε

απομακρυσμένες η αγροτικές περιοχές.

Παρά τα πολλά τους πλεονεκτήματα οι δίοδοι εκπομπής φωτός δεν παύουν να υστερούν σε κάποια σημεία και να παρουσιάζουν μειονεκτήματα στον τρόπο λειτουργία τους αλλά και γενικότερα.

- Υψηλό αρχικό κόστος: Τα LED σήμερα είναι ακριβότερα (τιμή ανά lumen), σε αρχικό κόστος κεφαλαίου, απ' ότι οι κοινές τεχνολογίες φωτισμού. Το επιπρόσθετο κόστος προέρχεται εν μέρει από τη σχετικά χαμηλή παραγωγή lumen, το κύκλωμα οδήγησης και την τροφοδοσία που απαιτείται. Όμως, αν υπολογιστεί το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (συμπεριλαμβανομένου του κόστους ενέργειας και συντήρησης), τα LED υπερτερούν κατά πολύ των λαμπών υαλογόνου ή πυρακτώσεως και αρχίζουν να απειλούν τους συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού.
- Ευαισθησία στην Τάση: Στα LED πρέπει να παρέχεται διαφορά δυναμικού πάνω από το κατώφλι και ρεύμα λιγότερο από μια τιμή. Έτσι πολλές φορές χρησιμοποιούνται σειρές αντιστάσεων ή πηγές ελέγχου του ρεύματος.
- Ποιότητα φωτός: Το χρώμα κάποιων αντικειμένων μπορεί να φαίνεται διαφορετικό κάτω από μια LED ψυχρού λευκού απ' ότι θα φαινόταν κάτω από το φως του ήλιου ή κάτω από μια λάμπα πυράκτωσης.
- Μόλυνση από το μπλε: Επειδή τα μπλε LED και αυτά του ψυχρού λευκού είναι πλέον ικανά να εκπέμπουν περισσότερο μπλε φως απ' ότι οι κοινές πηγές φωτός όπως οι λάμπες νατρίου υψηλής πίεσης, μπορούν να προκαλέσουν περισσότερη φωτορύπανση απ' ότι οι άλλες πηγές φωτός.

1.2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ LED

Τα LED λόγω του μεγέθους τους αλλά και των πλεονεκτημάτων τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πάρα πολλούς τομείς :

- *Σήμανση και πίνακες* : Η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, το χαμηλό κόστος συντήρησης και η το μικρό μέγεθός τους τα καθιστά ιδανικά για πίνακες. Σε μεγάλες επιφάνειες χρησιμοποιούνται σε στάδια ως πίνακες βαθμολογιών ενώ σε πιο μικρές σε

αεροδρόμια, σιδηροδρομικούς σταθμούς και σαν πίνακες προορισμών για τρένα, λεωφορεία, τραμ και φερρυ. Τα μονοχρωματικά LED χρησιμοποιούνται σε φωτεινούς σηματοδότες, πινακίδες εξόδων, οχήματα έκτακτης ανάγκης, φώτα πλοήγησης πλοίων, φανάρια καθώς και σε Χριστουγεννιάτικα διακοσμητικά φώτα. Σε ψυχρό περιβάλλον οι σηματοδότες από LED είναι ανθεκτικοί και σε χιόνι. Κόκκινα ή κίτρινα LEDs χρησιμοποιούνται ως δείκτες και αλφαριθμητικές επιδείξεις σε περιβάλλον όπου η νυχτερινή όραση πρέπει να διατηρηθεί: πιλοτήρια αεροσκαφών, γέφυρες υποβρυχίων και σκαφών, παρατηρητήρια αστρονομίας, και στον ύπαιθρο, π.χ. παρατήρηση ζώων στη νύχτα και σε χρήση στρατιωτικών τομέων. Λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους και της ικανότητας τους να είναι ορατά κατά τη διάρκεια τη μέρας, χρησιμοποιούνται σε φώτα φρένων σε αυτοκίνητα, φορτηγά, λεωφορεία αλλά και σε δείκτες κατευθύνσεως. Η χρήση τους στα φώτα φρένων βελτιώνει τα επίπεδα ασφαλείας, λόγω του ελάχιστου χρόνου απόκρισης που έχουν. Αυτό επιτρέπει στους οδηγούς των οχημάτων πιο πίσω την δυνατότητα να δράσουν πιο γρήγορα. Ραδιοφωνικοί σταθμοί σχετικά με τα καιρικά φαινόμενα, οι οποίοι χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο μετάδοσης πληροφοριών για τον καιρό (SAME) χρησιμοποιούν τριών ειδών LEDs: την κόκκινη για προειδοποίηση, την πορτοκαλί για επιτήρηση και τη κίτρινη για συμβουλές και οδηγίες όποτε χρειάζεται. Επίσης Καλλιτέχνες έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν LEDs για τις κατασκευές τους.

- *Φωταγώγηση:* Με την ανάπτυξη διόδων εκπομπής φωτός υψηλής απόδοσης και ισχύος, είναι δυνατή πια η χρήση τους σε εφαρμογές φωταγώγησης. Για να προωθήσουν την αντικατάσταση λαμπών πυρακτώσεων με καινούριες λάμπες LED, το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α δημιούργησε το διαγωνισμό L Prize. Οι LEDs χρησιμοποιούνται για φωταγώγηση δρόμων και άλλων αρχιτεκτονικών φωτισμών όπου η εναλλαγή χρωμάτων χρησιμοποιείται. Λόγω την αντοχή τους και της μεγάλης διάρκειας ζωής τους χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία δηλαδή σε αυτοκίνητα, μοτοσικλέτες και ποδήλατα. Επίσης χρησιμοποιούνται στον τομέα των αερομεταφορών δηλαδή σε μεσαίας έντασης φώτα διαδρόμου, φώτα κεντρικού διαδρόμου, φώτα άκρων, εμποδίων και κατασκευών. Χρησιμοποιούνται επίσης για τον οπίσθιο φωτισμό LCD τηλεοράσεων, φορητών υπολογιστών -κάνοντας τις οθόνες πιο λεπτές-, καθώς και ως πηγή φωτός σε εφαρμογές DLP (τηλεοράσεις LED). Οι RGB LED αυξάνουν την γκάμα χρωμάτων ως και 45%. Πέρα από τις εφαρμογές τους σε ηλεκτρονικά ήδη παρατηρείται ότι χρησιμοποιούνται

ολοένα και περισσότερο σε ενυδρεία . Ειδικότερα για ενυδρεία υφάλου , τα LED αποτελούν μια αποτελεσματική φωτεινή πηγή καθώς παράγουν πολύ μικρή θερμότητας και έτσι βοηθούν στη διατήρηση θερμοκρασίας του ενυδρείου στα βέλτιστα επίπεδα. Έχουν επίσης το πλεονέκτημα ότι είναι χειροκίνητα ρυθμιζόμενα και έτσι μπορούν να εκπέμπουν ένα συγκεκριμένο χρώμα - φάσμα για τον ιδανικό χρωματισμό των κοραλλιών και ψαριών του ενυδρείου , βελτιστοποιώντας παράλληλα την ενεργή φωτοσυνθετική ακτινοβολία (PAR) , που ενισχύει την ανάπτυξη και τη βιωσιμότητα της ζωής των κοραλλιών και των ανεμώνων. Παράλληλα μπορούν να προγραμματίζονται ηλεκτρονικά, ώστε να προσομοιώνουν τις διάφορες συνθήκες φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας , γεγονός που προσομοιώνει τις φάσεις του ήλιου και της σελήνης έτσι ώστε να ενισχυθεί η ποιότητα ζωής στον ύφαλο . Η έλλειψη IR ακτινοβολίας και θερμότητας καθιστά τα LED ιδανικά για το φωτισμό σκηνών χρησιμοποιώντας LED RGB που μπορούν εύκολα να αλλάξουν χρώμα και να μειώσουν τη θέρμανση σε σχέση με την θέρμανση που προκαλεί ο παραδοσιακός φωτισμός. Ιδανικά είναι και για φωτισμό σε ιατρικές εφαρμογές όπου η IR ακτινοβολία μπορεί να είναι επιβλαβής .Τα LEDs είναι μικρά , ανθεκτικά και χρειάζονται ελάχιστη ισχύ, άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φορητές συσκευές , όπως φακούς ενώ τα φώτα strobe ή το φλας της φωτογραφικής κάμερας μπορούν να λειτουργήσουν σε μια ασφαλή , χαμηλή διαφορά δυναμικού, αντί αυτή των 250+ βολτ που βρίσκονται συνήθως σε φώτα xenon . Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε κάμερες κινητών τηλεφώνων , όπου ο χώρος είναι πολύτιμος και ένα ογκώδες κύκλωμα είναι ανεπιθύμητο. Άλλη μια εφαρμογή τους είναι στο φωτισμό υπέρυθρων σε συνθήκες νυχτερινής όρασης, όπως δηλαδή καμερών ασφαλείας. Ένα δαχτυλίδι από LED γύρω από μια βιντεοκάμερα , με κατεύθυνση προς τα εμπρός σε ένα οπισθοανακλαστικό φόντο , επιτρέπει τη χρήση της τεχνικής chroma key σε παραγωγές βίντεο . LEDs χρησιμοποιούνται σε επιχειρήσεις εξόρυξης , όπως λάμπες για να παρέχουν φως για τους ανθρακωρύχους ενώ αρκετές έρευνες έχουν γίνει με σκοπό τη βέλτιστη χρήση τους για την εξόρυξη , τη μείωση της αντανάκλασης και για την αύξηση του φωτισμού , μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο τραυματισμού για τους ανθρακωρύχους. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλους τους τομείς της αγοράς για εμπορική χρήση αλλά και στο σπίτι : παραδοσιακός φωτισμός , AV , στάδια , θέατρα , αρχιτεκτονική αλλά και τις δημόσιες εγκαταστάσεις , και όπου αλλού ο τεχνητός φωτισμός χρησιμοποιείται. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως η NASA χρηματοδοτεί έρευνες για τη χρήση τους σχετικά με την προαγωγή της υγείας για τους

αστροναύτες.

- Επικοινωνία δεδομένων και άλλων σημάτων :* Το φως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση δεδομένων και αναλογικών σημάτων . Για παράδειγμα , ο φωτισμός λευκού LED μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα που βοηθούν τους ανθρώπους να περιηγηθούν σε κλειστούς χώρους ,ή ενώ αναζητούν απαραίτητα δωμάτια ή αντικείμενα .Οι βοηθητικές συσκευές ακρόασης σε πολλά θέατρα και παρόμοιους χώρους χρησιμοποιούν υπέρυθρα LED για να στείλουν ήχο στους δέκτες των ακροατών . Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (καθώς και λείζερ ημιαγωγών) χρησιμοποιούνται για την αποστολή δεδομένων σε πολλούς τύπους καλωδίων οπτικών ινών, από ψηφιακό ήχο μέσω καλωδίων TOSLINK έως τις πολύ υψηλού bandwidth συνδέσεις που αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του διαδικτύου . Εδώ και αρκετό καιρό , οι υπολογιστές ήταν συνήθως εξοπλισμένοι με διεπαφές IrDA , οι οποίες τους επέτρεψαν να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα σε κοντινά μηχανήματα μέσω υπέρυθρων .Πολύ μεγάλο εύρος ζώνης δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί καθώς LEDs μπορούν να αναβοσβήνουν εκατομμύρια φορές ανά δευτερόλεπτο ,
- Βιώσιμος φωτισμός :* Ο αποδοτικός φωτισμός είναι απαραίτητος για την αειφόρο αρχιτεκτονική . Το 2009 , μια τυπική 13-watt λάμπα LED εξέπεμπε 450-650 lumens , το οποίο είναι ισοδύναμο με μια συμβατική λάμπα πυράκτωσης 40 watt . Το 2011 , τα LED είχαν γίνει πιο αποτελεσματικά , και ένα LED 6 watt θα μπορούσε να επιτύχει εύκολα τα ίδια αποτελέσματα . Μια τυπική λάμπα πυράκτωσης 40 watt έχει αναμενόμενη διάρκεια ζωής 1.000 ώρες, ενώ ένα LED μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί με μειωμένη απόδοση για περισσότερο από 50.000 ώρες, 50 φορές μεγαλύτερο από ότι ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως.
- Πηγές φωτός για συστήματα μηχανικής όρασης :* Τα συστήματα μηχανικής όρασης απαιτούν ομοιογενή φωτισμό , έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν να είναι πιο εύκολο να επεξεργαστούν και έτσι LEDs χρησιμοποιούνται συχνά για το σκοπό αυτό . Οι σαρωτές barcode είναι το πιο κοινό παράδειγμα μηχανικής όρασης , και πολλοί από αυτούς χρησιμοποιούν κόκκινα LED (χαμηλότερου κόστους) αντί των λείζερ . Τα οπτικά ποντίκια υπολογιστών είναι επίσης μία ακόμα εφαρμογή τους στη τεχνητή όραση.

- *Άλλες εφαρμογές :* Το φως των LED μπορεί να τροποποιηθεί πολύ γρήγορα και έτσι χρησιμοποιείται στις οπτικές ίνες και στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (FSO). Αυτές περιλαμβάνουν τα τηλεχειριστήρια των τηλεοράσεων και των βίντεο, όπου χρησιμοποιούνται τα υπέρυθρα LED. Οι οπτοζεύκτες (optoisolator) χρησιμοποιούν ένα LED και μια φωτοδίοδο ή ένα φωτοτρανζίστορ για να παρέχουν μια διαδρομή σήματος με ηλεκτρική μόνωση μεταξύ δυο διαδρομών και είναι αρκετά χρήσιμοι στον ιατρικό εξοπλισμό, όπου τα σήματα του αισθητήρα χαμηλής τάσης όταν είναι σε επαφή με τον ανθρώπινο οργανισμό πρέπει να είναι μονωμένα. Πολλά συστήματα αισθητήρων βασίζονται στο φως ως πηγή σήματος και οι LEDs είναι συχνά ιδανικές ως πηγή φωτός λόγω των απαιτήσεων των αισθητήρων. Χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες κίνησης, π.χ σε οπτικά ποντίκια υπολογιστών ενώ αισθητήρας του Nintendo Wii χρησιμοποιεί υπέρυθρα LED. Τα παλμικά οξύμετρα τις χρησιμοποιούν για τη μέτρηση του κορεσμού οξυγόνου. Ορισμένοι σαρωτές (scanners) χρησιμοποιούν ως πηγή φωτός τις σειρές RGB LEDs αντί για τον τυπικό λαμπτήρα φθορισμού . Ο σαρωτής μπορεί να βαθμονομηθεί από μόνος του έχοντας τον ανεξάρτητο έλεγχο των τριών φωτιζόμενων χρωμάτων, και έτσι επιτυγχάνεται πιο ακριβή ισορροπία χρωμάτων, και δεν υπάρχει καμία ανάγκη για προθέρμανση. Επιπλέον αφού οι LEDs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φωτοδίοδοι, χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες κίνησης ή στις οθόνες αφής εντοπίζοντας το φως που ανακλάται από το δάχτυλο ή την ακίδα.
- Πολλά βιολογικά συστήματα είναι ευαίσθητα ή εξαρτώνται από το φως. Τα φώτα ανάπτυξης χρησιμοποιούν λυχνίες LED ώστε να αυξήσουν τη φωτοσύνθεση των φυτών αλλά και για να αφαιρέσουν τα βακτήρια και τους ιούς από το νερό και από άλλες ουσίες με τη βοήθεια των UV LEDs . Πολλοί καλλιεργητές φυτών ενδιαφέρονται για LED, επειδή είναι πιο ενεργειακά αποδοτικά, εκπέμπουν λιγότερη θερμότητα (οι ζεστοί λαμπτήρες μπορούν να βλάψουν τα φυτά), και μπορούν να παρέχουν την βέλτιστη συχνότητα φωτός για τις περιόδους ανάπτυξης και άνθισης των φυτών σε σύγκριση με τα φώτα ανάπτυξης που χρησιμοποιούνται σήμερα: HPS (νάτριο υψηλής πίεσης), μέταλλα αλογονιδίων (MH) ή CFL / χαμηλής ενέργειας . Ωστόσο, τα LED δεν έχουν αντικαταστήσει τα φώτα ανάπτυξης λόγω των υψηλότερων τιμών τους. Όσο η μαζική παραγωγή και τα LED kit αναπτύσσονται, τα προϊόντα LED θα γίνουν φθηνότερα.



(Εικόνα 10 – Οθόνη LED)



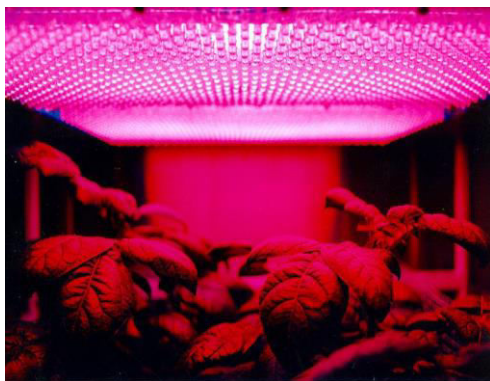
(Εικόνα 11 – Φωτεινός Σηματοδότης LED)



(Εικόνα 12 – LED φώτα ημέρας σε αυτοκίνητο)



(Εικόνα 13 – Κοστούμι LED πάνω σε permormer)



(Εικόνα 14 – LED πάνελ για καλλιέργεια φυτών)



(Εικόνα 15– LED οραότητας για ανθρακωρύχους)

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ LED

Οι ιδανικές δίοδοι, μπλοκάρουν οποιαδήποτε ροή ρεύματος και συμπεριφέρονται σαν ανοιχτό κύκλωμα όταν είναι ανάστροφα πολωμένες ή λειτουργούν σαν βραχυκύκλωμα αν είναι ορθά πολωμένες, δηλαδή επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος χωρίς πτώση τάσης. Δυστυχώς, η

συμπεριφορά της πραγματικής διόδου δεν είναι ιδανική, καθώς καταναλώνουν μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος κατά την ορθή πόλωση ενώ δε το μπλοκάρουν όλο όταν είναι πολωμένες ανάστροφα. Οι πραγματικές διόδους είναι λίγο πιο περίπλοκες και έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν το τρόπο που λειτουργούν. Για την καλύτερη περιγραφή και κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των διόδων εκπομπής φωτός απαιτείται η δημιουργία της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V και η παρατήρηση της συχνοτικής συμπεριφοράς τους.

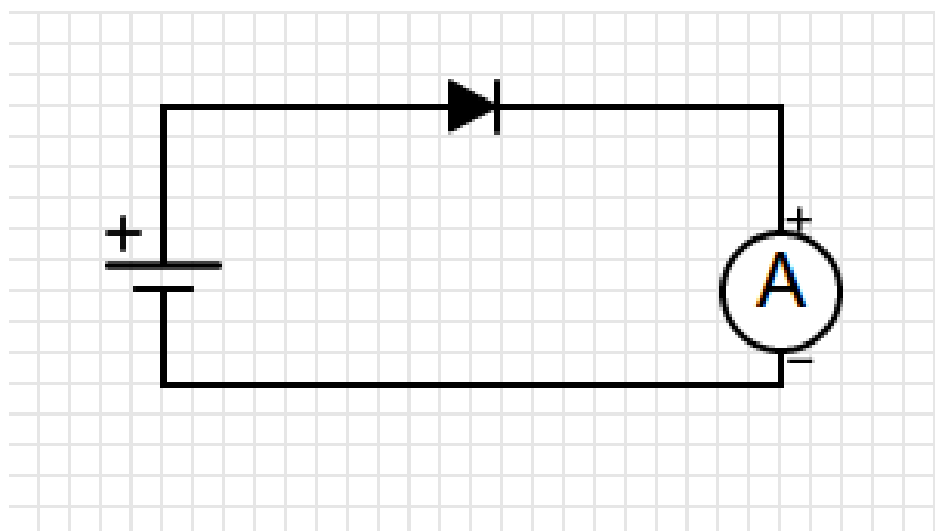
Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η ηλεκτρική συμπεριφορά της Διόδου Εκπομπής Φωτός (LED). Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν 4 τύποι LED: πράσινη, κόκκινη, λευκή και υπέρυθρη με σκοπό να επιλέξουμε αυτή που προσεγγίζει τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε για την υλοποίηση του κυκλώματος επικοινωνίας.

2.1

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ

I-V

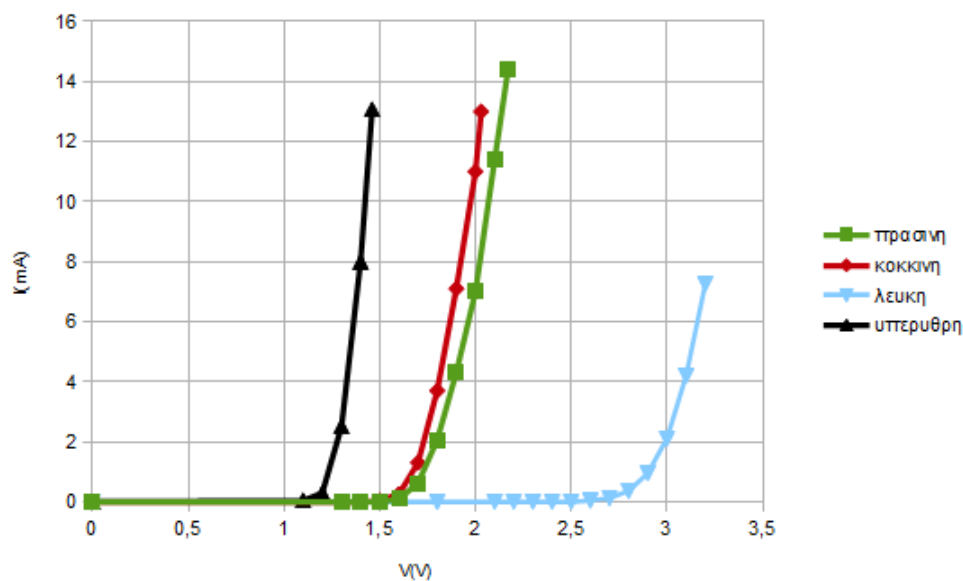
Αρχικά σχεδιάσαμε και επεξεργαστήκαμε τη συμπεριφορά του ρεύματος I, που ρέει τη διάταξη, όταν εφαρμόζεται στα άκρα της διαφορά δυναμικού V (καμπύλη I-V). Αυτό που κάναμε ήταν να φέρουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των διόδων που θα χρησιμοποιήσουμε και από αυτές να υπολογίσουμε την τάση κατωφλίου κάθε μιας. Για τις μετρήσεις μας χρησιμοποιήσαμε τη συνδεσμολογία του παρακάτω σχήματος, δηλαδή τη κάθε LED συνδεδεμένη σε σειρά με ένα πολύμετρο σε λειτουργία αμπερομέτρου, δηλαδή το μοντέλο FT - 3900. Σαν πηγή χρησιμοποιήσαμε τροφοδοτικό συνεχούς τάσης (DC τροφοδοτικό) και συγκεκριμένα το μοντέλο PeakTech 1885.



(Εικόνα 16– συνδεσμολογία για κατασκευή καμπύλης I-V)

Συγκεκριμένα το θετικό άκρο του τροφοδοτικού συνδέθηκε με την άνοδο της LED (θετικός ακροδέκτης) ενώ η κάθοδος συνδέθηκε με το θετικό άκρο του αμπερομέτρου. Η γείωση του αμπερομέτρου συνδέθηκε με την γείωση (αρνητικό) του τροφοδοτικού.

Αφού υλοποιήσαμε το παραπάνω κύκλωμα σε πόλωση ορθής φοράς και καταγράψαμε τις πειραματικές τιμές τάσης και ρεύματος στα άκρα τις διόδου, σχεδιάσαμε τις χαρακτηριστικές. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται και καμπύλες και των τεσσάρων διόδων για καλύτερη σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων.



(Εικόνα 17– Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των τεσσάρων LED - Δημιουργήθηκε με το Libre Office Calc)

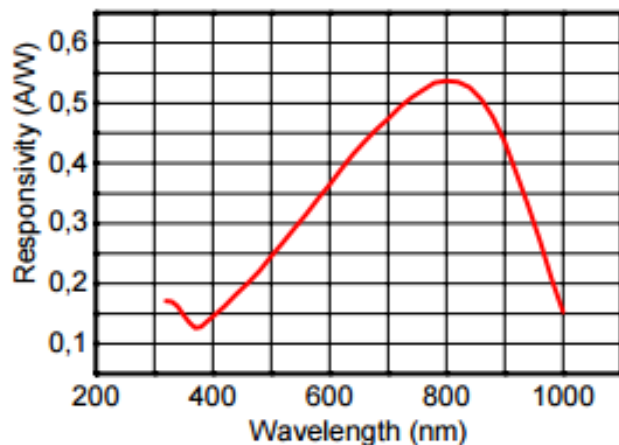
Αυτό που παρατηρούμε αρχικά είναι πως η λευκή έχει μεγαλύτερη τάση κατωφλίου από τις υπόλοιπες, δηλαδή χρειάζεται (περίπου $V_{th}=2.8V$) μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού στα άκρα της για να ανάψει. Αντίθετα η υπέρυθρη, χρειάζεται μικρότερο δυναμικό κατωφλίου σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η πράσινη με την κόκκινη παρουσιάζουν σχεδόν ίδια τάση κατωφλίου και παρόμοια συμπεριφορά στο συγκεκριμένο πείραμα. Το συμπέρασμα που μπορούμε να βγάλουμε είναι πως σε περίπτωση που θέλουμε η εφαρμογή μας να κάνει εξοικονόμηση ενέργειας δεν πρέπει να προτιμήσουμε τη λευκή πετυχαίνει την ίδια ένταση ρεύματος για μεγαλύτερη διαφορά σε σύγκριση με αυτή των υπολοίπων LED. Όταν η παρατήρηση αφορά μια και μόνο LED, τότε η εξοικονόμηση που θα επιτύχουμε επιλέγοντας οποιαδήποτε άλλη εκτός από τη λευκή είναι σχεδόν μηδαμινή. Σε περιπτώσεις όμως που απαιτείται η χρήση μεγάλου αριθμού διόδων εκπομπής φωτός η εξοικονόμηση θα είναι αξιοσημείωτη. Μια ακόμα παρατήρηση που

μπορούμε να κάνουμε είναι πως η υπέρυθη LED σε σχέση με τις υπόλοιπες παρουσιάζει την μεγαλύτερη κλίση και αυτό σημαίνει ότι πλησιάζει, περισσότερο από τις υπόλοιπες, την συμπεριφορά της ιδανικής διόδου όπου όταν είναι πολωμένη ορθά λειτουργεί σαν βραχυκύκλωμα και όταν είναι πολωμένη ανάστροφα δρα σαν ανοιχτό κύκλωμα και μπλοκάρει τη διέλευση οποιουδήποτε ρεύματος.

2.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Στο δεύτερο πείραμα, μελετήθηκε η απόκριση των διόδων στο πεδίο των συχνοτήτων και έτσι εξάγαμε συμπεράσματα για τους τύπους των εφαρμογών που είναι η κάθε μια τους συμφέρουσα.

Για την μελέτη μας στο πεδίο των συχνοτήτων χρησιμοποιήσαμε μια γεννήτρια συχνοτήτων TG5011 της εταιρίας TTI, έναν παλμογράφο και ένα φωτοδέκτη με ενίσχυση. Ο φωτοδέκτης που χρησιμοποιήσαμε είναι ο PDA8A (εικόνα 18) και σχεδιάστηκε για να ανιχνεύει σήματα φωτός συχνότητας μέχρι και 50MHZ.



(Εικόνα 18 – Φασματική Απόκριση PDA8A)



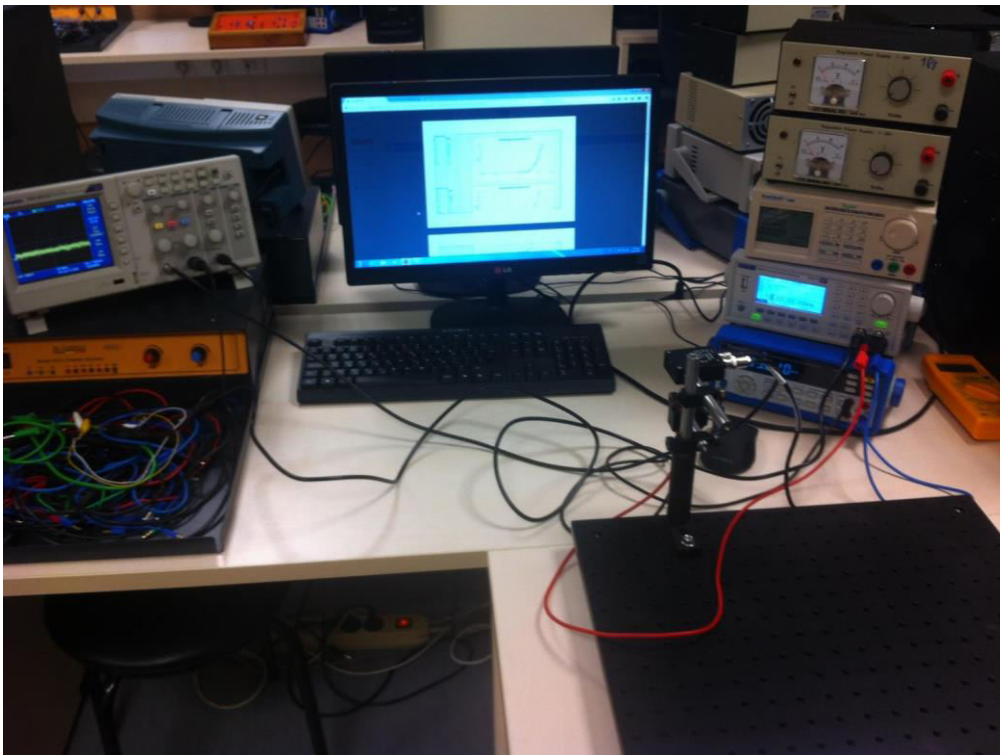
(Εικόνα 19 – PDA8A)

Η μετατροπή φωτός σε διαφορά δυναμικού μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την φασματική απόκριση του φωτοδέκτη PDA8A μέσω του κέρδους διαντίστασης όπως φαίνεται παρακάτω

$$\text{Έξοδος (V/W)} = \text{κέρδος διαντίστασης (V/A)} \times \text{απόκριση (A/W)}$$

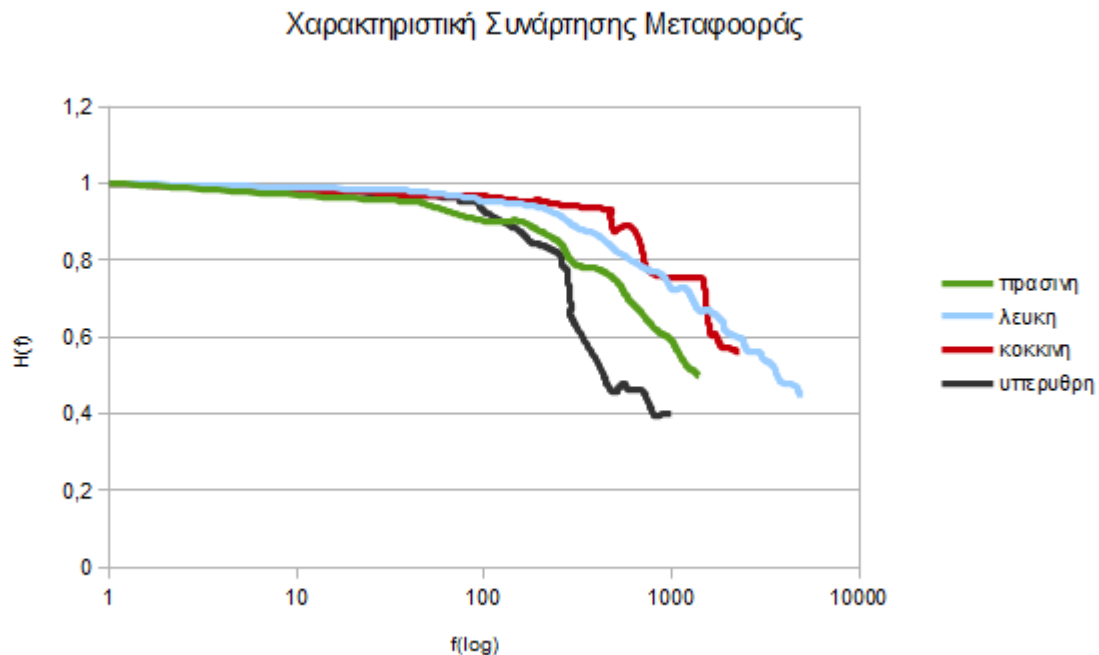
Η μέγιστη έξοδος-μέτρηση του φωτοδέκτη φτάνει τα 3.6V για φορτία υψηλής αντίστασης (ενώ φτάνει τα 1.8V για φορτία 50Ω). Το σήμα που παίρνουμε στην έξοδο θα πρέπει να είναι λιγότερο από την μέγιστη έξοδο (κατώφλι) του φωτοδέκτη που αναφέραμε προηγουμένως, έτσι ώστε να αποφεύγεται ο κορεσμός. Λόγω του πεπερασμένης απόδοσης κέρδους bandwidth που είναι κοινή σε όλα τα συστήματα ενισχυτών, το bandwidth του PDA8A μειώνεται όταν τα επίπεδα του σήματος εξόδου αυξάνονται.

Στην εικόνα 18 παραπάνω μπορούμε να δούμε την απόκριση του φωτοδέκτη σε σχέση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Η γεννήτρια συχνοτήτων συνδέθηκε με τους ακροδέκτες του κάθε LED και ο PDA8A με τον παλμογράφο. Χρησιμοποιήθηκε και το κανάλι trigger του παλμογράφου με σκοπό του συγχρονισμού του σήματος της πηγής με το σήμα εξόδου. Ρυθμίζοντας την γεννήτρια σε Amplitude 2 Vpp και Offset 1.9 Vdc πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για την κάθε δίοδο(εικόνα 20).



(Εικόνα 20 – Συνδεσμολογία για την μέτρηση της της απόκρισης συχνότητας)

Μετά την πραγματοποίηση των μετρήσεων, όλες οι τιμές τάσης(V) κάθε LED κανονικοποιήθηκαν ως προς την μονάδα. Με αυτό το τρόπο μπορέσαμε να ελέγξουμε και να συγκρίνουμε ευκολότερα τη συμπεριφορά των διόδων στο πεδίο των συχνοτήτων. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία προέκυψε το παρακάτω σχεδιάγραμμα (εικόνα 21)



(Εικόνα 21- Χαρακτηριστικές καμπύλες συναρτήσεων μεταφοράς κάθε LED - Δημιουργήθηκε με το Libre Office Calc)

Αυτό που παρατηρούμε με μια πρώτη ματιά είναι ότι η κόκκινη LED έχει καλύτερη απόκριση συχνότητας σε σχέση με την λευκή, η οποία έχει καλύτερη από την κόκκινη, που με την σειρά της έχει καλύτερη από την υπέρυθρη. Επίσης ενδιαφερόμαστε για εκείνο το κομμάτι της ζώνης υψηλών συχνοτήτων που βρίσκεται κοντά στη ζώνη μεσαίων συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει γιατί χρειαζόμαστε να υπολογίσουμε τη τιμή του σημείου αποκοπής συχνότητας -3 dB . Πρόκειται τη συχνότητα στην οποία η ισχύς εξόδου έχει μειωθεί στο μισό της τιμής της μεσαίας ζώνης της. Το σημείο -3 dB υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την μέγιστη τιμή διαφοράς δυναμικού της καμπύλης με το 0.707. Αφού στις χαρακτηριστικές καμπύλες το ανώτερο σημείο ξεκινάει από τη μονάδα το μόνο που επρεπε να κάνουμε είναι να βρούμε τη συχνότητα για την οποία κάθε δίοδος έχει τιμή τάσης 0.707 . Αφού συμβουλευτήκαμε τις μετρήσεις μας προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

f_{3dB} (green LED) =575 KHZ

f_{3dB} (red LED) =1550 KHZ

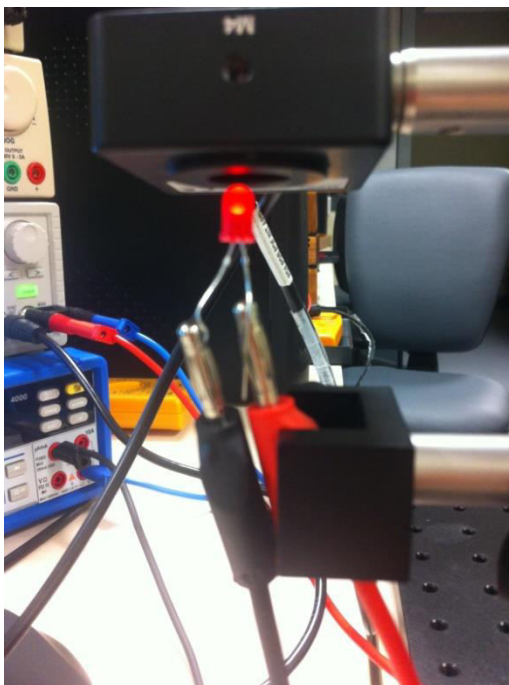
f_{3dB} (white LED) =1250 KHZ

f_{3dB} (ir LED) =285 KHZ

Τα αποτελέσματα αυτά μας δείχνουν πως η κόκκινη LED παρουσιάζει την μεγαλύτερη συχνότητα αποκοπής. Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε είναι πως για εφαρμογές που χρειαζόμαστε άμεση απόκριση των LED, θα προτιμήσουμε τις κόκκινες σε σχέση με τις υπόλοιπες 3. Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικές φωτογραφίες κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων.



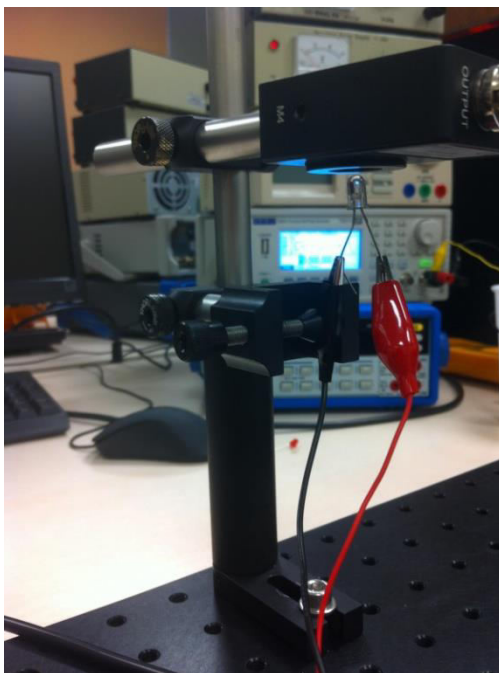
(Εικόνα 22 – Μέτρηση V της πράσινης με την χρήση του PDA8A)



Εικόνα 23 – Μέτρηση V της κόκκινης με την χρήση του PDA8A)



(Εικόνα 24 – Μέτρηση V της λευκής με την χρήση του PDA8A)



(Εικόνα 25 – Μέτρηση V της υπέρυθρης με την χρήση του PDA8A)

3.ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε μια θεμελιώδη λειτουργία επεξεργασίας σήματος η οποία υπάρχει σε όλα σχεδόν τα ηλεκτρονικά συστήματα, τους ενισχυτές.

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι αδιαμφισβήτητα η πιο χρήσιμη συσκευή σε αναλογικά κυκλώματα. Με πολύ λίγα εξωτερικά στοιχεία μπορεί να εκτελέσει μια ποικιλία εργασιών επεξεργασίας σήματος. Είναι αρκετά προσιτοί, καθώς οι περισσότεροι τελεστικοί ενισχυτές γενικής χρήσης πωλούνται αρκετά φθηνά.

Ως ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τρανζίστορ καθώς ο ρόλος τους είναι να μεγεθύνει ένα σήμα εισόδου για να δώσει ένα σημαντικά μεγαλύτερο σήμα εξόδου. Η ποσότητα της μεγέθυνσης καθορίζεται από τη σχεδίαση του εξωτερικού κυκλώματος, καθώς και από την ενεργή συσκευή. Ευρέως διαδεδομένα είναι τα διπολικά τρανζίστορ (BJTs) και τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (JFETs). Οι εφαρμογές είναι πολλές, όπως π.χ. ενισχυτές ήχου σε ένα στερεοφωνικό σπιτιού.

Στο κεφάλαιο αυτό θα επικεντρωθούμε στην ανάλυση των BJT και τελεστικών ενισχυτών καθώς είναι αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στο τελικό κύκλωμα.

Ένας ενισχυτής είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που αυξάνει την ισχύ του σήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη λήψη ενέργειας από μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και τον έλεγχο της εξόδου έτσι ώστε να ταιριάζει με το σχήμα του σήματος εισόδου, αλλά με μεγαλύτερο πλάτος. Άρα, ένας ενισχυτής διαμορφώνει την έξοδο της παροχής ρεύματος για να κάνει το σήμα εξόδου ισχυρότερο από το σήμα εισόδου.

Ένας ενισχυτής μπορεί να είναι είτε ένα ξεχωριστό κομμάτι εξοπλισμού ή ένα ηλεκτρικό κύκλωμα εντός μιας άλλης συσκευής. Η ικανότητα να ενισχύει είναι θεμελιώδης για τη σύγχρονη ηλεκτρονική, και οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλες σχεδόν τις ηλεκτρονικές συσκευές. Οι τύποι των ενισχυτών μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι λόγω της συχνότητας του ηλεκτρονικού σήματος που ενισχύεται. Οι ενισχυτές ήχου ενισχύουν σήματα ήχου με εύρος μικρότερο από 20 kHz, οι ενισχυτές RF ενισχύουν συχνότητες στο εύρος ραδιοσυχνοτήτων μεταξύ 20 kHz και 300 GHz. Ένας άλλος που με βάση την ποσότητα, τη διαφορά δυναμικού ή το ρεύμα οι ενισχυτές μπορούν να διαιρεθούν σε ενισχυτές τάσης, ενισχυτές ρεύματος ή ενισχυτές διαγωγιμότητας και ενισχυτές διαντίστασης. Μια περαιτέρω διάκριση είναι εάν η έξοδος είναι ένα γραμμική ή μη

γραμμική αναπαράσταση της εισόδου. Οι ενισχυτές μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν από φυσική τοποθέτηση τους στην αλυσίδα του σήματος.

3.1 ΤΥΠΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

Οι ενισχυτές κατατάσσονται ανάλογα με τις ιδιότητες εισόδου και εξόδου τους. Παρουσιάζουν την ιδιότητα του κέρδους, ή διαφορετικά τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα που σχετίζεται με το μέγεθος του σήματος εξόδου σε σχέση με το σήμα εισόδου. Το κέρδος μπορεί να καθορίζεται ως ο λόγος της τάσης εξόδου προς τη διαφορά δυναμικού εισόδου (κέρδος τάσης), η ισχύς εξόδου προς την ισχύ εισόδου (απολαβή ισχύος), ή κάποιο συνδυασμό του ρεύματος, τάσης και ισχύος. Σε πολλές περιπτώσεις, με την είσοδο και έξοδο σε ίδια μονάδα, το κέρδος είναι καθαρός αριθμός (αν και συχνά εκφράζεται σε ντεσιμπέλ (dB)).

Οι τέσσερις βασικοί τύποι ενισχυτών έχουν ως εξής:

- Ενισχυτής τάσης - Αυτός είναι ο πιο κοινός τύπος ενισχυτή. Μια διαφορά δυναμικού εισόδου ενισχύεται σε μια μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού στην έξοδο. Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή είναι υψηλή και η αντίσταση εξόδου είναι χαμηλή.
- Ενισχυτή ρεύματος - Αυτός ο ενισχυτής αλλάζει το ρεύμα εισόδου σε ένα μεγαλύτερο ρεύμα εξόδου. Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή είναι χαμηλή και η αντίσταση εξόδου είναι υψηλή.
- Ενισχυτή διαγωγιμότητας - Ο ενισχυτής αυτός ανταποκρίνεται σε μια μεταβαλλόμενη διαφορά δυναμικού στην είσοδο, παρέχοντας μια σχετική αλλαγή του ρεύματος εξόδου.
- Ενισχυτή διαντίστασης - Ο ενισχυτής αυτός ανταποκρίνεται σε ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα εισόδου, παρέχοντας μια σχετική αλλαγή της τάσης εξόδου. Άλλα ονόματα για τη συσκευή είναι ενισχυτής διαντίσταση και μετατροπέας ρεύματος-σε-τάση.

Στην πράξη, το κέρδος ισχύος εξαρτάται από την πηγή και τις σύνθετες αντιστάσεις φορτίου, καθώς και την εγγενή διαφορά δυναμικού και το κέρδος ρεύματος. Ένας ενισχυτής μπορεί να λειτουργήσει γραμμικά. Δηλαδή, να παρέχει σταθερό κέρδος για κάθε κανονικό επίπεδο σήματος εισόδου και εξόδου. Αν το κέρδος δεν είναι γραμμικό, π.χ., ψαλίδισμα του σήματος, το σήμα εξόδου στρεβλώνεται. Υπάρχουν, ωστόσο, περιπτώσεις όπου η μεταβολή κέρδους είναι χρήσιμη. Ορισμένες εφαρμογές επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιούν ενισχυτές εκθετικής αύξησης.

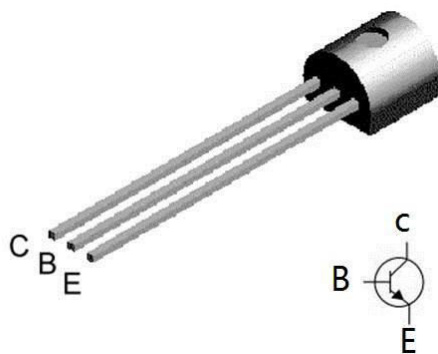
Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη ηλεκτρονικών ενισχυτών όπως: ραδιοφωνικοί και τηλεοπτικοί πομποί και δέκτες, υψηλής πιστότητας ("hi-fi") στερεοφωνικοί εξοπλισμοί, μικροϋπολογιστές και άλλες ψηφιακές συσκευές, κιθάρες και άλλοι ενισχυτές οργάνων. Βασικά συστατικά περιλαμβάνουν ενεργές συσκευές, όπως σωλήνες κενού ή τρανζίστορ.

3.2 BJT

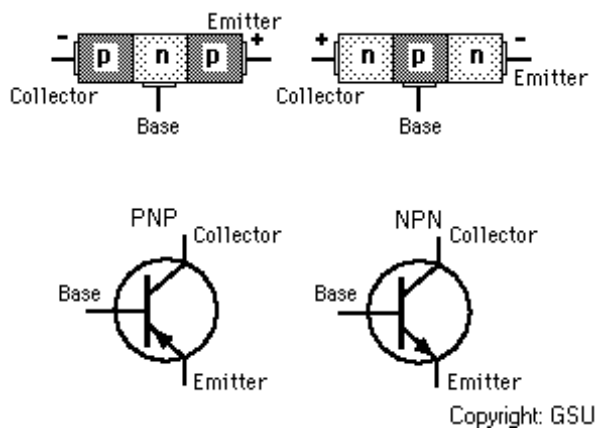
Ένα διπολικό τρανζίστορ επαφής (BJT ή διπολικής επαφής) είναι ένας τύπος τρανζίστορ που βασίζεται στην επαφή δύο τύπων ημιαγωγών για τη λειτουργία του. Τα BJTs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτές, διακόπτες, ή σε ταλαντωτές. Τα BJTs χρησιμοποιούνται είτε ως μεμονωμένα και διακριτά στοιχεία, ή πολλά μαζί σαν τμήματα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τα διπολικά τρανζίστορ ονομάζονται έτσι επειδή η λειτουργία τους αφορά και ηλεκτρόνια και οπές. Τα ηλεκτρόνια είναι φορείς φορτίου πλειονότητας σε n-τύπου ημιαγωγούς, ενώ οι οπές είναι η πλειοψηφία φορέων φορτίου σε ημιαγωγούς τύπου p. Αντίθετα, τα μονοπολικά τρανζίστορ όπως τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου έχουν μόνο ένα είδος φορέα φορτίου.

Η ροή φορτίων σε ένα BJT οφείλεται σε διάχυση φορέων φορτίου σε μια ένωση μεταξύ των δύο διαφορετικών περιοχών συγκεντρώσεων. Οι περιοχές ενός BJT ονομάζεται πομπός, συλλέκτης και βάση. Ένα διακριτό τρανζίστορ έχει τρία καλώδια για σύνδεση σε αυτές τις περιοχές (Εικόνα 24). Τυπικά, η περιοχή εκπομπού έχει μεγάλο βαθμό πρόσμιξης σε σχέση με τα άλλα δύο στρώματα, ενώ οι συγκεντρώσεις των φορέων πλειονότητας στη βάση και τον συλλέκτη είναι περίπου το ίδιο. Τα BJTs κατατάσσονται ως συσκευές φορέων μειονότητας.



(Εικόνα 26 – BJT τρανζίστορ)



(Εικόνα 27 – BJT τρανζίστορ και οι περιοχές του)

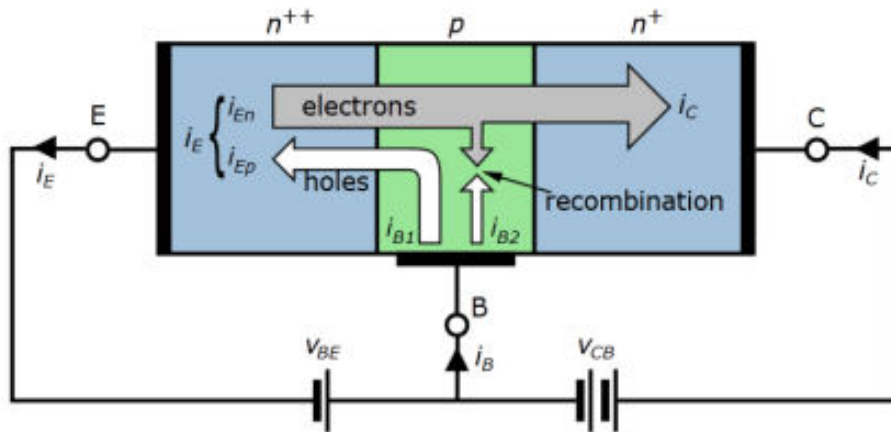
3.2.1 ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ

Το τρανζίστορ προκύπτει με τη συνένωση δύο ενώσεων διόδων και ανάλογα με την κατάσταση πόλωσης στην οποία βρίσκονται οι διόδοι προκύπτουν αντίστοιχα και οι διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του τρανζίστορ. Οι περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ είναι τρεις : η περιοχή αποκοπής , η ενεργός περιοχή και η περιοχή κορεσμού . Παρακάτω φαίνεται πίνακας με τις περιοχές λειτουργίας για τα δυο είδη τρανζίστορ.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	EBJ	CBJ
ΑΠΟΚΟΠΗΣ	Ανάστροφη	Ανάστροφη
ΕΝΕΡΓΟΣ	Ορθή	Ανάστροφη
ΚΟΡΕΣΜΟΥ	Ορθή	Ορθή

Η επαφή Βάσης-Εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, οπότε: ηλεκτρόνια (φορείς πλειονότητας στον Εκπομπό) εκχέονται στην Βάση (φορείς μειονότητας στην Βάση) και οπές (φορείς πλειονότητας στην Βάση) εκχέονται στον εκπομπό (φορείς μειονότητας στον Εκπομπό). Τα ηλεκτρόνια που εκχέονται στην Βάση (φορείς μειονότητας εκεί) από τον Εκπομπό δεν προλαβαίνουν να επανασυνδεθούν στην περιοχή της Βάσης, λόγω του χαμηλού εμπλουτισμού της και κυρίως λόγω του μικρού εύρους της. Έχουμε δει ότι στην ανάστροφα πολωμένη δίοδο οι φορείς μειονότητας σαρώνονται από την ανάστροφη τάση πόλωσης (ανάστροφο ρεύμα κορεσμού), συνεπώς θα σαρωθούν από το δυναμικό Συλλέκτη-Βάσης V_{CB} . Οι οπές που εκχέονται από την βάση στον εκπομπό δεν

συνεισφέρουν στην λειτουργία του τρανζίστορ αλλά είναι μικρό το ρεύμα τους λόγω του ότι $n_{E++} \gg p_B$. Επίσης υπάρχει ένα μικρό ρεύμα λόγω της επανασύνδεσης κάποιων ηλεκτρονίων από τον Εκπομπό στην περιοχή της Βάσης. Το I_C είναι το ρεύμα των ηλεκτρονίων που εκχέονται από τον Εκπομπό και σαρώνονται από τον Συλλέκτη και είναι ελάχιστα μικρότερο του I_E , $I_C \approx I_E$.



(Εικόνα 28 – BJT ηρη τρανζίστορ και τα ρεύματα του)

3.2.2 ΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΠΕΡΙΟΧΗ

Το ρεύμα του εκπομπού i_E προκύπτει από την μεταφορά (έγχυση) ηλεκτρονίων από το E προς την B και από την έγχυση οπών από το B στο E. Συνήθως ο εκπομπός κατασκευάζεται ώστε να έχει υψηλό επίπεδο νόθευσης σε αντίθεση με την βάση οπότε το ρεύμα των ηλεκτρονίων είναι πολύ σημαντικό. Εξαιτίας της κατανομής των φορέων τα ηλεκτρόνια που εγχέονται στην βάση, διαχέονται διαμέσου της περιοχής της βάσης προς το συλλέκτη. Το ρεύμα της βάσης αποτελείται από οπές που εγχέονται από το B στο E και από ένα μικρό αριθμό οπών που αντικαθιστούν τις οπές που επανασυνδέθηκαν στη βάση. Το ρεύμα συλλέκτη οφείλεται στην διάχυση των ηλεκτρονίων του εκπομπού διαμέσου της βάσης. Οι εξισώσεις για τα ρεύματα είναι οι εξής

$$i_C = I_S \exp (V_{BE}/V_T)$$

$$i_B = i_C/\beta = (I_S/\beta) \exp (V_{BE}/V_T)$$

$$i_E = i_C + i_B = (\beta + 1) i_B = ((I_S (\beta + 1))/\beta) \exp (V_{BE}/V_T)$$

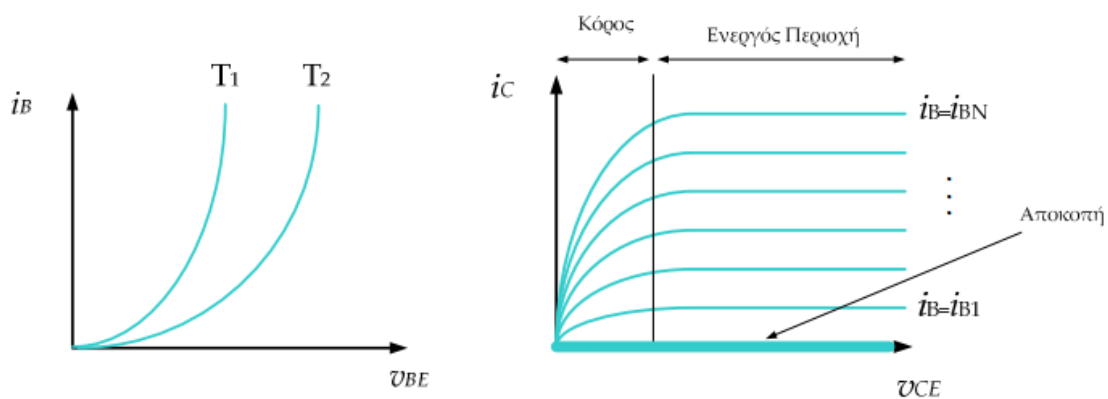
Το β είναι μια σταθερά που ονομάζεται «κέρδος ρεύματος κοινού εκπομπού». Είναι της τάξης του 100-200 αλλά μπορεί να φτάσει και το 1000. Αν ορίσουμε το «κέρδος ρεύματος κοινής βάσης», α , ως

$$\alpha = \beta / (\beta + 1) \approx 1$$

Τότε θα έχουμε για το ρεύμα του συλλέκτη:

$$i_C = \alpha i_E$$

3.3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ



(Εικόνα 29 – Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V BJT τρανζίστορ)

Για κάθε τρανζίστορ μπορούμε να χαράξουμε τις χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου. Οι πρώτες περιγράφουν την μεταβολή του ρεύματος βάση i_B με την διαφορά δυναμικού v_{BE} . Στην ουσία το ρεύμα i_B εξαρτάται μόνο από το v_{BE} και μοιάζει με την χαρακτηριστική μίας διόδου. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία, η χαρακτηριστική εισόδου μετακινείται προς τα δεξιά (περίπου 2mV/1 oC). Οι χαρακτηριστικές εξόδου περιγράφουν την εξάρτηση του ρεύματος συλλέκτη i_C από την διαφορά δυναμικού v_{CE} και το ρεύμα i_B . Όταν και οι δύο επαφές είναι ορθά πολωμένες η $v_{CE} = v_{CB} + v_{BE}$ έχει μία μικρή τιμή της τάξης των $V_{CE,sat} = +0.2V$. Αυτή οφείλεται στο ότι η BE έχει μικρότερη τάση κατωφλίου από την CB εξαιτίας του γεγονότος πως ο E είναι πιο νοθευμένος από τον C. Στην περιοχή όπου $v_{CE} < V_{CE,sat}$ το τρανζίστορ βρίσκεται στον κόρο και το ρεύμα μεταβάλλεται έντονα με την διαφορά δυναμικού v_{CE} . Αντίθετα στην περιοχή όπου $v_{CE} > V_{CE,sat}$ (ενεργός περιοχή, οπότε η BE είναι ορθά πολωμένη ενώ η CB είναι ανάστροφα), το ρεύμα δεν μεταβάλλεται σημαντικά με το v_{CE} . Τέλος για $i_B = 0$ το τρανζίστορ βρίσκεται στην αποκοπή οπότε και $i_C = 0$.

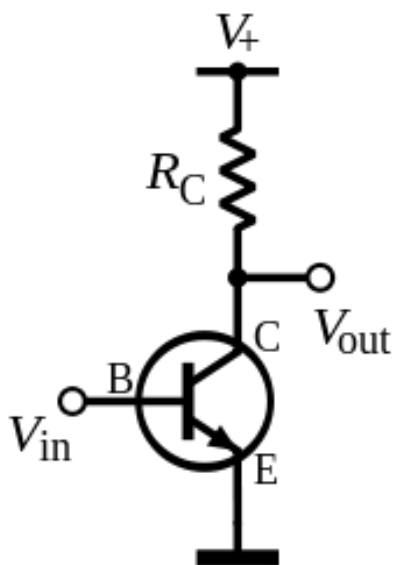
3.3.4 BJT ΩΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτής ρεύματος ή τάσης. Οι παράμετροι α και β χαρακτηρίζουν το κέρδος ρεύματος για το BJT. Αυτό το κέρδος επιτρέπει στο BJT να χρησιμοποιηθεί και σαν ηλεκτρονικός ενισχυτής. Οι τρεις κύριες τοπολογίες ενισχυτή BJT είναι Κοινού Εκπομπού (CE), Κοινής Βάσης (CB) και Κοινού Συλλέκτη (CC).

3.3.5 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ (CE)

Ο ενισχυτής κοινού εκπομπού είναι μία από τις τρεις βασικές ενός σταδίου τοπολογίες ενισχυτών BJT και συνήθως χρησιμοποιείται ως ενισχυτής τάσης.

Στο κύκλωμα αυτό το άκρο της βάσης του τρανζίστορ χρησιμεύει ως είσοδος, ο συλλέκτης είναι η έξοδος και ο εκπομπός είναι κοινός και για τα δύο (για παράδειγμα, μπορεί να συνδέεται με τη γείωση ή με ένα τροφοδοτικό), εξ ου και το όνομα του (Εικόνα 30).



(Εικόνα 30 – BJT τρανζίστορ κοινού εκπομπού)

Εκφυλισμός Πομπού

Οι CE δίνουν στον ενισχυτή μια ανεστραμμένη έξοδος και μπορεί να έχουν ένα πολύ υψηλό κέρδος που μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τρανζίστορ σε τρανζίστορ. Το κέρδος είναι μια

ισχυρή συνάρτηση της τρέχουσας θερμοκρασίας και του ρεύματος πόλωσης, και έτσι το πραγματικό κέρδος είναι κάπως απρόβλεπτο. Η σταθερότητα είναι ένα άλλο πρόβλημα που σχετίζεται με τέτοια κυκλώματα υψηλού κέρδους λόγω της ακούσιας θετικής ανάδρασης που μπορεί να παρουσιαστούν.

Άλλα προβλήματα που συνδέονται με το κύκλωμα είναι το χαμηλής εισόδου δυναμικό εύρος που προκύπτει από το όριο μικρού σήματος. Υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου αυτού και το τρανζίστορ παύει να συμπεριφέρεται σαν μοντέλο μικρού σήματος. Ένας τρόπος για την αποφυγή αυτών των ζητημάτων είναι με τη χρήση της αρνητικής ανάδρασης, το οποίο είναι συνήθως υλοποιείται με εκφυλισμού εκπομπού. Ο εκφυλισμός του εκπομπού είναι η προσθήκη μιας μικρής αντίστασης (ή οποιασδήποτε σύνθετης αντίστασης) μεταξύ του πομπού και της πηγής κοινού σήματος (π.χ., το έδαφος ή μία τροφοδοσία ρεύματος). Η αντίσταση R_E μειώνει τη συνολική διαγωγιμότητα $G_m = g_m$ του κυκλώματος με έναν παράγοντα $g_m R_E + 1$, το οποίο κάνει το κέρδος τάσης

Το κέρδος τάσης εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την αναλογία των αντιστάσεων R_C/R_E όπως φαίνεται και στον πίνακα παρακάτω, και σχεδόν καθόλου από τα ενδογενή χαρακτηριστικά του τρανζίστορ. Άρα τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης και σταθερότητας του κυκλώματος βελτιώνονται με κόστος τη μείωση του κέρδους.

Σε χαμηλές συχνότητες και χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο πι-υβριδικό μοντέλο, προκύπτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

	ΟΡΙΣΜΟΣ	ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ(ΜΕ ΕΚΦΥΛΙΣΜΟ ΕΚΠΟΜΠΟΥ)	ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ(ΧΩΡΙΣ ΕΚΦΥΛΙΣΜΟ ΕΚΠΟΜΠΟΥ, $R_E = 0$)
ΚΕΡΔΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	$A_i = i_{out}/i_{in}$	β	β
ΚΕΡΔΟΣ ΤΑΣΗΣ	$A_v = v_{out}/v_{in}$	$-\beta R_C R_\pi + (\beta + 1) R_E$	$\approx -g_m R_C$
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ	$r_{in} = v_{in}/i_{in}$	$R_\pi + (\beta + 1) R_E$	r_π
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	$r_{out} = v_{out}/i_{out}$	R_C	R_C

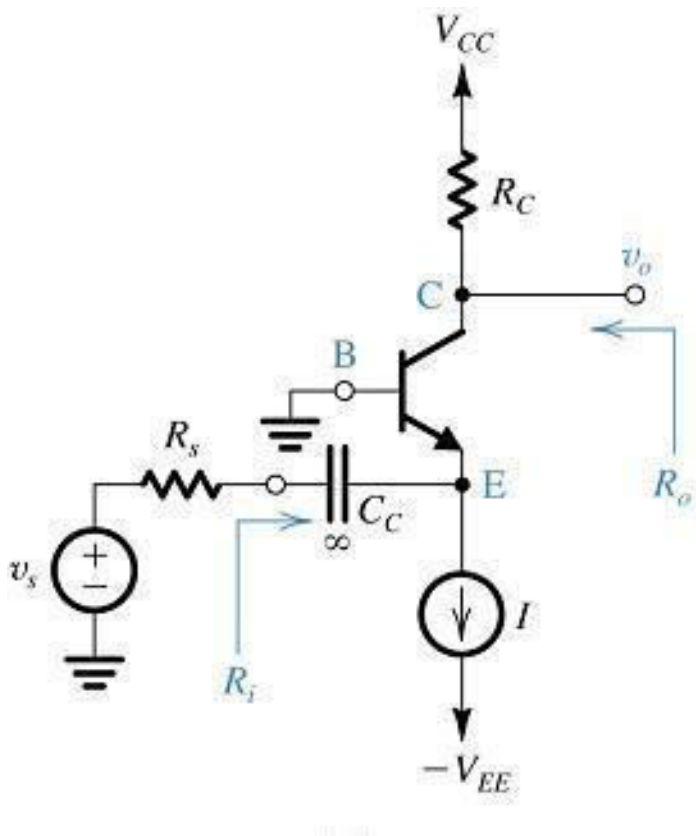
Αν ο εκφυλισμός εκπομπού δεν συμβαίνει τότε $R_E = 0 \Omega$ και οι παραστάσεις παίρνουν την μορφή της δεξιάς στήλης (το κέρδος τάσης είναι ιδανική τιμή, το πραγματικό κέρδος είναι απρόβλεπτο). Όπως περιμέναμε, όταν το R_E αυξάνεται, η αντίσταση εισόδου αυξάνεται και το κέρδος τάσης μειώνεται.

3.3.6 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΚΟΙΝΗΣ ΒΑΣΗΣ (CB)

Η δεύτερη βασική τοπολογία τρανζίστορ BJT είναι αυτή της κοινής βάσης και συνηθως χρησιμοποιείται ως ρυθμιστής ρεύματος ή ενισχυτής τάσης. Σε αυτό το κύκλωμα το άκρο του εκπομπού λειτουργεί ως είσοδος, ο συλλέκτης ως έξοδος και η βάση είναι γειωμένη, όπως φαίνεται στο σχήμα (εικόνα 29).

Η διάταξη αυτή δεν είναι πολύ συνήθης σε διακριτά κυκλώματα χαμηλής συχνότητας, όπου συνήθως χρησιμοποιείται για τους ενισχυτές που απαιτούν μια πολύ χαμηλή αντίσταση εισόδου, για παράδειγμα ως προ-ενισχυτής μικροφώνων. Ωστόσο, είναι δημοφιλής σε ολοκληρωμένα κυκλώματα και ενισχυτές υψηλής συχνότητας, όπως σε VHF και σε UHF, λόγω της χωρητικότητας εισόδου του που δεν υποβαθμίζει την διαμόρφωση του εύρους ζώνης του κοινού εκπομπού, και λόγω της υψηλής απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου. Αυτή η υψηλή απομόνωση σημαίνει ότι υπάρχει μικρή ανάδραση από την έξοδο πίσω προς την είσοδο, οδηγώντας σε υψηλή σταθερότητα.

Αυτή η διαμόρφωση είναι επίσης χρήσιμη ως ενισχυτής ρεύματος μοναδιαίου κέρδους ή απομονωτής ρεύματος: λαμβάνει ως είσοδο ένα σήμα ρεύματος σε μικρή αντίσταση εισόδου και αποδίδει σχεδόν ίσο ρεύμα σε πολύ υψηλή αντίσταση εξόδου, στο συλλέκτη.



(Εικόνα 31 – BJT τρανζίστορ κοινής βάσης)

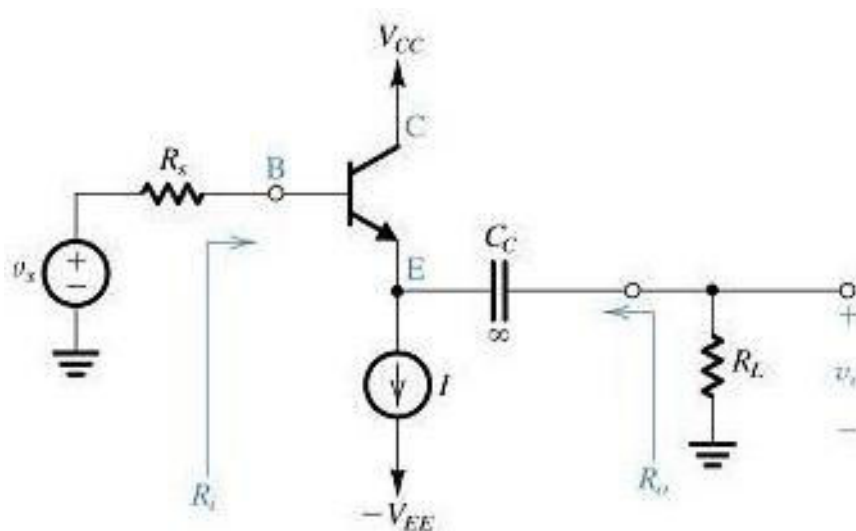
Χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο πι-υβριδικό μοντέλο, προκύπτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

	ΟΡΙΣΜΟΣ	ΕΚΦΡΑΣΗ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΚΕΡΔΟΣ ΤΑΣΗΣ	$A_u = u_0/u_1 \mid R_L=\infty$	$g_m R_C$	$r_o \gg R_C$
ΚΕΡΔΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	$A_i = i_0/i_1 \mid R_L=0$	1	$\beta \gg 1$
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ	$R_{in} = u_i/i_i$	$R_e (\approx 1/g_m)$	$r_o \gg R_C \parallel R_L$ ($\beta \gg 1$)
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	$R_{out} = -u_0/i_0 \mid u_s=0$	$R_C \parallel r_o$ $R_C \parallel [r_o(1 + g_m(r_\pi \parallel R_s))]$	$R_s \ll r_E$ $R_s \gg r_E$

3.3.7 Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΚΟΙΝΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ (CC)

Πρόκειται για την τρίτη τοπολογία τρανζίστορ BJT. Ο ενισχυτής κοινού συλλέκτη είναι χρήσιμος ως απομονωτής τάσης. Στο κύκλωμα αυτό ο ακροδέκτης της βάσης του τρανζίστορ χρησιμοποιείται ως είσοδος, ο εκπομπός είναι η έξοδος και ο συλλέκτης είναι κοινός και για τους δύο (πχ μπορεί να είναι συνδεδεμένος με πηγή ρεύματος ή γειωμένος).

Ο ενισχυτής κοινού συλλέκτη κάνει ενίσχυση ρεύματος αλλά όχι ενίσχυση τάσης και η διαφορά δυναμικού στην έξοδο παρουσιάζεται σε φάση με τη διαφορά δυναμικού στην είσοδο. Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή είναι πολύ μεγάλη, ενώ η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή. Έτσι ο ενισχυτής κοινού συλλέκτη αποτελεί συχνά βαθμίδα προσαρμογής ενός φορτίου με μικρή αντίσταση σε ενισχυτή με μεγάλη αντίσταση εξόδου.



(Εικόνα 32 – BJT τρανζίστορ κοινού συλλέκτη)

	ΟΡΙΣΜΟΣ	ΕΚΦΡΑΣΗ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΚΕΡΔΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	$A_i = i_{out}/i_{in}$	$\approx \beta_0$	$\beta_0 \gg 1$
ΚΕΡΔΟΣ ΤΑΣΗΣ	$A_v = v_{out}/v_{in}$	≈ 1	$g_m R_E \gg 1$
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ	$r_{in} = v_{in}/i_{in}$	$\approx \beta_0 R_E$	$(g_m R_E \gg 1) \cap (\beta_0 \gg 1)$

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	$r_{out} = V_{out}/i_{out}$	$\approx (1/g_m) + R_{source}/\beta_0$	$(\beta_0 \gg 1)$ $(r_{in} \gg R_{source})$	$\cap$
---------------------	-----------------------------	--	--	--------

Όπου R_{source} : η αντίστοιχη αντίσταση πηγής κατά Thévenin

3.3 ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

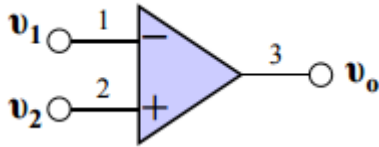
Οι τελεστικοί ενισχυτές αποτελούν ένα εξαιρετικά σημαντικό δομικό στοιχείο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια, με τις πρώτες τους εφαρμογές να βρίσκονται στους τομείς των αναλογικών υπολογιστών και των οργάνων μέτρησης και κατασκευάστηκαν με διακριτά στοιχεία πχ λυχνίες κενού ενώ το κόστος τους ήταν αρκετά υψηλό. Στα μέσα της δεκαετίας το 60 κατασκευάστηκε ο πρώτος τελεστικός ενισχυτής σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος. Αποτελούνταν δηλαδή από έναν μεγάλο αριθμό τρανζίστορ και αντιστάσεων όλα στο ίδιο τσιπ πυριτίου. Οι μηχανικοί άρχισαν να χρησιμοποιούν κατά κόρον τελεστικούς ενισχυτές και έτσι η τιμή τους μειώθηκε. Σε διάστημα λίγων ετών παρουσιάστηκαν στην αγορά τελεστικοί ενισχυτές υψηλής ποιότητας σε εξαιρετικά χαμηλές τιμές.

Ένας από τους λόγους στους οποίους οφείλεται η μεγάλη δημοτικότητα του τελεστικού ενισχυτή είναι η ευελιξία του. Εξίσου σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι τα ολοκληρωμένα των τελεστικών ενισχυτών έχουν χαρακτηριστικά τα οποία προσεγγίζουν αυτά του θεωρούμενου ιδανικού τελεστικού ενισχυτή. Αυτό σημαίνει ότι είναι αρκετά εύκολη η σχεδίαση κυκλωμάτων χρησιμοποιώντας ως δομική μονάδα τον ολοκληρωμένο τελεστικό ενισχυτή. Επιπλέον, τα κυκλώματα που υλοποιούνται με τελεστικούς ενισχυτές λειτουργούν σε επίπεδα απόδοσης πολύ κοντά στη προβλεπόμενη.



(Εικόνα 33 – Τελεστικός ενισχυτής)

3.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΛΕΣΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ



(Εικόνα 34 – Ακροδέκτες τελεστικού ενισχυτή)

Ο Τ.Ε είναι σχεδιασμένος ώστε να αντιλαμβάνεται τη διαφορά μεταξύ των σημάτων τάσης που εφαρμόζονται στους δύο ακροδέκτες εισόδου του -δηλαδή το μέγεθος $(u_2 - u_1)$ - να πολλαπλασιάζει αυτή τη διαφορά με ένα συντελεστή (κέρδος) A και να εμφανίζει την διαφορά δυναμικού που προκύπτει, $A(u_2 - u_1)$ σε έναν ακροδέκτη εξόδου.

Οι τελεστικοί ενισχυτές δεν επιτρέπουν η είσοδός τους (ακροδέκτης 1 και 2) να τραβάει πολύ ρεύμα. Δηλαδή η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγάλη. Αντίθετα οι Τ.Ε θέλουν η διαφορά δυναμικού μεταξύ της εξόδου τους (ακροδέκτης 3) και της γείωσης να είναι περίπου ίση με $A(u_2 - u_1)$, άρα η σύνθετη αντίσταση εξόδου του πρέπει να είναι πολύ μικρή.

Ο ακροδέκτης 1 ονομάζεται αναστρέφων ακροδέκτης εισόδου και επισημαίνεται με το πρόσημο (-), ενώ ο ακροδέκτης 2 ονομάζεται μη αναστρέφων ακροδέκτης εισόδου και επισημαίνεται με το πρόσημο (+). Γενικά ο τελεστικός ενισχυτής ανταποκρίνεται μόνο στο σήμα διαφοράς $u_2 - u_1$ (διαφορικό σήμα εισόδου) και αγνοεί οποιοδήποτε σήμα είναι κοινό και στις δύο εισόδους. Αυτή η ιδιότητα αποκαλείται απόρριψη κοινού σήματος. Ο Τ.Ε είναι ενισχυτής διαφορικής εισόδου - μονής εξόδου. Το κέρδος A ονομάζεται διαφορικό κέρδος η κέρδος ανοιχτού βρόχου.

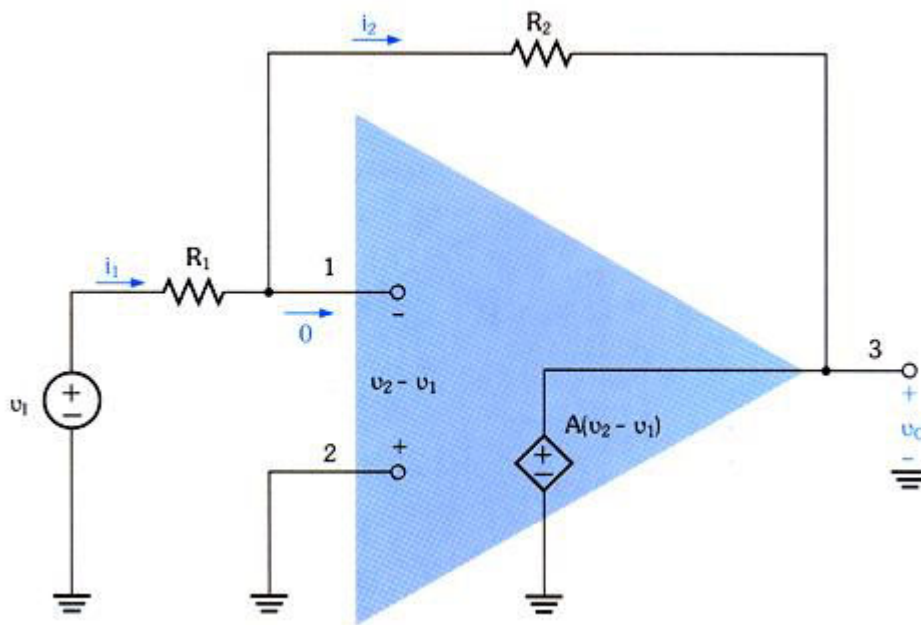
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των Τ.Ε είναι ότι αποτελούν στοιχεία άμεσης ζεύξης, για το λόγο αυτό αποκαλούνται επίσης ενισχυτές dc, όπου dc είναι ακρωνύμιο του direct coupled. Το γεγονός ότι Τ.Ε είναι ενισχυτές άμεσης ζεύξης επιτρέπει τη χρήση τους σε πολλές εφαρμογές ενώ ταυτόχρονα μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα.

Υπάρχει δυνατότητα του σήματος της εξόδου του ενισχυτή να παρακολουθεί τις μεταβολές του σήματος εισόδου καθώς και να παραμορφώνεται το σήμα εξόδου όταν η συχνότητα του σήματος εισόδου ξεπεράσει ένα όριο. Οι Τ.Ε χρειάζεται συμμετρική τροφοδοσία από $\pm 9\text{ V}$ μέχρι $\pm 15\text{ V}$. Οι Τ.Ε δεν χρησιμοποιούνται μόνοι τους, αλλά συνδέονται σε παθητικά στοιχεία, σχηματίζοντας ένα κύκλωμα ανάδρασης. Υπάρχουν δύο βασικές συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούν έναν

τελεστικό ενισχυτή και δύο αντιστάσεις : η αναστρέφουσα και η μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία.

3.3.2 ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΣΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

Στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία το σήμα εισόδου u_1 εφαρμόζεται στον ακροδέκτη εισόδου 1 του τελεστικού. Ο δεύτερος ακροδέκτης γειώνεται. Ο βρόχος από τον ακροδέκτη 3 στον ακροδέκτη 1, μέσω της αντίστασης R_2 προκαλεί αρνητική ανάδραση στο σύστημα καθώς ο ακροδέκτης 1 και η αρνητική είσοδος του τελεστικού. Το κέρδος κλειστού βρόχου G ορίζεται ως $G = U_0/U_1$.



(Εικόνα 35 –Το κύκλωμα ενός τελεστικού ενισχυτή αναστρέφουσας συνδεσμολογίας)

Ισχύει $u_2 - u_1 = u_0 / A$ και ο λόγος αυτός είναι περίπου ίσος με το μηδέν. Συνεπώς η διαφορά δυναμικού u_2 είναι περίπου ίση με την διαφορά δυναμικού u_1 . Αυτό ονομάζεται φαινομενικό ή τεχνητό βραχυκύκλωμα. Το ρεύμα i_1 που διατρέχει την R_1 είναι :

$$i_1 = u_1 - u_1 / R_1 = u_1 / R_1$$

και το ρεύμα αυτό οδηγείται μέσα από την αντίσταση R_2 προς τον ακροδέκτη 3. Αν εφαρμοστεί ο νόμος του Ohm στην R_2 τότε έχουμε :

$$u_0 = u_1 - i_1 R_2 = 0 - (u_1 / R_1) R_2$$

δηλαδή το κέρδος κλειστού βρόγχου υπολογίζεται ίσο με :

$$u_0 / u_1 = - R_2 / R_1$$

Αν το κέρδος A είναι πεπερασμένο, και καθώς $u_2 = 0$, συνεπάγεται ότι η διαφορά τάσης μεταξύ των ακροδεκτών 1 και 2 πρέπει να είναι :

$$u_2 - u_1 = u_0 / A \Rightarrow u_1 = -u_0 / A$$

$$i_1 = (u_1 - (-u_0 / A)) / R_1 = (u_1 + u_0 / A) / R_1$$

Συνεπώς:
$$u_0 = - u_0 / A - i_1 R_2 = - u_0 / A - ((u_1 + u_0 / A) / R_1) R_2$$

Ετσι :
$$G = u_0 / u_1 = - (R_2 / R_1) / 1 + (1 + R_2 / R_1) / A$$

Όταν $A \rightarrow \infty$ τότε $G = - R_2 / R_1$.

Για να ελαχιστοποιήσουμε την εξάρτηση του G από το A θα πρέπει :

$$1 + R_2 / R_1 \ll A$$

Αν $A = \infty$, σε έναν ιδανικό τελεστικό ενισχυτή σε αντιστρέφουσα συνδεσμολογία, η αντίσταση εισόδου του συστήματος θα δίνεται από τη σχέση

$$R_i = u_1 / i_1 = u_1 / (u_1 / R_1) = R_1$$

Και καθώς η έξοδος u_0 της συνδεσμολογίας παίρνεται από τους ακροδέκτες μια ιδανικής πηγής τάσης $A(u_2 - u_1)$, συνεπάγεται ότι η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή κλειστού βρόγχου είναι 0.

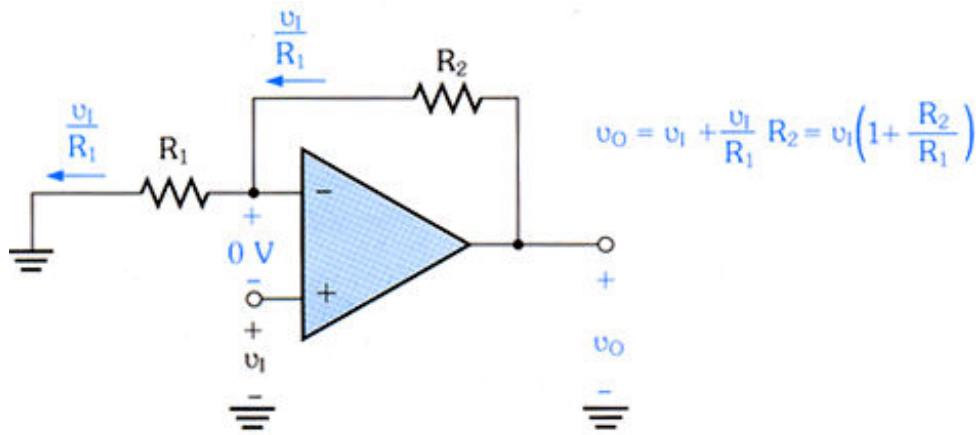
$$R_0 = 0$$

3.3.3 ΜΗ ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΣΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

Στη μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία το σήμα εισόδου u_1 εφαρμόζεται στον θετικό ακροδέκτη εισόδου 2 του τελεστικού. Ο ακροδέκτης 1 γειώνεται μέσω της αντίστασης R_1 . Ο βρόχος προκαλεί και πάλι αρνητική ανάδραση. Το κέρδος κλειστού βρόγχου ορίζεται ως

$$G = u_0 / u_1$$

Ισχύει $v_2 - v_1 = v_0 / A$ και ο λόγος αυτός είναι περίπου ίσος με το μηδέν όταν το κέρδος απειρίζεται. Η διαφορά δυναμικού στην έξοδο υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο που φαίνεται στο σχήμα :



(Εικόνα 36 –Το κύκλωμα ενός τελεστικού ενισχυτή μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας)

Εύκολα πλέον υπολογίζεται το κέρδος κλειστού βρόγχου και είναι ίσο με :

$$G = v_0 / v_1 = 1 + R_2 / R_1$$

Παρατηρούμε ότι το κέρδος της μη αναστρέφουσας σε αντίθεση με την αναστρέφουσα συνδεσμολογία, έχει θετικό πρόσημο.

Η άπειρη αντίσταση εισόδου της μη αντιστρέφουσας συνδεσμολογίας επιτρέπει τη χρήση του κυκλώματος ως απομονωτή. Έτσι θέτοντας $R_2 = 0$ και $R_1 = \infty$ έχουμε έναν ενισχυτή μοναδιαίου κέρδους, όπου η έξοδος ακολουθεί την είσοδο (ακόλουθος τάσης).

Στην περίπτωση ενός ΙΤΕ έχουμε $v_0 = v_1$, $R_1 = \infty$ και $R_2 = 0$.

4. ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ LEDs

Με την ταχεία ανάπτυξη του μοντέρνου φωτισμού, οι δίοδοι Εκπομπής Φωτός χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στη σηματοδότηση και το φωτισμό. Λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους καθώς και της υψηλής τους ενεργειακής απόδοσης, οι LEDs κυριαρχούν στις τεχνολογίες φωτισμού. Επιπλέον αυτές οι μικρές και αποδοτικές συσκευές

τείνουν να χρησιμοποιούνται τόσο στο φωτισμό όσο και στην επικοινωνία : η επικοινωνία ορατού φωτός (VLC) προσελκύει ερευνητικό ενδιαφέρον στην Ασία, την Ευρώπη και τις Η.Π.Α . Χρησιμοποιώντας LEDs ως πηγή σήματος, που κατασκευάζονται από , το διαμορφωμένο σήμα μπορεί να μεταδώσει ψηφιακά δεδομένα πέρα από την ταχύτητα αντίληψης του ανθρώπινου ματιού. Έτσι, η διπλή λειτουργικότητα των LEDs, τα καθιστά δημοφιλή στις σύγχρονες έρευνες στο τομέα των συστημάτων VLC του ελεύθερου χώρου.

Με τον όρο τηλεπικοινωνία, εννοούμε την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ 2 ή περισσότερων οντοτήτων ενώ αυτή περιλαμβάνει την χρήση της τεχνολογίας. Η τεχνολογία της επικοινωνίας χρησιμοποιεί κανάλια για την μετάδοση πληροφοριών (ως ηλεκτρικών σημάτων) είτε μέσω ενός φυσικού μέσου (όπως καλώδια σήματος) ή μέσω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες (Optical wireless communications - OWC) αποτελούν μια μορφή επικοινωνιών στην οποία χρησιμοποιείται ορατό, υπέρυθρο ή υπεριώδες καθοδηγούμενο φως για να μεταφέρει ένα σήμα. Τα συστήματα OWC που λειτουργούν στη ζώνη ορατού φωτός (390-750nm) συνήθως καλούνται επικοινωνία ορατού φωτός (Visible light communication - VLC) . Τα συστήματα VLC εκμεταλλεύονται τις διόδους εκπομπής φωτός οι οποίες μπορούν να πάλλονται με πολύ υψηλές ταχύτητες χωρίς αυτές να είναι ορατές στο φωτισμό και στο ανθρώπινο μάτι. Τα VLC χρησιμοποιούνται έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών ασύρματων δικτύων και των ασύρματων προσωπικών δικτύων. Υπάρχουν εφαρμογές του VLC που είναι πολλά υποσχόμενες και αρκετά λειτουργικές :

- Όταν ένα ορατό φως είναι στραμμένο προς μια άλλη συσκευή , μπορεί να δημιουργηθεί μια πολύ υψηλή ταχύτητα σύνδεσης που είναι ασφαλής. Αυτό ξεπερνά το πρόβλημα συνδεσιμότητας δυο συσκευών και παρέχει ένα πολύ υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από ότι το Bluetooth ή το Wi-Fi.
- Κάθε πηγή πληροφορίας ορατού φωτός μπορεί να ανιχνευθεί μοναδικά, και έτσι η η τοποθεσία οποιασδήποτε VLC συσκευής μπορεί να εντοπισθεί γρήγορα και με ασφάλεια.
- Τα έξυπνα κτίρια απαιτούν έξυπνο φωτισμό και αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της υποδομής που προσφέρει ο VLC φωτισμός. Οι συσκευές φωτισμού μπορούν να επικοινωνήσουν και αυτό θα μειώσει σημαντικά τη χρήση καλωδίων και την κατανάλωση ενέργειας στο εσωτερικό του κτιρίου.

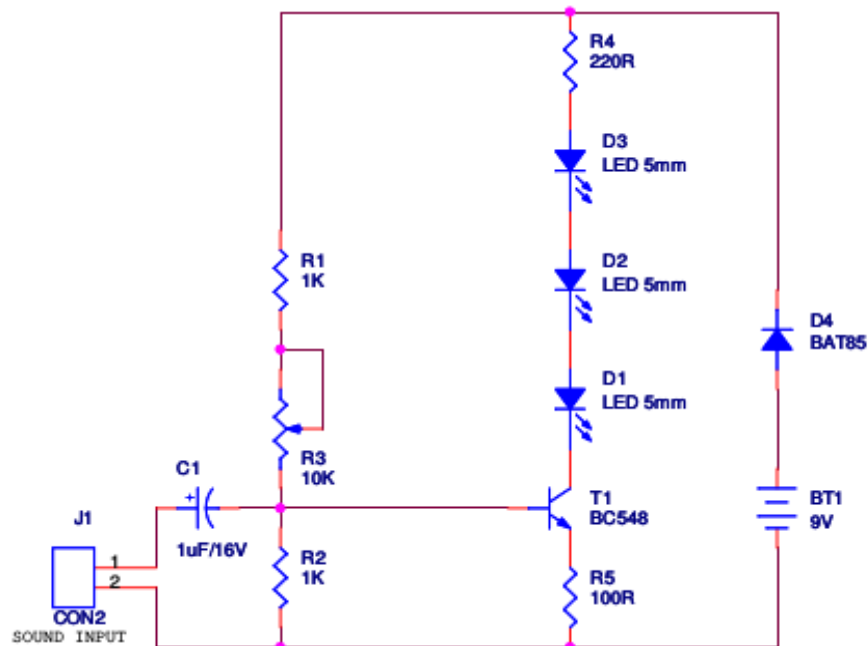
- Η επικοινωνία σε περιοχές όπου υπάρχει κίνδυνος εκρήξεων μπορεί να είναι δημιουργήσει προβλήματα (π.χ. σε ορυχεία , πετροχημικές εγκαταστάσεις , εξέδρες άντλησης πετρελαίου κ.λπ.) . Η VLC είναι από τη φύση της ασφαλής και προσφέρει τόσο ασφαλή φωτισμό όσο και επικοινωνία.
- Πολλά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν ήδη λαμπτήρες LED . Οι πινακίδες κυκλοφορίας , τα φανάρια , και οι λάμπες εμπιστεύονται τη τεχνολογίας LED και έτσι υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες ανάπτυξης εφαρμογών.
- Η δυνατότητα αποστολής δεδομένων γρήγορα και με ασφαλή τρόπο είναι το κλειδί για πολλές εφαρμογές . Το γεγονός ότι το ορατό φως δεν μπορεί να ανιχνευθεί από την άλλη πλευρά του τοίχου έχει πολλά πλεονεκτήματα ασφάλειας.
- Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα από τη χρήση του VLC σε νοσοκομεία και γενικότερα στην υγειονομική περίθαλψη . Κινητά τηλέφωνα και WiFi είναι ανεπιθύμητα σε ορισμένα τμήματα των νοσοκομείων , ειδικά γύρω από scanners MRI και σε χειρουργεία.
- Το WiFi είναι πιο γρήγορα, αλλά δεν μπορεί να ανταποκριθεί στους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων των ασύρματων επικοινωνιών . Τα VLC συστήματα μπορούν να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αρκετά πιο πού από αυτούς του WiFi και αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με χαμηλό κόστος , δεδομένου ότι τα συστατικά RF και σύστημα κεραίας δεν υπάρχουν.
- Τα ραδιοκύματα είναι ανεπιθύμητα σε θαλάμου επιβατών στις αερομεταφορές . LEDs χρησιμοποιούνται ήδη για το φωτισμό των αεροσκαφών και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθεί αντί των καλωδίων για την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων προς τους επιβάτες των . Αυτό μειώνει το κόστος κατασκευής των αεροσκαφών καθώς και το βάρος τους.

Στα πλαίσια της πειραματικής υλοποίησης του συστήματος επικοινωνίας με LEDs για τη παρούσα πτυχιακή εργασία χρειαζόμαστε έναν πομπό και έναν δέκτη. Τα δεδομένα που επιλέξαμε να μεταφέρουμε είναι σε μορφή ήχου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχηματικές

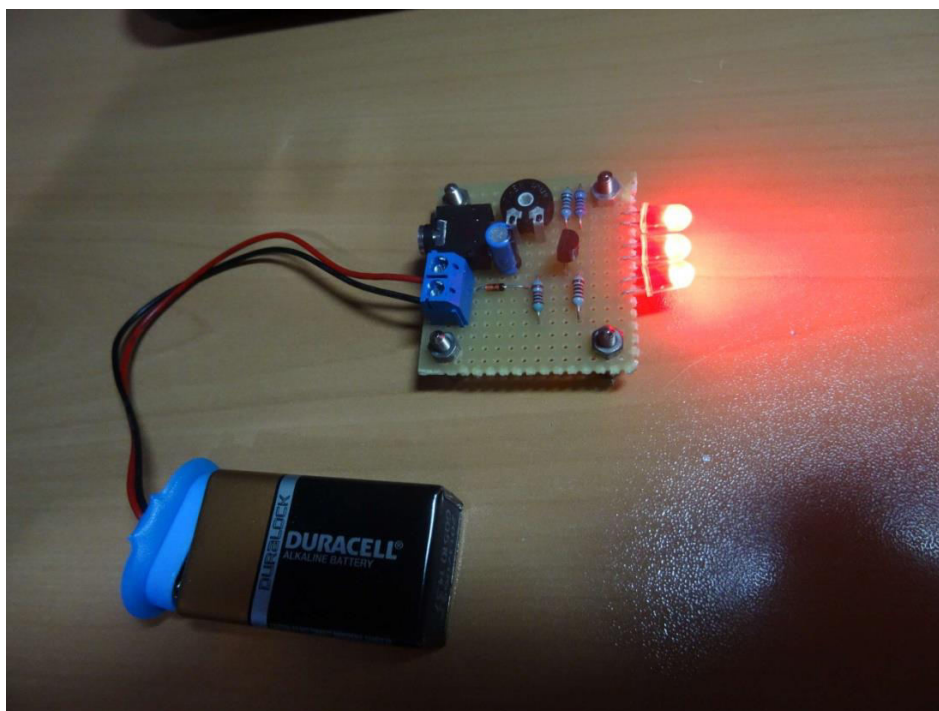
απεικονίσεις του κυκλώματος που υλοποιήθηκε, ενώ ταυτόχρονα παρατίθενται φωτογραφίες του κάθε μέρους.

4.1 ΠΟΜΠΟΣ

Μια υλοποίηση του πομπού είναι στη μορφή του παρακάτω κυκλώματος.

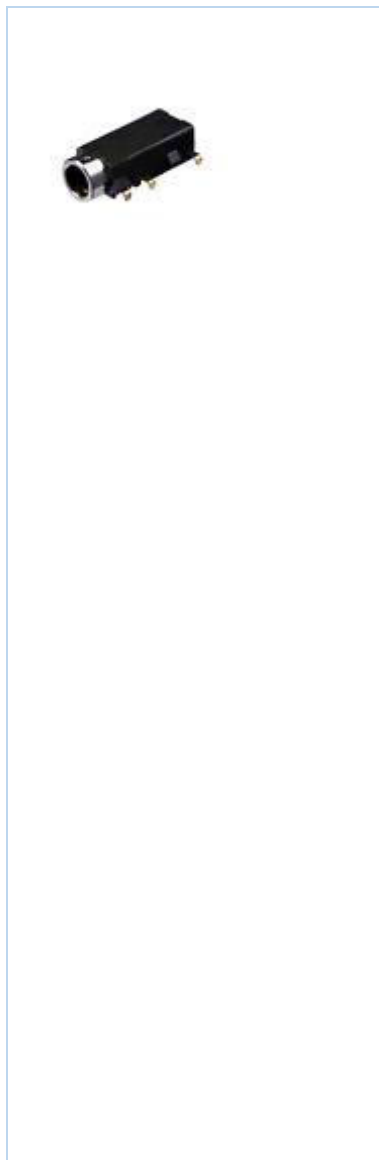


(Εικόνα 37 –Συνδεσμολογία πομπού - Δημιουργήθηκε με το AutoCAD)



(Εικόνα 38 - Πομπός)

Αυτό που κάναμε ήταν να δημιουργήσουμε ένα κύκλωμα πόλωσης με διαιρέτη τάσης και τοπολογία κοινού εκπομπού (CE). Σε αυτό το κύκλωμα η dc πηγή πόλωσης τοποθετεί το σημείο λειτουργίας περίπου στο μέσο της ευθείας φόρτου, ενώ μια ac πηγή στην είσοδο προκαλεί μικρές ταλαντώσεις στο ρεύμα και την διαφορά δυναμικού του συλλέκτη. Το κύκλωμα πόλωσης με διαιρέτη τάσης, πήρε το όνομά του από τον διαιρέτη τάσης που υπάρχει στο κύκλωμα της βάσης, ο οποίος χρησιμεύει έτσι ώστε να προκαλεί μέσω της τάσης που επικρατεί στα άκρα της αντίστασης R2, ορθή πόλωση στην επαφή βάσης-εκπομπού, αξιοποιώντας την πηγή τροφοδοσίας. Έτσι δεν απαιτείται ιδιαίτερη πόλωση στο κύκλωμα της βάσης.



Ο υποδοχέας ήχου (audio jack) χρησιμοποιείται σαν υποδοχή για σύνδεση με μια πηγή ήχου. Γενικά τα audio jacks βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά είδη ηχητικού εξοπλισμού και μουσικών οργάνων τα οποία δέχονται εξωτερικές πηγές ήχου. Στα αυτοκίνητα ή τα φορητά το audio jack, ή αλλιώς media jack (υποδοχέας πολυμέσων ή βοηθητικός υποδοχέας (AUX)) είναι ένας υποδοχέας μικρού τηλεφώνου που συνδέει οποιαδήποτε φορητή μουσική συσκευή με τους ενισχυτές και τα ηχεία του οχήματος. Η μια άκρη του καλωδίου του μικρού τηλεφώνου συνδέεται με τον υποδοχέα ακουστικών οποιασδήποτε φορητής μουσικής συσκευής, ενώ το άλλο άκρο συνδέεται στο audio jack του αυτοκινήτου. Τα iPod συνδέονται επίσης κατά αυτόν το τρόπο, αλλά υπάρχουν adaptors που έχουν σχεδιαστεί

		αποκλειστικά για τα iPods . Στο τηλεπικοινωνιακό κύκλωμα που υλοποιήθηκε, ένα καλώδιο συνδέει την έξοδο του ήχου με το κύκλωμα του πομπού μέσω ενός audio jack.
	C1:10 μ F/16V	Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολυτικός πυκνωτής μεγέθους 1 μ F, αποτελεί ένα πυκνωτή ζεύξης. Οι πυκνωτές ζεύξης συνδέονται σε σειρά με τη διαδρομή του σήματος και φιλτράρουν τη DC συνιστώσα τους. Στα αναλογικά κυκλώματα, οι πυκνωτές ζεύξης χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε ενισχυτές. Η τάση πόλωσης του τρανζίστορ είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή λειτουργία του ενισχυτή. Ο ρόλος του πυκνωτή είναι να εμποδίσει το εισερχόμενο AC σήμα να παρέμβει στη τάση πόλωσης που εφαρμόζεται στη βάση του τρανζίστορ. Η τιμή της χωρητικότητας θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει στο επιθυμητό σήμα να διαδοθεί ελεύθερα ενώ θα μπλοκάρει την DC συνιστώσα.
	R1, R2 : 1K Ω	Οι αντιστάσεις αυτές αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος πόλωσης της βάσης ενός τρανζίστορ είναι χρησιμοποιώντας έναν διαιρέτη τάσης. Ο διαιρέτης τάσης διατηρεί μια πολύ σταθερή τάση στη βάση του τρανζίστορ, και αφού το ρεύμα της βάσης είναι αρκετά μικρότερο από το ρεύμα που περνάει μέσα από το διαιρέτη, η τάση της βάσης πρακτικά

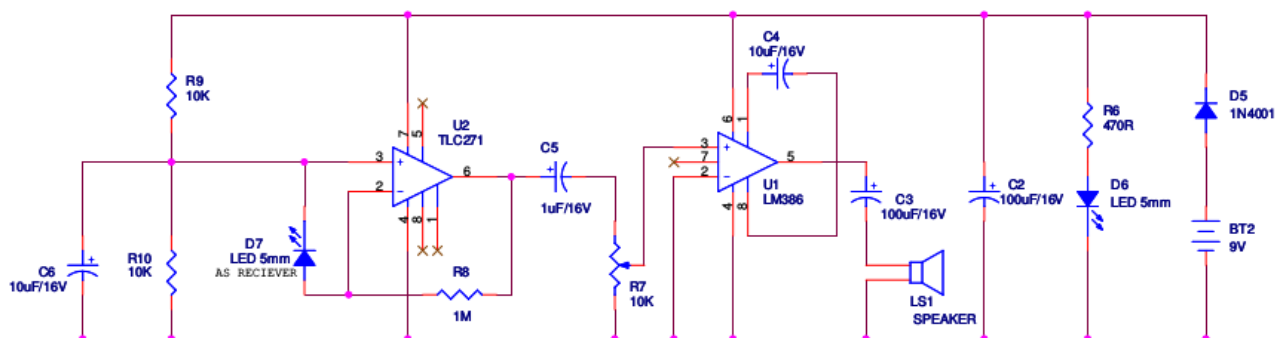
		μένει αναλλοίωτη. Λόγω του γεγονότος πως το δυναμικό στη βάση παραμένει αναλλοίωτο, η αρνητική ανάδραση λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά και έτσι οποιοδήποτε ανεπιθύμητη αύξηση της απολαβής ρεύματος δημιουργεί μια σχεδόν ίδια αρνητική ανάδραση. Συγκεκριμένα η R1 χρησιμοποιήθηκε για να ελέγξει το ρεύμα μέσα στο διαιρέτη τάσης, ενώ η R2 για να ελέγξει το δυναμικό της βάσης V_B.
	R3 : 10 KΩ	Το ποτενσιόμετρο είναι ένα παθητικό στοιχείο το οποίο αποτελείται από μία αντίσταση της οποίας τα άκρα μπορούν να μετακινηθούν. Με την βοήθεια ενός περιστροφικού επιλογέα μπορούμε να μεταβάλλουμε την αντίσταση στα άκρα της, μεταβάλλοντας στην ουσία το μήκος του αντιστάτη. Η μέγιστη αντίσταση, η οποία μπορεί να αποκτηθεί από το συγκεκριμένο ποτενσιόμετρο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, φτάνει τα 10KOhm (10^3Ohm).
	T1 : BC548B NPN BJT	Το συγκεκριμένο τρανζίστορ είναι η καρδιά του πομπού. Το BC548B είναι ένα γενικής χρήσης NPN τρανζίστορ διπολικής επαφής που συναντάται συνήθως στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της Ευρώπης. Αποτελεί μέρος μια οικογένειας NPN και PNP τρανζίστορ πυριτίου που περιλαμβάνει παραλλαγές καλύτερης ποιότητας.
	R4 : 220 Ω	Πρόκειται για την αντίσταση συλλέκτη

		ή αλλιώς αντίσταση φόρτωσης για το στάδιο ενίσχυσης τάσης CE. Διακυμάνσεις στο ρεύμα που ελέγχεται από το τρανζίστορ προκαλούν στην R4 να αναπτύξει μια τάση. Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι η έξοδος του τρανζίστορ, που κατευθύνεται στο LED.
	R5: 100 Ω	Πρόκειται για την αντίσταση εκπομπού. Η αντίσταση στον εκπομπό αυξάνει η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή με αποτέλεσμα η ενίσχυση της τάσης να είναι αρκετά ανεξάρτητη από τις παραμέτρους του τρανζίστορ και τις μεταβολές τους.
	D4 : BAT85	Η δίοδος BAT85 έχει ενσωματωμένο προστατευτικό δακτύλιο για την προστασία του 4444, εγκλείεται σε ένα ερμητικά σφραγισμένο μικρό πακέτο. Τα πλεονεκτήματά της περιλαμβάνουν το προστατευτικό δακτύλιο και την χαμηλή διαφορά δυναμικού ορθής πόλωσης. Η συγκεκριμένη δίοδος τοποθετήθηκε για προστασία της τροφοδοσίας, σε περίπτωση ανάστροφης πόλωσης της μπαταρίας.
	D1,D2,D3:led 5mm	Πρόκειται για τις LED που χρησιμοποιήσαμε, μεγέθους 5 mm, οι οποίες χρησιμοποιούν ένα κόκκινο φακό. Η κύρια διάμετρος του LED είναι 5mm, ενώ υπάρχει και ένα χείλος που τοποθετεί τη διάμετρο στα 6mm. Το χείλος είναι χρήσιμο σε περίπτωση ανάγκης στερέωσης της διόδου σε μια οπή ώστε να αποφευχθεί η πτώση.

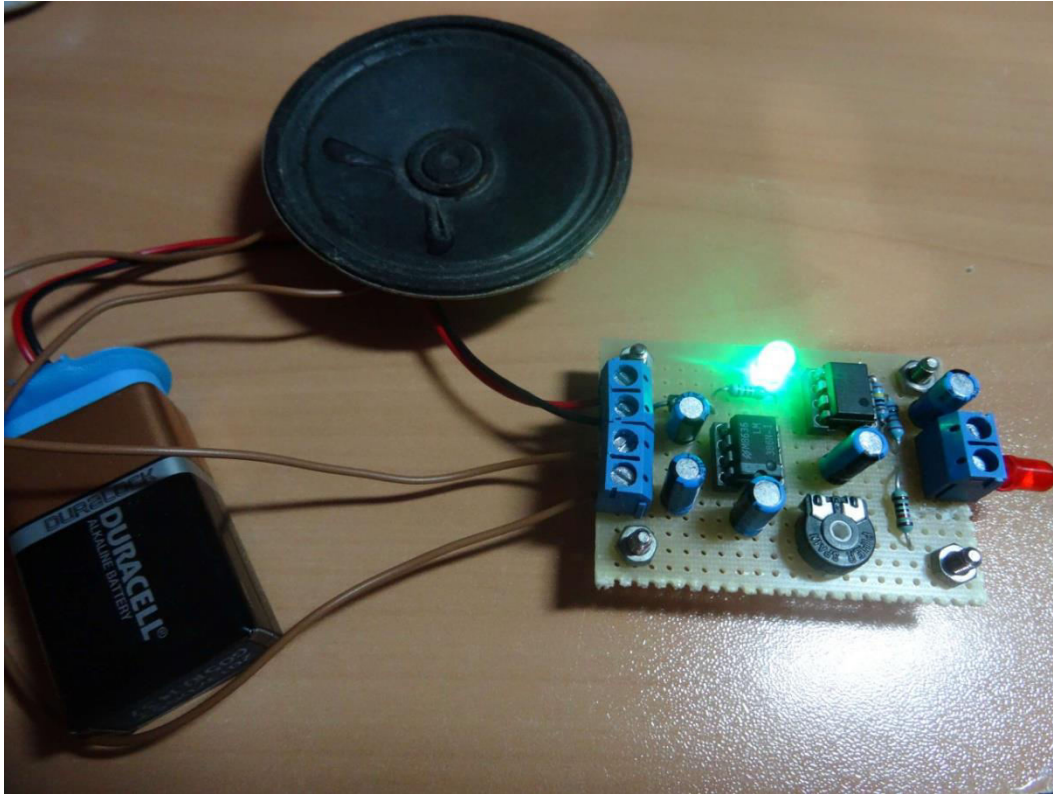
	BT1 : 9V	Η μπαταρία των 9 V, χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για τα τρανζίστορ του ραδιοφώνου. Έχει ορθογώνιο σχήμα με στρογγυλεμένες άκρες και πολωμένα βύσματα στην κορυφή. Αυτή η μπαταρία χρησιμοποιείται συνήθως στα ραδιόφωνα τσέπης, τα όπλα για το paintball καθώς και σε μικρές ηλεκτρονικές συσκευές. Έχει δύο ακροδέκτες στο ένα της άκρο. Το μικρότερο κυκλικό τερματικό είναι θετικό και το μεγαλύτερο εξαγωνικό η οχταγωνικό τερματικό είναι η αρνητική επαφή. Πρόκειται για τον τρόπο που επιλέξαμε να τροφοδοτήσουμε το κύκλωμα.
---	-----------------	---

4.2 ΔΕΚΤΗΣ

Μια υλοποίηση του δέκτη είναι στη μορφή του παρακάτω κυκλώματος.



(Εικόνα 39 - Συνδεσμολογία Δέκτη - Δημιουργήθηκε με το AutoCAD)



(Εικόνα

39

-

Δέκτης

)

	R9 ,R10 : 10K	Οι αντιστάσεις αυτές αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης, ο οποίος καθορίζει το επιθυμητό δυναμικό της βάσης. Η κάθε μια τους είναι 10KΩ.
	C6:10μF/16V	Ο πυκνωτής C3 αποτελεί ένα πυκνωτή αποκοπής.
	D7 : 5MM	Πρόκειται για τη LED που χρησιμοποιήσαμε, μεγέθους 5 mm, οι οποίες χρησιμοποιούν ένα κόκκινο

		φακό. Η κύρια διάμετρος του LED είναι 5mm. Η συγκεκριμένη χρησιμοποιείται ως δέκτης
	U2 : TLC271	Ο τελεστικός ενισχυτής TLC271 συνδυάζει ένα ευρύ φάσμα διαφοράς δυναμικού στην είσοδο με μια υψηλή αντίσταση εισόδου. Επιπροσθέτως προσφέρει τη χρήση της πόλωσης η οποία επιτρέπει στο χρήστη να διαλέξει τον καλύτερο συνδυασμό κατανάλωσης ισχύος και ac απόδοσης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία πυριτίου LinCMOSTM της εταιρίας Texas Instruments, η οποία προσφέρει σταθερότητα στη διαφορά δυναμικού που υπερβαίνει κατά πολύ τις συμβατικές μεθόδους που έχουν σα βάση το μέταλλο.
	C5:10µF/16V	Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολυτικός πυκνωτής τοποθετήθηκε μετά την έξοδο του πρώτου τελεστικού ενισχυτή και ο σκοπός του είναι να κόψει οποιαδήποτε DC συνιστώσα που μπορεί να υπάρξει

	R7 : 10K	Το ποτενσιόμετρο είναι ένα παθητικό στοιχείο το οποίο αποτελείται από μία αντίσταση της οποίας τα άκρα μπορούν να μετακινηθούν. Με την βοήθεια ενός περιστροφικού επιλογέα μπορούμε να μεταβάλλουμε την αντίσταση στα άκρα της, μεταβάλλοντας στην ουσία το μήκος του αντιστάτη. Η μέγιστη αντίσταση, η οποία μπορεί να αποκτηθεί από το συγκεκριμένο ποτενσιόμετρο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, φτάνει τα 10KOhm (10^3Ohm).
	R8 : 1M	Η αντίσταση R8 χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την αύξηση του κέρδους του ενισχυτή αφού το ρεύμα στην έξοδο είναι ανάλογο της αντίστασης αυτής όπως έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο 3.
	C4:10μF/16V	Η προσθήκη του συγκεκριμένου πυκνωτή μεγέθους 10μF έγινε με σκοπό την αύξηση του κέρδους του ενισχυτή.

	U1 : LM386	Ο LM386 είναι ένας ενισχυτής ρεύματος, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για εφαρμογές χαμηλού δυναμικού ενώ η χρήση του ήταν αρκετά διαδεδομένη σε προηγούμενα χρόνια. Το κέρδος είναι εσωτερικά ρυθμισμένο στο 20, αλλά η προσθήκη ενός πυκνωτή μεταξύ των ακροδεκτών 1 και 8 θα αυξήσει την τιμή του κέρδους από 20 σε 200. Είναι ιδανικός για λειτουργία με μπαταρία ενώ χρησιμοποιείται σε ενισχυτές AM-FM ραδιοφώνων, ενισχυτές φορητών μουσικών συσκευών αναπαραγωγής, θυροτηλέφωνα αλλά και συστήματα ήχου τηλεόρασης.
	C3:100µF/16V	Ο συγκεκριμένος πυκνωτής, μεγέθους 100µF, έχει τοποθετηθεί λίγο πριν την είσοδο του ηχείου. Ο σκοπός του είναι να αποκόψει οποιαδήποτε DC συνιστώσα υπάρχει, πριν φτάσει στο ηχείο και του δημιουργήσει πρόβλημα.
	LS1 : 8Ω 1W	Το ηχείο είναι ένας

		ηλεκτροακουστικός μετατροπέας, μια συσκευή δηλαδή που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα ήχου σε έναν ανάλογο ήχο. Ο πιο κοινός τύπος ηχείου, που έχει χρησιμοποιηθεί και στη συγκεκριμένη εφαρμογή, αποκαλείται κοινώς δυναμικό μεγάφωνο. Χρησιμοποιεί ένα ελαφρύ διάφραγμα, που συνδέεται με ένα άκαμπτο πλαίσιο μέσω ενός εύκαμπτου εναιωρήματος, που κοινώς αποκαλείται αράχνη. Το συγκεκριμένο εξάρτημα περιορίζει ένα πηνίο φωνής να κινηθεί αξονικά μέσω ενός κυλινδρικού μαγνητικού κενού. Όταν ένα ηλεκτρικό σήμα εφαρμόζεται στο πηνίο φωνής, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο και το καθιστά ένα μεταβλητό μαγνήτη. Το πηνίο και το μαγνητικό σύστημα αλληλεπιδρούν και δημιουργούν μια μηχανική δύναμη που προκαλεί το πηνίο να κινηθεί εμπρός και πίσω, με αποτέλεσμα την αναπαραγωγή του ήχου που
---	--	--

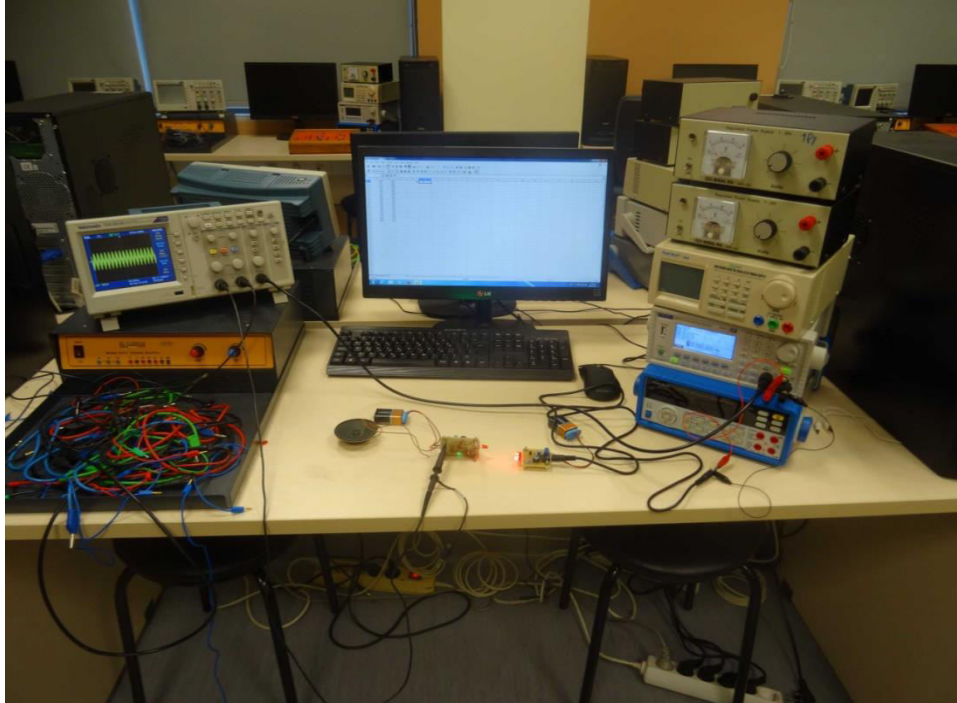
		ελέγχεται από το εισερχόμενο ηλεκτρικό σήμα.
	C2: 100μF/16V	Ο συγκεκριμένος πυκνωτής, μεγέθους 100μF, αποτρέπει το πέρασμα του σήματος στο ενδεικτικό πράσινο LED.
	R6 : 470 Ω	Η αντίσταση αυτή, μεγέθους 470 Ω, χρησιμοποιήθηκε καθαρά για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας. Η πράσινη LED που λειτουργεί σαν indicator ορθής λειτουργίας του πομπού, δεν χρειάζεται τα 9 V που φτάνουν στα άκρα της για να λειτουργήσει και με την τοποθέτηση αυτής της αντίστασης το ρεύμα που φτάνει τελικά στη LED είναι περίπου της τάξης των 12,34mA.
	D6 : Led 5mm	Η συγκεκριμένη πράσινη LED χρησιμοποιείται, ή αλλιώς ανάβει όταν το κύκλωμα του δέκτη λειτουργεί. Δηλαδή παίζει το ρόλο ενός indicator.
	D5 : 1N4001	Η διόδος BAT85 έχει ενσωματωμένο προστατευτικό δακτύλιο για την προστασία του 4444,

		εγκλείεται σε ένα ερμητικά σφραγισμένο μικρό πακέτο. Τα πλεονεκτήματά της περιλαμβάνουν το προστατευτικό δακτύλιο και την χαμηλή διαφορά δυναμικού ορθής πόλωσης. Η συγκεκριμένη δίοδος τοποθετήθηκε για προστασία της τροφοδοσίας, σε περίπτωση ανάστροφης πόλωσης της μπαταρίας.
	BT2 : 9V	Πρόκειται για τη τροφοδοσία του κυκλώματος

Τα παραπάνω υλικά κολλήθηκαν σε πλακέτες με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός πομπού και ενός δέκτη που η επικοινωνία του επιτυγχάνεται μέσω διόδων εκπομπής φωτός. Μέσω ενός καλωδίου, συνδέθηκε η έξοδος ενός υπολογιστή με τον υποδοχέα (jack) του πομπού. Ο πομπός μετατρέπει το ηχητικό σήμα σε ρεύμα μέσω του BJT και η πληροφορία μεταδίδεται μέσω φωτός. Με τη σειρά του ο δέκτης, και συγκεκριμένα η κόκκινη δίοδος εκπομπής φωτός, λαμβάνει τη πληροφορία, την ενισχύει με τη βοήθεια των προαναφερθέντων ενισχυτών και τελικά την παίρνουμε σαν έξοδο μέσω του ηχείου.

Θέλοντας ξανά να μελετήσουμε την συμπεριφορά του κυκλώματος στο πεδίο των συχνοτήτων, διεξήγαμε το εξής πείραμα με τη βοήθεια της γεννήτριας συχνοτήτων TG5011A της εταιρίας AIM-TTI INSTRUMENTS, του παλμογράφου TDS 2012C της εταιρίας Tektronix και ενός καλωδίου με 2 audio στα άκρα του. Ο πομπός και ο δέκτης συνδέθηκαν με την τροφοδοσία τους και τοποθετήθηκαν απέναντι σε απόσταση περίπου 30εκ. Το θετικό άκρο της της γεννήτριας συνδέθηκε με το θετικό μέρος του jack, ενώ το αρνητικό του μέρος (ground) συνδέθηκε με το αρνητικό άκρο της γεννήτριας. Η άλλη άκρη του καλωδίου συνδέθηκε με το socket του πομπού, όπως συνδέεται δηλαδή όταν θέλουμε να μεταδώσουμε τον ήχο. Το probe του καναλιού 1 του

παλμογράφου συνδέθηκε με . Επιπλέον το κανάλι trigger του παλμογράφου συνδέθηκε μέσω ενός καλωδίου BNC με τη γεννήτρια συχνοτήτων. Ακολουθεί φωτογραφία της συνδεσμολογίας που χρησιμοποιήθηκε.



(Εικόνα 40 - Συνδεσμολογία για τη μέτρηση της απόκρισης συχνότητας του συστήματος)

Για διάφορες τιμές συχνότητας πήραμε τις αντίστοιχες τιμές διαφοράς δυναμικού από το κανάλι 1 του παλμογράφου και έτσι προέκυψε η παρακάτω χαρακτηριστική καμπύλη μεταφοράς. Ξανά με τη μέγιστη τιμή διαφοράς δυναμικού διαιρέθηκαν όλες οι υπόλοιπες τιμές με σκοπό η καμπύλη να ξεκινάει από τη μονάδα. Επίσης ο οριζόντιος άξονας, δηλαδή ο άξονας V είναι λογαριθμικός.



(Εικόνα 41 - Χαρακτηριστική Συνάρτηση Μεταφοράς - Δημιουργήθηκε με το Libre Office Calc)

Υπολογίσαμε ξανά τη τιμή του σημείου αποκοπής συχνότητας $-3 \text{ dB } f_H$. Αφού συμβουλευτήκαμε τις μετρήσεις μας προέκυψε το παρακάτω αποτέλεσμα.

$$f_{-3\text{dB}} (\text{σύστημα LED-to-LED}) = 93000 \text{ HZ} = 93 \text{ KHZ}$$

Κατασκευάστηκε λοιπόν ένα κύκλωμα επικοινωνίας LED-to-LED, το οποίο μετέφερε ήχο. Ο πομπός κατασκευάστηκε με τη χρήση ενός ενισχυτή BJT και ο δέκτης με τη χρήση 2 τελεστικών ενισχυτών εκ των οποίων ο ένα είναι ενισχυτής ήχου. Από την παρατήρηση της συχνотικής συμπεριφοράς της κόκκινης LED στο κεφάλαιο 2, είδαμε πως η συχνότητα αποκοπής της αγγίζει τα 1.15 MHz ενώ το σύστημα έχει συχνότητα αποκοπής τα 93KHZ. Η διαφορά στις συχνότητες αποκοπής προέκυψε κυρίως από τη χρήση του ενισχυτή ήχου ο οποίος έχει περιορισμένο εύρος συχνοτήτων.

5.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύθηκε, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα σύστημα επικοινωνίας LED-to-LED. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφηκε αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας των διόδων καθώς και τα χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου τύπου διόδου, η δίοδος εκπομπής

φωτός. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 2, παρατέθηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν στο πλαίσιο ανεύρεσης της καταλληλότερης LED για το σύστημα επικοινωνίας. Φυσικά δεν θα μπορούσε να παραλειφθεί η εκτεταμένη ανάλυση ενισχυτών, όπως και έγινε στο κεφάλαιο 3, και συγκεκριμένα των ενισχυτών που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα. Στο κεφάλαιο 4 αναλύθηκε ο τρόπος κατασκευής και περιγράφηκε το σύστημα που τελικά κατασκευάστηκε.

Αυτό που τελικά επιτεύχθηκε ήταν η ασύρματη μεταφορά δεδομένων, και συγκεκριμένα ήχου, με τη χρήση διόδων εκπομπής φωτός σαν πομπούς και δέκτες. Το τελικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει σε μέγιστη απόσταση 50 εκατοστών και τρόποι βελτίωσής της ποιότητας του ήχου αλλά και του ίδιου του συστήματος για μεταφορά άλλου είδους πληροφορίας αποτελούν η χρήση μεγαλύτερης χωρητικότητας πυκνωτή στη θέση του πυκνωτή C3 με σκοπό την αποκοπή DC συνιστωσών, η χρήση κατευθυντήριων φακών με σκοπό την αποφυγή διάχυσης του φωτός στο χώρο, με τη χρήση περισσότερων LED στο πομπό και τέλος με τη χρήση ενισχυτών που θα προσφέρουν περισσότερο κέρδος.

Αυτό που τελικά κατασκευάστηκε επιτρέπει την επικοινωνία με τη χρήση του ορατού φωτός. Ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να βρει εφαρμογή στην επικοινωνία οχημάτων με απώτερο σκοπό την ασφάλεια επιβατών και πεζών. Το μέγεθος, η ταχύτητα αλλά και οι δράσεις ενός αμαξιού κατά τη διάρκεια της πορείας του αποτελούν πληροφορίες που θα μπορούσαν να σταλθούν στα αυτοκίνητα γύρω του και αυτά με τη σειρά τους να υπολογίσουν την ακριβή τοποθεσία του αμαξιού και να είναι ενημερωμένα για την συμπεριφορά και τις κινήσεις του. Τέτοιου είδους συστήματα θα μπορούσαν να προειδοποιήσουν για επικείμενη πρόσκρουση, να βοηθήσουν στην εξαγωγή γνώμης για το πόσο εύκολη είναι η αλλαγή λωρίδας τη συγκεκριμένη στιγμή, αλλά και να βοηθήσουν στο συντονισμό ενός συνεργαζόμενου ελέγχου πορείας όπου τα αυτοκίνητα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και έτσι να ανταποκρίνονται γρήγορα στις επικείμενες αλλαγές στη ροή της κυκλοφορίας.

Με τη μεγάλη διάρκεια ζωής και την ενεργειακή αποδοτικότητα του προϊόντος, η ανάπτυξη LED που εκπέμπουν λευκό φως κατέστη δυνατή μετά την ανακάλυψη του μπλε LED από του Ιάπωνες ερευνητές, και, όπως είναι γνωστό, LED έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ενώ οι LED συνεχίζουν να εξαπλώνονται ραγδαία σε τομείς όπως ο φωτισμός για γραφεία και τα σπίτια, ο οπίσθιος φωτισμός για προσωπικούς υπολογιστές, και οι πινακίδες και τα φανάρια σε όλη την πόλη, μια πρόσφατα αναπτυγμένη τεχνολογία, όπως η επικοινωνία υψηλής χωρητικότητας

, οι αισθητήρες αποφυγής κινδύνου, καθώς και οι μηχανισμοί που σκοπό έχουν την παράταση ζωής του προϊόντος , χωρίς να απειλείται η φωτεινότητα , φέρνει την καινοτομία στην καθημερινή μας ζωή και έχει φτάσει στο σημείο όπου οι νέες εξελίξεις βρίσκουν εφαρμογή, η μια μετά την άλλη.

Η εταιρία Okinawa Prefecture, που βρίσκεται στη πόλη Naha της Ιαπωνίας, έχει αναπτύξει ένα σύστημα επικοινωνιών, το οποίο μπορεί να επικοινωνεί πληροφορίες μεγάλου όγκου σε πολύ υψηλές ταχύτητες, χρησιμοποιώντας LED φωτισμό, όπως τα φώτα του δρόμου. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί την επικοινωνία ορατού φωτός (VLC), όπου ο εναέριος χώρος είναι το κανάλι και η πληροφορίες μεταβιβάζονται μέσω του ορατού φωτός, σε αντίθεση με τις συμβατικές οπτικές επικοινωνίες που χρησιμοποιούν ως μέσο την οπτική ίνα. Το φως των LEDs, που αναβοσβήνει ένα δισεκατομμύριο φορές ανά δευτερόλεπτο, μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα και αφού το σύστημα μπορεί να μεταδώσει πληροφορία στο επίπεδο των 100mbps, είναι πιθανό να γίνει η υποδομή της νέας γενιάς επικοινωνιών, δηλαδή να αποτελέσει την εναλλακτική λύση για τα καλώδια ή τις αποκλειστικές γραμμές.

Η ανταλλαγή πληροφοριών μέσω LEDs σε εξωτερικούς χώρους, θεωρήθηκε δύσκολη να επιτευχθεί λόγω της παρουσίας θορύβου από τη δυνατή ηλιοφάνεια. Ωστόσο, η συγκεκριμένη εταιρία, έχει πετύχει την ανάπτυξη ενός προηγμένου συστήματος επικοινωνίας στο οποίο ένα εξειδικευμένο κύκλωμα που εξάγει μόνο το φως των LED που μεταφέρουν πληροφορίες. Η κατασκευή μια νέας υποδομής επικοινωνίας, εμπεριέχει πολλά έξοδα για την κάλυψη της εγκατάστασης των στύλων τηλεγράφου αλλά και των ηλεκτρικών καλωδίων, αλλά, στη περίπτωση του LED VLC , η μόνη απαίτηση είναι η τοποθέτηση πομποδεκτών σε φώτα που υπάρχουν στο δρόμο. Αυτό θα μείωνε το κόστος κατασκευής υποδομών στο ένα εκατοστό.

Ένα πείραμα, με σκοπό την χρήση αυτής της τεχνολογίας, είναι σε εξέλιξη από το φθινόπωρο του 2013 στη Δημοκρατία της Εσθονίας. Ο στόχος τους είναι να παρέχουν νέας γενιάς Internet με υψηλές ταχύτητες σε ποσοστό πάνω από το 60% των κατοίκων μέχρι το 2020.

Ένα πρότζεκτ που αφορά την εφαρμογή LED VLC για την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ Γης και διαστήματος είναι επίσης σε εξέλιξη. Το Πανεπιστήμιο Shinshu, το οποίο έχει αναλάβει την αποστολή να εξερευνήσει τη πιθανότητα επικοινωνίας μεταξύ Γης και διαστήματος (έως 400 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της Γης), απογείωσε το πειραματικό δορυφόρο “Ginrei” , την άνοιξη του 2014.

Επί του παρόντος, υπάρχουν περισσότεροι από 3500 τεχνητούς δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη. Στη περίπτωση των συμβατικών ραδιοκυμάτων, προκύπτουν προβλήματα όταν στις ζώνες συχνοτήτων παρατηρείται μεγάλη συμφόρηση και απαιτούνται περιορισμοί στη χρήση. Αν το πρότζεκτ στεφθεί εν τέλει με επιτυχία η δυνατότητα χρήσης ψηφιακών επικοινωνιών σίγουρα θα εξαπλωθεί.

Ένα παράδειγμα του πως οι πληροφορίες από το φως LED αποδεικνύονται χρήσιμες ως μέτρα ασφαλείας αποτελεί το αυτόνομο ρομπότ παράδοσης “HOSPI”, που αναπτύχθηκε από μια μεγάλη Ιαπωνική εταιρία κατασκευής ηλεκτρικών ειδών ευρείας κατανάλωσης για νοσοκομειακή χρήση. Αυτό το ρομπότ μεταφέρει φάρμακα ή δείγματα μέσα στο νοσοκομείο με μέγιστη ταχύτητα 3,6 χιλιόμετρα ανά ώρα και του έχει γίνει εγκατάσταση ενός LED VLC που χρησιμοποιείται σαν σύστημα ασφαλείας ώστε να εντοπίζει και να αποφεύγει περιοχές περιορισμένης πρόσβασης, όπως σκάλες. Χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό ο οποίος μεταδίδει ψηφιακή πληροφορία μέσω LED και είναι εγκατεστημένος στην οροφή των διαδρόμων, που δεν μπορεί να γίνει αντιληπτός με το γυμνό μάτι. Αυτή η πληροφορία αναγνωρίζεται από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο κεφάλι του ρομπότ και του επιτρέπουν να αποφεύγει τους κινδύνους. Αυτά τα ρομπότ μπορούν να αποφεύγουν τα εμπόδια, επειδή βασίζονται σε μια κάτοψη που έχει εισαχθεί εκ των προτέρων και επειδή χρησιμοποιούν αισθητήρες λέιζερ αλλά και επειδή τους έχουν εγκαταστήσει ένα σύστημα που χρησιμοποιεί LED σαν σύστημα ασφαλείας για την πρόληψη ατυχημάτων όπως π.χ. σε περίπτωση πτώσης.

Αξιόλογες τεχνολογικές καινοτομίες που χρησιμοποιούν LED φωτισμό υπάρχουν και στο τομέα της γεωργίας. Το 2013, ένα εργοστάσιο φυτών, που δημιουργήθηκε στο Πανεπιστήμιο Tamagawa σε συνεργασία με έναν επαγγελματία, άρχισε να κυκλοφορεί φύλλα μαρουλιού, που καλλιεργούνται με τη χρήση LED ως πηγή φωτός. Μια “άμεση μέθοδος ψύξης LED υψηλής ισχύος” αναπτύχθηκε από το καθηγητή Hiroyuki Watanabe του τμήματος Γεωργίας του Πανεπιστημίου εισήχθη στο εργοστάσιο φυτών. Με την τοποθέτηση του LED απευθείας στη βάση του αλουμινίου, η ψύξη αυξάνεται, αποτρέποντας έτσι τη μείωση της παραγωγής στην καλλιέργεια λόγω της παραγόμενης θερμότητας και επιτρέποντας, το συνεχή φωτισμό σε υψηλή ισχύ. Επειδή μπορεί να διατηρήσει μια επαρκή ισχύ ως πηγή φωτός για την καλλιέργεια φυτών για πάνω από 10 χρόνια σε πλήρη λειτουργία, το κόστος αντικατάστασης εξοπλισμού μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Στο εργοστάσιο έχουν επίσης την τεχνογνωσία του ελέγχου της ανάπτυξης χαρακτηριστικών στο φυτό όπως π.χ. τη γεύση και την θρεπτική αξία, με τη χρήση διαφορετικών LEDs που εκπέμπουν φως διαφορετικού μήκους κύματος για το κόκκινο , το μπλε ή το πράσινο ανάλογα με το τύπο του φυτού και τις συνθήκες ανάπτυξης. Αυτά τα μαρούλια έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, αντιοξειδωτικά, βιταμίνες και πολυφαινόλες σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μαρούλια. Τέλος έτυχαν θερμής υποδοχής από τους καταναλωτές λόγω των οφελών στην υγεία τους.

Η επικοινωνία με LED προσφέρει το πλεονέκτημα ενός καναλιού επικοινωνίας σε ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που δεν χρειάζεται άδεια ενώ μπορεί να παρέχει υψηλούς ρυθμούς ανταλλαγής δεδομένων. Βέβαια υπάρχει μια σειρά από τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν όπως οι παρεμβολές που προκαλούνται από τον ήλιο. Η ταχεία πρόοδος στο τομέα της επικοινωνίας ορατού φωτός μπορεί να αποφέρει μια χαμηλού κόστους υποδομή που θα υποστηρίζει την υψηλή ταχύτητα στη μεταφορά δεδομένων και θα βελτιώσει σημαντικά τις ικανότητες της ασύρματης επικοινωνίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Η πλειοψηφία των πηγών ήταν από το ίντερνετ και συγκεκριμένα από τα παρακάτω site :

<https://el.wikipedia.org/wiki/Δίοδος> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://www.hlektronika.gr> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

https://el.wikipedia.org/wiki/Δίοδος_εκπομπής_φωτός Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://www.thorlabs.de/thorcat/18100/PDA8A-SpecSheet.pdf> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://vavel.noc.teithe.gr/~dpapakos/analog/BDHD/opAmp%20files/anastr-syndesm.htm>

Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

https://en.wikipedia.org/wiki/Common_base Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

https://en.wikipedia.org/wiki/Common_emitter Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

https://en.wikipedia.org/wiki/Common_collector Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://www.ledluxor.com/top-10-benefits-of-led-lighting> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://www.jameco.com/1/1/371-bc548b-gp-bjt-transistor-92-transistor-npn-switch-more-about-transistors-click-here.html> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://www.mroelectronics.com/mro/img/p/6/2/8/9/6289-large.jpg> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

http://ecx.images-amazon.com/images/I/31a-XW17KzL_SY300.jpg Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

http://in.element14.com/productimages/standard/en_US/4732249.jpg Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://static.rapidonline.com/catalogueimages/Module/M029294P01WL.jpg> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

http://el.termwiki.com/EL/backhaul_%E2%82%88 Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

http://web-japan.org/trends/11_tech-life/tec140210.html Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<https://www.quora.com/What-are-the-most-promising-application-of-visible-light-communication-VLC> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://elcodis.com/> Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

Πηγές από βιβλία :

Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα (ΤΟΜΟΣ Α') - 5η Έκδοση - Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, ΑΘΗΝΑ 2011

A.P. Malvino, Ηλεκτρονική, ενότητες 2.4–2.11, 3.1–3.4, 3.10 (και λυμένα παραδείγματα).

A.P. Malvino, Βασική Ηλεκτρονική, κεφάλαιο 2 (και λυμένα παραδείγματα)

Πηγές εικόνων :

Εξώφυλλο,

<http://cdn.instructables.com/FV0/0U50/8ZPEP27TMES/FV00U508ZPEP27TMES.MEDIUM.jpg> , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[1] Diodes , <https://learn.sparkfun.com/tutorials/diodes>, Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[2]PN Junction Theory , http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[3] The Signal Diode , http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_4.html , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[4] The Zener Diode , http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_7.html, Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[5,6,7] Light-emitting diode, https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[8] Controlling Plants with Light: LEDs to Change Plant Growth ,
<http://www.decodedscience.org/controlling-plants-light-leds-change-plant-growth/39190/2>
Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[9] Βασικές αρχές και χαρακτηριστικά των led ,
<http://www.hlektronika.gr/index.php?page=theory?led>, Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

[10,11,12,13,14,15] Light-emitting diode, https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

- [18] PDA8A Operating Manual - Silicon Amplified Detector,
<http://www.thorlabs.de/thorcat/18100/PDA8A-SpecSheet.pdf>, Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015
- [26] BJT vs MOSFET ,<http://blog.oscarliang.net/bjt-vs-mosfet/> , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015
- [27] Fundamentals of Bipolar Junction Transistors
,http://www.eeweb.com/blog/andrew_carter/fundamentals-of-bipolar-junction-transistors ,
Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015
- [28] Bipolar junction transistor ,https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor ,
Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015
- [29] Ηλεκτρονική, <http://eclass.hua.gr/modules/document/?course=DIT125>, Ανακτήθηκε:
Σεπτέμβριος 2015
- [30] Common base ,https://en.wikipedia.org/wiki/Common_base , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος
2015
- [31] Common emitter ,https://en.wikipedia.org/wiki/Common_emitter , Ανακτήθηκε:
Σεπτέμβριος 2015
- [32] Common collector ,https://en.wikipedia.org/wiki/Common_collector , Ανακτήθηκε:
Σεπτέμβριος 2015
- [33] Τελεστικός Ενισχυτής UA741 ,<http://grobotronics.com/ua741.html> , Ανακτήθηκε:
Σεπτέμβριος 2015
- [34,35,36] Sedra/Smith, Τελεστικοί Ενισχυτές , Μικροηλεκτρονικά
Κυκλώματα, 2011, Παπασωτηρίου
- [http://www.nexolocal.com.ec/p11782665-conector-de-audifonos-equipos-blackberry-9000-
original](http://www.nexolocal.com.ec/p11782665-conector-de-audifonos-equipos-blackberry-9000-original) , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015
- [http://cdn.shopify.com/s/files/1/0672/9409/products/resistor-36-ohm-256px-
256px_grande.jpg?v=1426167372](http://cdn.shopify.com/s/files/1/0672/9409/products/resistor-36-ohm-256px-256px_grande.jpg?v=1426167372) , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015
- <http://www.ti.com/graphics/folders/partimages/TLC271> , Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015
- <http://thumbs.ebaystatic.com/d/l96/m/mjWVB54NunsDOrp-mps1Cpg> , Ανακτήθηκε:
Σεπτέμβριος 2015

<http://www.robotop.lv/473-home/50v-1uf-4x7-elektroliticheski-kondensator>, Ανακτήθηκε:

Σεπτέμβριος 2015

<http://www.neoembedded.com/media/catalog/product/cache/1/thumbnail/50x9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/z/e/zener>, Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

http://i01.i.aliimg.com/wsphoto/v0/694267641_4/PIHER-TRIMMER-POTENTIOMETER-PT6-PT10-PT15-1K-5K-10K-100K-200K-500K-1M.jpg_50x50, Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://thumbs.ebaystatic.com/d/196/m/mQeq9DrKnbjLFwANLrUvtMA>, Ανακτήθηκε:

Σεπτέμβριος 2015

https://mechanicalkeyboards.com/shop/images/products/thumb_category_red_led, Ανακτήθηκε:

Σεπτέμβριος 2015

http://www.arborsci.com/media/catalog/product/cache/1/small_image/50x50/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/g/r/green-led, Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015

<http://www.best9vbattery.org/wp-content/uploads/2015/06/9v-battery-nsn-50x50>, Ανακτήθηκε:

Σεπτέμβριος 2015

[http://i.ebayimg.com/00/s/NTAwWDUwMA==/z/AW8AAOSwcwhVK8Ya/\\$ 14.JPG](http://i.ebayimg.com/00/s/NTAwWDUwMA==/z/AW8AAOSwcwhVK8Ya/$ 14.JPG)

Ανακτήθηκε: Σεπτέμβριος 2015