



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΕΛΛΑΔΟΣ

**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΦΩΤΟΔΙΟΔΩΝ ΓΙΑ  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΚΕΔΑΣΗΣ ΣΕ ΦΟΡΗΤΟΥΣ  
ΟΠΤΙΚΟΥΣ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ**

**IMPLEMENTATION OF PHOTODIODE ARRAYS  
FOR SCATTERING ANALYSIS IN PORTABLE  
BIOMEDICAL SENSORS**

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΗΛΙΑΣ ΚΑΒΟΥΚΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΙΧΑΗΛ ΚΙΖΗΡΟΓΛΟΥ**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020**

## ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω κάνει σαφείς αναφορές (συντάκτη, χρονολογία, εργασία, σελίδα) στις πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, προτάσεων, ιδεών ή λέξεων είτε αυτές αναφέρονται αυτολεξεί είτε βάση επιστημονικής παράφρασης. Ακόμα, αναλαμβάνω την προσωπική μου ευθύνη, ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των παραπάνω στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι στην κατηγορία της λογοκλοπής που σημαίνει αποτυχία σε αυτήν την Πτυχιακή εργασία ή και πιο σοβαρές κυρώσεις κατόπιν συμφωνίας.

Υλοποίηση διατάξεων φωτοδιόδων για ανάλυση σκέδασης σε φορητούς οπτικούς βιοϊατρικούς αισθητήρες

Ηλίας Καβούνης

Υπογραφή

Ηλίας Καβούνης

Ημερομηνία: 19/08/2020

Όνομα επιβλέποντα

Καθηγητής Μιχαήλ Κιζήρογλου

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Μιχαήλ Κιζήρογλου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον θέμα και για την αμέριστη επιστημονική βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε. Τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τις εξαιρετικά ωφέλιμες παρατηρήσεις του στην επεξεργασία του θέματος αυτού.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές που μου έδωσαν μία ποικιλία γνώσεων σε όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων καθώς το έργο τους ξεπερνά κατά πολύ την απλή εκπαίδευση φοιτητών και θεωρώ τον εαυτό μου τυχερό που ήμουν μέλος μίας τέτοιας σχολής σπουδαίων επιστημών μα πάνω από όλα σπουδαίων ανθρώπων.

Τέλος πρέπει να εκφράσω την πολύ βαθιά ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και στην αδερφή μου, που μου έδωσαν αδιάκοπη υποστήριξη και συνεχή ενθάρρυνση σε όλη την διάρκεια όχι μόνο των σπουδών μου αλλά της ζωής μου, φροντίζοντας έτσι για την καλύτερη δυνατή μόρφωσή μου. Αυτό το επίτευγμα δεν θα ήταν δυνατό χωρίς αυτούς. Απλά ευχαριστώ.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα Πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια μιας νέας υλοποίησης μικροηλεκτρονικών συστημάτων ώστε να επιτευχθεί μέτρηση της οπτικής συμπεριφοράς του αίματος. Η προσπάθεια που έγινε είχε να κάνει με την εύρεση κατάλληλης φωτοδιόδου που να μπορεί να βελτιστοποιήσει το ήδη προϋπάρχον πείραμα της μέτρησης της οπτικής συμπεριφοράς του αίματος και μέσω αναπτυγμένων γεωμετρικών διατάξεων να μπορεί να συλλέγει όσον το δυνατόν περισσότερη πληροφορία. Το πείραμα βασίζεται στην ανάπτυξη ενός φορητού συστήματος μετρήσεως, το οποίο αποτελείται από τον μικροϋπολογιστή Beaglebone Black Rev C, την πλακέτα φωτοδιόδου που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τις ανάγκες του πειράματος και τέλος την συσκευή παραγωγής ακτίνας μονοχρωματικού φωτός(laser). Αυτή η μέθοδος προτείνεται για την συνεχόμενη μέτρηση των κυττάρων του αίματος.

## **ABSTRACT**

This dissertation demonstrates a new implementation of microelectronic systems in order to achieve a measurement of the visual behavior of the blood. A research has been made to find a suitable photodiode so that the previous experiment of measuring the behavior of the blood can be optimized and through geometrical methods to collect as much light information as possible. The experiment is based on the development of a portable measuring system that is made of the Beaglebone Black Rev C microcontroller, the photodiode array that has been designed and fabricated within the needs of the experiment and a monochromatic laser light source. This device concept is proposed for continuous counting of blood cells.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |    |
|--|----|
| <u>ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ</u> .....           | 2  |
| <u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u> .....                             | 3  |
| <u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u> .....                                | 4  |
| <u>ABSTRACT</u> .....                                | 5  |
| <u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u> .....                             | 6  |
| <u>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u> .....                             | 9  |
| <u>1.1 ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΑ</u> .....                | 9  |
| <u>1.1.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ</u> .....            | 9  |
| <u>1.1.2 ΔΙΟΔΟΣ</u> .....                            | 12 |
| <u>1.1.3 ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ</u> .....                        | 15 |
| <u>1.1.4 ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ (CCD)</u> ..... | 17 |
| <u>1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u> .....   | 19 |
| <u>1.3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u> .....             | 20 |
| <u>2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ</u> .....                  | 21 |
| <u>2.1 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ</u> .....            | 21 |
| <u>2.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ</u> .....     | 25 |
| <u>2.3 ΕΡΕΥΝΑ ΑΓΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ</u> .....       | 39 |
| <u>3. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u> .....              | 42 |
| <u>3.1 ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ</u> .....      | 42 |
| <u>3.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ</u> .....                   | 47 |
| <u>4. Βιβλιογραφία</u> .....                         | 49 |

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|  |    |
|--|----|
| <a href="#">Σχήμα 1: Ολοκληρωμένο κύκλωμα δεκατεσσάρων ακροδεκτών</a>  | 10 |
| <a href="#">Σχήμα 2: Παράδειγμα σύνθετου ολοκληρωμένου κυκλώματος πάνω σε πλακέτα</a>  | 11 |
| <a href="#">Σχήμα 3: Κβαντικό κύκλωμα πυριτίου</a>   | 12 |
| <a href="#">Σχήμα 4: Ηλεκτρική αποτύπωση της διόδου εσωτερικά</a>  | 13 |
| <a href="#">Σχήμα 5: Ορθή και ανάστροφη πόλωση μίας διόδου</a>   | 14 |
| <a href="#">Σχήμα 6: Απεικόνιση τυπικής διακριτής διόδου</a>   | 14 |
| <a href="#">Σχήμα 7: Αναπαράσταση διόδου ως μια επαφή υλικού τύπου-P και υλικού τύπου-N</a>                                      | 16 |
| <a href="#">Σχήμα 8: Η κάθοδος και η άνοδος της τυπικής φωτοδιόδου (LED)</a>   | 16 |
| <a href="#">Σχήμα 9: Διάταξη μίας συστοιχίας φωτοδιόδων</a>  | 17 |
| <a href="#">Σχήμα 10: Κλαστικό παράδειγμα αισθητήρα CCD (συσκευής συζευγμένου φορτίου)</a>                                       | 19 |
| <a href="#">Σχήμα 11: Παρουσίαση του αισθητήρα TCD1103GFG και απεικόνιση των δύο όψεων του</a>                                   | 25 |
| <a href="#">Σχήμα 12: Το σήμα του σχεδιαστικού προγράμματος EAGLE</a>  | 26 |
| <a href="#">Σχήμα 13: Η πλακέτα του προηγούμενου πειράματος που βασίστηκε η δημιουργία του καινούριου</a>                        | 27 |
| <a href="#">Σχήμα 14: Η αρχική οθόνη του Eagle όταν ανοίγει το πρόγραμμα</a>   | 28 |
| <a href="#">Σχήμα 15: Εισαγωγική παρουσίαση του προγράμματος</a>   | 30 |
| <a href="#">Σχήμα 16: Η απεικόνιση του αισθητήρα από το φύλλο προδιαγραφών (datasheet) για την σχεδίαση του πάνω στη πλακέτα</a> | 31 |
| <a href="#">Σχήμα 17: Οι διάφορες όψεις του αισθητήρα αναλυτικά όπως δίνονται στο φύλλο προδιαγραφών (datasheet)</a>             | 32 |
| <a href="#">Σχήμα 18: Η γραμμή εργαλείων του Eagle</a>   | 33 |
| <a href="#">Σχήμα 19: Παράδειγμα της αλλαγής διαστάσεων γραμμής στο Eagle</a>  | 34 |
| <a href="#">Σχήμα 20: Το περίγραμμα της πλακέτας σχεδιασμένο στο Bottom Layer</a>  | 34 |
| <a href="#">Σχήμα 21: Γραφική απεικόνιση του συνδετήρα στο Vias Layer</a>  | 35 |
| <a href="#">Σχήμα 22: Γραφική προσθήκη του αισθητήρα και των κειμένων στα στρώματα Pads και Tnames αντίστοιχα</a>                | 36 |
| <a href="#">Σχήμα 23: Σύνδεση του αισθητήρα με τον συνδετήρα οκτώ ακροδεκτών στο στρώμα top</a>                                  | 37 |
| <a href="#">Σχήμα 24: Το ολοκληρωμένο σχέδιο της πλακέτας που θα σταλεί για εκτύπωση</a>   | 38 |
| <a href="#">Σχήμα 25: Η απεικόνιση της πλακέτας μετά τις τελευταίες διορθώσεις και πάνω δεξιά το λογότυπο του πανεπιστημίου</a>  | 40 |
| <a href="#">Σχήμα 26: Τελικό αποτέλεσμα προηγούμενης έκδοσης της πλακέτας</a>  | 42 |
| <a href="#">Σχήμα 27: Παρουσίαση της πλακέτας από την εταιρεία quarks electronics</a>  | 43 |
| <a href="#">Σχήμα 28: Η πλακέτα μετά την κόλληση του συνδετήρα</a>   | 44 |
| <a href="#">Σχήμα 29: Η πλακέτα ολοκληρωμένη μετά και την κόλληση του αισθητήρα</a>  | 44 |
| <a href="#">Σχήμα 30: Η πλακέτα της εταιρείας JLC PCB</a>  | 45 |
| <a href="#">Σχήμα 31: Η πλακέτα της εταιρείας JLC PCB από άλλη όψη</a>   | 46 |
| <a href="#">Σχήμα 32: Αναπαράσταση του πειράματος</a>  | 48 |

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

|  |    |
|--|----|
| <u>Πίνακας 1: Παράθεση διαθέσιμων αισθητήρων φωτοдиодων στην αγορά.....</u>                                    | 20 |
| <u>Πίνακας 2: Περαιτέρω ανάλυση και έρευνα αγοράς για την εύρεση κατάλληλου<br/>αισθητήρα φωτοдиодου .....</u> | 21 |
| <u>Πίνακας 3 : Παράθεση εταιρειών για την κατασκευη της πλακέτας.....</u>                                      | 37 |



## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

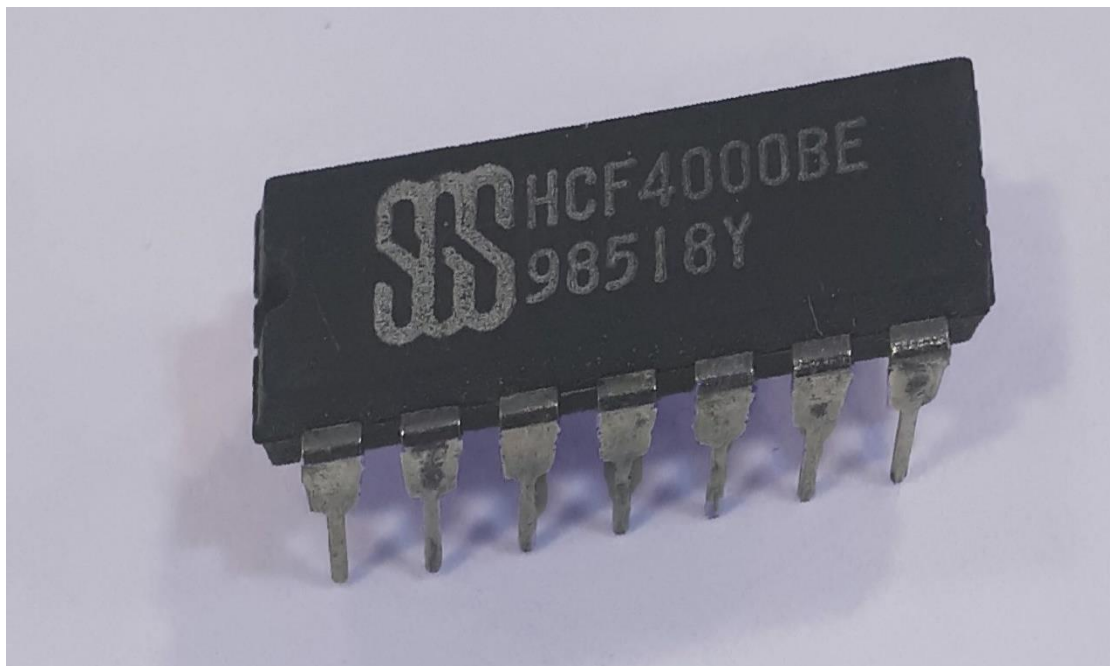
Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, παράλληλα με την ταχεία άνοδο του διαδικτύου, η παραγωγή μικροηλεκτρονικών συσκευών έχει σημειώσει τεράστια πρόοδο. Μικροηλεκτρονικά όπως οι αισθητήρες, οι ενεργοποιητές και οι ασύρματοι πομποί έχουν ενσωματωθεί σε κάθε πτυχή του 'τεχνολογικού' τρόπου ζωής μας. Έτσι, συνδυάζοντας τα επιτεύγματα των μικροηλεκτρονικών συσκευών και τη βιοτεχνολογία, έχει παρατηρηθεί ραγδαία ερευνητική ανάπτυξη στο σχεδιασμό βιοϊατρικών αισθητήρων. Οι τεχνολογικές εφαρμογές που έχουν ανθήσει με βάση τους συγκεκριμένους αισθητήρες εξυπηρετούν την ιατρική τόσο για τη θεραπεία όσο και για τη διάγνωση, δηλαδή αυτό που ονομάζεται βιοϊατρική τεχνολογία.

Ο όρος βιοϊατρική τεχνολογία προέρχεται από τον αγγλικό όρο “Biomedical Engineering”. Δηλώνει το γνωστικό πεδίο που μελετά πώς εφαρμόζονται οι αρχές και οι μέθοδοι της τεχνολογίας, της μηχανικής και των θετικών βασικών επιστημών (Φυσική, Χημεία, Μαθηματικά) στην προσπάθεια κατανόησης και αντιμετώπισης προβλημάτων που εμφανίζονται στη Βιολογία και την Ιατρική.[1](Τσίκου , 2004) Με την ανάπτυξη των διαφόρων αισθητήρων και διατάξεων μέτρησης βιοϊατρικών μεγεθών έχουν αναπτυχθεί παράλληλα και λογισμικό για την επεξεργασία, καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων. Τα λογισμικά αυτά αποκτούν σε πραγματικό χρόνο βιοϊατρικά δεδομένα, ενώ μπορούν να εισάγουν ταυτόχρονα από βάση δεδομένων και αποθηκευμένες τιμές για την σύγκριση των τιμών μετρήσεων.[2](Καλοβρέκτης & Κατέβας, 2013) Επομένως, γίνεται εύκολα κατανοητή η σπουδαιότητα της επιστήμης της βιοϊατρικής τεχνολογίας καθώς και οι δυνατότητες της να αλλάξουν και να βοηθήσουν τον κόσμο. Τώρα, ως αρχίζει η ανάλυση του θέματος από πιο πρώιμο στάδιο για λόγους μεγαλύτερης σαφήνειας και ακρίβειας.

### **1.1 ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΑ**

#### **1.1.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ**

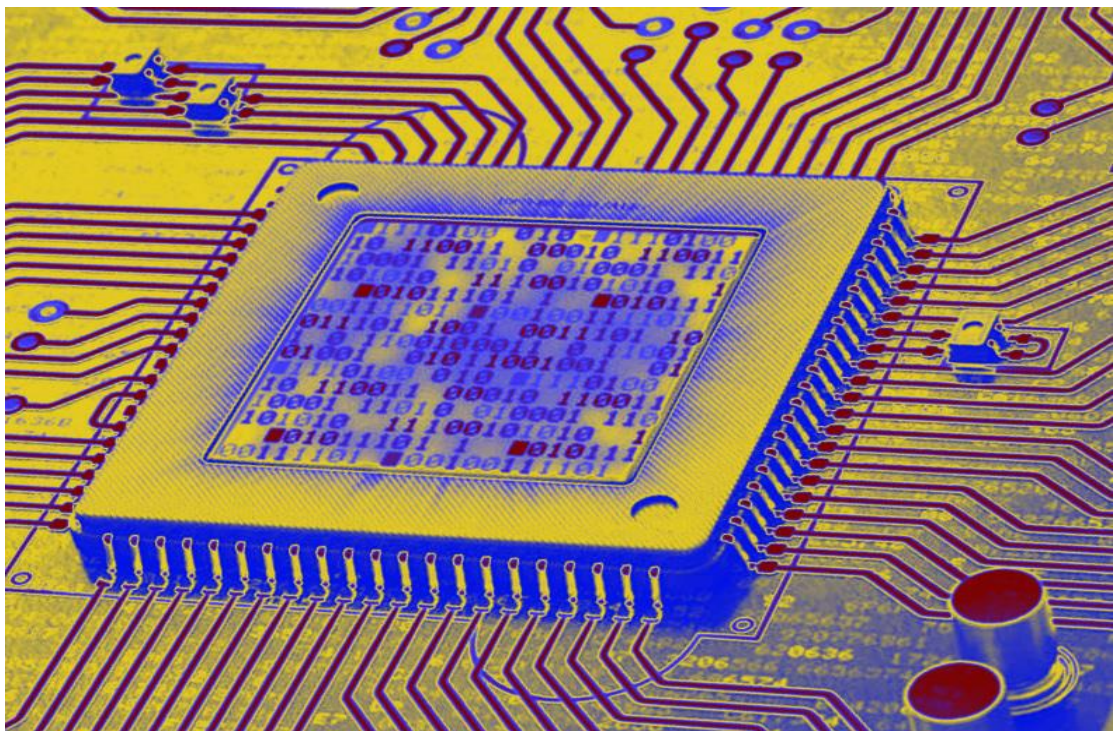
Η σμίκρυνση στις ηλεκτρονικές συσκευές που έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια μας κάνει να αναρωτηθούμε για το ποια είναι τα όρια της. Πλέον ολόκληρα συστήματα περιέχονται σε πλακίδια πυριτίου (wafers, που πρόκειται για λεπτά στρώματα πυριτίου που εμπλουτίζονται και διαμορφώνονται για να δημιουργηθούν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και chips, που εμπεριέχονται στο κέλυφος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων) χιλιάδες φορές μικρότερα από ένα και μόνο εξάρτημα των πρώτων κυκλωμάτων. Το πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα (integrated circuit) αναπτύχθηκε από τον Jack Kilby το 1958. [3](Boylestad & Nashelsky, 2012) Σήμερα εξήντα χρόνια μετά, έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της ζωής μας και έχουμε φτάσει στο σημείο να δημιουργούνται ολοκληρωμένα κυκλώματα με δισεκατομμύρια τρανζίστορ τα οποία βοηθούν σε όλες τις επιστήμες και στην κοινωνική εξέλιξη. Ο όρος 'ολοκληρωμένο κύκλωμα' αναφέρεται σε ένα πολύ προηγμένο ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο είναι συστατικό στοιχείο των ψηφιακών κυκλωμάτων. Ένα τέτοιου είδους κύκλωμα αποτελείται από έναν ημιαγωγό κρύσταλλο πυριτίου που περιέχει ηλεκτρικά στοιχεία με τα οποία κατασκευάζονται οι πύλες. Το chip τοποθετείται σε ένα πλαστικό περίβλημα και συγκολλούνται επαφές σε εξωτερικούς ακροδέκτες για να σχηματιστεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Παρακάτω στα Σχήματα 2 και 3 γίνεται η εισαγωγή πολύπλοκων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Σχήμα 1: Ολοκληρωμένο κύκλωμα δεκατεσσάρων ακροδεκτών



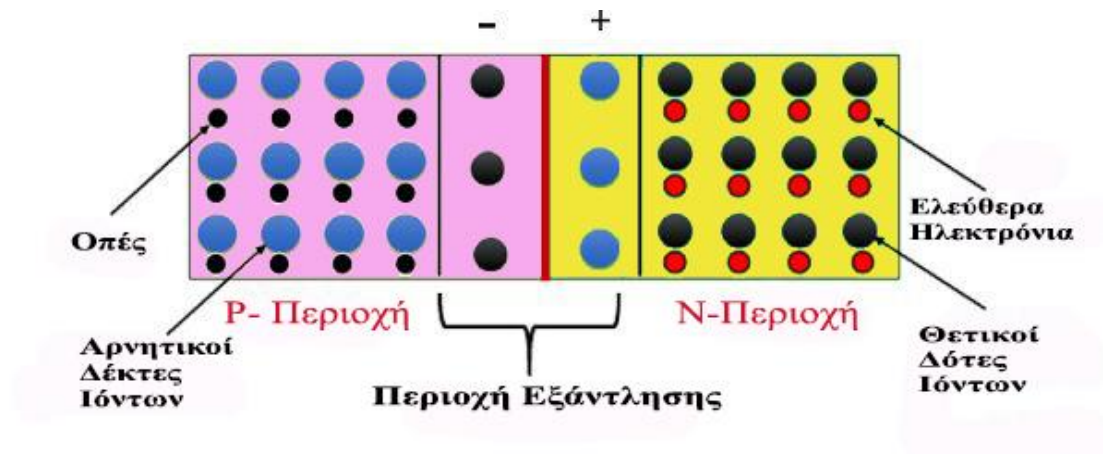
Σχήμα 2: Παράδειγμα σύνθετου ολοκληρωμένου κυκλώματος πάνω σε πλακέτα [4] (VE-TEJ IMPEX, n.d.) <https://www.indiamart.com/proddetail/digital-integrated-circuit-chip-13202417948.html>



Σχήμα 3: Κβαντικό κύκλωμα πυριτίου [5](Smith, n.d.) <https://www.ul.com/resources/functional-safety-embedded-systems-and->

### 1.1.2 ΔΙΟΔΟΣ

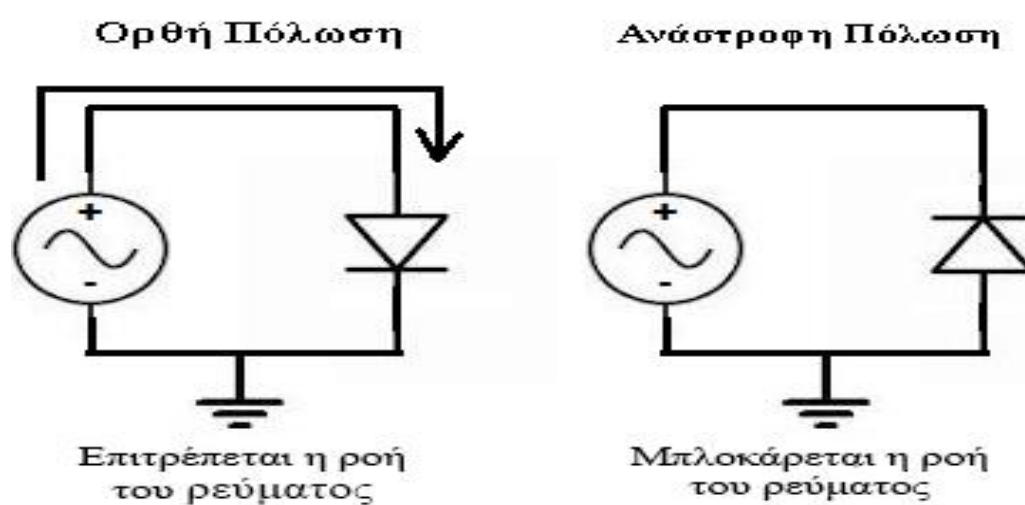
Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από διάφορα ηλεκτρικά στοιχεία όπως το τρανζίστορ, οι αντιστάσεις και η δίοδος. Συγκεκριμένα, η δίοδος ημιαγωγού (semiconductor diode) δημιουργείται με την ένωση ενός υλικού τύπου-n και ενός υλικού τύπου-p, δηλαδή ενώνοντας ένα υλικό με πλειονότητα φορέων ηλεκτρονίων με ένα υλικό με πλειονότητα φορέων οπών, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο Σχήμα 4.[3] (Boylestad & Nashelsky, 2012)



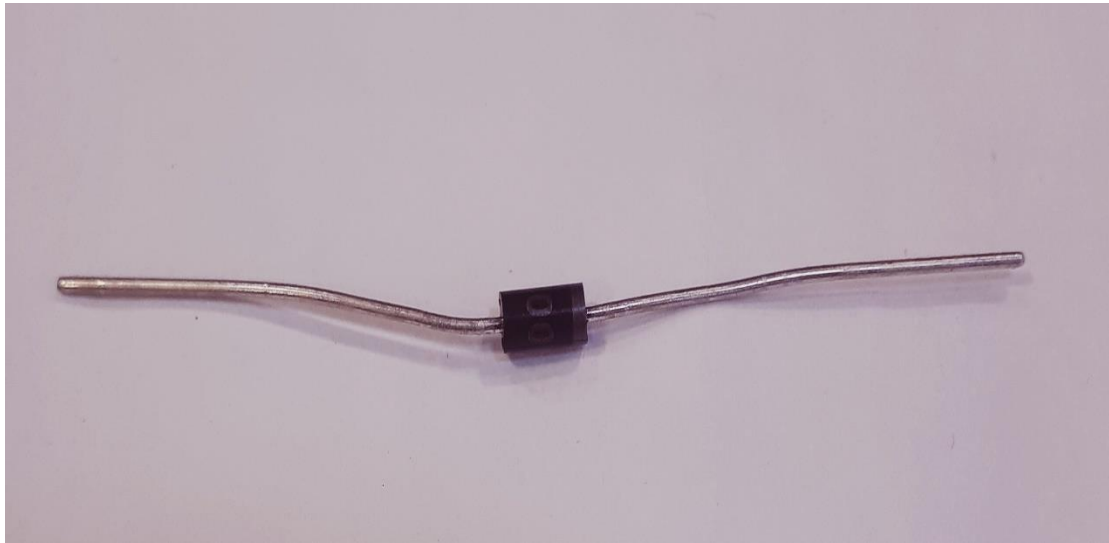
Σχήμα 4: Ηλεκτρική αποτύπωση της διόδου εσωτερικά [6](Circuit Globe, n.d.)  
<https://circuitglobe.com/potential-barrier-in-a-diode.html>

Η απλότητα κατασκευής της διόδου το μόνο που μπορεί να κάνει είναι να ενισχύσει τη σπουδαιότητα της ανάπτυξης της. Στην ηλεκτρονική, η δίοδος δρα ως το στοιχείο που περιορίζει τη κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας. Πρόκειται

δηλαδή για μια διάταξη που ελέγχει τη διέλευση (τη δίοδο) του ηλεκτρικού ρεύματος κάτω από κάποιες συνθήκες. Η δίοδος συνήθως, επιτρέπει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την ορθή φορά ενώ την απαγορεύει κατά την ανάστροφη. Γενικότερα η διάταξή της, πάντα μπλοκάρει μία από τις δύο κατευθύνσεις του ηλεκτρικού ρεύματος λειτουργώντας έτσι ως μια ηλεκτρονικής μορφής βαλβίδα η οποία δεν επιτρέπει διαφορετική ροή στο νερό εκτός από την επιθυμητή. Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος ανάλογα με την πόλωση της διόδου γίνεται πιο κατανοητή στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Ορθή και ανάστροφη πόλωση μίας διόδου [7](Learning about electronics, n.d.)  
<http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/What-is-a-diode-connected-in-reverse-biased>

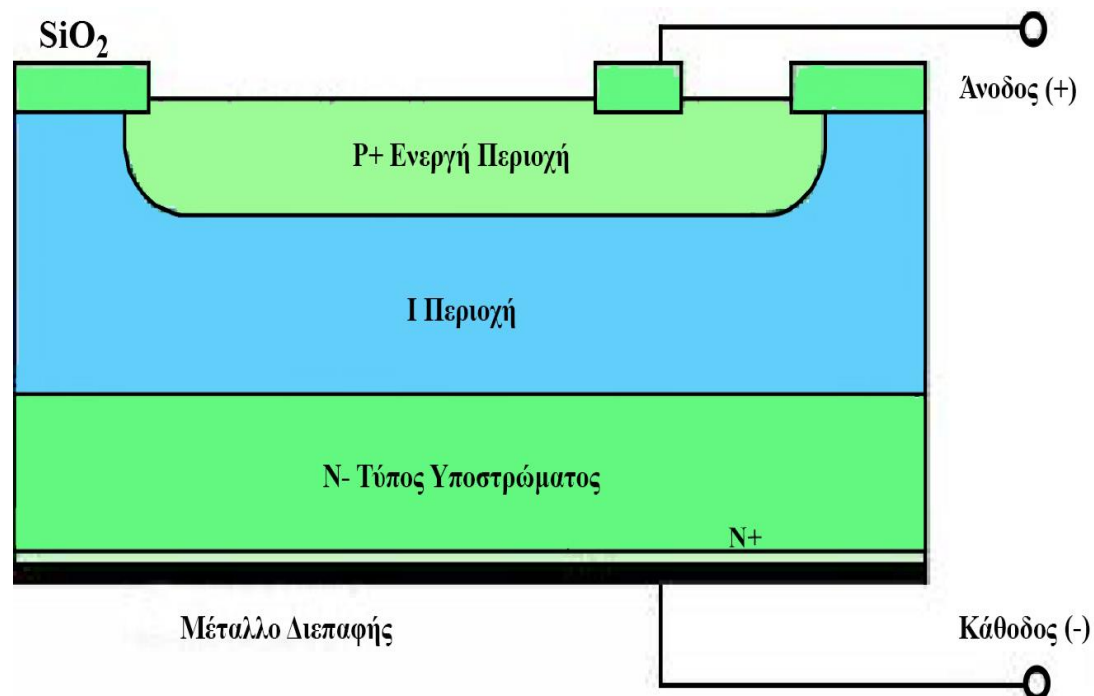


Σχήμα 6: Απεικόνιση τυπικής διακριτής διόδου

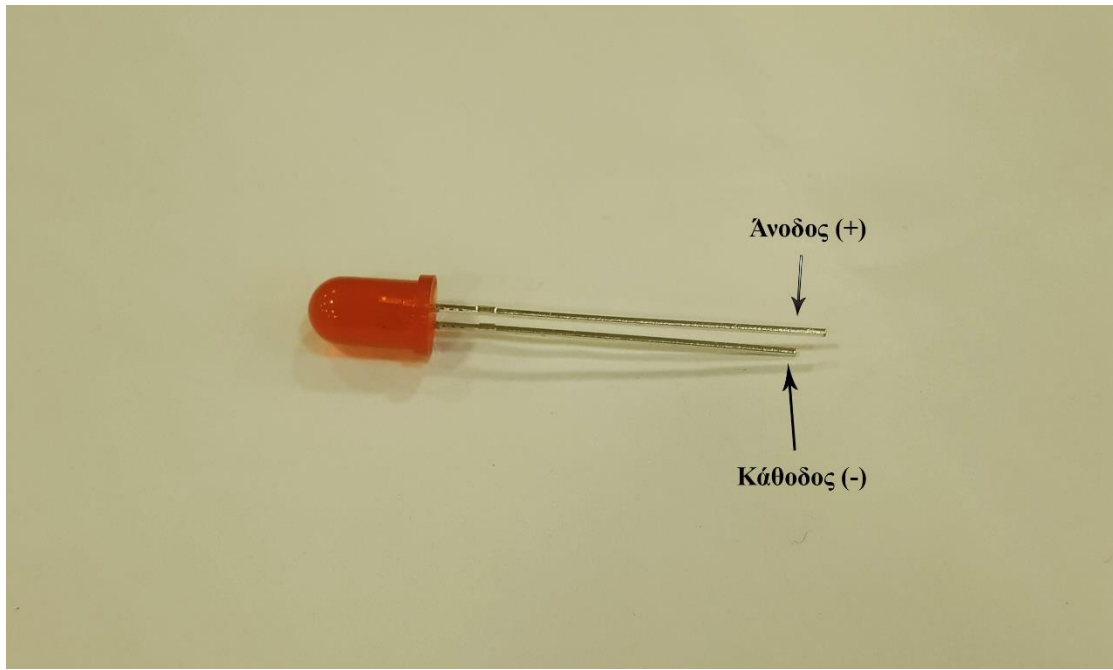
### 1.1.3 ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τις φωτοευαίσθητες διατάξεις έχει ανέβει κατακόρυφα. Το αντίστοιχο πεδίο της ηλεκτρονικής, γνωστή και ως οπτοηλεκτρονική (optoelectronics), έχει αναπτυχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό και καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για τη βελτίωση των επιπέδων απόδοσής της. Οι πηγές φωτός ή φωτεινής ακτινοβολίας προσφέρουν μία μοναδική πηγή ενέργειας. Η ενέργεια αυτή εκπέμπεται με την μορφή φωτονίων και έχει τιμή η οποία είναι ευθέως ανάλογη προς τη συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός.[3] (Boylestad & Nashelsky, 2012) Μία διόδος η οποία χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής φωτός ονομάζεται φωτοδίοδος και συνήθως κατασκευάζεται από στοιχείο πυριτίου (Si). Η φωτοδίοδος δουλεύει μόνο με ανάστροφη πόλωση, αντίθετα δηλαδή από την λειτουργία μίας απλής διόδου. [8](Λιαπέρδος, 2015) Όταν η ένταση του φωτός αυξάνεται τότε αυξάνεται και το ανάστροφο ρεύμα που περνά μέσα σε μια φωτοδίοδο. Σκοπός της φωτοδιόδου είναι η μετατροπή της φωτεινής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα και είναι κλασσικό παράδειγμα ενός φωτοανιχνευτή (photodetector) μιας διάταξης που ανιχνεύει δηλαδή την παρουσία φωτός. Μια φωτοδίοδος χρησιμοποιείται είτε με φωτοβολταϊκό είτε με φωτοαγωγίμο τρόπο λειτουργίας. Φωτοβολταϊκό τρόπο λειτουργίας μιας φωτοδιόδου έχουμε όταν σε αυτή δεν εφαρμόζουμε ανάστροφη τάση πόλωσης αλλά η ίδια η

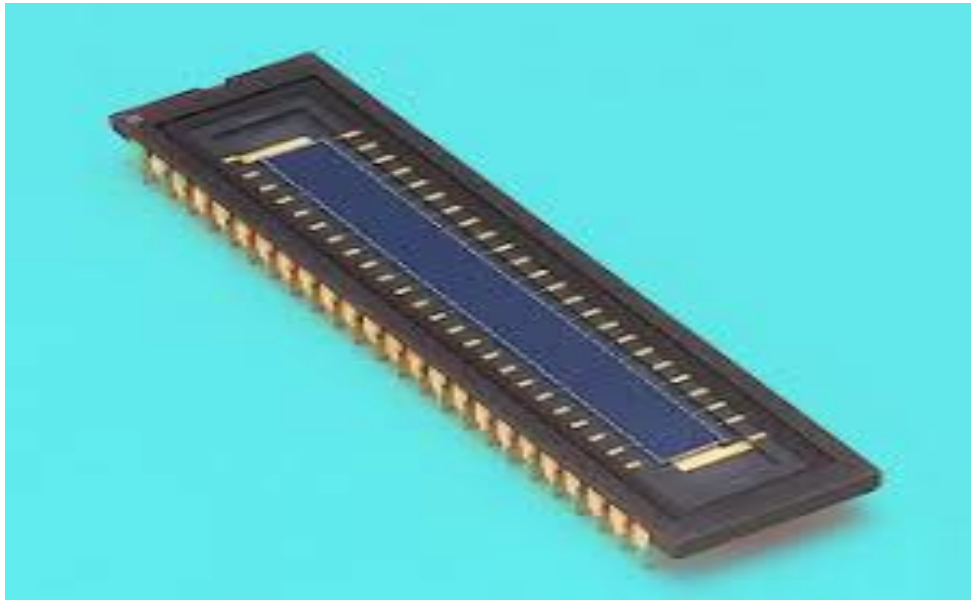
φωτοδίοδος παράγει φωτοβολταϊκή τάση στα άκρα της. Φωτοαγώγιμο τρόπο λειτουργίας μιας φωτοδίοδου έχουμε όταν σε αυτή εφαρμόζουμε ανάστροφη τάση πόλωσης. [2](Καλοβρέκτης & Κατέβας, 2013) Κατά την κατασκευή ή την επιλογή υπάρχουσας φωτοδίοδου λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι όπως είναι το μήκος κύματος που θέλουμε να εξετάσουμε, οι διαστάσεις που μπορεί να έχει από μηχανολογικής και σχεδιαστικής άποψης ή ακόμα και τα ηλεκτρικά όρια που μπορεί να έχει όπως το σκοτεινό ρεύμα και η ισχύς που μπορεί να αντέξει. Παρακάτω παραθέτονται τρεις εικόνες ώστε να γίνει όσον το δυνατόν πιο κατανοητή η φωτοδίοδος σαν αντικείμενο. Στο Σχήμα 7 παρατηρείται το εσωτερικό μιας φωτοδίοδου και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη. Στο Σχήμα 8 δίνεται το ηλεκτρικό σύμβολο της φωτοδίοδου ενώ στο Σχήμα 9 δίνεται μία πιο πολύπλοκη κατασκευή, αυτής της συστοιχίας φωτοδίοδων, αντικείμενο πάνω στο οποίο θα εργαστούμε.



Σχήμα 7: Αναπαράσταση διόδου ως μια επαφή υλικού τύπου-P και υλικού τύπου-N [9](Team wavelength, n.d.) <https://www.teamwavelength.com/photodiode-basics/>



Σχήμα 8: Η κάθοδος και η άνοδος της τυπικής φωτοδιόδου (LED)



Σχήμα 9: Διάταξη μίας συστοιχίας φωτοδιόδων [10](Hamamatsu Photonics, 2015) <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/S4111-46Q/index.html>

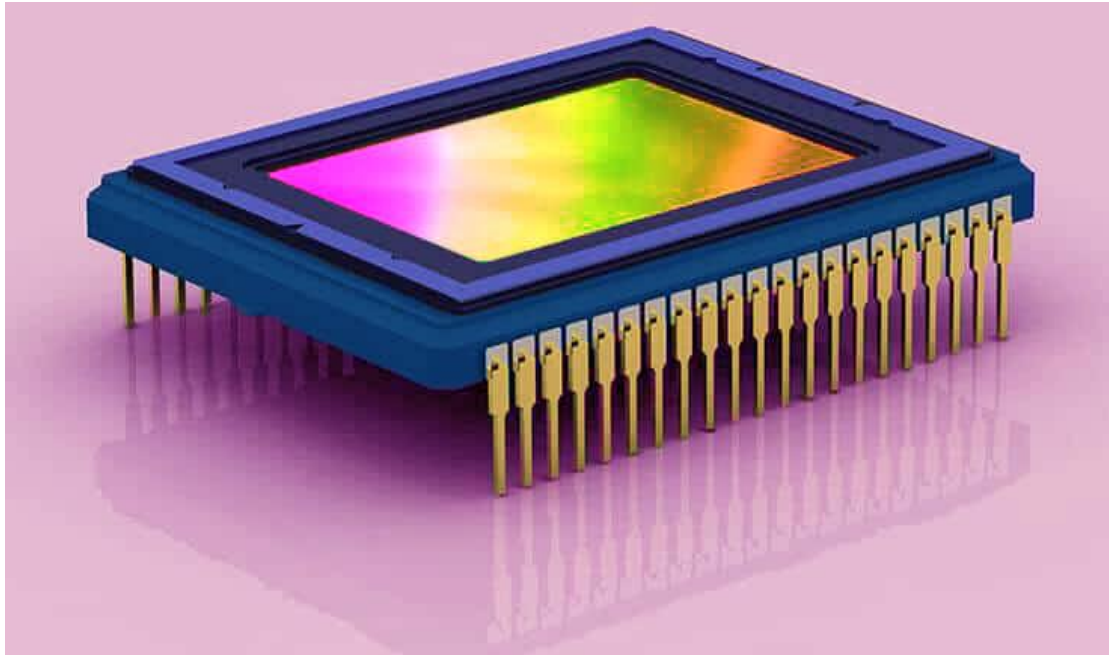


#### **1.1.4 ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ (CCD)**

Μία άλλη επιλογή αισθητήρα που εξετάστηκε είναι αυτή της διάταξης συζευγμένων φορτίων. Η παραγωγή ενός σήματος εξόδου από μια διάταξη συζευγμένων φορτίων CCD (charged couple device) περιλαμβάνει τις τέσσερις παρακάτω διαδικασίες:

1. μετατροπή της φωτεινής ακτινοβολίας σε μορφή εικόνας φορτίων μέσω φωτοστοιχείων
2. αποθήκευση των φορτίων εικόνας
3. μεταφορά των φορτίων και
4. μετατροπή των φορτίων σε σήμα εικόνας.

Κάθε φωτοστοιχείο της διάταξης καλείται στοιχείο εικόνας ή εικονοστοιχείο (pixel). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση που μπορεί να καταγραφεί από την διάταξη CCD. Καθώς κάθε φωτοστοιχείο φορτίζεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, στη συνέχεια μέσω οριζόντιων και κάθετων καταχωρητών ολίσθησης εκφορτίζεται και μεταφέρεται το δυναμικό φόρτισης τους σε κυκλώματα παραγωγής ψηφιακού σήματος εικόνας (video) μέσω μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό. Οι έγχρωμες διατάξεις CCD υλοποιούνται με την τοποθέτηση φίλτρων χρώματος σε διάταξη μωσαϊκού ή λωρίδας. Η διασύνδεση μεταξύ της φωτοδιόδου (φωτοστοιχείου) και του καταχωρητή ολίσθησης φορτίων γίνεται μέσω ενός ψηφιακού διακόπτη MOS, ο οποίος μεταφέρει το φορτίο της φωτοδιόδου στο αντίστοιχο bit του καταχωρητή ολίσθησης. Ακολουθεί παράδειγμα απεικόνισης ενός τέτοιου αισθητήρα. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ενός τέτοιου αισθητήρα. [2] (Καλοβρέκτης & Κατέβας, 2013)



Σχήμα 10: Κλασσικό παράδειγμα αισθητήρα CCD (συσκευής συζευγμένου φορτίου) [11] (Watterson, n.d.) <https://photographycourse.net/what-is-the-ccd/>

## **1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Οι προτεινόμενοι στόχοι έχουν να κάνουν, αρχικά με την βαθιά μελέτη της φωτοδιόδου και της συστοιχίας φωτοδιόδων για να υπάρχει μία πιο εμπειριστατωμένη άποψη όσον αφορά την λύση του προβλήματος, δηλαδή την μέτρηση της οπτικής συμπεριφοράς του αίματος. Εν συνέχεια, θα γίνει μία έρευνα αγοράς και παίρνοντας υπόψη όλες τις προοπτικές και παραμέτρους θα γίνει η κατάλληλη επιλογή της συστοιχίας φωτοδιόδων που θα χρειαστούμε για το πείραμα. Η τεχνική σχεδίαση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή στο πρόγραμμα Eagle της Cad-soft είναι το επόμενο βήμα με σκοπό τη δημιουργία μιας νέας πλακέτας PCB που θα εμπεριέχει φυσικά την συστοιχία φωτοδιόδων καθώς και τον συνδετήρα οχτώ ακροδεκτών μέσω του οποίου θα συνδέονται σε ράστερ τα υπόλοιπα υλικά του πειράματος. Στη σχεδίαση χρειάζεται μεγάλη προσοχή και λεπτομέρεια γιατί υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές και στις διαστάσεις και στο τρόπο που γίνονται οι συνδέσεις πάνω στην πλακέτα. Ακολούθως, ξαναγίνεται έρευνα αγοράς για τον κατασκευαστή των πλακετών και έπειτα από την λήψη τους γίνονται οι κολλήσεις των συστοιχιών πάνω στη πλακέτα.

Το προτελευταίο βήμα αναφέρεται στην σύνδεση με τον μικροϋπολογιστή Beaglebone Black Rev C και αφού τοποθετηθούν σωστά με προχωρημένες γεωμετρικές μεθόδους, θα γίνει ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή σε C++ για την οδήγηση, την ανάγνωση και την αποθήκευση των δεδομένων. Τέλος, αφού το φορητό σύστημα μετρήσεων είναι έτοιμο θα γίνει η λήψη των αποτελεσμάτων. Με την ανάλυση αυτών των αποτελεσμάτων θα μπορούμε να βγάλουμε ένα καλύτερο συμπέρασμα σχετικά με την επίδοση της κατασκευής και περαιτέρω βελτίωση για την συνέχεια της έρευνας.

### **1.3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην υλοποίηση του πειράματος που περιλαμβάνει όλη την εργασία που χρειάστηκε να γίνει με την ανάλυση των προδιαγραφών για την σωστή επιλογή φωτοδιόδου και την έρευνα αγοράς της έως και τη λεπτομερή σχεδίαση της πλακέτας που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια του πειράματος.

Στο κεφάλαιο νούμερο τρία, γίνεται η αποτίμηση της εργασίας. Έτσι, γίνεται μια αναφορά στα αποτελέσματα του πειράματος και του κατά πόσο ήταν επιτυχημένη η προσπάθεια που εκπονήθηκε για να γίνει αυτό το πείραμα. Τέλος, δίνονται επιπρόσθετες σκέψεις για μελλοντική έρευνα ώστε να συνεχιστεί αυτή η προσπάθεια για την τελειοποίηση της εφαρμογής αυτής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο που κλείνει και την εργασία συνοψίζεται το ολικό συμπέρασμα της εργασίας και δίνεται επιγραμματικά η βιβλιογραφία.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

### 2.1 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ

Στις εικόνες που ακολουθούν έχουν γίνει συγκριτικοί πίνακες μεταξύ των διαθέσιμων φωτοδιόδων που βρέθηκαν στην αγορά. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζουμε από πάνω προς τα κάτω έτσι όπως φαίνονται στη δεξιά πλευρά του πίνακα είναι τα εξής:

- Οι διαστάσεις των φωτοδιόδων που αναλύθηκαν ως προς μήκος, πλάτος και ύψος. Αυτή η κατηγορία είναι υψίστης σημασίας, διότι χρειαζόμαστε μία όσον το δυνατόν μεγαλύτερη φωτοδίοδο. Ο λόγος του μεγάλου μεγέθους είναι ότι συλλέγει παραπάνω πληροφορία από την ακτίνα μονοχρωματικού φωτός που εκπέμπεται, με αποτέλεσμα να γίνεται καλύτερα η μέτρηση που θα κάνουμε.
- Οι διαστάσεις εσωτερικά της συστοιχίας φωτοδιόδων, το chip δηλαδή που εμπεριέχεται.
- Η φωτοευαίσθητη περιοχή της φωτοδίοδου, δηλαδή το μέρος στο οποίο το αντικείμενο αντιδρά στη λήψη φωτονίων.
- Η μέγιστη φωτοευαισθησία που μπορεί να αντέξει η φωτοδίοδος αναφέρεται σε ένα όριο φωτονίων που μπορεί να λάβει η φωτοδίοδος από την πηγή και δεν πρέπει να ξεπερνάμε καθώς σε αντίθετη περίπτωση είναι πολύ πιθανό η συσκευή να πάθει ζημιά και να καταστραφεί.
- Το μέγιστο μήκος κύματος πληροφορίας που καταλαβαίνει η κάθε φωτοδίοδος. Το μήκος κύματος φωτός είναι μία μεγάλη κλίμακα που δεν μπορούν όλες οι συσκευές να το αναλύσουν ολόκληρο. Γι' αυτό και υπάρχουν συσκευές για συγκεκριμένα μήκη κύματος.
- Η διαθεσιμότητα που υπάρχει στην αγορά στη περίοδο που εκπονήθηκε η εργασία.
- Η τιμή που αναγράφεται είναι η τιμή της κάθε φωτοδίοδου στη περίοδο που εκπονήθηκε η εργασία καθώς είναι μεταβλητή και μπορεί να αλλάξει. Σε κάποιες υπάρχει και υπόδειξη κόστους μεταφοράς (shipment) που προέκυψαν μετά από επικοινωνία με την εκάστοτε εταιρεία.
- Τα στοιχεία που περιέχει η κάθε συστοιχία φωτοδιόδων έχει να κάνει με το πόσες φωτοδιόδοι εμπεριέχονται μέσα στο πακέτο. Όσο περισσότερες φωτοδιόδοι τόσο καλύτερα γιατί αυξάνεται η ανάλυση που θα έχουμε. Ο προηγούμενος αισθητήρας

που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα που βασιζόμαστε πάνω εμπειρείχε 128 φωτοδιόδους. Ο σκοπός μας είναι να βρούμε έναν αισθητήρα περισσότερο εύχρηστο από τον προηγούμενο οπότε από αυτή την άποψη θα πρέπει να ξεπερνάει τα 128 στοιχεία φωτοδιόδων.

- Ενδεικτικά αναφέρεται ένας σύνδεσμος για το φύλλο λεπτομερειών και προδιαγραφών (datasheet) του κάθε αισθητήρα στο διαδίκτυο.

Αν κάποια στοιχεία παραλείπονται στους πίνακες 1 και 2 είναι γιατί δεν αναφέρονται στα φυλλάδια προδιαγραφών τους. Τέλος στο όνομα κάθε αισθητήρα έχει προστεθεί υπερσύνδεσμος του datasheet κάθε αισθητήρα στο διαδύκτιο.

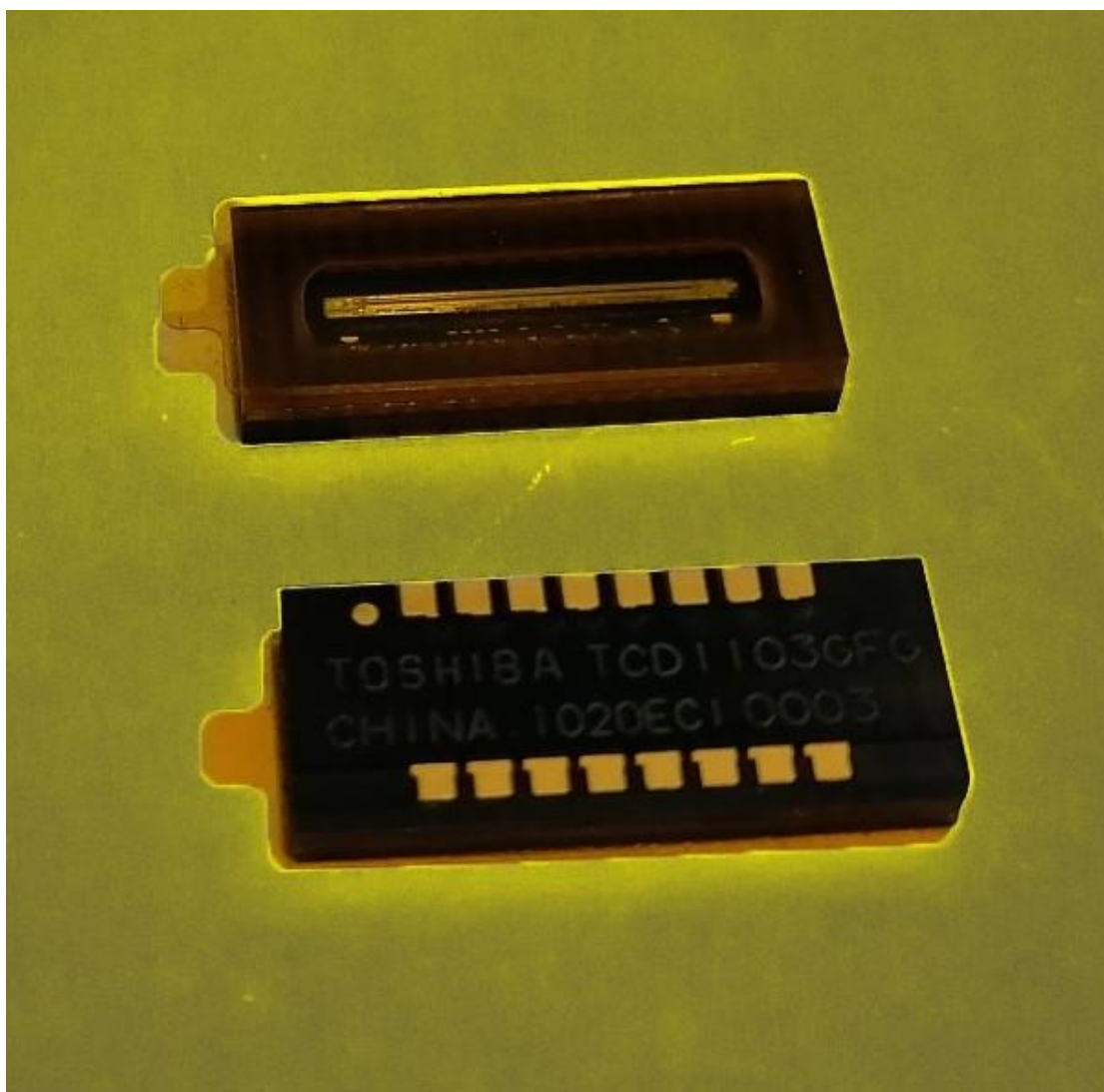
| NAME                                       | <a href="#">S13256-2048-02 (CCD)</a> | <a href="#">S11156-2048-02 (CCD)</a> | <a href="#">S12379 (CCD)</a> | <a href="#">S3901-256F (NMOS)</a> |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| <b>DIMENSIONS (mm)</b>                     | 48×12.7×5                            | 38.1×10.41×3.3                       | 36×12.45 ×1.85               | 31.75×10.4×1.3                    |
| <b>DIMENSIONS INSIDE</b>                   | 33.02                                | 27.94                                | 27.94                        | 25.4                              |
| <b>PHOTOSENSITIVE AREA</b>                 |                                      |                                      |                              |                                   |
| <b>PEAK PHOTO SENSITIVITY</b>              |                                      |                                      |                              |                                   |
| <b>WAVELENGTH OF PEAK SENSITIVITY (nm)</b> | 1100                                 | 1100                                 | 1000                         | 1000                              |
| <b>AVAILABILITY</b>                        | YES                                  | YES                                  | YES                          | YES                               |
| <b>PRICE</b>                               | 837,82                               | 593,45                               | 640                          | 1.140,36                          |
| <b>PACKAGING</b>                           | CERAMIC                              | CERAMIC                              | CERAMIC                      |                                   |
| <b>ELEMENTS</b>                            | 2048                                 | 2048                                 | 2048                         | 256                               |
| <b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ</b>                            | [12] (S13256-2048-02 (CCD))          | [13] (S11156-2048-02(CCD))           | [14] (S12379(CCD))           | [15] (S3901-256F(NMOS))           |

Πίνακας 1: Παράθεση διαθέσιμων αισθητήρων φωτοδιόδων στην αγορά

| NAME                                  | <a href="#">S8378-512Q (CMOS)</a>  | <a href="#">S11639-01 (CMOS)</a>      | <a href="#">TSL 1401CL</a> | <a href="#">TSL1402 R</a> | <a href="#">TSL1412 S</a>  | <a href="#">S11865</a> | <a href="#">S11299-421</a> | <a href="#">TCD130 4DG</a> | <a href="#">TCD103GFG</a> | <a href="#">G7150-16</a> |
|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>DIMENSIONS (mm)</b>                | 22.2×7.6<br>2×5                    | 41.6×9.1<br>×3                        | 9.4×3×1.<br>2              | 19.3×<br>10.67×<br>3.18   | 103.86×<br>12.95<br>× 3.30 | 51.2× 40<br>×2.54      | 25.4 ×<br>10.2 ×<br>5.42   | 29.1 ×<br>9.65 ×<br>3.22   | 15.2×6×<br>2.2            | 22.9 ×<br>7.5 × 7.3      |
| <b>DIMENSIONS INSIDE</b>              | 7.62                               | 27.94                                 | 7.5                        | 15.24                     | 30.48                      |                        | 23.625                     | 27.94                      | 8.9                       | 20.32                    |
| <b>PHOTO SENSITIVE AREA</b>           | -                                  | 28,672m<br>m                          |                            |                           |                            | 51.2                   | 1.175 × 2<br>mm            |                            |                           | 0.08 ×<br>0.2 mm         |
| <b>PEAK PHOTO SENSITIVITY</b>         | 22 V/ lx<br>* s                    | 1300<br>V/(lx*s)                      |                            |                           |                            |                        | 4400<br>V/(lx*s)           |                            |                           | 0.95<br>A/W              |
| <b>WAVELENGTH OF PEAK SENSITIVITY</b> | 1000nm                             | 1000nm                                | 1000 nm                    | 1000nm                    | 1100nm                     | 1000nm                 | 920nm                      | 1000nm                     | 1000nm                    | 1.55 μm                  |
| <b>AVAILABILITY</b>                   | NO                                 | YES                                   | YES                        | YES                       | NO                         | NO                     | NO                         | YES                        | YES                       | NO                       |
| <b>PRICE</b>                          | 221,09                             | 139,64                                | 4.85                       | 60 + 35<br>shipping       | DO NOT<br>KNOW             | DO NOT<br>KNOW         | DO NOT<br>KNOW             | 21,64                      | 8.28                      | DO NOT<br>KNOW           |
| <b>PACKAGING</b>                      | CERAMIC                            | LIQUID<br>CRYSTAL                     | FLAT                       | FLAT                      | FLAT                       | NO<br>FLAT             | NO<br>FLAT                 | TRAY                       | TRAY                      | NO<br>FLAT               |
| <b>ELEMENTS</b>                       | 512                                | 2048                                  | 128                        | 256                       | 1536                       | 256                    | 16                         | 3648                       | 1500                      | 16                       |
| <b>ANAPHORES</b>                      | [16]<br>(S8378-<br>512Q(C<br>MOS)) | [17]<br>(S11639<br>-<br>01(CM<br>OS)) | [18]<br>(TSL14<br>01CL)    | [19]<br>(TSL14<br>02R)    | [20]<br>(TSL14<br>12S)     | [21]<br>(S11865<br>)   | [22]<br>(S11299<br>-421)   | [23]<br>(TCD13<br>04DG)    | [24]<br>TCD103GFG         | [25]<br>(G7150-<br>16)   |

Πίνακας 2: Περαιτέρω ανάλυση και έρευνα αγοράς για την εύρεση κατάλληλου αισθητήρα φωτοδίοδου

Η απόφαση της επιλογής της συστοιχίας φωτοδιόδων θα πρέπει να βασίζεται στις δύο βασικότερες παραμέτρους που βοηθούν σημαντικά το πείραμα μας. Η πρώτη είναι η συστοιχία με το μεγαλύτερο μέγεθος (dimensions) σε συνδυασμό με τον μεγαλύτερο αριθμό των στοιχείων (elements) που μπορούμε να πετύχουμε. Δυστυχώς δεν καθίσταται εφικτό να αγοράσουμε τις φωτοδιόδους που θέλαμε περισσότερο (TSL1402R, TSL1412S). Ο λόγος είναι η ζητούμενη τιμή γι' αυτούς τους αισθητήρες καθώς είναι περίπου 100€, πολύ περισσότερα από τα διαθέσιμα που έχουμε αυτή τη στιγμή. Επιπλέον, η δεύτερη σκέψη ήταν η αγορά ενός γραμμικού αισθητήρα συζευγμένου φορτίου (CCD) με μήκος ανάμεσα στα δεκαπέντε με τριάντα εκατοστά. Μετά από μακρά και βαθιά μελέτη και σκέψη το περιορίσαμε στις δύο ακόλουθες: στην TCD1304DG και στην TCD1103GFG. Αυτοί οι δύο αισθητήρες τηρούν πολλές απαραίτητες προϋποθέσεις καθώς είναι διαθέσιμοι στην αγορά άμεσα και σε καλή τιμή. Ακόμα είναι αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας και χαμηλού σκοτεινού ρεύματος. Ο TCD1304DG έχει μερικά πλεονεκτήματα όπως περισσότερα στοιχεία (3648), χαμηλότερη τάση σκοτεινού ρεύματος μεγαλύτερος εύρος μήκους κύματος και μεγαλύτερη απορρόφηση ισχύος. Το μοναδικό μειονέκτημα που υστερεί σε σχέση με τον TCD1103GFG είναι τα απαραίτητα λεφτά που χρειάζεται να δαπανηθούν. Στην μία φωτοδίοδο η διαφορά ανέρχεται στα δεκαπέντε ευρώ. Η παραγγελία πρέπει να περιλαμβάνει 6 συστοιχίες φωτοδιόδων και ως εκ τούτου πρέπει να προτιμηθεί η φθηνότερη λύση. Συγκριτικά οι τιμές της μονάδας τους είναι 21,6€ και 6,2€. Συμπερασματικά η προσωπική μου επιλογή είναι να παραγγείλουμε τον TCD1103GFG διότι κοστίζει δεκαέξι ευρώ λιγότερα ανά μονάδα από την δεύτερη καλύτερη επιλογή και καταφέρνουμε προσθετικά να διατηρήσουμε σε καλή ποιότητα όλες τις πτυχές του πειράματος μας και θα μπορούσε να βοηθήσει και για μελλοντικές μελέτες. Ο χρόνος που έκανε να γίνει η παραλαβή ήταν κοντά στις 40 μέρες καθώς η αποστολή έγινε από το Μπαχρέιν. Ακολουθεί φωτογραφία της συστοιχίας φωτοδιόδων που παραγγείλαμε στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Παρουσίαση του αισθητήρα TCD1103GFG και απεικόνιση των δύο όψεων του

## **2.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ**

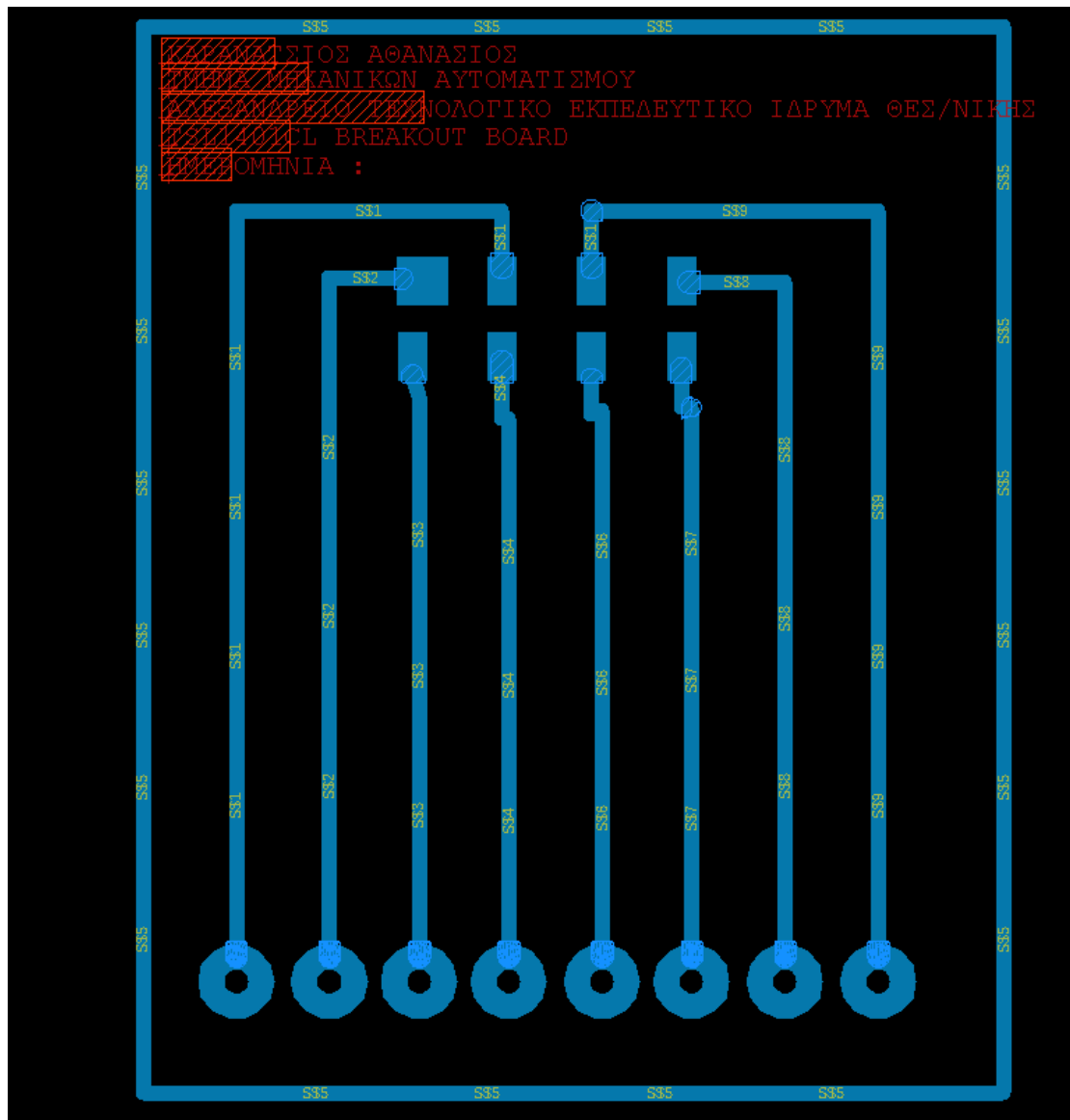
Η μηχανολογική σχεδίαση της πλακέτας είναι ένα βήμα που απαιτεί αρκετή λεπτομερή δουλειά και προσοχή, διότι πάνω σε αυτό εξαρτάται το αποτέλεσμα του πειράματος. Η δημιουργία της πλακέτας έγινε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα eagle της Cadsoft το οποίο προσφέρει πολλές επιλογές σε κάποιον χρήστη αλλά χρειάζεται και εκτενής έρευνα για να μάθει κάποιος όλες τις δυνατότητες του προγράμματος και την σωστή χρήση αυτών.





Σχήμα 12: Το σήμα του σχεδιαστικού προγράμματος EAGLE

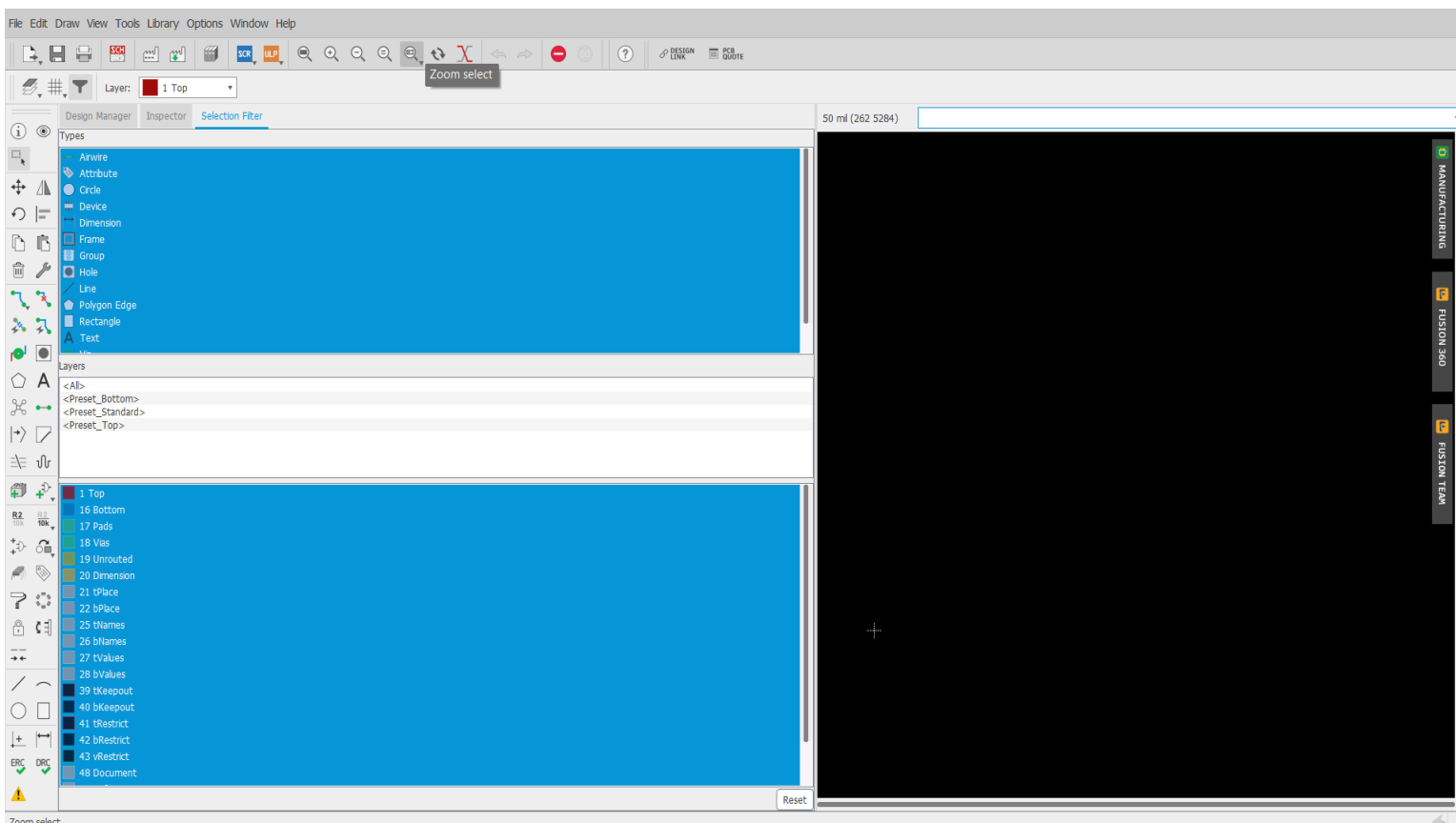
Η παραγωγή του καινούριου σχεδίου βασίστηκε πάνω σε ένα παλιότερο που υπήρχε ώστε να μπορέσουν να κατανοηθούν κάποιες βασικές σχεδιαστικές αρχές. Το σχέδιο αυτό παραθέεται στο Σχήμα 13. Αυτό το σχέδιο περιλαμβάνει τον αισθητήρα 128 φωτοδιόδων, TSL1401cl, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν.



Σχήμα 13: Η πλακέτα του προηγούμενου πειράματος που βασίστηκε η δημιουργία του καινούριου

Το σχέδιο που υπάρχει μας δίνει κάποιες πρώτες υποδείξεις από το πως αποτελείται η πλακέτα. Το περίγραμμα οριοθετεί το μέγεθος της πλακέτας που στη συγκεκριμένη

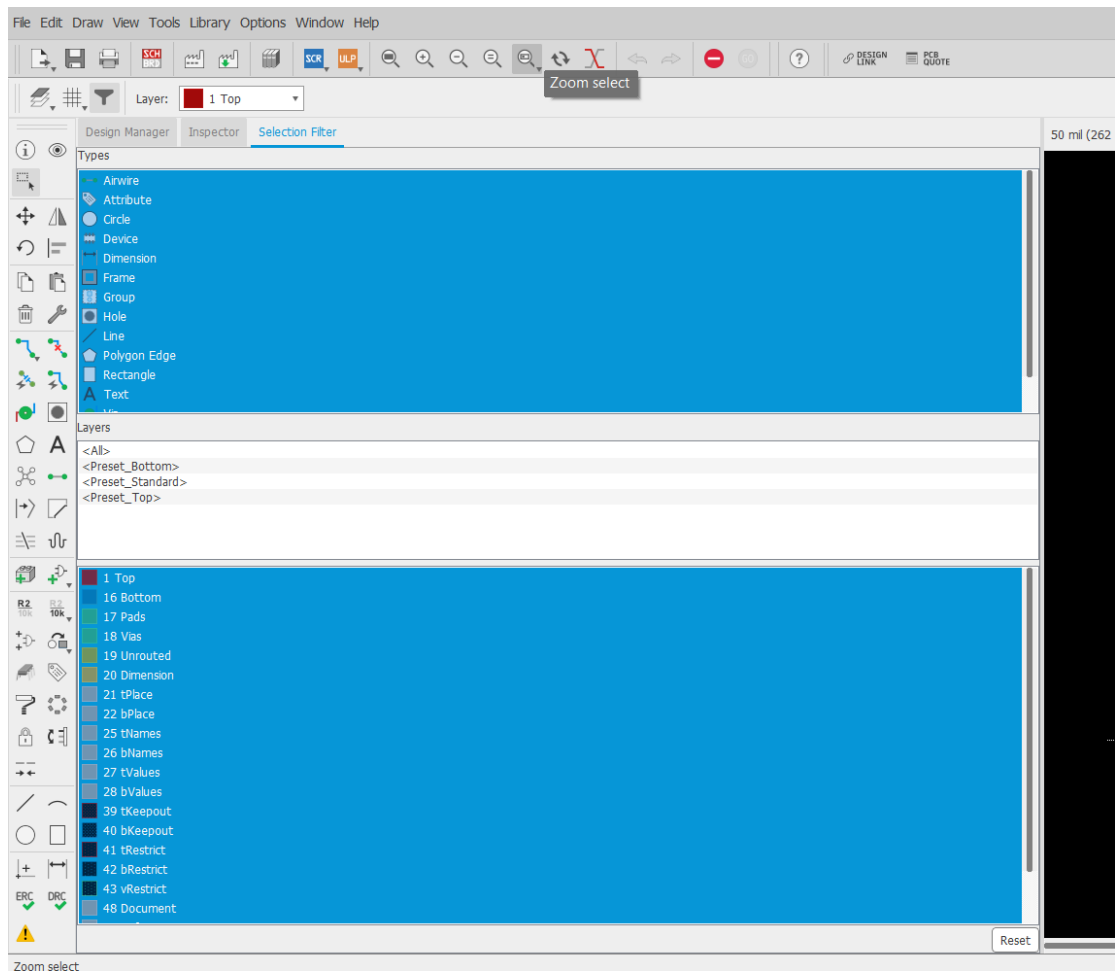
περίπτωση είναι 2 εκατοστά μήκος και 3 εκατοστά περίπου ύψος. Οι κύκλοι στο κάτω μέρος του σχεδίου είναι η θέση του συνδετήρα που θα προσθέσουμε είτε θηλυκό είτε αρσενικό. Οι ευθείες γραμμές συμβολίζουν τις συνδέσεις που θα κάνουμε, ενώ τα τετράγωνα δείχνουν τη συστοιχία φωτοдиодων που θα τοποθετηθεί. Επιπροσθέτως, ενδεικτικά μπαίνουν και τα στοιχεία του εκάστοτε φοιτητή πάνω στην πλακέτα όπως φαίνεται στην εικόνα πάνω αριστερά. Τώρα, που ήρθαμε σε επαφή με το πρωταρχικό σχέδιο ας γνωρίσουμε λίγο καλύτερα το eagle. Στο Σχήμα 14 βλέπουμε την οθόνη του υπολογιστή όταν ανοίξουμε το πρόγραμμα. Μέσα στο eagle υπάρχουν χιλιάδες εντολές σχεδίασης, έτοιμα ολοκληρωμένα ή έτοιμα βοηθητικά αντικείμενα που μπορούν να υπάρχουν σε ένα κύκλωμα. Γι' αυτό ανάλογα με την δυσκολία της πλακέτας που φτιάχνεις μπορείς να ενεργήσεις με όποιον τρόπο θέλεις και να δημιουργήσεις ακόμα και τις πιο πολύπλοκες πλακέτες με ακρίβεια που να δουλέψουν χωρίς πρόβλημα.



Σχήμα 14: Η αρχική οθόνη του Eagle όταν ανοίγει το πρόγραμμα

Στα αριστερά του Σχήματος 14 βρίσκεται η γραμμή εργαλείων του προγράμματος που θα μας βοηθήσει να το συνθέσουμε. Για να καταλάβουμε όμως λίγο καλύτερα την σχεδίαση του πρέπει να σημειωθούν κάποιες λεπτομέρειες. Έτσι όπως βλέπουμε το Σχήμα 15 παρατηρούμε δύο μπλε περιοχές. Η πάνω μπλε περιοχή συμπεριλαμβάνει μία ποικιλία από στοιχεία που μπορεί να τοποθετήσουμε μέσα στο σχέδιο όπως καλώδια, συσκευές, κείμενο, γραμμές και πολλά άλλα που χρησιμεύουν. Η κάτω μπλε περιοχή που είναι εξίσου σημαντική μετονομάζει όλα τα στρώματα (layers) της πλακέτας. Μία πλακέτα για να είναι σωστά σχεδιασμένη πρέπει να έχει τα εκάστοτε χαρακτηριστικά της σε συγκεκριμένο στρώμα ώστε να γίνει σωστά η κατασκευή της μετέπειτα. Τα πιο σημαντικά στρώματα που έχει η πλακέτα είναι το top και το bottom που όπως καταλαβαίνουμε προσδιορίζουν την πάνω και την κάτω πλευρά της. Αυτές που θα χρειαστούμε εμείς για την δική μας εργασία είναι οι εξής:

- i. το top, γιατί εκεί θα πραγματοποιηθούν οι συνδέσεις του χαλκού από τον συνδετήρα προς τον αισθητήρα που επιλέξαμε
- ii. το bottom, επειδή εκεί πέρα σχεδιάζεται το περίγραμμα της πλακέτας
- iii. το pads, διότι εκεί σχεδιάζεται ο αισθητήρας που θα βάλουμε στο σχέδιο
- iv. το vias, καθώς εκεί συμπεριλαμβάνεται η σχεδίαση συνδετήρα δηλαδή αυτών των κύκλων που είδαμε
- v. το tnames είναι το στρώμα στο οποίο επιτρέπεται η συγγραφή κειμένου και η εκτύπωση του πάνω στη πλακέτα.



Σχήμα 15: Εισαγωγική παρουσίαση του προγράμματος

Για να γίνει το σχέδιο κάτω από τις σωστές προδιαγραφές πρέπει να ελέγξουμε από το φυλλάδιο του κατασκευαστή (datasheet) τις διαστάσεις του αισθητήρα ώστε να τον σχεδιάσουμε με ακρίβεια. Στα Σχήματα 16 και 17 παραθέτονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την συστοιχία φωτοдиодων. Στο Σχήμα 16 όπως βλέπουμε αναφέρονται οι αποστάσεις μεταξύ των ακροδεκτών του αισθητήρα και δίνει μια γενικότερη απεικόνιση της φωτοδιόδου για να υλοποιηθεί πάνω στην πλακέτα.

#### 4. Foot Pattern on the PCB

We recommend fig.2's foot pattern for your PCB (Printed Circuit Board).

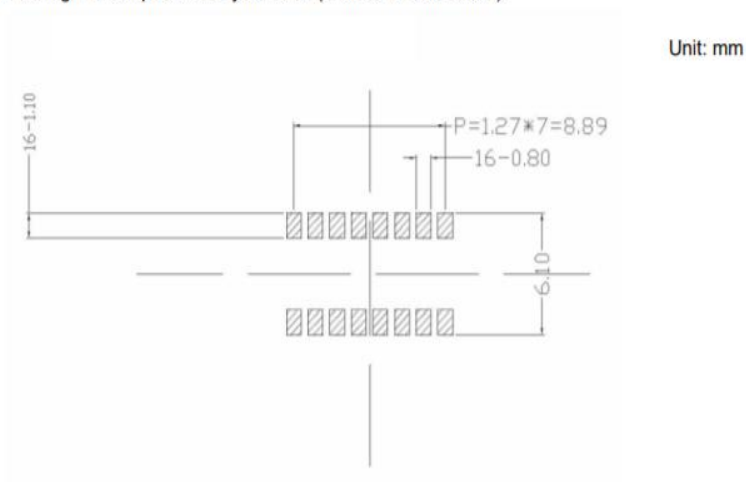


fig.2 Foot pattern

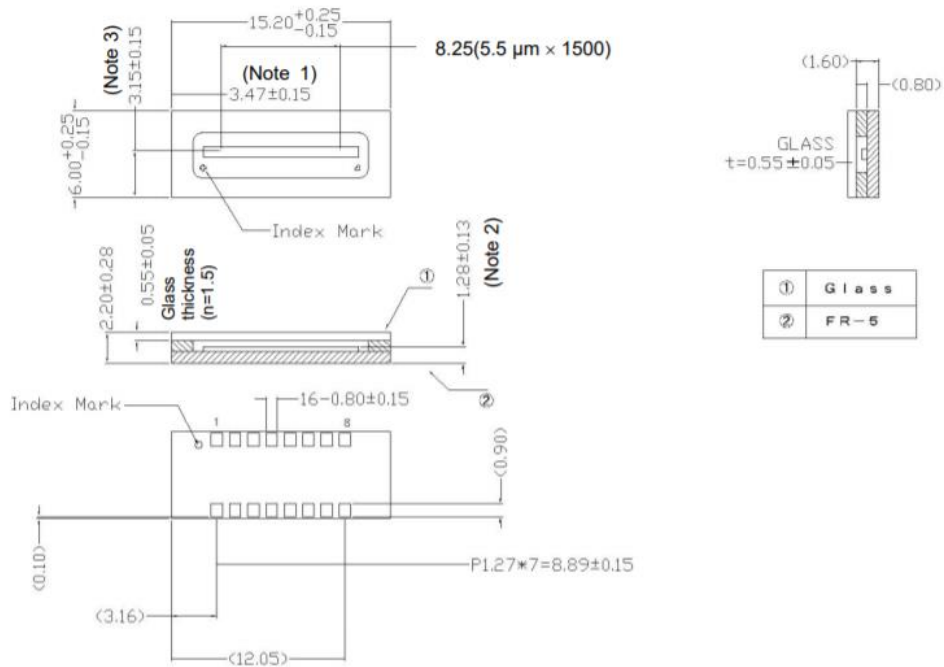
Σχήμα 16: Η απεικόνιση του αισθητήρα από το φύλλο προδιαγραφών (datasheet) για την σχεδίαση του πάνω στη πλακέτα

Στο Σχήμα 17 δίνονται κάποιες όψεις του αισθητήρα, η πρόσοψη, η κάτοψη και η πλάγια όψη του. Με αυτόν το τρόπο υπάρχει μεγαλύτερη σαφήνεια στο μέγεθος όλων των παραμέτρων του με αποτέλεσμα να είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε να τον απεικονίζουμε στο πρόγραμμα Eagle.

## Package Dimensions

WQFN16X-240B

Unit: mm



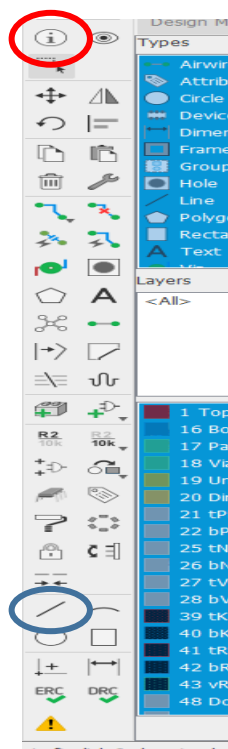
Note 1: Distance between the edge of the package and the first pixel (S1)

Note 2: Distance between the top of chip and bottom of the package

Note 3: Distance between the edge of the package and the chip center

Σχήμα 17: Οι διάφορες όψεις του αισθητήρα αναλυτικά όπως δίνονται στο φύλλο προδιαγραφών (datasheet)

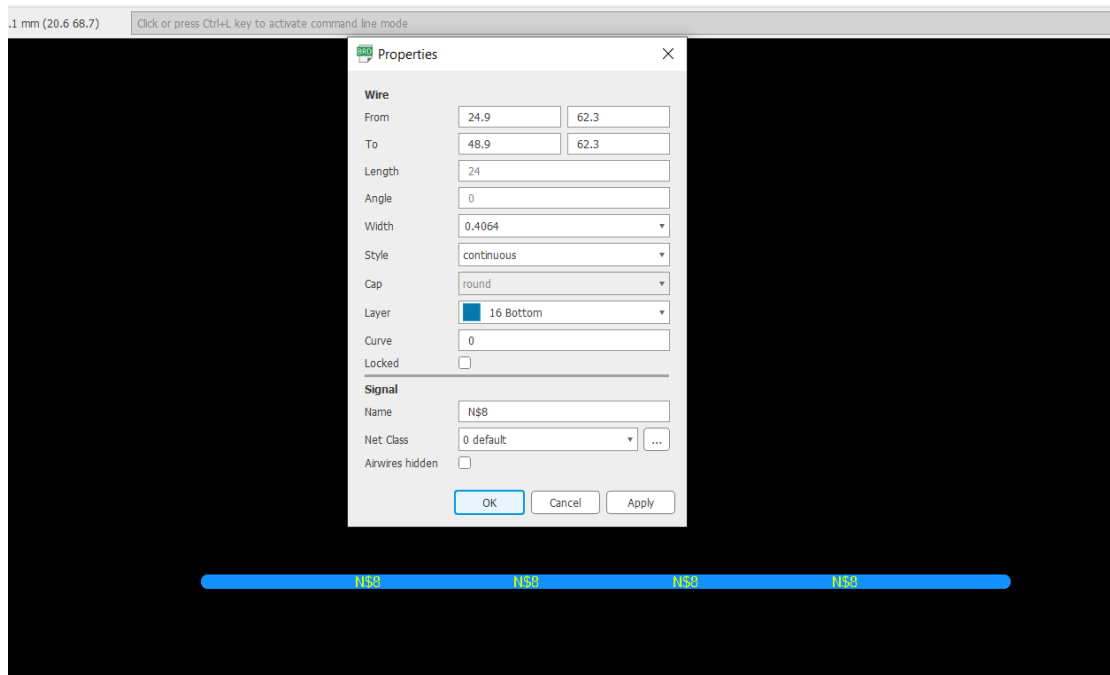
Θα ξεκινήσουμε τμηματικά να σχεδιάζουμε την πλακέτα για λόγους εύκολης ανάλυσης. Το πρώτο που πρέπει να σχεδιαστεί είναι το περίγραμμα της και εν συνεχεία θα σχεδιάσουμε τους κύκλους του συνδετήρα. Επιπρόσθετα, θα απεικονιστεί ο αισθητήρας φωτοδίοδου μας και τέλος θα βάλουμε το απαραίτητο κείμενο που χρειάζεται.



Σχήμα 18: Η γραμμή εργαλείων του Eagle

Για να ξεκινήσουμε να σχεδιάζουμε επιλέγουμε το σύμβολο της γραμμής από την γραμμή εργαλείων, που είναι κυκλωμένη με τον μπλε κύκλο και σχεδιάζουμε μια ευθεία γραμμή όπως φαίνεται στο Σχήμα 18 παραπάνω. Στη συνέχεια επιλέγουμε την γραμμή και πατώντας το κυκλωμένο με κόκκινο κύκλο (i) μας δίνει την δυνατότητα της αλλαγής των διαστάσεων της γραμμής που μόλις σχεδιάσαμε όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Όπως βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα μας δίνει μία πληθώρα επιλογών και αλλαγών που μπορούμε να κάνουμε στο καλώδιο όπως την αλλαγή διαστάσεων ή την αλλαγή του στρώματος που σχεδιάζουμε το καλώδιο το όνομα και το πάχος του. Με αυτόν το τρόπο καταλήγουμε στον σχεδιασμό του περιγράμματος όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 20.



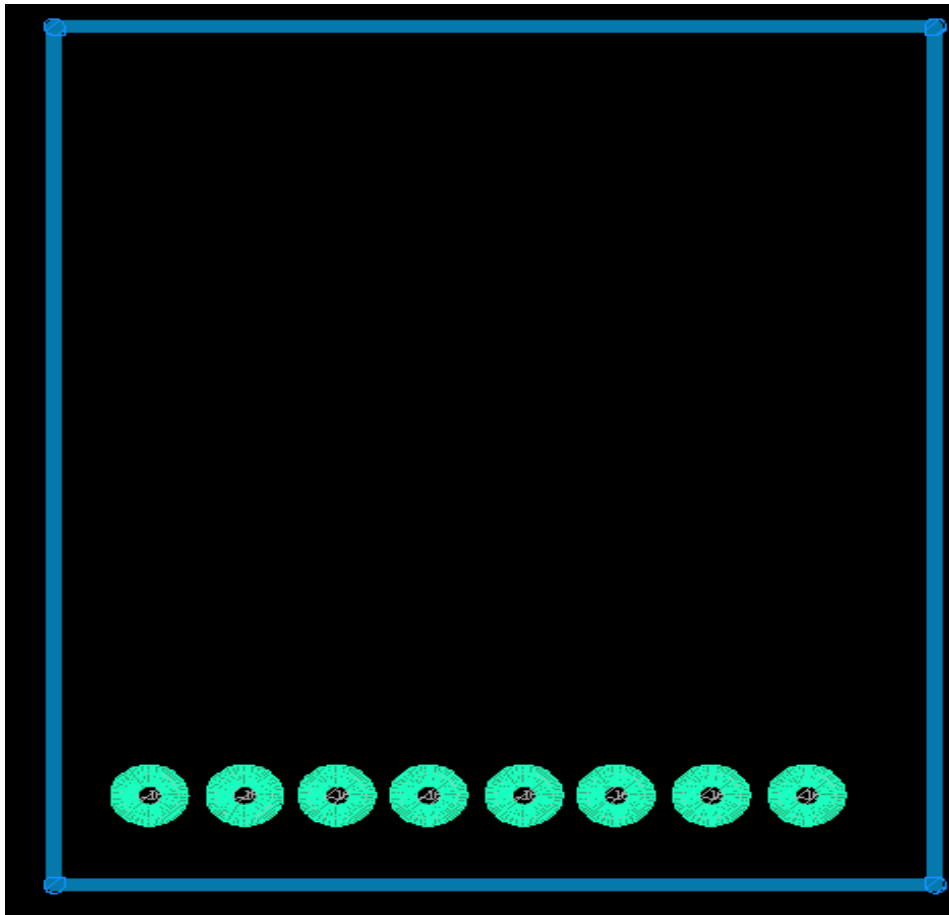


Σχήμα 19: Παράδειγμα της αλλαγής διαστάσεων γραμμής στο Eagle



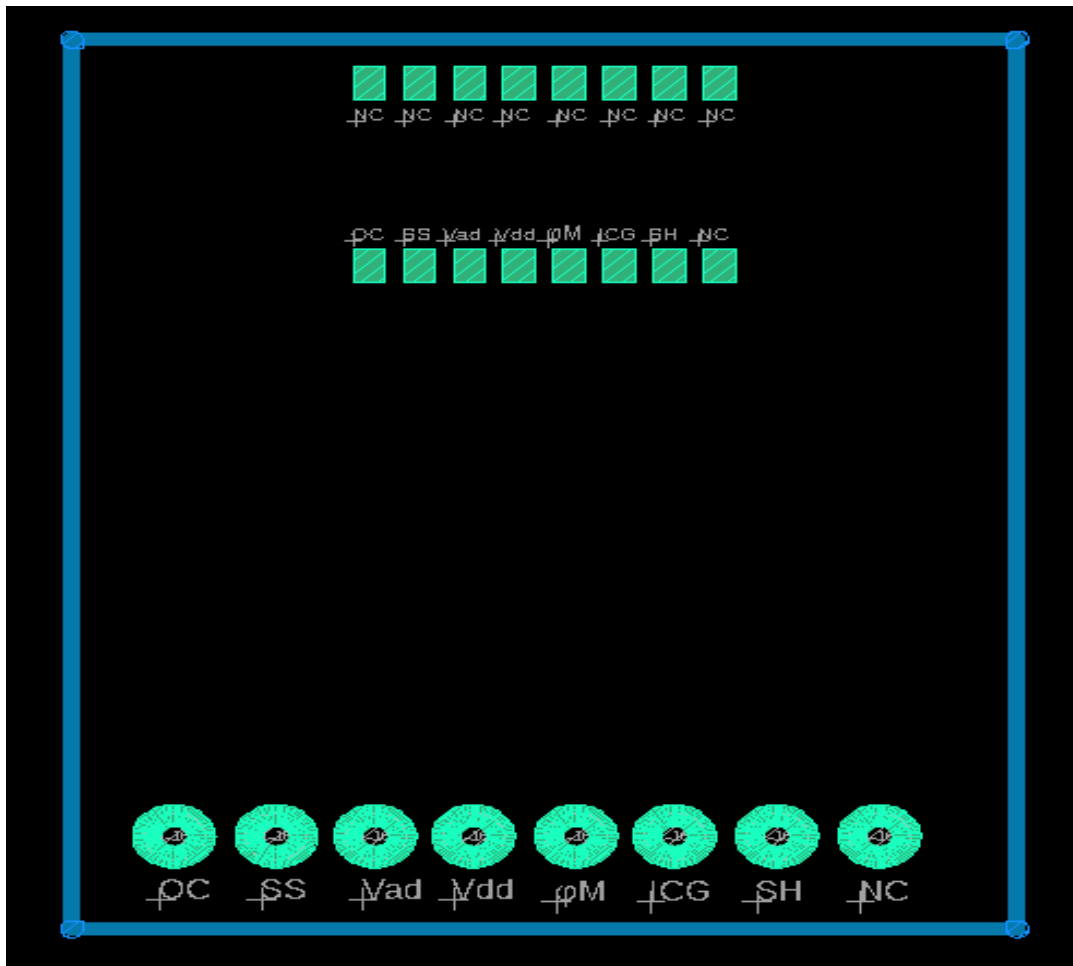
Σχήμα 20: Το περίγραμμα της πλακέτας σχεδιασμένο στο Bottom Layer

Επιπλέον, πατώντας το κουμπί του κύκλου από τη γραμμή εργαλείων θα απεικονίσουμε το συνδετήρα με τον οποίο θα εργαστούμε και κατά προτίμηση θα είναι θηλυκός συνδετήρας οχτώ ακροδεκτών. Το προσαρμόζουμε στο μέγεθος που θέλουμε ανάλογα με τις προδιαγραφές του συνδετήρα και έπειτα το εφαρμόζουμε οχτώ φορές για να ολοκληρωθεί στο στρώμα vias. Το αποτέλεσμα απεικονίζεται στο Σχήμα 21.



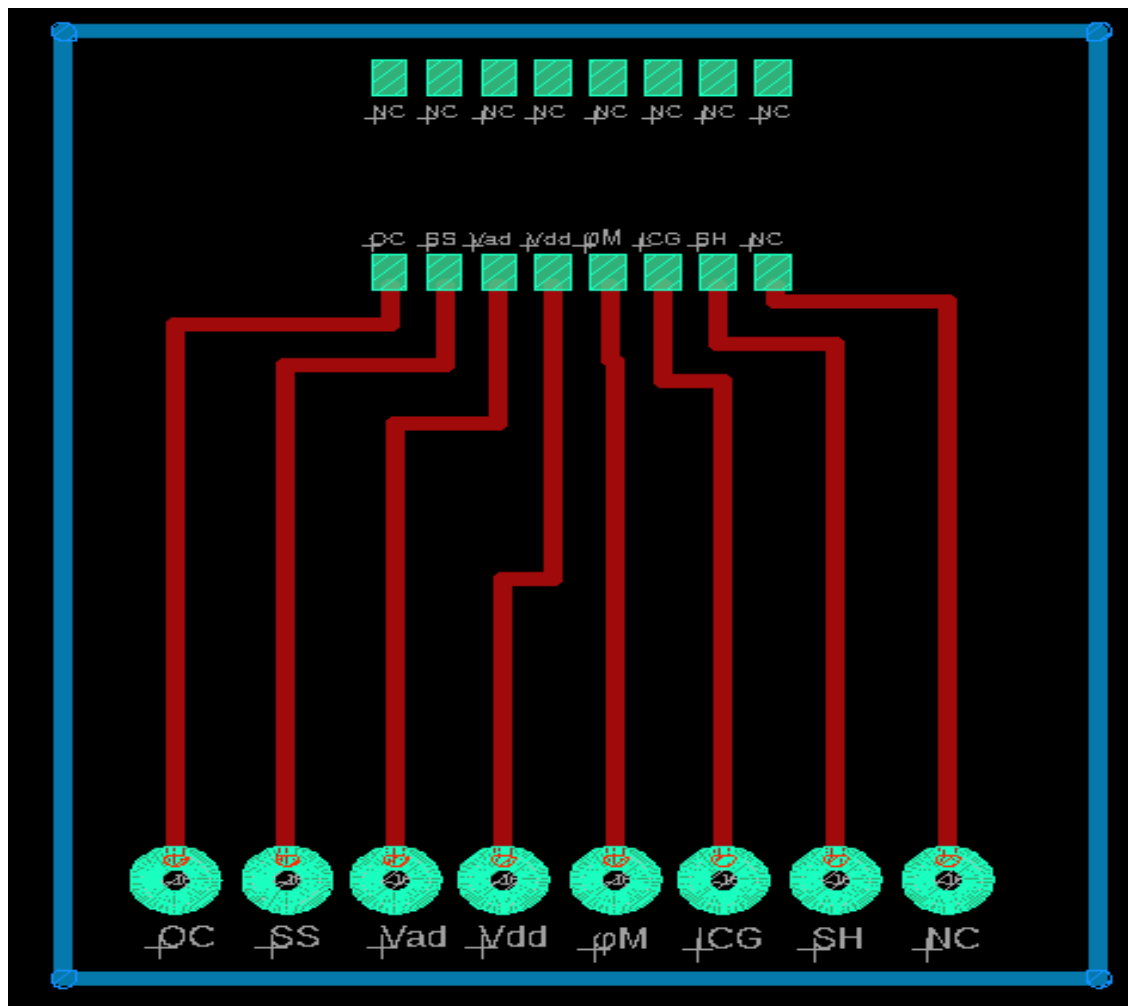
Σχήμα 21: Γραφική απεικόνιση του συνδετήρα στο Vias Layer

Η γραφική απεικόνιση της συστοιχίας φωτοδιόδων στη πλακέτα είναι το επόμενο βήμα προς την ολοκλήρωσή της, επιλέγοντας πάντα το κατάλληλο στρώμα για να καταχωρηθεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε το στρώμα pads και σχεδιάστηκε διαλέγοντας από την γραμμή εργαλείων το ορθογώνιο (rectangle). Το διαφορετικό στρώμα που μπαίνουν τα στοιχεία της πλακέτας είναι και ο λόγος των διαφορετικών χρωμάτων πράγμα που διευκολύνει και την κατανόηση και την ταξινόμηση τους. Επιπρόσθετα προστέθηκαν ήδη και στο στρώμα tnames τα ονόματα των ακροδεκτών. Οι αποστάσεις από τα άκρα του αισθητήρα σχεδιάστηκαν με βάση το σχέδιο του αισθητήρα στο Σχήμα 16 που πάρθηκε από το φυλλάδιο του κατασκευαστή. Το Σχήμα 22 δείχνει την πλακέτα μετά την προσθήκη του αισθητήρα.



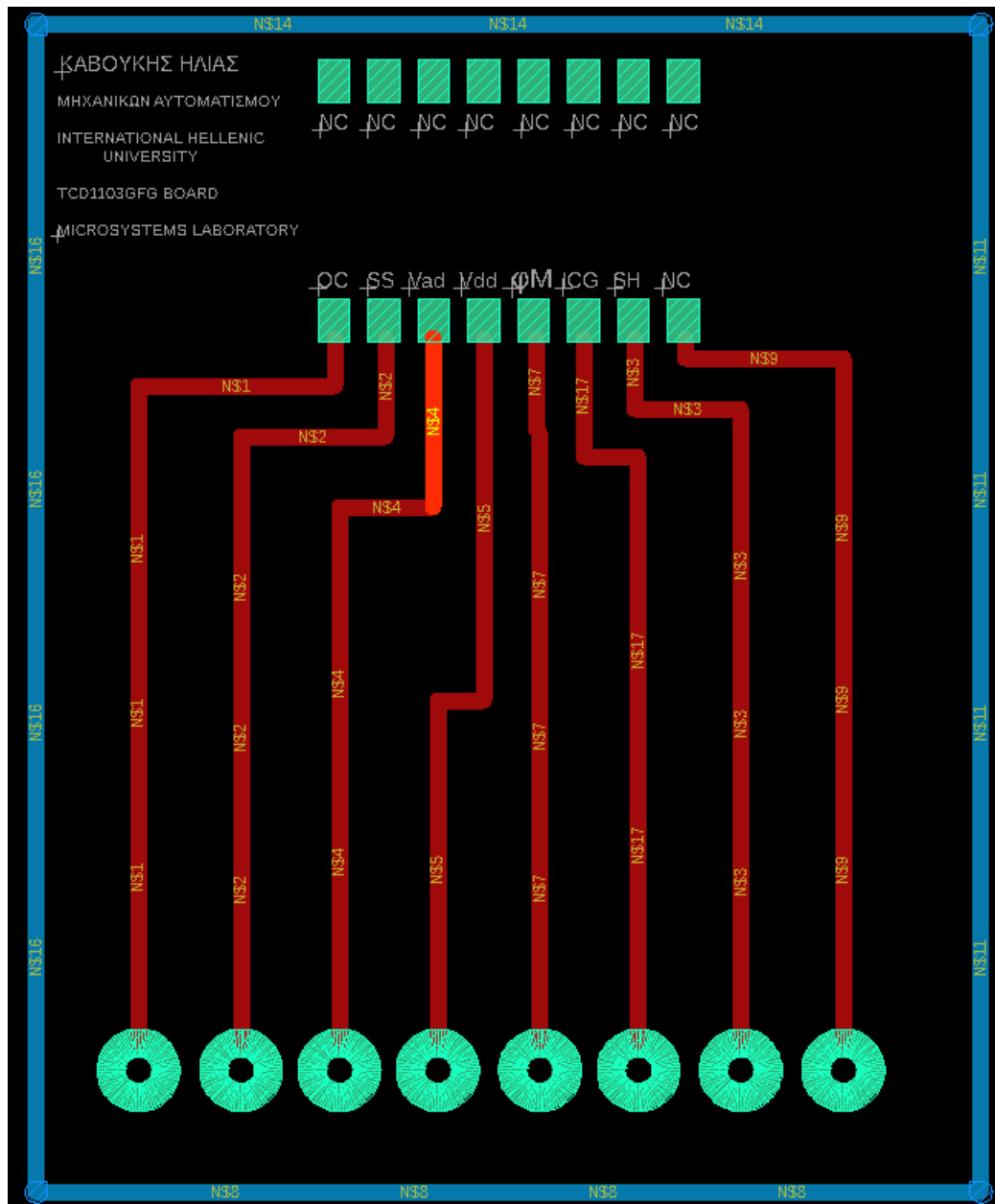
Σχήμα 22: Γραφική προσθήκη του αισθητήρα και των κειμένων στα στρώματα Pads και Tnames αντίστοιχα

Ένα βήμα μακριά από την ολοκλήρωση του σχεδίου θα προστεθούν οι συνδέσεις από τον συνδετήρα στον αισθητήρα. Αυτή η καλωδίωση θα γίνει στο στρώμα top. Εδώ θα ακολουθήσουμε κάποιους αυστηρούς σχεδιαστικούς κανόνες ώστε να υπάρξει ακρίβεια και να μην δημιουργηθούν προβλήματα στο πείραμα. Γι' αυτό η κάθε γραμμή σύνδεσης πρέπει να έχει απόσταση τουλάχιστον 1 cm από την επόμενη και όσον τον δυνατόν λιγότερες διακλαδώσεις για να πηγαίνει σε ευθεία γραμμή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 23.



Σχήμα 23: Σύνδεση του αισθητήρα με τον συνδετήρα οκτώ ακροδεκτών στο στρώμα top

Τέλος προστέθηκε το όνομα του ατόμου που εκπονεί την εργασία, το πανεπιστήμιο φοίτησης του και το εργαστήριο για το οποίο γίνεται το πείραμα. Με αυτό το βήμα φτάσαμε στη τελική μορφή του σχεδίου που θα σταλεί για εκτύπωση πλακετών στο Σχήμα 24.



Σχήμα 24: Το ολοκληρωμένο σχέδιο της πλακέτας που θα σταλεί για εκτύπωση

## 2.3 ΕΡΕΥΝΑ ΑΓΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ

Όταν ολοκληρώθηκε το σχέδιο της πλακέτας, εκπονήθηκε έρευνα αγοράς με στόχο την εύρεση του κατάλληλου προμηθευτή πλακετών. Η παραγγελία αναφέρεται σε πακέτο δέκα πλακετών. Οι παράμετροι που λήφθηκαν ήταν η χώρα προέλευσης, η τιμή και ο χρόνος παράδοσης. Μετά από σοβαρές σκέψεις αποφασίστηκε η συνεργασία με την Quarks Electronics. Ο κύριος λόγος ήταν η στήριξη της εγχώριας αγοράς σε μία λογική τιμή που σε σύγκριση με τις άλλες εταιρείες είναι λίγο ακριβότερη επιλογή αλλά βοηθά στην αξιοπιστία και στην στενή συνεννόηση σε περίπτωση που χρειαστεί να αλλάξει κάτι, καθώς η συγκεκριμένη εταιρεία στεγάζεται στη Θεσσαλονίκη. Παρακάτω στον Πίνακα 3 παραθέτονται τα στοιχεία της κάθε εταιρείας που εξετάστηκε για να γίνει η συνεργασία. Τέλος στο όνομα κάθε εταιρείας έχει προστεθεί υπερσύνδεσμος της ιστοσελίδας της κάθε εταιρείας.

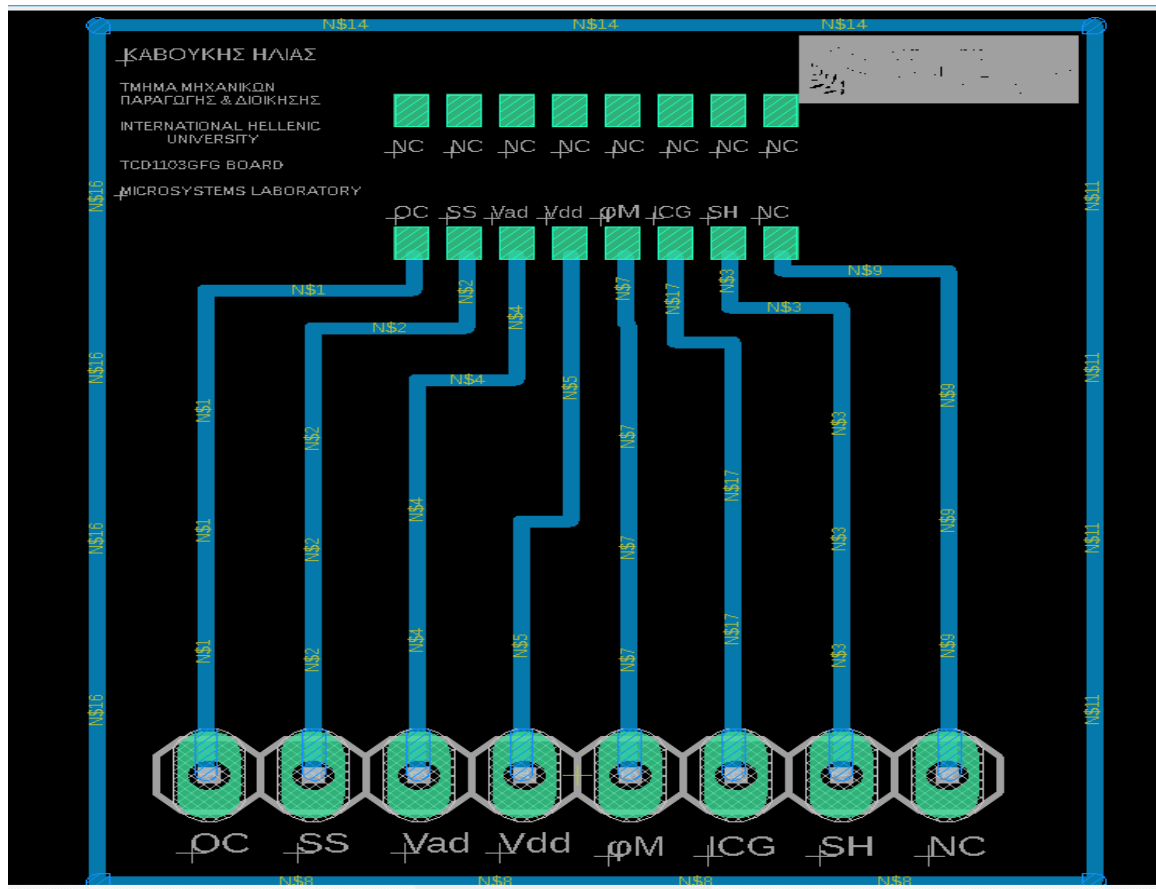
|                         | <a href="#">Quarks electronics</a> | <a href="#">Pcbway</a> | <a href="#">Jlcpcb</a> | <a href="#">Nextpcb</a> | <a href="#">Firstpcb</a> | <a href="#">Pcb assembling</a> |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| <i>Χώρα προέλευσης</i>  | Ελλάδα                             | Κίνα                   | Κίνα                   | Κίνα                    | Κίνα                     | Ελλάδα                         |
| <i>Διαθεσιμότητα</i>    | Ναι                                | Ναι                    | Ναι                    | Ναι                     | Ναι                      | Ναι                            |
| <i>Τιμή</i>             | 65€                                | 90€                    | 41€                    | 55€                     | 46€                      | 125€                           |
| <i>Χρόνος παράδοσης</i> | 3-5 μέρες                          | 3-7 μέρες              | 3-5 μέρες              | 2-3 μέρες               | 3-5 μέρες                | 3-5 μέρες                      |
| <i>Τιμή</i>             | !                                  | 15€                    | 6€                     | 21€                     | -                        | -                              |
| <i>Χρόνος παράδοσης</i> | !                                  | 23-30 μέρες            | 20-35 μέρες            | 5-6 μέρες               | -                        | -                              |

|                 |                                     |                             |                         |                              |                              |                                    |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| <i>Αναφορές</i> | [26] (PCB quarks electronics, n.d.) | [27] (PCB of PCBW AY, n.d.) | [28] (PCB of JLC, n.d.) | [29] (PCB of Next pcb, n.d.) | [30] (PCB of Firstpcb, n.d.) | [31] (Pcb of Pcb assembling, n.d.) |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|

Πίνακας 3 : Παράθεση εταιρειών για την κατασκευή της πλακέτας

Τελικά, η συνεργασία με την Quarks Electronics ήταν η καλύτερη επιλογή που μπορούσε να γίνει καθώς χρειάστηκαν μερικές αλλαγές στο σχέδιο για να γίνει δυνατή η υλοποίηση του. Οι αλλαγές που χρειάστηκαν να γίνουν φαίνονται στο σχήμα 25 και είναι οι τρεις ακόλουθες:

- Οι συνδέσεις του συνδετήρα με τον αισθητήρα μεταφέρθηκαν από το στρώμα top στο bottom γιατί αλλιώς φαίνεται σαν διπλής όψης η πλακέτα και έτσι θα κοστίσει παραπάνω και δεν θα είναι σωστά υλοποιημένη.
- Δεύτερον, στους κύκλους του συνδετήρα χρειάζεται να δοθεί μία εντολή μέσα από το πρόγραμμα που ονομάζεται drill. Αυτό καθορίζει το μέγεθος των τρυπημάτων που θα έχουμε σε διάμετρο ώστε να χωράει να περάσει η σύνδεση του συνδετήρα.
- Τέλος το μέγεθος του ολοκληρωμένου ήταν μεγαλύτερο από το πραγματικό και μετά από μία πρώτη δοκιμή που δεν εφαρμόζε πάνω στην πλακέτα μίκρυνε ή απόσταση κατά 1.6 χιλιοστά.



Σχήμα 25: Η απεικόνιση της πλακέτας μετά τις τελευταίες διορθώσεις και πάνω δεξιά το λογότυπο του πανεπιστημίου

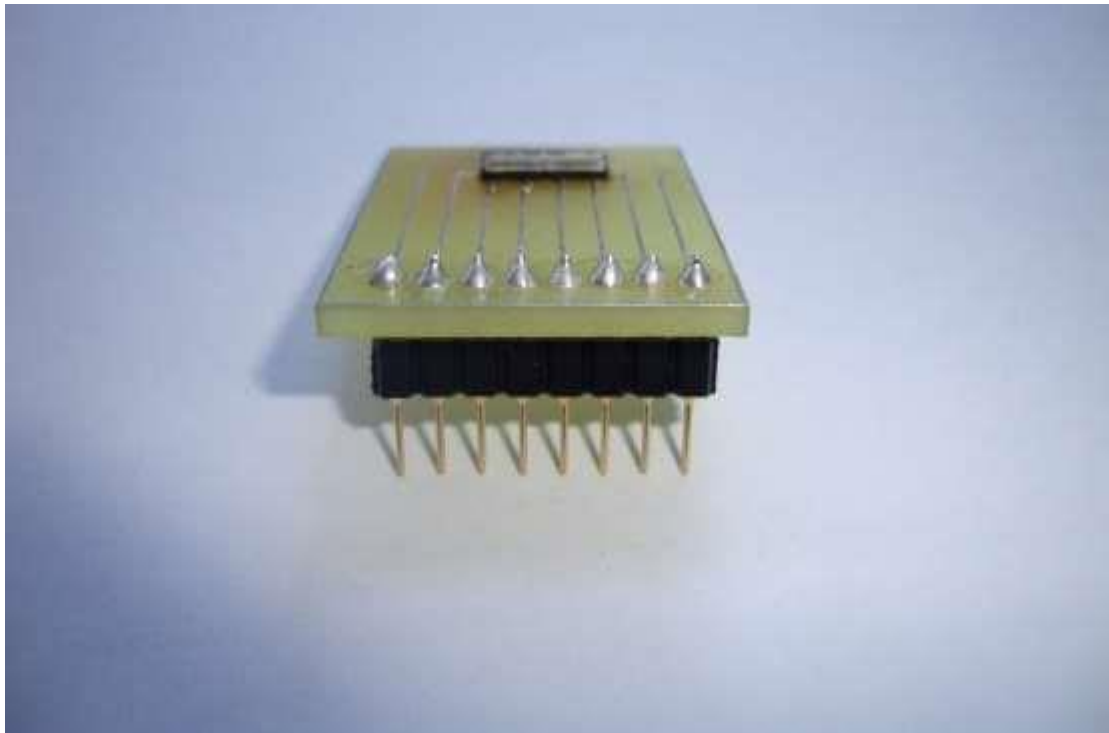
Μετά από στενή παρακολούθηση της δουλειάς της ελληνικής εταιρείας κατασκευής πλακετών Quarks Electronics αποφασίστηκε η διακοπή της συνεργασίας μαζί τους, διότι παρατηρήθηκε ότι ενώ ο χαλκός ήταν καλός και το σχέδιο αποτυπώθηκε σωστά, τα υπόλοιπα επίπεδα όπως είναι, η πράσινη στρώση που χρησιμοποιείται για προστασία από διάχυση καλαί, η επικασσιτέρωση, και τα ονόματα των ακροδεκτών τα οποία δεν μπορούσαν να συμπεριληφθούν πάνω στη πλακέτα. Έτσι στη δεύτερη προσπάθεια που έγινε προτιμήθηκε η κινέζικη εταιρεία JLC PCB που είναι αναγνωρισμένη και έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν. Η διαφορά του αποτελέσματος είναι εμφανής και θα γίνει κατανοητή στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



### **3.ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

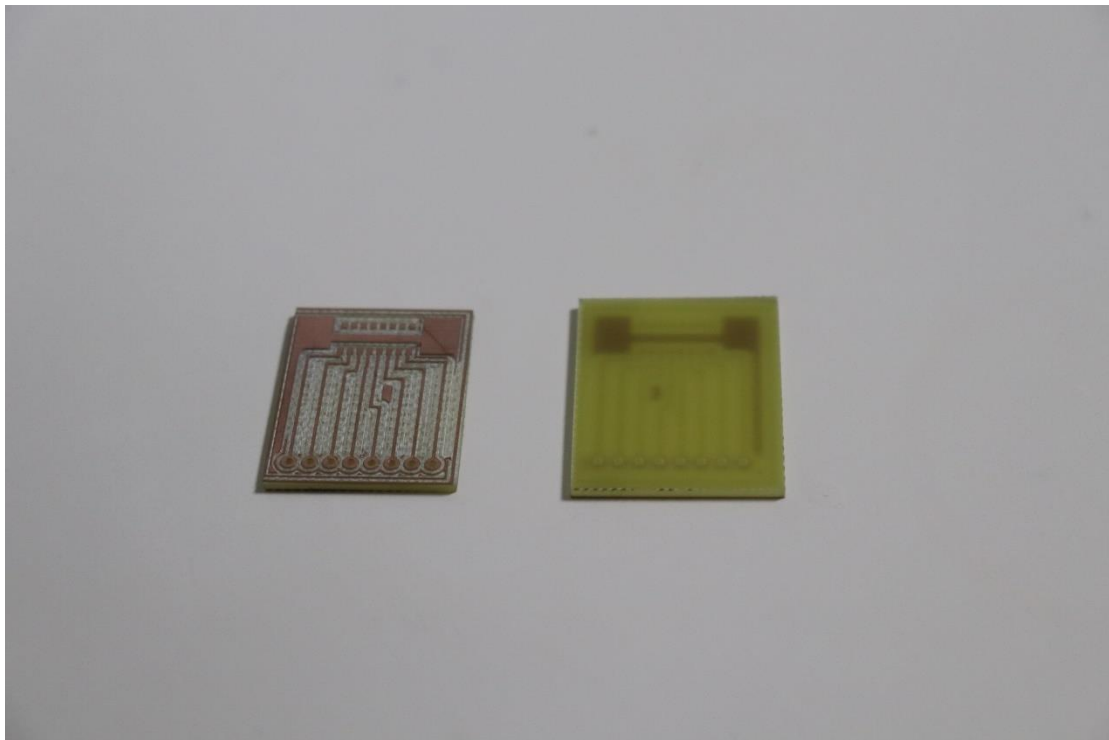
#### **3.1 ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ**

Μετά από πολλές εργατοώρες και αλλαγές που έγιναν το αποτέλεσμα της πλακέτας είναι έτοιμο. Στο σχήμα 26 παραθέεται για λόγους σύγκρισης, η τελική έκδοση της προηγούμενης πλακέτας που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα πάνω στο οποίο βασιστήκαμε για να εξάγουμε τα αποτελέσματα αυτής της πτυχιακής. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι οι κολλήσεις στο κάτω μέρος της πλακέτας εκεί δηλαδή όπου βρίσκουμε τον συνδετήρα των οκτώ ακροδεκτών με διαστάσεις 2.56 χιλιοστά, τις συνδέσεις από τον συνδετήρα στον αισθητήρα φωτοδιόδου που αναγράφεται στο πάνω μέρος της πλακέτας.



Σχήμα 26: Τελικό αποτέλεσμα προηγούμενης έκδοσης της πλακέτας (Παλαζλί, 2016)

Στο σχήμα 27 γίνεται η παρουσίαση της πλακέτας από την εταιρεία quarks electronics, η οποία τελικά απορρίφθηκε σαν επιλογή για την περάτωση του πειράματος εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας που είχε να προσφέρει από άποψη δομής και λειτουργικότητας. Παρόλα αυτά όπως θα δούμε στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για δοκιμαστικές κολλήσεις, του συνδετήρα και του αισθητή, πριν γίνουν οι τελικές κολλήσεις στη πλακέτα που χρησιμοποιηθεί στο πείραμα.



Σχήμα 27: Παρουσίαση της πλακέτας από την εταιρεία quarks electronics

Στη συνέχεια θα δοκιμαστούν οι κολλήσεις βηματικά πάνω στην πλακέτα. Αυτό σημαίνει ότι πρώτα θα γίνει η κόλληση του συνδετήρα όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 28. Έπειτα η ολοκλήρωση των κολλήσεων περιλαμβάνει την τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στην πλακέτα, ακριβώς όπως στο σχήμα 29. Οι κολλήσεις εκτελέστηκαν με την χρήση κολλητηριού και καλαί ( το οποίο είναι κασσίτερος και χρησιμοποιείται σαν συγκολλητικό κράμα μαλακής κόλλησης).



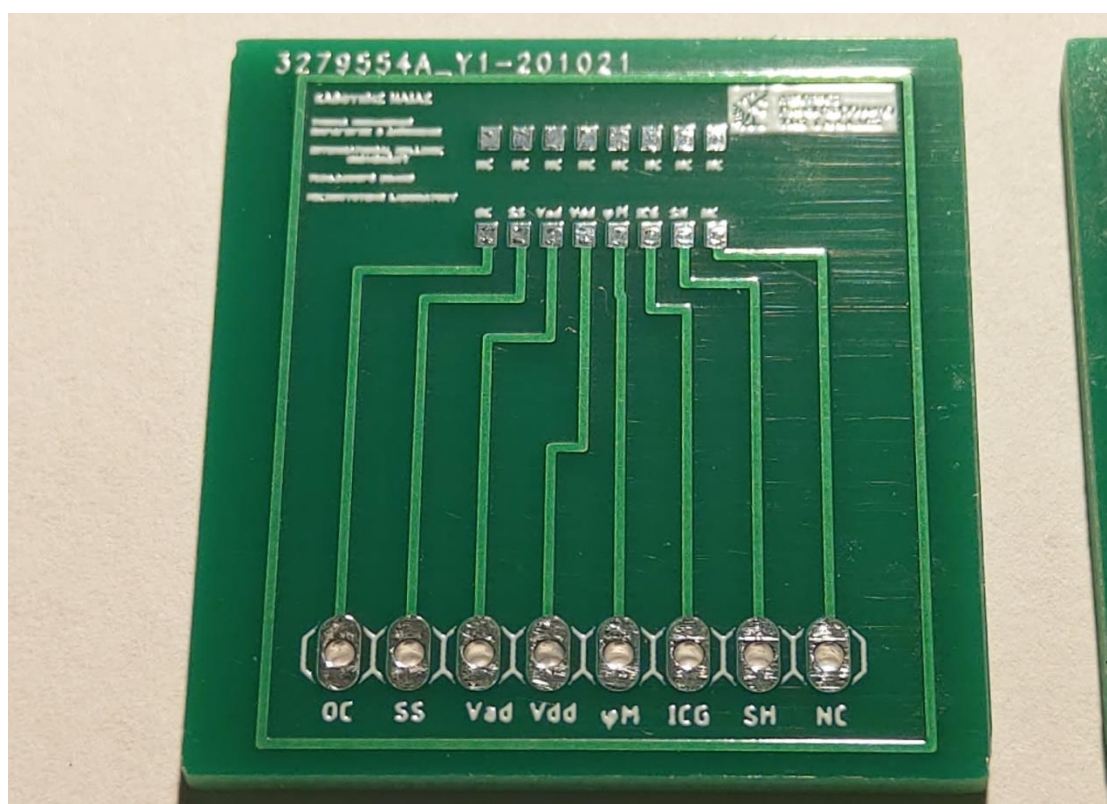
Σχήμα 28: Η πλακέτα μετά την κόλληση του συνδετήρα



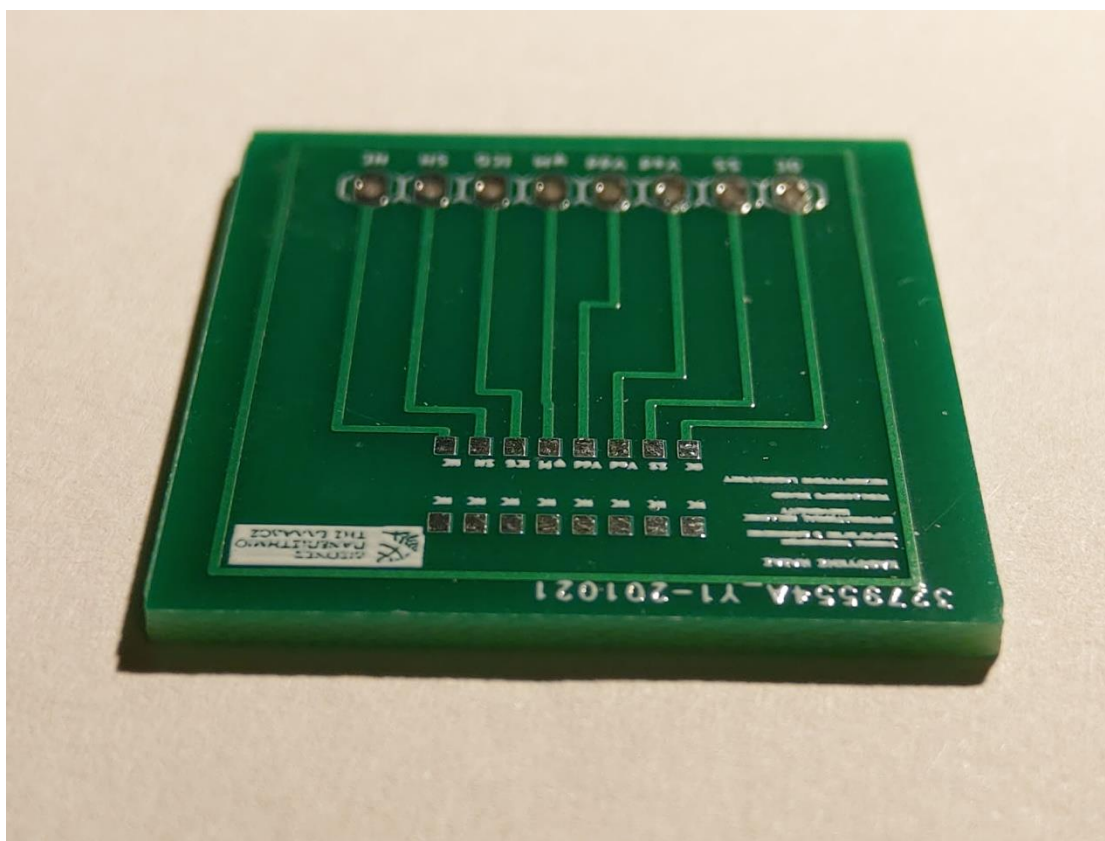
Σχήμα 29: Η πλακέτα ολοκληρωμένη μετά και την κόλληση του αισθητήρα

Τελικά, με την παραλαβή των πλακετών από την εταιρεία JLC PCB, οι οποίες όπως φαίνεται στα σχήματα 30 και 31, έφτασε το τελευταίο στάδιο το οποίο είναι οι τελικές κολλήσεις. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στη πλακέτα παρακάτω υπάρχει αρκετός χαλκός για να γίνουν σωστά και σταθερά οι κολλήσεις, και στο συνδετήρα και στον αισθητήρα, σε σχέση πάντα με την προηγούμενη πλακέτα.

Δυστυχώς, λόγω της πανδημίας του κορονοϊού οι τελικές κολλήσεις δεν κατάφεραν να γίνουν στη πλακέτα της JLC PCB, καθώς τα πανεπιστήμια παρέμειναν κλειστά σε όλη τη χώρα, με αποτέλεσμα κατά την ολοκλήρωση της πτυχιακής να μην υπάρχει διαθέσιμος χρόνος.



Σχήμα 30: Η πλακέτα της εταιρείας JLC PCB



Σχήμα 31: Η πλακέτα της εταιρείας JLC PCB από άλλη όψη

Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαίο να παρατεθούν σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν σε όλη τη διάρκεια της συγγραφής και της εκτέλεσης του πειράματος ώστε να αποφευχθούν καθυστερήσεις από μελλοντικές έρευνες:

- Στη σχεδίαση του συνδετήρα επειδή είναι λεπτομερής προτιμάται καλύτερα η επιλογή συνδετήρα από την βιβλιοθήκη του προγράμματος ώστε να μπορούν να γίνουν σωστά οι κολλήσεις του πειράματος.
- Το logo που μπήκε στο σχέδιο της πλακέτας είναι αρκετά δύσκολο παρόλο που υπάρχει και η καθοδήγηση επιστημονικών σελίδων του διαδικτύου, γιατί στις ρυθμίσεις πρέπει να επιλεγθεί ένα χρώμα άσπρο να έχει υψηλή ανάλυση και τέλος να έχει ρυθμιστεί σωστά από πλευράς διαστάσεων.
- Οι έρευνες αγορών χρειάζονται αρκετό χρόνο και κυρίως για την παραλαβή των αντικειμένων οπότε κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι ο εκάστοτε μαθητής θα

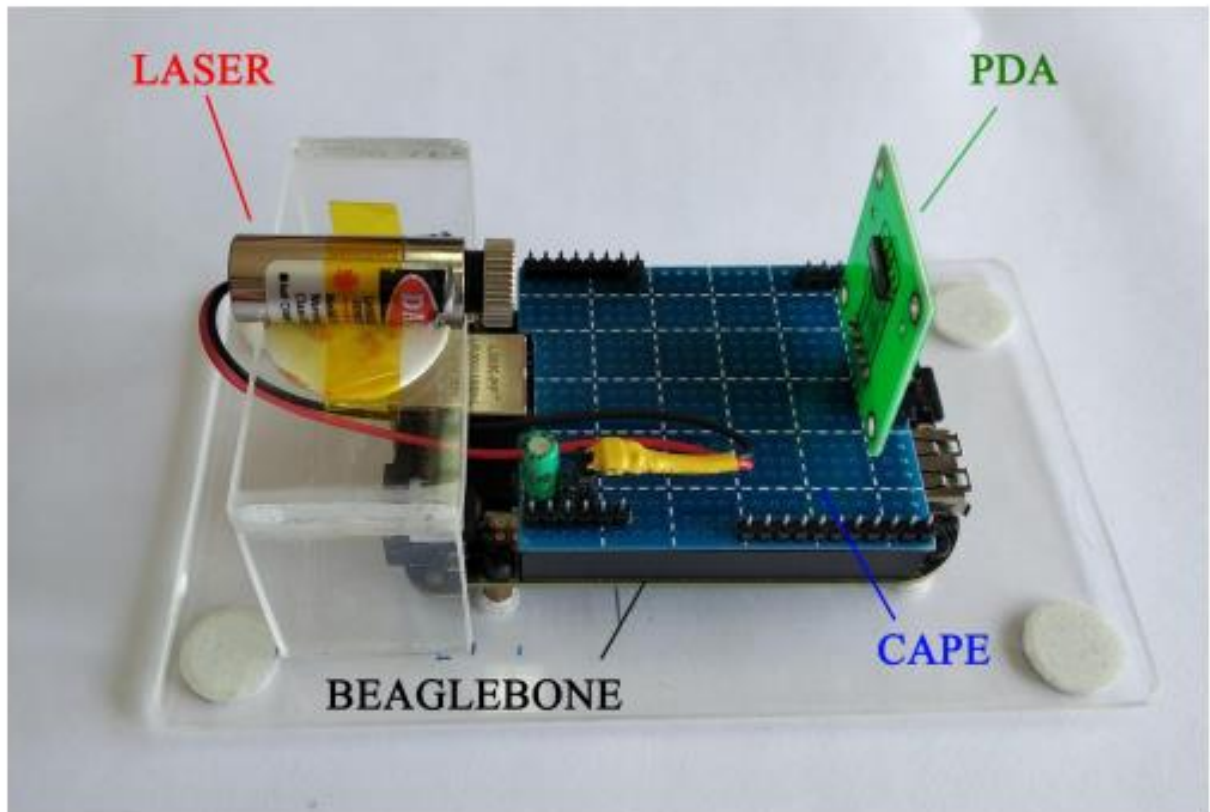
πρέπει στο χρονοδιάγραμμα να έχει βάλει ένα μήνα αναμονή για την λήψη των αντικειμένων.

- Στη σχεδίαση πρέπει να γίνει η τήρηση κάποιων κανόνων ώστε να είναι ομοιόμορφο και σωστά διαμορφωμένο το σχέδιο της πλακέτας όσον αφορά τις συνδέσεις.
- Στη σχεδίαση του αισθητήρα πρέπει να γίνει πολύ προσεκτική σχεδίαση γιατί στα datasheet δεν γίνονται πάντα ευκόλως κατανοητές οι αποστάσεις που πρέπει να τηρηθούν.

### **3.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

Με την περάτωση αυτής της πτυχιακής εργασίας παραθέτονται ιδέες που συγκεντρώθηκαν κατά την εκπόνηση της για μελλοντικές έρευνες οι οποίες θα βασίζονται πρωταρχικά πάνω σε αυτήν:

1. Ένα πείραμα μπορεί να υλοποιηθεί με την πλακέτα που δημιουργήθηκε βάσει του ήδη υπάρχοντος πειράματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 27, το οποίο μετά και τον προγραμματισμό του ελεγκτή θα μπορέσει να παρατηρηθεί η βελτιστοποίηση του αποτελέσματος των βιοϊατρικών μετρήσεων, γιατί σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα η πλακέτα εμπεριέχει αισθητήρα 1500 στοιχείων φωτοδιόδου το οποίο είναι μεγάλη αύξηση από το προηγούμενο που είχε 128 στοιχεία.



Σχήμα 32: Αναπαράσταση του πειράματος (Karakostas, K., Gkagkanis, S., Katsaliaki, K., Kollensperger, P., Hatzopoulos, A., & Kiziroglou, M. (2019). Portable optical blood scattering sensor. *Microelectronic engineering*. 217.111129.10.1016/j.mee.2019.111129)

2. Μία έρευνα αγοράς θα μπορούσε να γίνει στο μέλλον ώστε να βρεθεί αισθητήρας ο οποίος θα είναι πιο βέλτιστος από αυτόν που χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή και για λόγους τελειοποίησης του.

#### 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσίκου , Ε. (2004). *Τει crete*. Ανάκτηση από Τει crete:  
<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/iat/2004/TsikouEftychia/attached-document/2004Tsikou.pdf>
2. Καλοβρέκτης, Κ., & Κατέβας, Ν. (2013). *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
3. Boylestad , R., & Nashelsky, L. (2012). *Ηλεκτρονικές Διατάξεις και Θεωρία Κυκλωμάτων*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.
4. VE-TEJ IMPEX. *indiamart*. Ανάκτηση από  
<https://www.indiamart.com/proddetail/digital-integrated-circuit-chip-13202417948.html> στις 06-11-2020
5. Smith, J. *UL corporation*. Ανάκτηση από  
<https://www.ul.com/resources/functional-safety-embedded-systems-and-software-used-machinery> στις 05-11-2020
6. *Circuit Globe*. Ανάκτηση από <https://circuitglobe.com/potential-barrier-in-a-diode.html> στις 06-11-2020
7. *Learning about electronics*. Ανάκτηση από  
<http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/What-is-a-diode-connected-in-reverse-biased> στις 07-11-2020
8. Λιαπέρδος , Γ. (2015). *kallipos*. Ανάκτηση από Kallipos:  
[https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/52/7/chapter\\_02.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/52/7/chapter_02.pdf) στις 29-10-2020
9. *Team wavelength*. Ανάκτηση από Wavelength electronics:  
<https://www.teamwavelength.com/photodiode-basics/> στις 30-10-2020
10. Hamamatsu Photonics. (2015, Οκτώβριος). *Hamamatsu*. Ανάκτηση από Hamamatsu Photonics:  
<https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/S4111-46Q/index.html> στις 02-11-2020
11. Watterson, D. *photography course*. Ανάκτηση από  
<https://photographycourse.net/what-is-the-ccd/> στις 15-10-2020



12. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 20-09-2020, από [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13255-2048-02\\_kmpd1179e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13255-2048-02_kmpd1179e.pdf)
13. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 15-09-2020, από [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11155-2048-02\\_kmpd1155e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11155-2048-02_kmpd1155e.pdf)
14. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 23-09-2020, από [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12379\\_kmpd1149e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12379_kmpd1149e.pdf)
15. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 04-09-2020, από <http://spectronicdevices.com/pdf/Hamamatsu/PhotoDiode/s390XPhotoDiodeArray.pdf>
16. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 10-10-2020, από [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8377-128q\\_etc\\_kmpd1066e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8377-128q_etc_kmpd1066e.pdf)
17. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 11-10-2020, από [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11639-01\\_kmpd1163e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11639-01_kmpd1163e.pdf)
18. Mouser. Ανάκτηση στις 03-07-2020, από [https://ams.com/documents/20143/36005/TSL1401CL\\_DS000136\\_3-00.pdf](https://ams.com/documents/20143/36005/TSL1401CL_DS000136_3-00.pdf)
19. Mouser. Ανάκτηση στις 03-07-2020, από [https://www.mouser.com/datasheet/2/588/TSL1402R\\_DS000147\\_2-00-559278.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/588/TSL1402R_DS000147_2-00-559278.pdf)
20. Mouser. Ανάκτηση στις 06-07-2020, από [https://www.mouser.com/datasheet/2/588/TSL1412S\\_DS000150\\_2-00-948119.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/588/TSL1412S_DS000150_2-00-948119.pdf)
21. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 01-08-2020, από [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11865-64\\_etc\\_kmpd1134e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11865-64_etc_kmpd1134e.pdf)
22. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 06-08-2020, από <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/S11299-421/index.html>
23. Toshiba. Ανάκτηση στις 20-07-2020, από <http://toshiba.semicon-storage.com/eu/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html>
24. Toshiba. Ανάκτηση στις 21-07-2020, από <http://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1103GFG.html>
25. Hamamatsu. Ανάκτηση στις 13-09-2020, από <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/G7151-16/index.html>

26. (Quarks electronics) Ανάκτηση στις 10-9-2020, από <https://www.quarkselectronics.gr/>
27. (PCBWAY) Ανάκτηση στις 15-09-2020, από <https://www.pcbway.com/>
28. (JLPCB) Ανάκτηση στις 16-09-2020, από <https://jlcpcb.com/>
29. (Nextpcb) Ανάκτηση στις 17-09-2020, από <https://www.nextpcb.com/>
30. (Firstpcb) Ανάκτηση στις 19-09-2020, από <https://www.firstpcb.com/>
31. (Pcb assembling) Ανάκτηση στις 18-09-2020, από <http://www.assembling.gr/index.php>
32. Παλαζλί, Χ. (2016). Μελέτη οπτικών μετατροπών για χρήση σε μη παρεμβατικούς βιοϊατρικούς αισθητήρες. Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
33. Karakostas, K., Gkagkanis, S., Katsaliaki, K., Kollensperger, P., Hatzopoulos, A., & Kiziroglou, M. (2019). Portable optical blood scattering sensor. *Microelectronic engineering*. 217.111129.10.1016/j.mee.2019.111129.