



**Αλεξάνδρειο**  
**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης**  
Τμήμα Αυτοματισμού

**«Ασύρματος αισθητήρας φωτός»**



**Πτυχιακή Εργασία:** Τσακαλάκης Χρήστος (Α.Μ.06/2227)

**Επίβλεψη:** Κιζήρογλου Μιχάλης

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2013

## Αντί Προλόγου...

Η εργασία αυτή ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2012 και ολοκληρώθηκε τον Μάιο του 2013 όπου πραγματοποιήθηκαν διάφορες μετρήσεις και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εισηγητή της πτυχιακής εργασίας καθηγητή του τμήματος Αυτοματισμού Θεσσαλονίκης κ. Μιχάλη Κιζήρογλου για την βοήθεια που μου προσέφερε και την άψογη συνεργασία που συνάψαμε.

## Περίληψη

Σε αυτή την εργασία θα μελετηθεί η δυνατότητα υλοποίησης ενός καινοτόμου ασύρματου αισθητήρα φωτός. Η τροφοδοσία του συστήματος αυτού γίνεται αποκλειστικά με συγκομιδή ενέργειας από το φως. Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο φορτίζει έναν πυκνωτή, με ταχύτητα που καθορίζεται από την ένταση του διαθέσιμου φωτός. Μόλις η τάση στα άκρα του πυκνωτή ξεπεράσει μια τιμή  $V_t$ , αυτός εκφορτίζεται απευθείας σε μια κεραία απλού βρόγχου. Οι ταλαντώσεις που προκύπτουν, παράγουν έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό ο οποίος μπορεί να ανιχνευθεί τοπικά από έναν δέκτη. Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η σχεδίαση και η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, ώστε να αποδειχθεί η λειτουργία αυτής της καινούργιας ιδέας η οποία θα μπορούσε να βοηθήσει στην βελτίωση οργάνων και συσκευών όπως και στην λύση προβλημάτων για βιομηχανίες-βιοτεχνίες. Αυτό θα γίνει με διάφορες μετρήσεις και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το κύκλωμα θα αποτελείται από ένα μικρό φωτοβολταϊκό, ένα κύκλωμα μεταγωγής (δηλαδή ένα κύκλωμα με MOSFET) και ένα φορτίο πολύ χαμηλής αντίστασης.

Το κύκλωμα μεταγωγής θα βρίσκεται μεταξύ του φωτοβολταϊκού και του φορτίου, και θα μπορεί ν' ανοίγει και να κλείνει το αγωγίμο μονοπάτι μεταξύ τους ως εξής:

Όσο το φωτοβολταϊκό έχει τάση μικρότερη από ένα κατώφλι τάσης  $V_{t1}$ , το κύκλωμα θα πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση ώστε να μην εκφορτίζεται το φωτοβολταϊκό. Μόλις η τάση του φωτοβολταϊκού ξεπεράσει την  $V_{t1}$ , το κύκλωμα θα πρέπει να μεταβαίνει στην αγωγίμη κατάσταση, και να παραμένει εκεί, μέχρι η τάση του φωτοβολταϊκού φτάσει σε μια στάθμη  $V_{t2}$  αρκετά χαμηλότερη της  $V_{t1}$ , ώστε το φωτοβολταϊκό να εκφορτιστεί πλήρως πάνω στο φορτίο. Όταν η τάση του φωτοβολταϊκού γίνει μικρότερη της  $V_{t1}$ , το κύκλωμα θα πρέπει να επανέρχεται στην κατάσταση μεγάλης αντίστασης.

## ABSTRACT

In this paper we will study the feasibility of an innovative wireless sensor light. The power of this system is entirely harvesting energy from light. A photovoltaic cell charges a capacitor at a rate determined by the intensity of the available light. Once the voltage across the capacitor exceeds a value  $V_t$ , is discharged directly into a single loop antenna. The vibrations arising, produce an electromagnetic pulse which can be detected locally by a receiver. The purpose of this project is the design and implementation of such a system to demonstrate the operation of this new idea which could help improve organ and equipment as well as in solving problems for industries. This will be done by various measurements and analysis of results.

The circuit consisting of a small photovoltaic, a switching circuit (i.e. a circuit with MOSFET) and a very low load impedance.

The switching circuit will be between the photovoltaic and the load, and may be opening and closing the conductive path between them as follows:

As the photovoltaic voltage is less than a threshold voltage  $V_{t1}$ , the circuit should be of high resistance so as not to discharge the photovoltaic. Once the voltage of the photovoltaic exceed  $V_{t1}$ , the circuit will have to travel to the conductive state and remain there until the voltage of the photovoltaic reached a level  $V_{t2}$ , well below than  $V_{t1}$ , that the photovoltaic discharged fully onto the load. When the voltage drops below the photovoltaic  $V_{t1}$ , the circuit should return to its state of high resistance.



## Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1:Στόχος πτυχιακής εργασίας	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Κεφάλαιο 2:Θεωρητική ανάλυση .....	9
Κεφάλαιο 3:Περιγραφή ηλεκτρονικού μέρους .....	23
Κεφάλαιο 4:Θεωρητικοί υπολογισμοί-Προσομοίωση .....	28
Κεφάλαιο 5:Πειραματική διαδικασία .....	38
Κεφάλαιο 6:Επίλογος .....	42
Βιβλιογραφία .....	43

## Κεφάλαιο 1: Στόχος της πτυχιακής

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό την μελέτη, την σχεδίαση, την προσομοίωση και την πειραματική εξερεύνηση ενός ασύρματου αισθητήρα φωτός έτσι ώστε να διαπιστωθεί η χρησιμότητά του, και η μετέπειτα χρήση του. Αυτό θα υλοποιηθεί αρχικά με την κατασκευή ενός κυκλώματος πομπού-δέκτη που ουσιαστικά είναι ένα απλό κύκλωμα LC, την μελέτη των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν εκεί από άποψη τιμών και χαρακτηριστικών τους ιδιοτήτων, την μετέπειτα προσομοίωση της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου κυκλώματος με την χρήση του προγράμματος PSpice, την κατασκευή του σε πλακέτα και την πραγματοποίηση πειραμάτων έτσι ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης και των θεωρητικών υπολογισμών και να εξαγάγουμε τα κατάλληλα συμπεράσματα.

Οι ασύρματοι αισθητήρες απαντώνται πολύ συχνά πλέον στην καθημερινότητά μας και προσδίδουν ευκολίες σε διάφορους τομείς όπως για παράδειγμα αυτούς της υγείας και της ασφάλειας. Το πρόβλημα σε αυτή την τεχνολογία μέχρι στιγμής έγκειται στον τρόπο τροφοδότησής των αισθητήρων. Με τα μέχρι τώρα δεδομένα η τροφοδότηση πραγματοποιείται μέσω μπαταριών, οι οποίες όμως λόγω του όγκου που καταλαμβάνουν, αλλά και λόγω της ανάγκης που υπάρχει για συχνή επαναφόρτισή τους, καταλήγουν στο να είναι πρακτικά ασύμφορες κυρίως βέβαια όταν έχουμε και ολόκληρα δίκτυα με ασύρματους αισθητήρες. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν σε εξέλιξη πολλές έρευνες που σαν σκοπό έχουν την δημιουργία συστημάτων με χαμηλή κατανάλωση ισχύος και που σαν πηγές θα χρησιμοποιούνται αναλώσιμες πηγές ενέργειας από το περιβάλλον και όχι οι μπαταρίες.

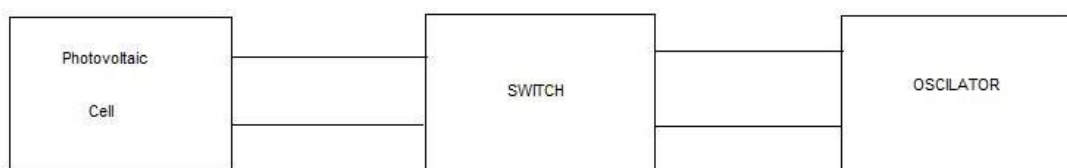
Σκοπός μας είναι το σύστημα να βρίσκεται το μεγαλύτερο διάστημα σε κατάσταση αναμονής, να λειτουργεί για σύντομο χρονικό διάστημα σε γρήγορους ρυθμούς αποστέλλοντας και λαμβάνοντας δεδομένα, και έπειτα να τίθεται πάλι σε κατάσταση αναμονής. Η όλη σκέψη είναι αρκετά απλή και έχει πολύ ελπιδοφόρα αποτελέσματα, όμως με την χρήση μπαταριών παρατηρείται πως η κατανάλωση ενέργειας ακόμα και όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής είναι αρκετά μεγάλη κυρίως όταν θέλουμε η λειτουργία μας να γίνεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για να λύσουμε το παραπάνω πρόβλημα θα προσπαθήσουμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία να επιτύχουμε άμεση αποφόρτιση της εξόδου του αισθητήρα σε ένα φορτίο, να δημιουργηθεί δηλαδή ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός που τα χαρακτηριστικά του θα περιέχουν τις πληροφορίες του αισθητήρα.

Βέβαια για να είναι αξιόπιστο ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας δύο σημαντικές παραμέτρους. Αρχικά τον τρόπο με τον οποίο θα παρέχεται η απαραίτητη ενέργεια για την λειτουργία του συστήματος, και μετέπειτα η μετάδοση των δεδομένων να είναι αξιόπιστη αλλά και να έχει την μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

Ένας αυτόνομος αισθητήρας αποτελείται από τα εξής μέρη : το πρώτο είναι το σύστημα μέσω του οποίου γίνεται η απαραίτητη συλλογή ενέργειας για την λειτουργία του και το δεύτερο το σύστημα που θα εκπέμπει το σήμα με την κατάλληλη πληροφορία. Τον ρόλο του πρώτου μέρους στο δικό μας σύστημα διαδραματίζει ένα μικρό φωτοβολταϊκό πάνελ το οποίο και τροφοδοτεί με την απαραίτητη ενέργεια το σύστημά μας, ενώ το δεύτερο μέρος αποτελείται από ένα σύστημα με mosfet συνδεδεμένο κατάλληλα με ένα απλό κύκλωμα LC έτσι ώστε να επιτύχουμε τον επιθυμητό παλμό. Ένα τέτοιο καινοτόμο σύστημα λοιπόν θα προσπαθήσουμε να κατασκευάσουμε στην παρούσα πτυχιακή, εκμεταλλευόμενοι την ενέργεια από το φως και προσπαθώντας η αποστολή και η λήψη των δεδομένων να γίνεται με μεγάλη ακρίβεια.

Στο κεφάλαιο 2 παρατίθενται κάποια θεωρητικά δεδομένα σχετικά με τις βασικές έννοιες οι οποίες μελετώνται στην παρούσα πτυχιακή. Αυτό γίνεται με σκοπό να γίνει απλούστερη η ανάλυση κάποιων εννοιών που θα συναντήσουμε σε διάφορα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η ιδέα και η κατασκευή του κυκλώματος καθώς επίσης παρατίθενται και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται ο τρόπος που πραγματοποιήθηκαν οι θεωρητικοί υπολογισμοί καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο πρόγραμμα PSpice, ενώ στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του κυκλώματος. Στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με την δυνατότητα υλοποίησης ενός ασύρματου αισθητήρα φωτός καθώς επίσης προτείνονται και κάποιες μελλοντικές βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν στο σύστημα.

Το κύκλωμα λοιπόν θα αποτελείται από ένα μικρό φωτοβολταϊκό κύτταρο, ένα κύκλωμα μεταγωγής (δηλαδή ένα κύκλωμα με MOSFET) και ένα ταλαντωτή. Το κύκλωμα μεταγωγής θα βρίσκεται μεταξύ του κυττάρου και του ταλαντωτή, και θα μπορεί ν' ανοίγει και να κλείνει το αγωγίμο μονοπάτι μεταξύ τους, διαδραματίζοντας ουσιαστικά έτσι τον ρόλο ενός διακόπτη. Στο σχήμα 1 βλέπουμε σε ένα block-διάγραμμα την απεικόνιση του κυκλώματος



Σχήμα 1: Block-διάγραμμα του κυκλώματος.



## Κεφάλαιο 2: Θεωρητική ανάλυση

Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτουμε κάποια θεωρητικά δεδομένα σχετικά με τις βασικές έννοιες οι οποίες θα μελετηθούν στην παρούσα πτυχιακή. Αυτό γίνεται με σκοπό να γίνει απλούστερη η ανάλυση κάποιων εννοιών που θα συναντήσουμε σε διάφορα κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν έχουμε:

### 2.1 Αισθητήρες φωτός

Ένας αισθητήρας φωτός, όπως υποδηλώνει η ονομασία του, είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση φωτός. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι αισθητήρων φωτός, καθένας από τους οποίους λειτουργεί με έναν ελαφρώς διαφορετικό τρόπο. Ένα φωτοκύτταρο ή φωτοαντίσταση, για παράδειγμα, έχει ένα μικρό αισθητήρα που αλλάζει την αντίστασή του όταν το φως πέσει πάνω του. Οι συσκευές που περιλαμβάνουν αυτούς τους αισθητήρες έχουν πολλές χρήσεις σε επιστημονικές εφαρμογές, αλλά βρίσκουν επίσης εφαρμογή και σε πολλά σημεία της καθημερινότητας. Ένας απλός αισθητήρας φωτός μπορεί να είναι μέρος μιας συσκευής ασφάλειας, όπως συναγερμού ή άνοιγμα πόρτας γκαράζ.

Πολλά σύγχρονα ηλεκτρονικά, όπως υπολογιστές, ασύρματα τηλέφωνα και τηλεοράσεις, χρησιμοποιούν αισθητήρες φωτός για αυτόματη ρύθμιση της φωτεινότητας της οθόνης, ειδικά σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού ή καταστάσεις υψηλού φωτισμού. Μπορούν να ανιχνεύσουν πόσο φως υπάρχει σε ένα δωμάτιο και να αυξήσουν ή να μειώσουν τη φωτεινότητα προσφέροντας έτσι ένα πιο άνετο επίπεδο για τον χρήστη. Αισθητήρες φωτός, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αυτόματη ενεργοποίηση φώτων μέσα ή έξω από ένα σπίτι ή την επιχείρηση.

Οι αισθητήρες φωτός, έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία, ιδίως μέσω της τεχνολογίας υπερύθρων. Έτσι με την βοήθεια των υπέρυθρων αισθητήρων φωτός, μπορούμε για παράδειγμα να ρυθμίζουμε την ένταση στα φώτα κάποιων δωματίων ανάλογα με την χρήση τους, πραγματοποιώντας κατά αυτό τον τρόπο εξοικονόμηση ενέργειας.

Αισθητήρες φωτός, συναντώνται ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα στον τομέα της επιστήμης, με τις πιο πρόσφατες ανακαλύψεις να αφορούν τον χώρο της ιατρικής και της ρομποτικής. Τα ρομπότ, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιούν αισθητήρες φωτός για να "δουν" και να πλοηγηθούν σε ένα δωμάτιο, για τον εντοπισμό αντικειμένων έχοντας αντίληψη καθώς το φως ανακλάται σε αυτά.

Οι αισθητήρες φωτός αποτελούνται από πολλές σειρές φωτοευαίσθητων “κελιών”, τα οποία με τη σειρά τους, σχηματίζουν μια μήτρα. Κάθε κελί περιέχει μια ειδική “φωτοδίοδο”, η οποία, λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, παράγει ηλεκτρικό φορτίο μόλις πέσει φως πάνω της. Το φορτίο είναι τόσο μεγαλύτερο όσο περισσότερο είναι το φως και αποθηκεύεται στον μικρό πυκνωτή που περιλαμβάνει κάθε κελί. Το γινόμενο του αριθμού φωτοευαίσθητων κελιών κάθε σειράς επί τον αριθμό των σειρών, μας δίνει το μέγεθος του αισθητήρα σε εικονοστοιχεία (pixels).

Σήμερα, δύο από τις κυριότερες μορφές αισθητήρων φωτός είναι: α) η μορφή CCD η οποία χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για την κατασκευή αισθητήρων, και β) η μορφή CMOS η οποία χρησιμοποιείται επίσης και για την κατασκευή μονάδων μνήμης των υπολογιστών, επεξεργαστών κ.α. Ένας αισθητήρας CMOS έχει, συγκριτικά, μεγάλη πυκνότητα κυκλωμάτων. Αυτό επιτρέπει στον κατασκευαστή να ενσωματώσει κάποιες επιπλέον λειτουργίες στο chip. Έτσι, καταλήγουμε σε ένα προϊόν με πληθώρα λειτουργιών και μικρό μέγεθος που, ως αποτέλεσμα, έχει χαμηλό συνολικό κόστος κατασκευής, όπως και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Στην τεχνολογία CCD (Charge-Coupled Device), οι αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ως μονάδα μνήμης. Σε σύγκριση με τα CMOS, για τη λειτουργία τους χρειάζονται κάποια επιπλέον κυκλώματα επεξεργασίας κάτι που οδηγεί σε υψηλότερο κόστος κατασκευής. Οι αισθητήρες CCD έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στο φως, χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και υψηλότερη δυναμική κλίμακα. Αυτή η υψηλότερη ευαισθησία μεταφράζεται σε καλύτερη εικόνα σε συνθήκες χαμηλού φωτός.

Παρακάτω βλέπουμε ενδεικτικά κάποιες συσκευές οι οποίες περιέχουν αισθητήρες φωτός :



Σχήμα 2.1.1: Φωτάκι νυκτός LED με αισθητήρα φωτός χαμηλής κατανάλωσης<sup>[8]</sup>.

## Ασύρματος αισθητήρας φωτός



Σχήμα 2.1.2: Φωτιστικό κήπου LED με αισθητήρα φωτός<sup>[8]</sup>.



Σχήμα 2.1.3: Φωτιστικό εξωτερικού χώρου με αισθητήρα και γωνία ανίχνευσης 180°<sup>[8]</sup>.



Σχήμα 2.1.4: Φωτιστικό Κήπου με Αισθητήρα Φωτός TELCO S5071<sup>[8]</sup>.

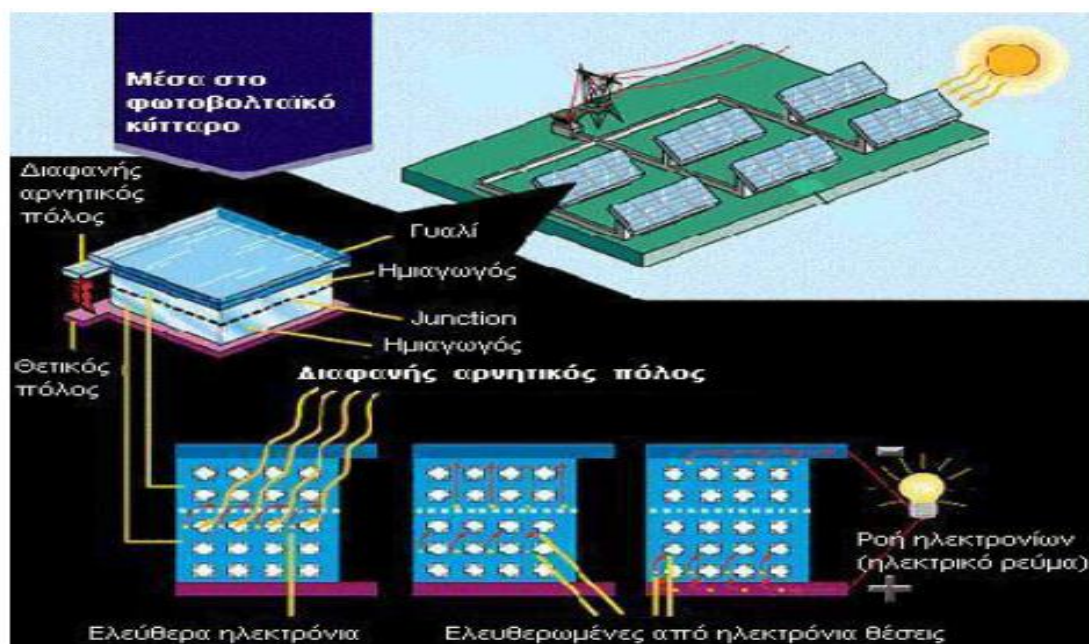


Σχήμα 2.1.5: Φωτάκι με Αισθητήρα Φωτός RL-0318<sup>[8]</sup>.

## 2.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ

Τα *φωτοβολταϊκά πάνελ* είναι δίοδοι ημιαγωγού με την μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολήση, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

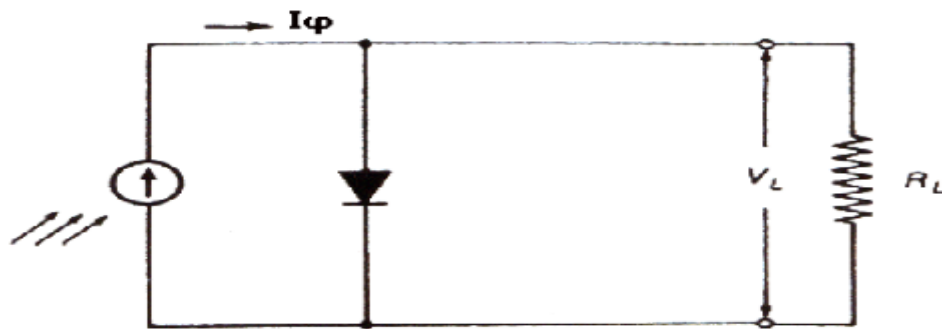
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι φτιαγμένα από ειδικά υλικά, όπως το πυρίτιο, που λέγονται ημιαγωγοί. Όταν το φως πέσει στο κύτταρο ένα μέρος του απορροφάται από τον ημιαγωγό. Η ενέργεια αυτή ελευθερώνει ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν επίσης ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά πεδία τα οποία υποχρεώνουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινούνται προς μια κατεύθυνση. Η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο, μαζί με την διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την κίνηση των ηλεκτρονίων  $e^-$  και των οπών  $h^+$ , καθορίζει την ισχύ του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει το κύτταρο. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ένα σχεδιάγραμμα με τον τρόπο λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πάνελ.



Σχήμα 2.2.1: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πάνελ<sup>[7]</sup>.

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο, και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 2.2.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου<sup>[7]</sup>.

Ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Σε αντίθεση δηλαδή με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές, οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή.

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται διάφορα φωτοβολταϊκά πάνελ:



Σχήμα 2.2.3: Διάφορα φωτοβολταϊκά πάνελ<sup>[12]</sup>.

Παρά την ύπαρξη διαφόρων ημιαγωγίμων υλικών, το πυρίτιο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πάνελ. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ χωρίζονται στα κρυσταλλικά και στα μη κρυσταλλικά, τα οποία με την σειρά τους έχουν τις δικές τους υποκατηγορίες όπως πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικά πάνελ πυριτίου, υβριδικά στοιχεία και άλλα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι ηλιακών πάνελ με τους κυριότερους από αυτούς να είναι:

- τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου,
- τα πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου,
- τα πάνελ τεχνολογίας λεπτού υμενίου,
- τα πάνελ άμορφου πυριτίου,
- τα πάνελ καδμίου-τελλουρίου, και τέλος τα πάνελ χαλκού-Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου.

### 2.3 Τρανζίστορ MOSFET

Το MOSFET είναι μια συσκευή τεσσάρων τμημάτων, με πηγή, πύλη, απαγωγό και το σώμα. Το σώμα ή υπόστρωμα όμως συχνά συνδέεται με το κομμάτι της πηγής, καθιστώντας το έτσι, συσκευή τριών τμημάτων. Το συνηθέστερο υλικό κατασκευής τους είναι το πυρίτιο, αλλά ορισμένοι κατασκευαστές, πρόσφατα άρχισαν να χρησιμοποιούν μια χημική ένωση του πυριτίου και γερμανίου (SiGe).

Η δομή του MOSFET δεν περιέχει καμία επαφή p-n γιατί η πύλη είναι απομονωμένη από το κανάλι από ένα στρώμα διοξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>). Είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση οι οποίες δεν απαιτούν μεγάλα ρεύματα οδήγησης όπως οι αντίστοιχες διπολικές διατάξεις. Πρόκειται για τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET), απομονωμένης εισόδου, που λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου επαφής (JFET). Η βασική τους διαφορά έναντι των JFET είναι ότι το δυναμικό που ελέγχει τη λειτουργία τους (δυναμικό πύλης) εφαρμόζεται στην ενεργό περιοχή (κανάλι) διαμέσου ενός μονωτικού στρώματος από κατάλληλο οξειδίο αντί να εφαρμόζεται μέσω μιας p-n επαφής.

Η ενεργός περιοχή τους μπορεί να είναι ένα κανάλι p-τύπου οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως PMOS ή ένα κανάλι n-τύπου οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως NMOS. Το μεγάλο πλεονέκτημα τους είναι η πολύ μικρή ισχύς τους λόγω του μονωτικού στρώματος που παρεμβάλλεται μεταξύ πύλης και καναλιού.

Αρχικά οι δομές MOSFET χρησιμοποιούσαν μεταλλική πύλη και κανάλι πυριτίου και διοξείδιο του πυριτίου ως μονωτικό στρώμα. Στη συνέχεια, οι μεταλλικές πύλες αντικαταστάθηκαν από πύλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου και οι πιο εξελιγμένες τεχνολογίες έκαναν χρήση οξυνιτριδίου του πυριτίου ως μονωτικού υλικού αντί του διοξειδίου του πυριτίου. Αναφορικά τώρα με τον ημιαγωγό που χρησιμοποιείται, αυτός είναι κυρίως το πυρίτιο. Ημιαγωγοί με υψηλές επιδόσεις, δεν είναι κατάλληλοι για την κατασκευή MOS τρανζίστορ λόγω της αδυναμίας ανάπτυξης του αντίστοιχου οξειδίου του ημιαγωγού.

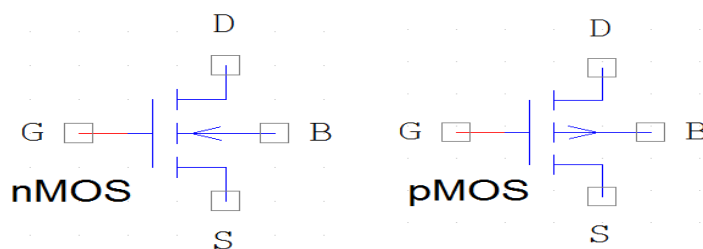
Διάφοροι τύποι MOSFET είναι οι :

- NMOS - n-channel MOSFET
- PMOS - p-channel MOSFET

Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας των MOSFET είναι η ακόλουθη: Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαπερνά το διηλεκτρικό της πύλης και δημιουργεί ή τροποποιεί ένα στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής έχει αντίθετο τύπο αγωγιμότητας από αυτόν του υποστρώματος και ταυτόσημο με αυτόν των διαχύσεων σε πηγή και απαγωγό.

Τα κυκλώματα με MOS τρανζίστορ παρουσιάζουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με αντίστοιχα κυκλώματα με διπολικά τρανζίστορ, όμως, υστερούν ως προς την ταχύτητα λειτουργίας τους. Επίσης, οι διαστάσεις κατασκευής MOS τρανζίστορ, σε ολοκληρωμένη μορφή, είναι κατά πολύ μικρότερες διπολικών τρανζίστορ, γεγονός που τα καθιστά πολύ ελκυστικά για κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Στο σχήμα 2.3.1, φαίνονται τα σύμβολα για MOSFET διαύλου τύπου n και τύπου p. Στα σύμβολα αυτά διακρίνεται ο ακροδέκτης B (bulk), που δηλώνει το σώμα του τρανζίστορ. Ο ακροδέκτης αυτός, σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, συνδέεται μονίμως στο χαμηλότερο δυναμικό, για τρανζίστορ διαύλου-n, ή στο ψηλότερο δυναμικό για τρανζίστορ διαύλου-p. Επίσης σε άλλες τεχνολογίες ο ακροδέκτης B συνδέεται μονίμως με την πηγή.



Σχήμα 2.3.1: Δομή MOSFET διαύλου-n και διαύλου-p

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του MOSFET είναι:

- οι πολύ μικρές φυσικές διαστάσεις του. Χρειάζεται περίπου το 20-30% της επιφάνειας, που απαιτείται για ένα BJT.
- η χαμηλή κατανάλωση ισχύος.
- η μεγάλη αντίσταση εισόδου της τάξης των  $10^{14} \Omega$ .

Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για την λειτουργία των MOSFET αποτελεί η τάση κατωφλίου. Πιο συγκεκριμένα, η ελάχιστη τάση πύλης-πηγής, η οποία προκαλεί την εμφάνιση του στρώματος αναστροφής και κάτω από αυτήν το ρεύμα μεταξύ του απαγωγού και της πηγής ουσιαστικά πέφτει στο μηδέν, ονομάζεται τάση κατωφλίου και συμβολίζεται με  $V_{GS(th)}$  ή  $V_T$ . Έτσι, όταν η τάση της πύλης είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου το MOSFET είναι ανοικτό. Αντίθετα, όταν η τάση της πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου, το MOSFET άγει. Η τάση κατωφλίου  $V_T$  είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για τα τρανζίστορ MOSFET, καθώς είναι αυτή που ουσιαστικά καθορίζει αν θα λειτουργεί ή όχι.

Όταν όλοι οι ακροδέκτες του τρανζίστορ βρίσκονται σε μηδενικό δυναμικό, τότε το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Στην κατάσταση αυτή το ρεύμα απαγωγού ισούται με μηδέν  $I_D=0$ .

Όταν η πύλη του τρανζίστορ συνδέεται σε θετικό δυναμικό, χαμηλής τιμής, με  $0 < V_{GS} < V_T$ , επειδή το σύμπλεγμα μετάλλου-ημιαγωγού σχηματίζει έναν πυκνωτή, η παρουσία του θετικού δυναμικού συνεπάγεται τη συγκέντρωση θετικών φορτίων στην πύλη G του τρανζίστορ και αρνητικών φορτίων στο υποστρώμα B. Στην κατάσταση αυτή, είναι φανερό ότι, το ρεύμα απαγωγού είναι μηδενικό, ανεξάρτητα από το δυναμικό του απαγωγού.

Όταν το θετικό δυναμικό της πύλης ξεπεράσει κάποια τιμή, γίνει δηλαδή  $V_{GS} > V_T$ , τότε, η περιοχή του υποστρώματος κάτω από την πύλη αναστρέφεται, με αποτέλεσμα ο ημιαγωγός από τύπου-p να μετατρέπεται σε ημιαγωγό τύπου-n. Επομένως, ένας αγωγίμος δίαυλος τύπου-n σχηματίζεται μεταξύ απαγωγού D και πηγής S. Επομένως όταν ξεπεραστεί η τάση κατωφλίου τότε προκαλείται αναστροφή στους φορείς αγωγιμότητας στο τμήμα του ημιαγωγού κάτω από την πύλη.

Η μορφή του διαύλου αγωγιμότητας εξαρτάται από το δυναμικό του απαγωγού. Για μικρά θετικά δυναμικά απαγωγού, όπου  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ , η μορφή του διαύλου είναι σχεδόν ομοιόμορφη, και το ρεύμα  $I_D$  του διαύλου μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την τάση  $V_{DS}$ . Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι, το τρανζίστορ λειτουργεί στην ωμική του περιοχή. Καθώς το δυναμικό του απαγωγού αυξάνεται, το εύρος του διαύλου αλλάζει, και γίνεται πιο ευρύ στην περιοχή της πύλης και στενότερο στην περιοχή του απαγωγού. Αυτό οφείλεται στο ότι, η διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης G και του υποστρώματος B του ημιαγωγού είναι μεγαλύτερη στην περιοχή της πηγής



από ότι, στην περιοχή του απαγωγού. Για συγκεκριμένη τιμή της  $V_{GS}$  υπάρχει μια οριακή τιμή της  $V_{DS}$ ,  $V_{DS}=V_{GS}-V_T$ , πέραν της οποίας το εύρος του διαύλου στην περιοχή του απαγωγού στραγγαλίζεται. Στην κατάσταση αυτή, το ρεύμα που περνά από τον δίαυλο παραμένει σχεδόν σταθερό ανεξάρτητα από την τάση του απαγωγού. Τότε λέμε ότι, το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κόρου. Μεγαλύτερες τιμές της  $V_{DS}$ , πέραν της οριακής τιμής, μειώνουν το ενεργό μήκος του διαύλου, με συνέπεια μια μικρή γραμμική αύξηση του ρεύματος του απαγωγού  $I_D$ .

Η τεχνολογία σήμερα προσφέρει τη δυνατότητα υλοποίησης nMOS και pMOS τρανζίστορ πάνω στο ίδιο υπόστρωμα. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται CMOS (Complementary MOS).

Ένα MOS τρανζίστορ είναι ένα τρανζίστορ που:

- Όταν είναι πολωμένο στην περιοχή κόρου, λειτουργεί ως πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από την τάση εισόδου.
- Λειτουργεί ικανοποιητικά και ως διακόπτης, όταν πολώνεται εκτός της περιοχής κόρου.
- Είναι βαθμίδα χαμηλής ισχύος.

Υπάρχουν δυο βασικές περιοχές λειτουργίας των MOSFET. Αυτές είναι η περιοχή μη-κόρου και η περιοχή κόρου ή ενεργός περιοχή. Στην πρώτη περιοχή λειτουργίας το ρεύμα του καναλιού διαμορφώνεται από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ του απαγωγού και της πηγής ( $V_{DS}$ ). Αντιθέτως, στην δεύτερη περιοχή λειτουργίας το ρεύμα του καναλιού είναι σχεδόν σταθερό και ανεξάρτητο από την τιμή τάσης μεταξύ απαγωγού και πηγής. Ο καθορισμός της περιοχής λειτουργίας του MOSFET γίνεται μέσω της πόλωσης του. Η τυπική τάση εισόδου στην ωμική περιοχή είναι είτε χαμηλή είτε υψηλή. Η χαμηλή τάση είναι 0V, ενώ η υψηλή  $V_{GS(on)}$ , έχει τιμή που δίνουν τα φυλλάδια προδιαγραφών. Όταν ένα MOSFET πολώνεται στην ωμική περιοχή ισοδυναμεί με την αντίσταση  $R_{DS(on)}$ . Οι τυπικές τιμές της  $V_{GS(th)}$  κυμαίνονται από 1,5 μέχρι 3V. Οι τιμές της  $R_{DS(on)}$  κυμαίνονται μεταξύ 0,3 και 28 Ω. Όταν πολώνεται στην ενεργό περιοχή ισοδυναμεί με πηγή ρεύματος.

Τα MOSFET έχουν ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, έναν μονωτή που παρεμποδίζει το ρεύμα πύλης για τις θετικές καθώς και για τις αρνητικές τάσεις πύλης. Αυτό το μονωτικό στρώμα διατηρείται όσο το δυνατόν πιο λεπτό για να δώσει στην πύλη μεγαλύτερη δυνατότητα ελέγχου του ρεύματος απαγωγού.

Οι διατάξεις MOSFET είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες επομένως δεν θα πρέπει ποτέ να τα συνδέουμε ή να τα αποσυνδέουμε ενώ βρίσκονται σε λειτουργία, ενώ πριν απομακρύνουμε μια διάταξη MOSFET από κάποιο κύκλωμα θα πρέπει να γειώσουμε το σώμα μας.

Το MOSFET έχει την παρακάτω συμπεριφορά στις διάφορες περιοχές λειτουργίας του:

- Περιοχή αποκοπής: Η τάση πύλης - πηγής είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου, και η ροή του ρεύματος είναι 0.
- Μη κορεσμένη περιοχή: Το κανάλι έχει αντιστραφεί ελαφριά και το ρεύμα εξαρτάται από τις τάσεις πύλης - απαγωγού.
- Περιοχή κόρου: Το κανάλι έχει έντονα αντιστραφεί και το ρεύμα απαγωγού είναι ανεξάρτητο από την τάση απαγωγού-πηγής.

Τα MOSFET ανεξάρτητα από το αν είναι διαύλου p ή n χωρίζονται σε :

- MOSFET τύπου αραιώσης (depletion MOSFET)
- MOSFET τύπου πύκνωσης (enhancement MOSFET)

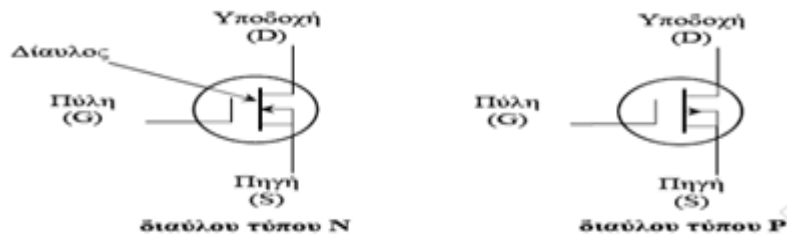
MOSFET τύπου αραιώσης (depletion) ή D-MOSFET  $V_T < 0$



Το MOSFET αραιώσης αποτελείται από ένα τμήμα ημιαγωγού τύπου N. Στα άκρα αυτού του τμήματος συνδέονται οι ακροδέκτες πηγής και απαγωγού. Η εφαρμογή μιας τάσης μεταξύ πηγής και απαγωγού, όπου ο απαγωγός συνδέεται στο θετικό πόλο της πηγής, εξαναγκάζει τα ηλεκτρόνια σε ροή από την πηγή προς τον απαγωγό. Το MOSFET, έχει μια μόνο περιοχή P, η οποία ονομάζεται υπόστρωμα. Η περιοχή αυτή περιορίζει τη διατομή του καναλιού με αποτέλεσμα να παραμείνει ένα πολύ λεπτό στρώμα το οποίο επιτρέπει στα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινούνται από την πηγή στον απαγωγό. Ένα πολύ λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου υπάρχει στην αντίθετη πλευρά του καναλιού και πάνω σε αυτό τοποθετείται η μεταλλική πύλη.

Ένα τρανζίστορ τύπου αραιώσης άγει όταν η τάση πύλης είναι ίση με την τάση πηγής. Η πόλωση πύλης-πηγής εδώ είναι ανάστροφη και η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι καθώς παρεμβάλλεται ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου ως μονωτικό. Το ρεύμα της πύλης είναι πολύ μικρό ενώ η τιμή της τάσης κατωφλίου  $V_T$ , είναι αρνητική. Όταν στην πύλη εφαρμοστεί αρνητική τάση, τότε αυτή απωθεί τα ηλεκτρόνια του καναλιού με

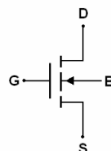
αποτέλεσμα να μειωθεί το ρεύμα του απαγωγού. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται αραίωση. Με αρνητικές τάσεις στην πύλη έχουμε μείωση του ρεύματος του απαγωγού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο ηλεκτρονικός συμβολισμός των MOSFET τύπου αραίωσης διαύλου η και διαύλου p αντίστοιχα. Η πύλη έχει τη μορφή οπλισμού ενός πυκνωτή. Δεξιά από την πύλη υπάρχει μια λεπτή γραμμή, η οποία παριστάνει το κανάλι. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο κατασκευαστής συνδέει εσωτερικά το υπόστρωμα με την πηγή:



Σχήμα 2.3.2: Ηλεκτρονικός συμβολισμός του MOSFET τύπου αραίωσης<sup>[2]</sup>.

Τα MOSFET τύπου αραίωσης χρησιμοποιούνται κυρίως στα αναλογικά ηλεκτρονικά (ενισχυτές, κυκλώματα αυτόματου ελέγχου απολαβής κ.α.). Το υπόστρωμα εκτείνεται μέχρι την επίστρωση του διοξειδίου του πυριτίου. Το ρεύμα απαγωγού καθορίζεται από την τάση της πύλης. Όταν η τάση της πύλης είναι μικρότερη από την τάση του κατωφλίου τότε δεν περνάει ρεύμα.

MOSFET τύπου πύκνωσης (enhancement) ή E-MOSFET  $V_T > 0$



Σε αυτόν τον τύπο MOSFET υπάρχει στρώμα απομόνωσης γύρω από την πύλη. Η διαφορά του από το D-MOSFET είναι ότι το τμήμα της πύλης είναι πολύ μεγαλύτερο σε όγκο με συνέπεια το φράγμα δυναμικού που δημιουργείται να είναι πολύ μεγάλο εμποδίζοντας τη ροή φορέων από την πηγή στον απαγωγό. Ρεύμα στον απαγωγό δημιουργείται μόνο όταν εφαρμοστεί μια αρκετά μεγάλη ορθή πόλωση μεταξύ πύλης-πηγής. Ένα n-MOS (ή p-MOS) τρανζίστορ πύκνωσης άγει όταν η τάση πύλης και η τάση πηγής έχουν θετική (ή αρνητική) διαφορά, ενώ η  $V_T$  έχει θετική τιμή.

Η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της πύλης και του σώματος του υποστρώματος διαμορφώνει την αγωγιμότητα του καναλιού ελέγχοντας έτσι τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού. Όταν στην πύλη δεν εφαρμόζεται κάποιο δυναμικό δεν υπάρχει ο δίαυλος και οι περιοχές του απαγωγού και της πηγής χωρίζονται από το υπόστρωμα. Το υπόστρωμα, το μονωτικό οξείδιο και η μεταλλική πύλη αποτελούν έναν πυκνωτή. Όταν η

μεταλλική πύλη βρεθεί σε θετικό δυναμικό υψηλότερο από αυτό της πηγής ( $V_{GS} > 0$ ) τότε αυτή έλκει τα ηλεκτρόνια του καναλιού με αποτέλεσμα να αυξηθεί το ρεύμα απαγωγού. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται πύκνωση. Με θετικές τάσεις στην πύλη έχουμε αύξηση ρεύματος του απαγωγού.

Ο σχηματισμός του διαύλου ουσιαστικά ισοδυναμεί με τη δημιουργία ενός καναλιού υψηλής αγωγιμότητας μεταξύ πηγής και απαγωγού. Όσο το θετικό δυναμικό της πύλης αυξάνει τόσο αυξάνεται και η αγωγιμότητα του διαύλου. Η δημιουργία του καναλιού συμβαίνει όταν η θετική τάση  $V_{GS}$  ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου  $V_T$ .

Το δυναμικό των σημείων του διαύλου αυξάνεται καθώς κινούμαστε από την πηγή προς τον απαγωγό. Για να συντηρείται δίαυλος σε κάποια θέση  $x$  μεταξύ πηγής και απαγωγού θα πρέπει η διαφορά δυναμικού  $V_{GX}$  να είναι τουλάχιστον ίση ή να ξεπερνά το δυναμικό κατωφλίου  $V_T$ .

Όταν ο δίαυλος διατηρείται σε όλο του το μήκος από την πηγή στον απαγωγό η αγωγιμότητα του MOSFET χαρακτηρίζεται ως μη κορεσμένη. Το ρεύμα  $I_D$  που ρέει μεταξύ πηγής και απαγωγού εξαρτάται τόσο από την  $V_{DS}$  όσο και από την  $V_{GS}$ , και αυξάνει με την αύξησή τους. Όταν ο δίαυλος κλείνει από κάποιο σημείο του μέχρι τον απαγωγό η αγωγιμότητα χαρακτηρίζεται ως κορεσμένη και το ρεύμα που ρέει μεταξύ πηγής και απαγωγού είναι ανεξάρτητο της διαφοράς δυναμικού  $V_{DS}$  στους δύο αυτούς ακροδέκτες και εξαρτάται μόνο από την  $V_{GS}$ . Όταν ο δίαυλος δεν σχηματίζεται καθόλου, δηλαδή  $V_{GS} < V_T$ , τότε το τρανζίστορ βρίσκεται σε αποκοπή και το ρεύμα μηδενίζεται.

Τα MOSFET τύπου πύκνωσης χρησιμοποιούνται στα αναλογικά ηλεκτρονικά (τελεστικοί ενισχυτές, voltage inverters) και κυρίως στα ψηφιακά ηλεκτρονικά (μνήμες RAM/ROM, πύλες CMOS, μικροεπεξεργαστές κ.α.). Έχουν πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος και είναι τόσο ευαίσθητα που μπορούν να καταστραφούν από τα ηλεκτροστατικά φορτία των χεριών μας.

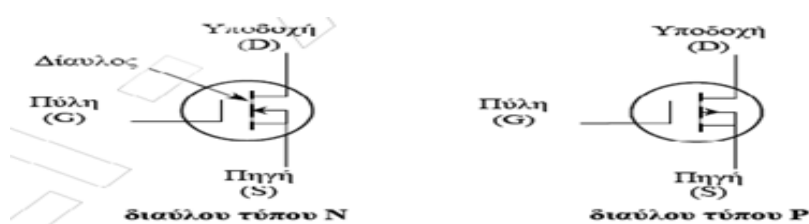
Η δομή των MOSFET τύπου πύκνωσης διαφέρει από αυτή των MOSFET τύπου αραίωσης. Σε αυτά το υπόστρωμα εκτείνεται μέχρι την επίστρωση του οξειδίου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού αλλά μόνο μια δομή η οποία μοιάζει με δυο διόδους συνδεδεμένες αντίθετα μεταξύ τους.

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία ενός MOSFET τύπου πύκνωσης θα πρέπει κατ' αρχήν να εφαρμοστούν οι κανονικής πολικότητας πολώσεις της πύλης και του απαγωγού. Αρχικά θεωρούμε ότι η τάση της πύλης είναι μηδέν, δηλαδή ότι έχουμε κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης. Σ' αυτή την περίπτωση το ρεύμα δεν μπορεί να διέλθει από την πηγή στον απαγωγό διότι αφενός το P-τύπου υπόστρωμα έχει πάρα πολύ λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και αφετέρου η διόδος υποστρώματος – απαγωγού είναι ανάστροφα πολωμένη.

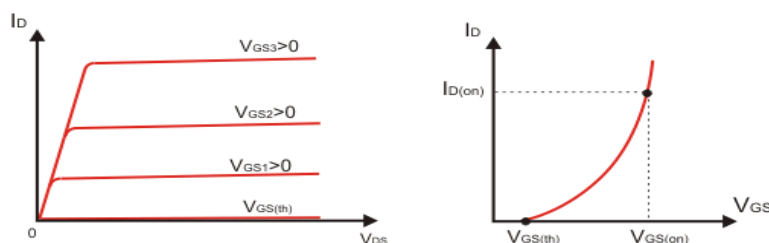
Έτσι στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης το ρεύμα του απαγωγού είναι αμελητέο.

Για να υπάρξει ρεύμα απαγωγού πρέπει να υπάρξουν ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα, δηλαδή το υπόστρωμα να μετατραπεί – έστω τοπικά – σε N – τύπου ώστε να μην υπάρχουν οι δίοδοι υποστρώματος – απαγωγού. Αυτό επιτυγχάνεται χάρις στο γεγονός ότι η πύλη σχηματίζει ένα πυκνωτή με το υπόστρωμα. Έτσι, αν εφαρμοστεί μια αρκετά «υψηλή» θετική τάση στην πύλη τότε ο οπλισμός της πύλης του πυκνωτή πύλης-υποστρώματος, φορτίζεται θετικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συσσωρευτεί αρνητικό φορτίο, δηλαδή ηλεκτρόνια, στο υπόστρωμα. Το φορτίο αυτό συσσωρεύεται στην περιοχή του υποστρώματος, η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από το λεπτό στρώμα του οξειδίου της πύλης καλύπτοντας όλη τη διαδρομή από την πηγή μέχρι τον απαγωγό. Έτσι δημιουργείται, τοπικά, ένα πολύ λεπτό στρώμα στο οποίο η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των οπών. Το στρώμα αυτό συμπεριφέρεται ως τύπου-N και η παρουσία του αποκαθιστά την αγωγιμότητα και συνεπώς το ηλεκτρικό ρεύμα, μεταξύ πηγής και απαγωγού. Αν στη συνέχεια, αυξηθεί η θετική τάση της πύλης, θα αυξηθεί και η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος απαγωγού. Το υπόστρωμα είναι P-τύπου και με την παρουσία του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου ένα λεπτό στρώμα αυτού, το οποίο εφάπτεται του στρώματος διοξειδίου του πυριτίου, μετατρέπεται σε N-τύπου.

Στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης το MOSFET τύπου πύκνωσης βρίσκεται σε κατάσταση off, επειδή δεν υπάρχει κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο ηλεκτρονικός συμβολισμός των MOSFET τύπου πύκνωσης διαύλου n και διαύλου p αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3.3: Ηλεκτρονικός συμβολισμός του MOSFET τύπου πύκνωσης<sup>[2]</sup>.

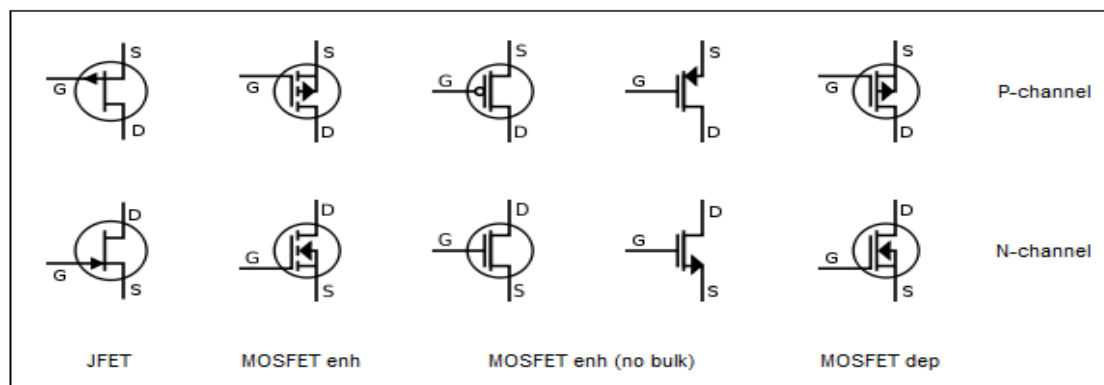


Σχήμα 2.3.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-απαγωγού & χαρακτηριστική καμπύλη διαγωγιμότητας<sup>[2]</sup>.

Στο προηγούμενο σχήμα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος απαγωγού συναρτήσει της τάσης απαγωγού-πηγής για διάφορες τιμές της τάσης πύλης. Όπως βλέπουμε η χαμηλότερα ευρισκόμενη καμπύλη αντιστοιχεί σε τάση πύλης ίση με την τάση κατωφλίου  $V_{GS(th)}$ . Έτσι όταν η τάση πύλης είναι μικρότερη της τάσης κατωφλίου το ρεύμα απαγωγού είναι σχεδόν μηδέν. Αντίθετα, όταν η τάση πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου το MOSFET άγει και το ρεύμα απαγωγού καθορίζεται από την τάση πύλης. Στις χαρακτηριστικές του σχήματος παρατηρούμε μια συμπεριφορά αντίστοιχη με αυτή των MOSFET αραίωσης, δηλαδή μια περιοχή όπου το ρεύμα παραμένει σχεδόν σταθερό (ενεργός περιοχή ή περιοχή πηγής ρεύματος). Στο σχήμα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας, η οποία και στην περίπτωση των MOSFET πύκνωσης αποτελεί μέρος μιας παραβολής η οποία αρχίζει, από το σημείο  $V_{GS(th)}$ .

Τα όρια τάσης πύλης καθορίζονται με το  $V_{GS(max)}$ , πράγμα που σημαίνει πως για τάσεις μεγαλύτερες της  $V_{GS(max)}$  το MOSFET καταστρέφεται.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τα κυκλωματικά σύμβολα διαφόρων τύπων MOSFET:



Σχήμα 2.3.5: Διάφορα κυκλωματικά σύμβολα MOSFET<sup>[2]</sup>.

### Κεφάλαιο 3: Περιγραφή ηλεκτρονικού μέρους

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε το ηλεκτρονικό μέρος του συστήματος. Ουσιαστικά ο αισθητήρας αποτελεί έναν συλλέκτη ενέργειας, ο οποίος μεταδίδει τα εκάστοτε δεδομένα μέσω της κεραίας του. Το κύκλωμα χωρίζεται στα δύο παρακάτω κύρια μέρη:

- Το μικρό φωτοβολταϊκό το οποίο διαδραματίζει τον ρόλο του συλλέκτη ενέργειας την οποία και χρησιμοποιεί το κύκλωμά μας για την λειτουργία του.
- Τον εκπομπό, που είναι συνήθως μια κεραία (εδώ το πηνίο), ο οποίος και μεταδίδει τα δεδομένα.

Το κύκλωμά μας θα κατασκευαστεί πάνω σε μια μικρή διάτρητη πλακέτα. Μέχρι πρότινος, στα συστήματα που υπάρχουν, η ενίσχυση του σήματος γινόταν συνήθως μέσω κάποιας μπαταρίας, σκοπός μας επομένως είναι να εξετάσουμε το κατά πόσο είναι δυνατή η κατάργηση της χρήσης των μπαταριών λόγω των γνωστών προβλημάτων που αυτές δημιουργούν εξαιτίας του όγκου τους, της ανάγκης επαναφόρτισής τους ή και κάποιες φορές της αντικατάστασής τους. Για να ξεπεραστούν λοιπόν τα προβλήματα αυτά, θα χρησιμοποιήσουμε σαν πηγή ενέργειας έναν συλλέκτη ενέργειας φωτός. Αν η κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά χαμηλή, το σύστημα μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, χρησιμοποιώντας μόνο την ισχύ του συλλέκτη ενέργειας. Ο τρόπος λειτουργίας ενός τέτοιου κυκλώματος περιγράφεται παρακάτω: το φωτοβολταϊκό πάνελ έχει σαν σκοπό να συλλέξει την απαραίτητη ενέργεια για την λειτουργία του κυκλώματος, και αφού αυτή μετατραπεί σε ηλεκτρομαγνητικό παλμό να μεταδώσει μέσω του εκπομπού την πληροφορία που θέλουμε σε έναν τοπικό δέκτη. Η ενέργεια που συλλέγεται στο πάνελ φορτίζει έναν πυκνωτή. Όταν ο πυκνωτής φορτιστεί πλήρως (πράγμα που σημαίνει ότι το φορτίο του είναι το μέγιστο δυνατό), απομονώνεται από το υπόλοιπο σύστημα, δηλαδή από την περισυλλογή ενέργειας, και τότε πραγματοποιεί ταλάντωση με το πηνίο. Έχει επιλεχθεί ένας πυκνωτής πολύ μικρής χωρητικότητας έτσι ώστε η φόρτιση να γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα, οπότε και δεν θα επηρεάζει το τελικό μας αποτέλεσμα. Παράλληλα χρησιμοποιούμε και δύο mosfet (pmos και nmos) έτσι ώστε να έχουμε ένα κύκλωμα μεταγωγής. Ο ρόλος του κυκλώματος μεταγωγής είναι να μπορεί να ανοίγει και να κλείνει το αγωγίμο μονοπάτι μεταξύ της πηγής και του φορτίου. Έτσι όσο το φωτοβολταϊκό έχει τάση μικρότερη από ένα κατώφλι τάσης  $V_{t1}$ , το κύκλωμα θα πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση ώστε να μην εκφορτίζεται το φωτοβολταϊκό. Μόλις η τάση του φωτοβολταϊκού ξεπεράσει την  $V_{t1}$ , το κύκλωμα θα πρέπει να μεταβαίνει στην αγωγίμη κατάσταση, και να παραμένει εκεί, μέχρι η τάση του φωτοβολταϊκού φτάσει σε μια στάθμη  $V_{t2}$  αρκετά χαμηλότερη της  $V_{t1}$ , ώστε

το φωτοβολταϊκό να εκφορτιστεί πλήρως πάνω στο φορτίο. Όταν η τάση του φωτοβολταϊκού γίνει μικρότερη της  $V_{t1}$ , το κύκλωμα θα πρέπει να επανέρχεται στην κατάσταση μεγάλης αντίστασης. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς.

Για να είναι πρακτικό βέβαια ένα τέτοιο σύστημα όπου την θέση της μπαταρίας θα πάρει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ είναι σημαντικό η κατανάλωση ενέργειάς του να είναι εξαιρετικά χαμηλή. Το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας καταναλώνεται από τον εκπομπό κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας με σκοπό την αποστολή δεδομένων, άρα η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται εκεί είναι ο ουσιαστικός σκοπός μας.

Στο σύστημά μας σαν πηγή χρησιμοποιούμε το φως του περιβάλλοντος, που μέσω του φωτοβολταϊκού μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι των συστημάτων με μπαταρίες είναι ο μικρότερος όγκος που καταλαμβάνουν τα μικρά πάνελ, και βέβαια ότι η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται από μια αναλώσιμη πηγή ενέργειας, οπότε γίνεται εύκολα κατανοητό πως και ο χώρος αλλά και το κόστος είναι εμφανώς μικρότερα.

Τον ρόλο της κεραίας στο σύστημά μας παίζει το πηνίο το οποίο μαζί με τον πυκνωτή παράγουν τον επιθυμητό ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Έτσι, και μέσω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής επιτρέπεται αποτελεσματικά η λήψη και η μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών παλμών, και άρα των δεδομένων. Όταν το σύστημά μας θα λειτουργεί σαν δέκτης, λαμβάνει τους παλμούς και τους μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ όταν λειτουργεί ως πομπός, λαμβάνει εναλλασσόμενο ρεύμα και το μετατρέπει αντίστοιχα σε παλμούς.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κυκλώματος καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτό κατασκευάστηκε. Επίσης παρουσιάζονται τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και το λογισμικό. Σαν σταθερή πηγή τάσης χρησιμοποιήθηκε ένα φωτοβολταϊκό (λόγω των χαρακτηριστικών του φωτοβολταϊκού). Προτιμήθηκε η συγκεκριμένη λύση για τροφοδοσία για όλους τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω ότι υπερτερούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε σχέση με τις μπαταρίες. Οι πυκνωτές, τα πηνία και τα mosfet που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:



Ο συνδυασμός των πυκνωτών με τα πηνία έγινε έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα στις συχνότητες. Στον υπολογισμό αυτό βέβαια λάβαμε υπόψη μας και τις τιμές που υπάρχουν στο εμπόριο. Οι τιμές που προέκυψαν υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον τύπο:  $f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$ , ενώ οι συχνότητες που θέλουμε να επιτύχουμε είναι 10KHz, 100KHz, 1MHz, 10MHz. Ο λόγος που επιλέχθηκαν τόσο μικρές χωρητικότητες είναι γιατί για πυκνωτές με μεγαλύτερες χωρητικότητες η πλήρης φόρτισή τους θα ήταν ουσιαστικά αδύνατη. Τα αποτελέσματα για τους διάφορους συνδυασμούς λοιπόν που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Συχνότητα F (Hz)	Πυκνωτές C (F)	Πηνία L (uH)
10000	1u	250
100000	24n	100
1000000	1n	22
10000000	100p	2.7

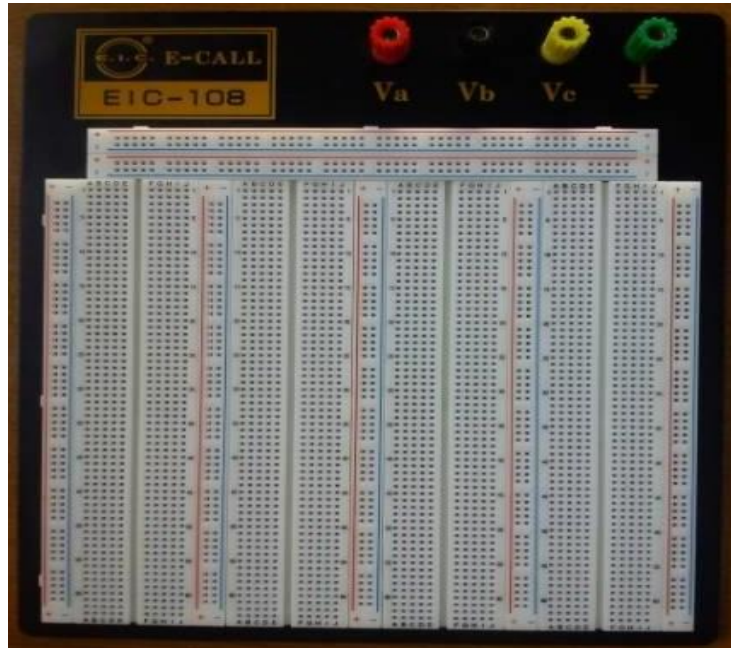
Πίνακας 3.1: Τιμές πυκνωτών και πηνίων σε συνάρτηση με την συχνότητα

Στον Πίνακα 3.2 που φαίνεται παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά παρόμοιων τύπων mosfet με αυτό που χρησιμοποιήσαμε τελικά. Το mosfet που τελικά χρησιμοποιούμε είναι το Si5515CDC της Vishay. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο γιατί θέλαμε να έχουμε μια πολύ μικρή αντίσταση  $R_{on}$  και να είναι σχετικά μικρής ισχύος.

Τύπος	Εταιρεία	$V_{MAX}(V)$	$V_{TH}(V)$	$R_{ON}(\Omega)$	$R_{OFF}(M\Omega)$	$P_{MAX}(W)$	Τιμή(€)	DIP Package
Si5515CDC	Vishay	20	0.4-0.8	0.041	2	3,1	0.97	OXI
IRFZ44N	Int.Rectifier	55	2-4	0.0175	2.2	94	0.50	NAI
IRF3707ZPBF	Int.Rectifier	30	1.35-2.25	0.0095	24	57	0,98	NAI
IRF3708PBF	Int.Rectifier	30	0.6-2	0.012	1.2	87	1.00	NAI
IRF3315PBF	Int.Rectifier	150	2-4	0.070	6	94	1.16	NAI
STS8DNF3LL	ST	30	1	0.024	3	1.6	0.54	OXI
BUZ11_NR4941	Fairchild	50	2.1-4	0.040	0.2	75	0.45	NAI
FDM3622	Fairchild	100	2-4	0.080	80	2.4	0.68	OXI
FDS8880	Fairchild	30	1.2-2.5	0.0163	24	2.5	7.70	OXI
SSM6J409TU	Toshiba	20	0.3-1	0.0723	2	1	0.88	OXI

Πίνακας 3.2: Διάφορα mosfet παρόμοιων χαρακτηριστικών του Si5515CDC

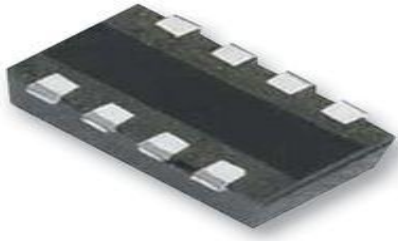
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν:



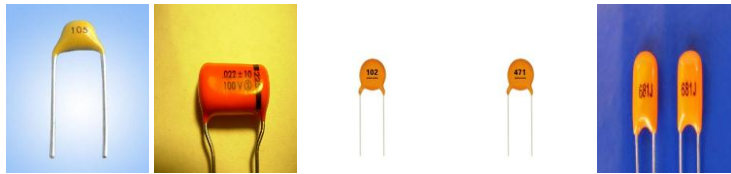
Σχήμα 3.1: Ράστερ κατασκευής κυκλωμάτων



Σχήμα 3.2: Μικρό φωτοβολταϊκό πάνελ



Σχήμα 3.3: Mosfet SI5515 της Vishay<sup>[12]</sup>.



Σχήμα 3.4: Οι πυκνωτές διαφόρων χωρητικότητων που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα<sup>[12]</sup>.



Σχήμα 3.5: Τα πηνία με διάφορες τιμές αυτεπαγωγής που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα<sup>[12]</sup>.

## Κεφάλαιο 4: Θεωρητικοί υπολογισμοί-Προσομοίωση

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι τιμές που προέκυψαν από τους θεωρητικούς υπολογισμούς αλλά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυκλώματος, η οποία έγινε με την βοήθεια του προγράμματος PSpice.

Για την προσομοίωση του κυκλώματος επιλέχθηκαν διάφορες τιμές R,L και C, έτσι ώστε να μελετηθεί καλύτερα η συμπεριφορά του. Οι τιμές που τελικά επιλέχθηκαν βοηθούν στην αποτελεσματική σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών υπολογισμών με αυτή των αποτελεσμάτων προσομοίωσης αλλά και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Σαν τάση φόρτισης έχουμε τα 5V, καθότι θεωρείται μια σχετικά χαμηλή τάση και είναι δυνατό να εμφανιστεί σε συλλέκτες ενέργειας.

Κατά την ανάλυση του κυκλώματος μελετήθηκαν η κυματομορφή εκπομπής, ο συντελεστής ποιότητας Q, και η ισχύς του σήματος. Τα αποτελέσματα αυτών θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην συνέχεια του συγκεκριμένου κεφαλαίου.

Συντελεστής ποιότητας Q είναι ένας συντελεστής ο οποίος μας δείχνει πόσο αργά αποσβένει ένας ταλαντωτής. Μας δείχνει δηλαδή πόσες ταλαντώσεις θα γίνουν πριν εξασθενίσει πλήρως η ταλάντωση . Όταν έχουμε υψηλό συντελεστή ποιότητας Q οι ταλαντώσεις διαρκούν περισσότερο χρονικό

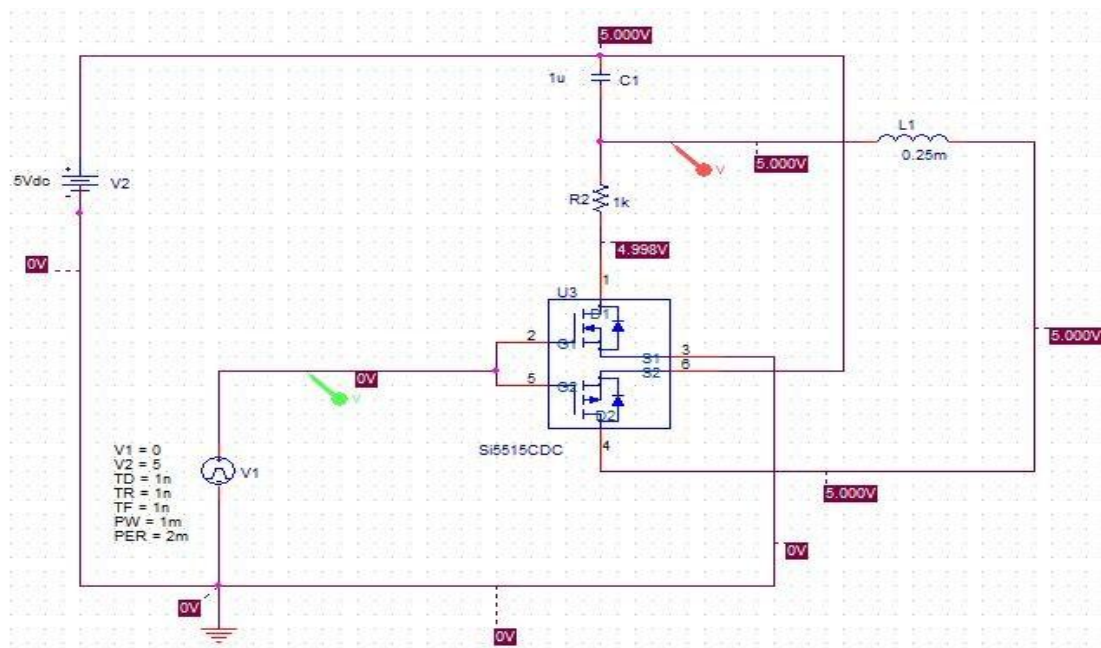
διάστημα. Σε ένα RLC κύκλωμα το Q εκφράζεται από την σχέση:  $Q = \frac{\omega L}{R_{\omega L}}$

όπου  $\omega = 2\pi f$  , ενώ σαν συνολική αντίσταση  $R_{\omega L}$  θεωρούμε το άθροισμα των αντιστάσεων των στοιχείων που συμμετέχουν στην ταλάντωση, δηλαδή την αντίσταση του  $R_{\omega L}$  αλλά και την αντίσταση  $R_L$  του πηνίου. Από την παραπάνω σχέση γίνεται εύκολα κατανοητό πως πυκνωτές μικρότερης χωρητικότητας αποδίδουν μεγαλύτερο Q, κάτι το φυσιολογικό εφόσον όσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα ταλάντωσης του RLC κυκλώματος. Επιπλέον παρατηρούμε πως αύξηση της γωνιακής συχνότητας  $\omega$  του κυκλώματος συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση του Q.

Ο συντελεστής ποιότητας Q σε ένα κύκλωμα RLC είναι ανάλογος της συχνότητας ταλάντωσης και της αυτεπαγωγής του πηνίου, και αντιστρόφως ανάλογος της συνολικής αντίστασης. Η μελέτη ενός τέτοιου δείκτη σε ασύρματα συστήματα είναι πολύ σημαντική γιατί μπορεί να φανερώσει κατά πόσο ένα σύστημα εκπομπής έχει την δυνατότητα να εκπέμψει έναν ικανοποιητικό αριθμό ταλαντώσεων, ιδιότητα πολύ σημαντική κατά την αποστολή πληροφοριών.

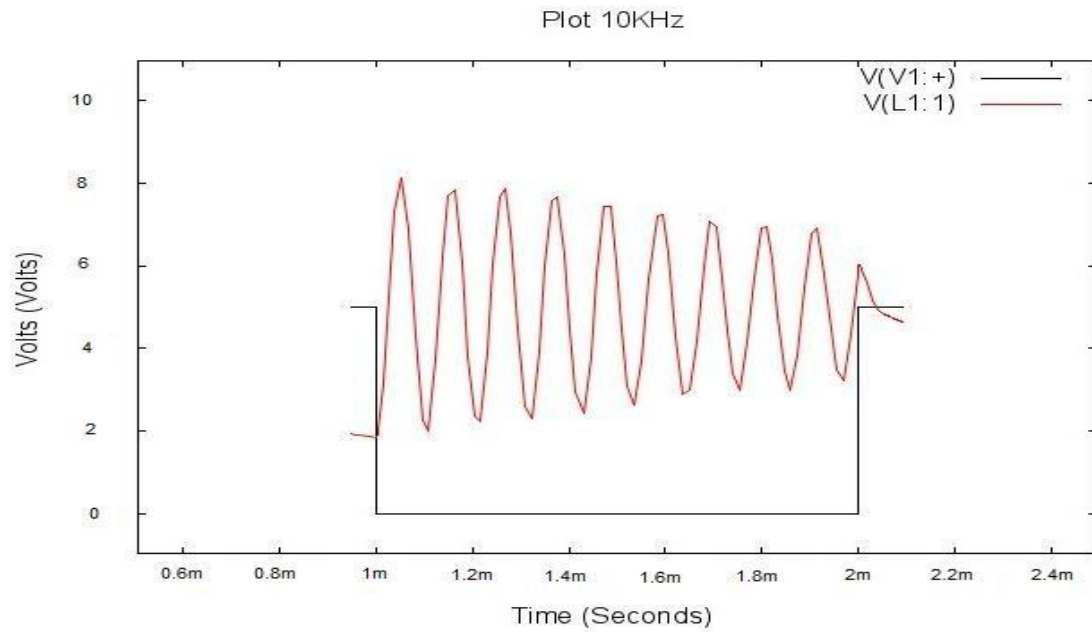
Ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας στην ασύρματη μετάδοση είναι η ισχύς που θα έχει το σήμα. Στο κύκλωμα που μελετήθηκε το σήμα είναι αποσβενόμενο, επομένως το πλάτος του δεν είναι σταθερό αφού μειώνεται με τον χρόνο.

Στόχος της προσομοίωσης είναι αρχικά να αξιολογηθούν τα αποτελέσματά της σε σχέση με την θεωρητική ανάλυση και κατόπιν να συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν από την εκτέλεση του πειραματικού μέρους. Παρακάτω παρατίθενται τα κυκλώματα αλλά και οι κυματομορφές που προέκυψαν στην προσομοίωση για τις διάφορες τιμές L και C που αναφέρθηκαν παραπάνω:

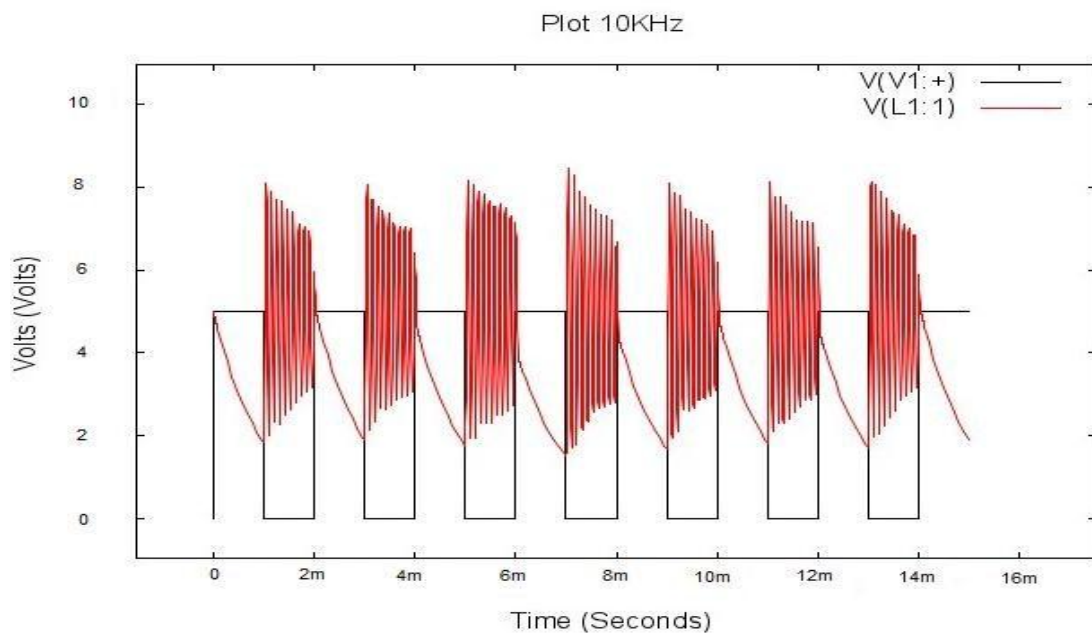


Σχήμα 4.1: Κύκλωμα για συχνότητα 10KHz

## Ασύρματος αισθητήρας φωτός

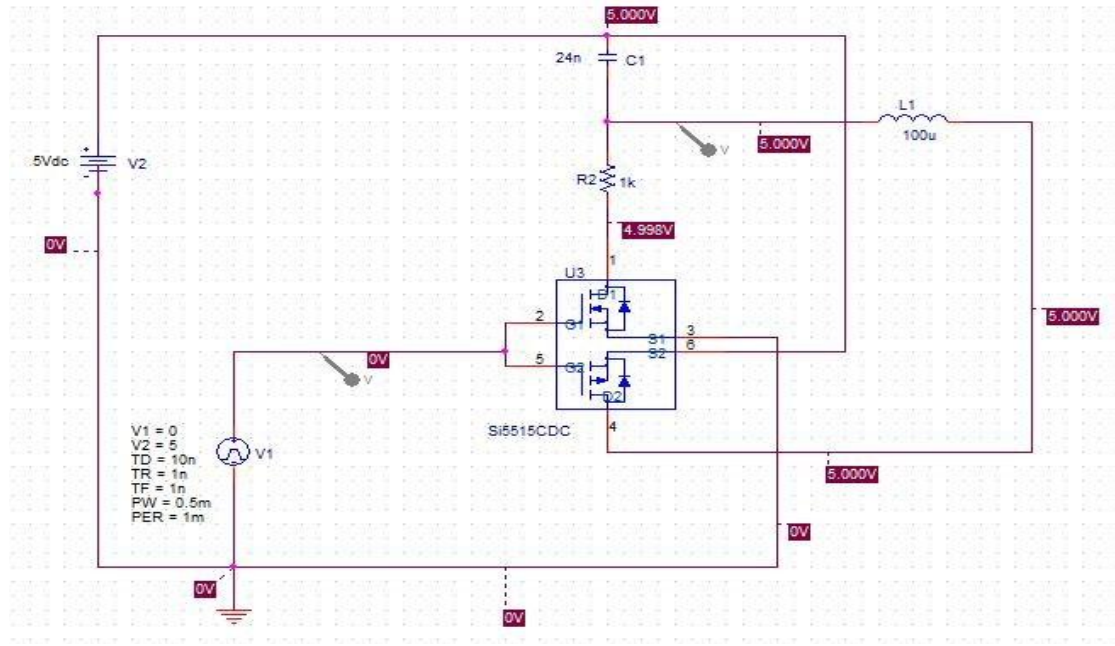


Σχήμα 4.2: Μονή κυματομορφή για συχνότητα 10KHz

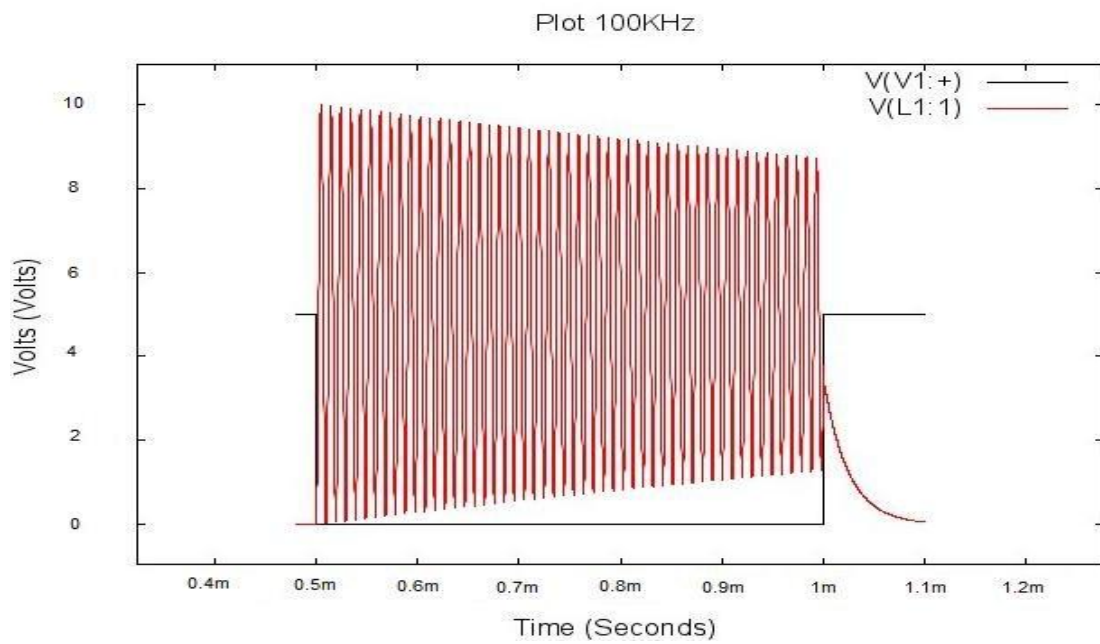


Σχήμα 4.3: Κυματομορφή για συχνότητα 10KHz σε πολλά στιγμιότυπα

Ασύρματος αισθητήρας φωτός



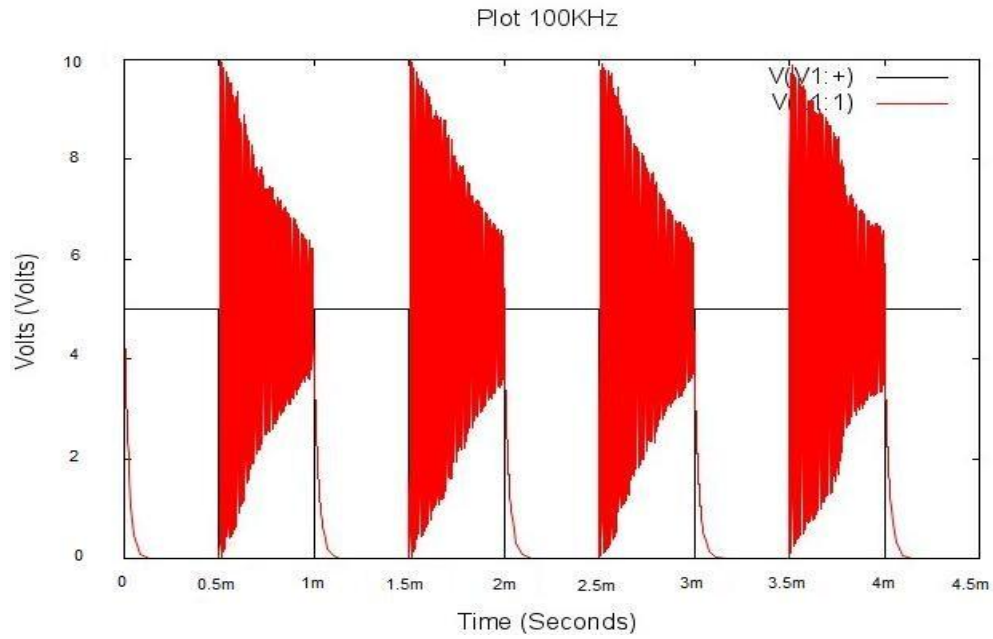
Σχήμα 4.4: Κύκλωμα για συχνότητα 100KHz



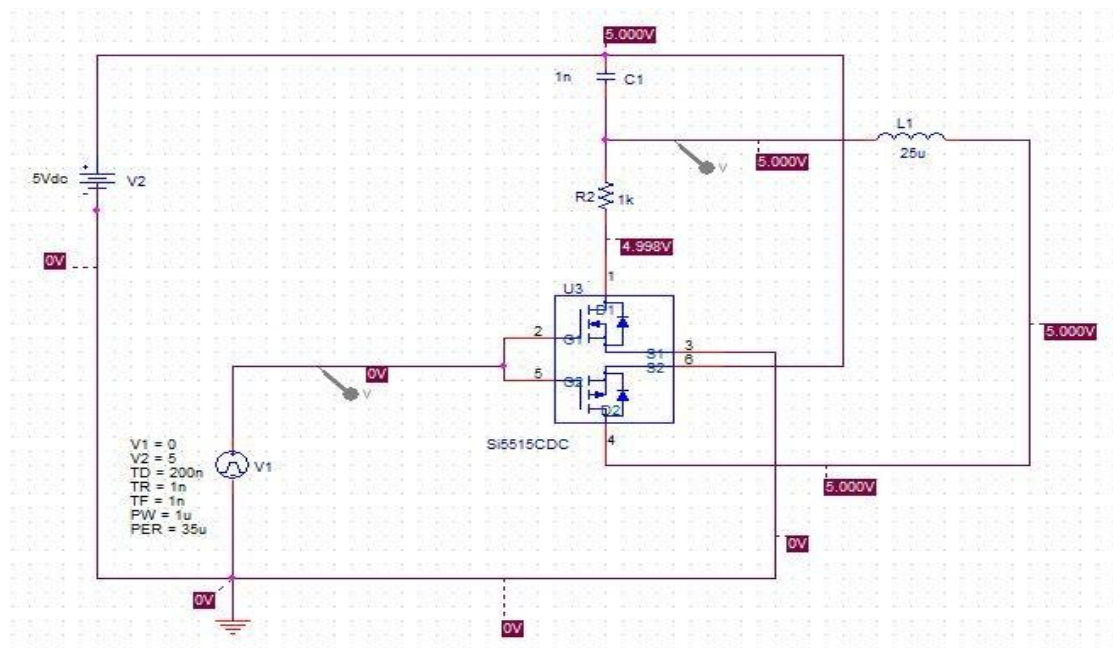
Σχήμα 4.5: Μονή κυματομορφή για συχνότητα 100KHz



Ασύρματος αισθητήρας φωτός



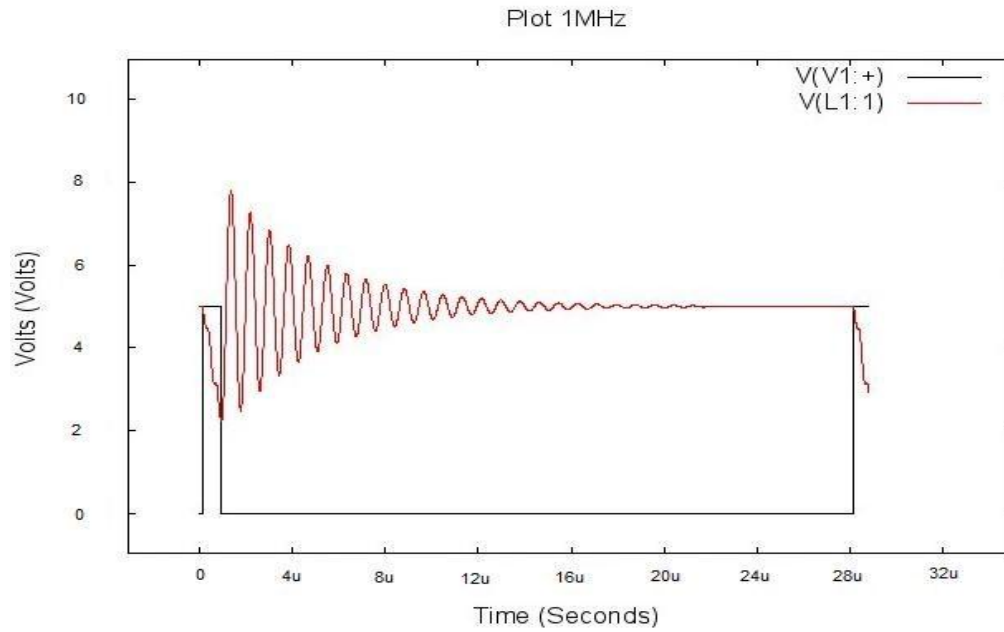
Σχήμα 4.6: Κυματομορφή για συχνότητα 100KHz σε πολλά στιγμιότυπα



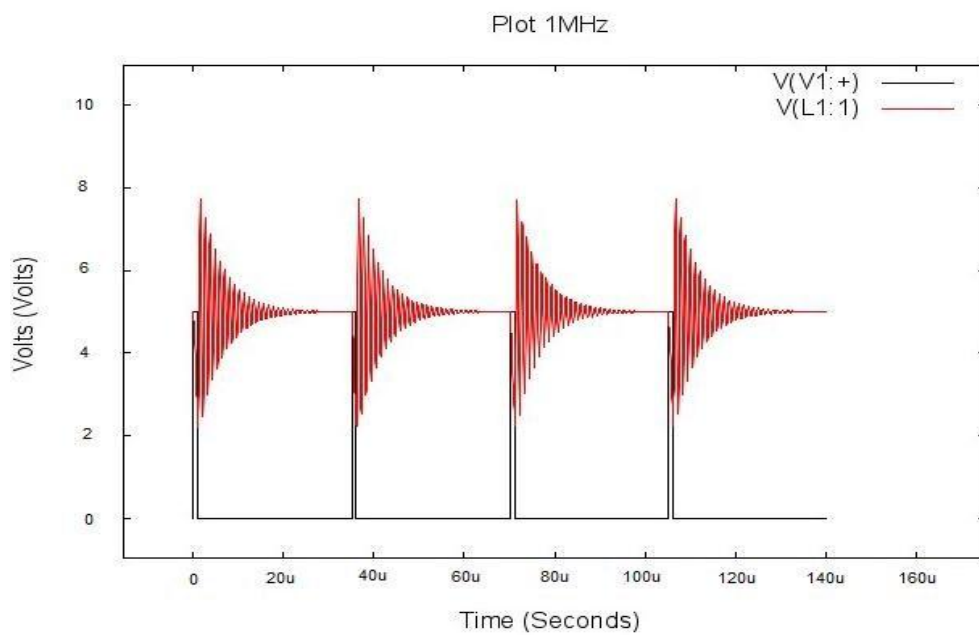
Σχήμα 4.7: Κύκλωμα για συχνότητα 1MHz



## Ασύρματος αισθητήρας φωτός

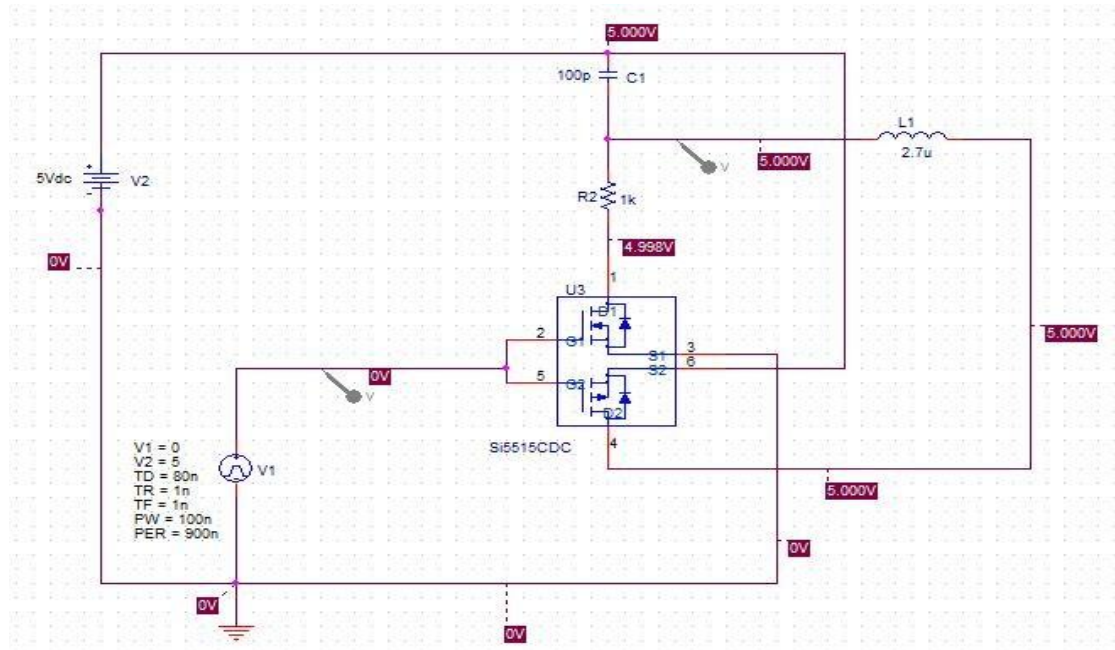


Σχήμα 4.8: Μονή κυματομορφή για συχνότητα 1MHz

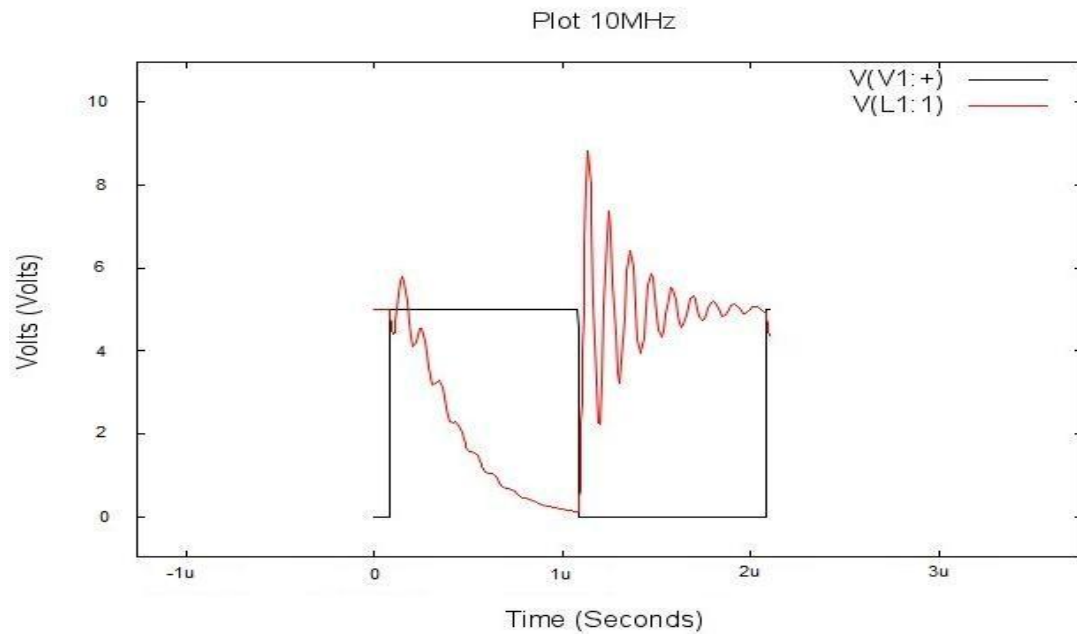


Σχήμα 4.9: Κυματομορφή για συχνότητα 1MHz σε πολλά στιγμιότυπα

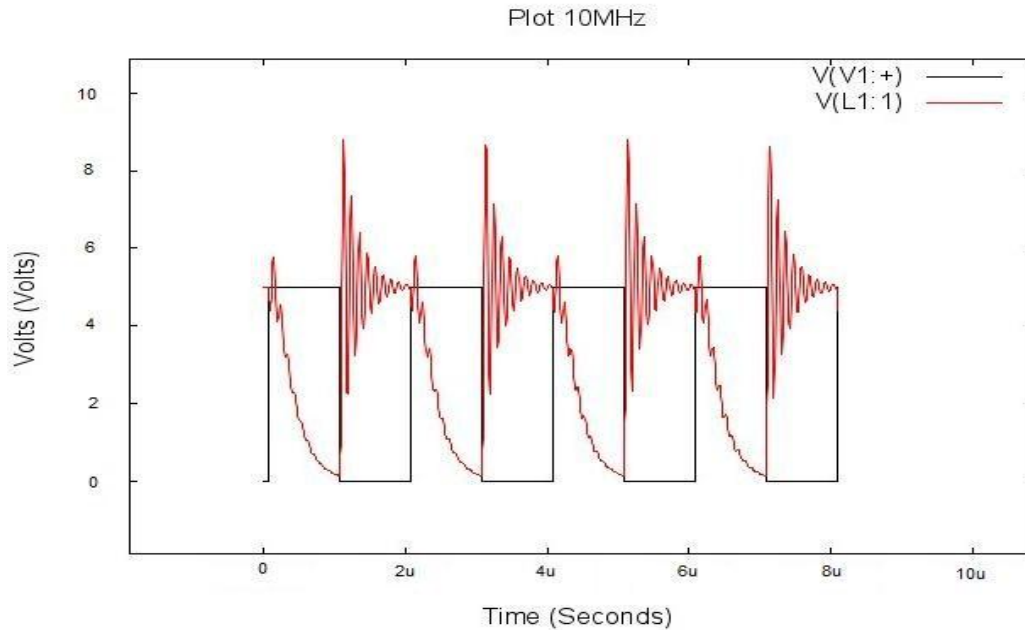
Ασύρματος αισθητήρας φωτός



Σχήμα 4.10: Κύκλωμα για συχνότητα 10MHz



Σχήμα 4.11: Μονή κυματομορφή για συχνότητα 10MHz



Σχήμα 4.12: Κυματομορφή για συχνότητα 10MHz σε πολλά στιγμιότυπα

Στο σχήμα 4.2 που αντιπροσωπεύει το στιγμιότυπο της ταλάντωσης για την συχνότητα των 10KHz, βλέπουμε ότι μια περίοδος ταλάντωσης γίνεται σε 0,11ms, οπότε σύμφωνα με τον τύπο  $f = \frac{1}{T}$  έχουμε το παρακάτω

αποτελέσματα:  $f = \frac{1}{0.11 \cdot 10^{-3}} = 9090.9Hz \cong 10KHz$ , πολύ κοντά δηλαδή στην

τιμή των 10KHz που είναι και η επιθυμητή. Για τις υπόλοιπες τιμές των συχνοτήτων, τα στιγμιότυπα των οποίων απεικονίζονται στα σχήματα 4.5 (100KHz), 4.8 (1MHz), 4.11 (10MHz), και πραγματοποιώντας την ίδια

διαδικασία όπως πρωτίτερα έχουμε:  $f = \frac{1}{0.01 \cdot 10^{-3}} = 100000Hz = 100KHz$ ,

$f = \frac{1}{1.1 \cdot 10^{-6}} = 909090.9Hz \cong 1MHz$ ,  $f = \frac{1}{0.11 \cdot 10^{-6}} = 9090909.9Hz \cong 10MHz$ .

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σχέση με τα αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Συχνότητα f (Hz)	Θεωρητική τιμή (Hz)
10000	9090.9
100000	100000
1000000	909090.9
10000000	9090909.9

Πίνακας 4.1: Συχνότητες προσομοίωσης σε σχέση με τις επιθυμητές συχνότητες

Βλέπουμε δηλαδή ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πλησιάζουν αρκετά με τα επιθυμητά αποτελέσματα που προέκυψαν από τους θεωρητικούς υπολογισμούς.

Από τις παραπάνω κυματομορφές επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε και τον συντελεστή ποιότητας  $Q$ . Έτσι σύμφωνα με τον τύπο  $Q = \frac{\omega L}{R_{o\lambda}}$  θα έχουμε για τις διάφορες συχνότητες:

- Για την συχνότητα των 10KHz:

$$Q = \frac{\omega L}{R_{o\lambda}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R_M + R_L} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 250 \cdot 10^{-6}}{0.1 + 6.8} = 2.2$$

- Για την συχνότητα των 100KHz:

$$Q = \frac{\omega L}{R_{o\lambda}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R_M + R_L} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0.1 + 5} = 12.3$$

- Για την συχνότητα του 1MHz:

$$Q = \frac{\omega L}{R_{o\lambda}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R_M + R_L} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 22 \cdot 10^{-6}}{0.1 + 2.7} = 493.4$$

- Για την συχνότητα των 10MHz:

$$Q = \frac{\omega L}{R_{o\lambda}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R_M + R_L} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6}}{0.1 + 1} = 1541.4$$

Τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά του συντελεστή ποιότητας σε σχέση με τις συχνότητες και τις χωρητικότητες φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.2:

Συχνότητα (Hz)	Χωρητικότητα (F)	Συντελεστής ποιότητας Q
10000	1u	2.2
100000	24n	12.3
1000000	1n	493.4
10000000	100p	1541.4

Πίνακας 4.2 : Συντελεστής ποιότητας σε συνάρτηση με χωρητικότητες και συχνότητες

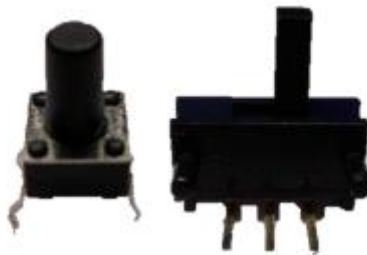
Παρατηρούμε δηλαδή πως όσο αυξάνεται η συχνότητα της ταλάντωσης, έχουμε δηλαδή μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή, το Q μεγαλώνει. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως για μεγαλύτερες συχνότητες έχουμε και μεγαλύτερο συντελεστή ποιότητας και αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτές τις συχνότητες καθότι έχουμε μικρές χωρητικότητες έχουμε και μικρές περιόδους ταλάντωσης, άρα και μικρότερο χρόνο αποφόρτισης. Αυτό σημαίνει πως η ταλάντωση θα γίνεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και θα έχουμε και καλύτερη μετάδοση των δεδομένων.

Στο παραπάνω συμπέρασμα βέβαια μπορούμε να καταλήξουμε παρατηρώντας και τις καμπύλες (σχήματα 4.2, 4.5, 4.8 και 4.11) που σχηματίζονται για τις διάφορες τιμές συχνοτήτων. Έτσι βλέπουμε ότι η μικρότερη καμπύλη βρίσκεται στην συχνότητα των 10KHz, ενώ όσο ανεβαίνει η τιμή της συχνότητας παρατηρούμε πως η καμπύλη αυτή γίνεται πιο απότομη, δηλαδή όπως και στους θεωρητικούς υπολογισμούς μας μεγαλώνει ο συντελεστής ποιότητας Q. Επομένως, έχουμε μια συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών μας αποτελεσμάτων και αυτών που προέκυψαν από την διαδικασία της προσομοίωσης.

## Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια ανάλυση για το πώς έγινε η διαδικασία κατασκευής του κυκλώματός μας. Μετά την επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων, δηλαδή των αντιστάσεων, των πυκνωτών, των πηνίων και των mosfet, τα οποία πραγματοποιώντας τους κατάλληλους συνδυασμούς μας έδιναν τα επιθυμητά αποτελέσματα, ξεκινήσαμε την διαδικασία κατασκευής του κυκλώματος. Δυστυχώς όμως κατά την διάρκεια κατασκευής του αντιμετωπίσαμε κάποια προβλήματα τα οποία και θα αναλύσουμε στο παρών κεφάλαιο.

Η αρχική σκέψη ήταν το κύκλωμα να κατασκευαστεί πάνω σε ένα ράστερ (βλέπε σχήμα 3.1), σύμφωνα με αυτό το οποίο είχαμε στην προσομοίωση. Η μόνη αλλαγή που θα γινόταν ήταν να έμπαινε ένας διακόπτης τύπου push button ή toggle στην θέση της παλμογεννήτριας.



Σχήμα 5.1: Δύο τύποι διακοπών (αριστερά push button, δεξιά toggle)<sup>[3]</sup>.

Η λειτουργία είναι η ακόλουθη: Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός τότε στην πύλη G1 του pmos δεν υπάρχει τάση, επομένως το mosfet δεν άγει γιατί η διαφορά  $V_G - V_S = 0$  (για να άγει χρειάζεται μια τιμή διάφορη του μηδενός). Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του πυκνωτή είναι 5V, δηλαδή ο πυκνωτής είναι φορτισμένος, ενώ το nmos άγει καθώς η διαφορά  $V_G - V_S = 5V$ . Έπειτα, όταν κλείσει ο διακόπτης, η πύλη του pmos δέχεται τάση επομένως πλέον η διαφορά  $V_G - V_S = 5V$ . Άρα το mosfet άγει. Αυτό όμως επιτρέπει την τάση να περάσει προς το άκρο του οπλισμού του πυκνωτή, επομένως η διαφορά δυναμικού στα άκρα του πια να είναι 0V. Η διαφορά  $V_G - V_S$  γίνεται ίση με μηδέν για το nmos επομένως πλέον το mosfet αυτό δεν άγει. Δημιουργείται επομένως μια ταλάντωση μεταξύ του πηνίου και του πυκνωτή, ενώ στην συνέχεια ο πυκνωτής αποφορτίζεται μέχρις ότου ανοίξουμε και πάλι τον διακόπτη ώστε να ξεκινήσει και πάλι η ίδια διαδικασία. Παρατηρούμε δηλαδή πως πολύ σημαντικός παράγοντας για την λειτουργία του κυκλώματος είναι τα δύο mosfet nmos και pmos.

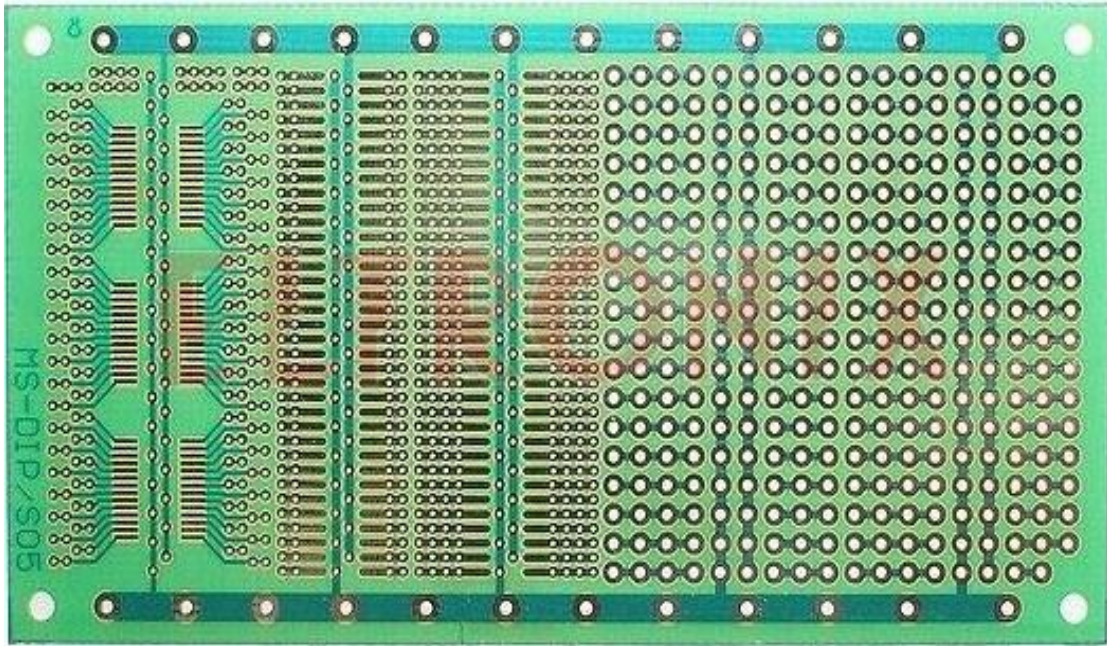
Αρχικά επιλέχθηκε το mosfet (cmos) με την πολύ χαμηλή αντίσταση  $R_{on}$  (Si5515 της Vishay) και έγινε η παραγγελία του. Το μεγαλύτερο πρόβλημα όμως που είχαμε να αντιμετωπίσουμε σχετικά με αυτό το mosfet ήταν πως το μέγεθός του ήταν πάρα πολύ μικρό (μόλις 3x1mm). Αυτό οδηγούσε στο να δημιουργηθούν προβλήματα σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο θα γίνουν οι απαραίτητες κολλήσεις έτσι ώστε το mosfet να ενσωματωθεί στο υπόλοιπο κύκλωμα. Χαρακτηριστική για το πόσο μικρό είναι το mosfet είναι το σχήμα 5.2 που ακολουθεί παρακάτω.



Σχήμα 5.2: Το mosfet Si5515 σε σύγκριση με ένα κέρμα

Στην συνέχεια διερευνήθηκαν διάφοροι τρόποι για να αντιμετωπιστεί η παραπάνω δυσκολία. Αρχικά έγινε η προσπάθεια το mosfet να προσκολληθεί πάνω σε μια διάτρητη πλακέτα όπως αυτή του σχήματος 5.3.

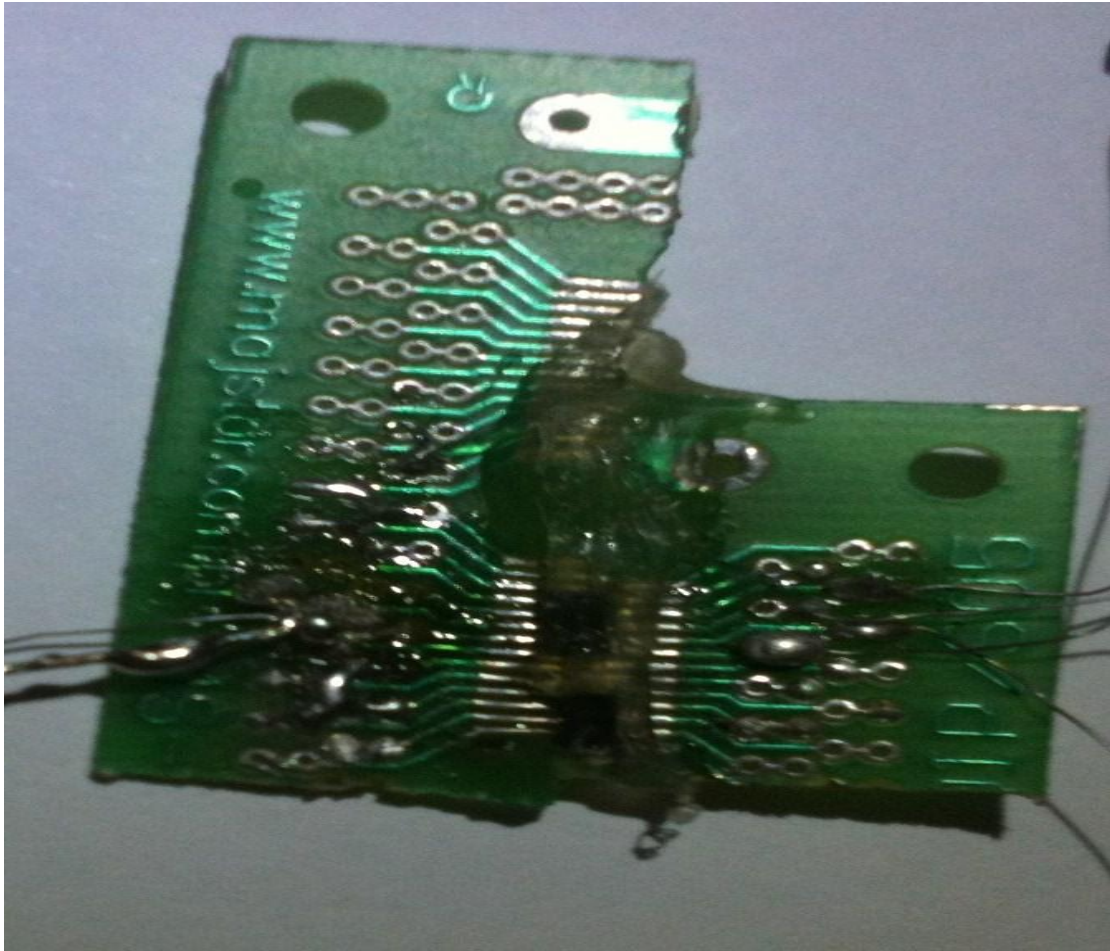




Σχήμα 5.3: Διάτρητη πλακέτα MS-DIP/S05<sup>[12]</sup>.

Δυστυχώς όμως και παραπάνω προτεινόμενη λύση δεν έλυσε το πρόβλημά μας. Λόγω του πολύ μικρού μεγέθους του mosfet που επισημάνθηκε και παραπάνω, οι κολλήσεις έπρεπε να γίνουν με ειδικά εργαλεία και μεγεθυντικό φακό, πράγμα που απαιτεί μεγάλη εξειδίκευση κάτι το οποίο εμείς δεν έχουμε. Έγιναν βέβαια κάποιες προσπάθειες όπως φαίνεται στην σχήμα 5.4, αλλά λόγω των κοντινών αποστάσεων μεταξύ των pins του mosfet οι μεγάλες θερμοκρασίες που υπήρχαν κατά την κόλληση ίσως και να έκαψαν το ήδη ευαίσθητο εξάρτημά μας. Στην προσπάθεια που έγινε για τον έλεγχό του τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα οπότε δεν μπορούσαμε να το χρησιμοποιήσουμε στο κύκλωμά. Το ίδιο πρόβλημα βεβαίως αντιμετωπίζουν και πολλές ερευνητικές ομάδες καθώς η όλη επεξεργασία smd εξαρτημάτων απαιτεί πολύ καλές γνώσεις αλλά και μεγάλη εμπειρία.





Σχήμα 5.4: Το mosfet πάνω στην διάτρητη πλακέτα.

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό από την παραπάνω εικόνα η προσπάθεια κόλλησης ακόμα και πολύ λεπτών συρμάτων επάνω στην πλακέτα δεν ήταν δυνατό καθώς απαιτούνταν πολύ λεπτοί χειρισμοί και ουσιαστικά η πλακέτα έγινε μην πρακτική και το mosfet δεν μπορούσε πλέον να χρησιμοποιηθεί καθώς είχε καταστραφεί. Για τους παραπάνω λόγους δεν κατέσκει δυνατή η πειραματική μέτρηση για τις διάφορες τιμές συχνοτήτων.

## Κεφάλαιο 6: Επίλογος

Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της πτυχιακής εργασίας, καθώς επίσης και μέσω των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που προέκυψαν, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια σύνοψης της εργασίας ενώ παράλληλα προτείνονται και κάποιες μελλοντικές αναβαθμίσεις του συστήματος που θα μπορέσουν να οδηγήσουν στην εκτενέστερη και βαθύτερη μελέτη του.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε σαν στόχο να εξετασθεί το κατά πόσο είναι εφικτή η αποστολή δεδομένων μέσω ηλεκτρομαγνητικών παλμών χρησιμοποιώντας την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας κάτι το οποίο το επιτύχαμε χρησιμοποιώντας σαν πηγή για το σύστημά μας μικρά φωτοβολταϊκά πάνελ και όχι μπαταρίες, μειώνοντας έτσι παράλληλα και το κόστος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μια τέτοια απευθείας αποστολή είναι εφικτή και πολλά υποσχόμενη αλλά επιδέχεται και πολλές βελτιώσεις. Το καλό είναι ότι πολλοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά τα αποτελέσματα είναι εύκολα ανιχνεύσιμοι και σχετίζονται κυρίως με τον τρόπο κατασκευής του κυκλώματος και τις επιρροές από το περιβάλλον. Το κύκλωμα σίγουρα επιδέχεται βελτιώσεις έτσι ώστε το εκπεμπόμενο σήμα που φέρει την πληροφορία να καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις και να μην επηρεάζεται τόσο από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές του περιβάλλοντος. Από την στιγμή λοιπόν που οι βελτιώσεις που επιδέχεται το σύστημα δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη δυσκολία, μπορούμε να πούμε πως αυτή η μέθοδος αποστολής δεδομένων που μελετήθηκε, μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη.

Πιο συγκεκριμένα θα μπορούσαν να γίνουν οι ακόλουθες βελτιώσεις. Όσο αφορά την κατασκευή του κυκλώματος, θα μπορούσαμε να έχουμε κάποια άλλα mosfet με παρόμοια χαρακτηριστικά των οποίων το μέγεθος θα ήταν αρκετά μεγαλύτερο έτσι ώστε η οποιαδήποτε επεξεργασία τους να μην ήταν τόσο πολύπλοκο θέμα. Βέβαια μεγαλύτερα εξαρτήματα ίσως να οδηγούσαν στην αύξηση του μεγέθους του κυκλώματος αλλά και πάλι αυτό θα ήταν αρκετά μικρό και πρακτικό.

Τέλος προτείνεται στην θέση του διακόπτη να κατασκευαστεί ένα ειδικό κύκλωμα με mosfet το οποίο θα κλείνει και θα ανοίγει το αγώγιμο μονοπάτι όπως ακριβώς ο διακόπτης, κάνοντας έτσι το σύστημα ακόμη πιο αυτόνομο και πιο εύκολο στην λειτουργία του.

## Βιβλιογραφία

- [1] Βιβλίο Ηλεκτρονικής Malvino
- [2] Διδακτορική διατριβή για τα mosfet Γεώργιος Σπ. Ράικος.
- [3] Διπλωματική εργασία Χρήστου Β. Ηλιούδη < Καινοτομική πλατφόρμα επικοινωνίας για δίκτυα MEM's αισθητήρων βιοϊατρικής >, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Πολυτεχνική σχολή, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών Κατεύθυνσης Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων.
- [4] Εργασία για τα φωτοβολταϊκά πάνελ των Viktor Schlosser και Ahmed Ghitas, <Measurement of silicon solar cells ac parameters>, Institute for Material Physics, Faculty of Physics, Vienna Austria.
- [5] Οδηγός μελέτης και υλοποίησης φωτοβολταϊκών έργων-Πόρισμα της ομάδας εργασίας του ΤΕΕ, Μέλη ομάδας : Μωυσής Δαμιανίδης, Γεώργιος Κατσαρός, Ματθαίος Τόλης, Φώτιος Στεργιόπουλος.
- [6] Πανεπιστήμιο Κρήτης, Βιβλίο εργαστηρίου, <Εισαγωγή στην μικροηλεκτρονική>
- [7] Ιστοσελίδα : [www.arcmeletitiki.gr](http://www.arcmeletitiki.gr) <Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο>
- [8] Ιστοσελίδα: [www.bestprice.gr](http://www.bestprice.gr) <Συσκευές όπου μπαίνουν αισθητήρες φωτός>
- [9] Ιστοσελίδα [www.wikispaces.com](http://www.wikispaces.com) <Πληροφορίες για αισθητήρες φωτός>
- [10] Ιστοσελίδα [www.electronicslab.eu](http://www.electronicslab.eu) < Πληροφορίες για mosfet>
- [11] Ιστοσελίδα [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) <Πληροφορίες για αισθητήρες φωτός και mosfet>
- [12] Ιστοσελίδα [www.google.gr](http://www.google.gr) < Εικόνες για φωτοβολταϊκά πάνελ>