



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΑΛΑΜΟΥ  
ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ  
ΠΛΑΚΕΤΩΝ»



Του φοιτητή  
Γεώργιου Κουφού  
Αρ. Μητρώου: 518224

Επιβλέπων  
Άγγελος Γιακουμής  
Επ. Καθηγητής

Ημερομηνία 27-05-2026

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη και κατασκευή θαλάμου αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών

Κωδικός Δ.Ε. 23216

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Γεώργιος Κουφός

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Άγγελος Γιακουμής

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 15-01-2026

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γεώργιου Κουφού που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

*«Αφιέρωση»*



## Πρόλογος

Ο τομέας των τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλάδους της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας, καθώς σχεδόν κάθε ηλεκτρονική συσκευή βασίζεται στη χρήση πλακετών PCB για τη λειτουργία και τη διασύνδεση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η διαδικασία κατασκευής φωτοευαίσθητων πλακετών μέσω φωτολιθογραφίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδυάζει τεχνικές ηλεκτρονικής, χημείας και αυτοματισμού, προσφέροντας τη δυνατότητα δημιουργίας αξιόπιστων και ακριβών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος πραγματοποιήθηκε λόγω του έντονου ενδιαφέροντός μου για τις ηλεκτρονικές κατασκευές, τα συστήματα αυτοματισμού και τις τεχνολογίες κατασκευής PCB. Μέσα από την εκπόνηση της εργασίας είχα την ευκαιρία να μελετήσω σε βάθος τις βασικές αρχές της φωτολιθογραφίας, να σχεδιάσω και να κατασκευάσω έναν λειτουργικό θάλαμο αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών, καθώς και να εφαρμόσω γνώσεις προγραμματισμού, ηλεκτρονικής σχεδίασης και πειραματικής αξιολόγησης. Η παρούσα εργασία συνέβαλε σημαντικά στην απόκτηση πρακτικής εμπειρίας και στην καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών κατασκευής PCB.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη, σχεδίαση, κατασκευή και αξιολόγηση ενός θαλάμου αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB) μέσω της διαδικασίας της φωτολιθογραφίας. Αρχικά πραγματοποιήθηκε θεωρητική μελέτη σχετικά με τις βασικές κατηγορίες PCB, τα δομικά τους στοιχεία, τα υλικά κατασκευής, καθώς και τις σημαντικότερες τεχνικές παραγωγής πλακετών, με ιδιαίτερη έμφαση στη φωτολιθογραφία και στις σύγχρονες τεχνολογίες UV έκθεσης. Παράλληλα εξετάστηκαν ζητήματα που σχετίζονται με τα ηλεκτρονικά απόβλητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των PCB.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας λειτουργικός θάλαμος αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών, βασισμένος σε UV LED ως πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Για τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος χρησιμοποιήθηκε μικροελεγκτής Arduino Uno R3, μέσω του οποίου υλοποιήθηκε ρύθμιση του χρόνου έκθεσης και της έντασης φωτισμού. Επιπλέον, ενσωματώθηκαν οθόνη LCD, πληκτρολόγιο, ποτενσιόμετρο και σύστημα ηχητικών ειδοποιήσεων για τη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης του χρήστη με τη συσκευή.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής πραγματοποιήθηκε πειραματική αξιολόγηση του θαλάμου. Σχεδιάστηκαν δοκιμαστικά κυκλώματα στο λογισμικό KiCad και ακολούθησε η διαδικασία έκθεσης, εμφάνισης και αποχάλκωσης φωτοευαίσθητων πλακετών με χρήση χημικών διαλυμάτων. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εξετάστηκε η επίδραση διαφορετικών χρόνων έκθεσης, επιπέδων φωτεινότητας και αναλογιών χημικών διαλυμάτων στην ποιότητα αποτύπωσης των κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της φωτολιθογραφικής διαδικασίας. Τέλος, η επιτυχής δημιουργία λειτουργικών πλακετών PCB επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα και τη λειτουργικότητα της κατασκευής.

# Study and Construction of a Photoresist Printed Circuit Board Exposure Chamber

Georgios Koufos

## **Abstract**

The present thesis focuses on the study, design, construction, and evaluation of a photoresist PCB exposure chamber for the fabrication of Printed Circuit Boards (PCBs) through the process of photolithography. Initially, the theoretical background regarding the main PCB categories, their structural components, manufacturing materials, and the most important PCB fabrication techniques, was presented with particular emphasis on photolithography and modern UV exposure technologies. In addition, issues related to electronic waste and the environmental impact of PCBs were examined.

Subsequently, a functional exposure chamber for photoresist PCBs was designed and constructed using UV LEDs as the ultraviolet radiation source. An Arduino Uno R3 microcontroller was utilized to control the system, enabling the adjustment of exposure time and light intensity. Furthermore, an LCD display, keypad, potentiometer, and audible notification system were integrated in order to facilitate user interaction with the device.

After the completion of the construction process, an experimental evaluation of the chamber was carried out. Test circuits were designed using the KiCad software and the procedures of exposure, development, and etching of photoresist PCBs were performed using chemical solutions. During the experiments, the effects of different exposure times, light intensity levels, and chemical solution ratios on the quality of circuit pattern transfer were investigated. The experimental results demonstrated that the proper adjustment of the operating parameters significantly affects the quality of the photolithography process. Finally, the successful fabrication of functional PCB circuits confirmed the effectiveness and reliability of the constructed system.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστώ την οικογένεια μου για την συνεχή στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση σε όλη την διάρκεια της ακαδημαϊκή μου πορείας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, καθώς και την κοπέλα μου για την συμπαράσταση και την υποστήριξη τους, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Η παρουσία τους ήταν σημαντική και απαραίτητη στην επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract .....	vii
Ευχαριστίες .....	viii
Περιεχόμενα .....	ix
Κατάλογος Σχημάτων .....	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συνομογραφίες.....	xv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή .....	1
1.1 Αντικείμενο Εργασίας.....	1
1.2 Σκοπός και Στόχοι.....	2
1.3 Διαμόρφωση Κειμένου.....	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Ιστορική αναδρομή.....	4
2.3 Κατηγορίες PCB.....	6
2.3.1 Μονής Όψης (Single-Sided PCB) .....	7
2.3.2 Διπλής Όψης (Double-Sided PCB) .....	9
2.3.3 Πολλαπλών Όψεων (Multi-Layer PCB).....	11
2.4 Μέρη ενός PCB .....	12
2.4.1 Αγωγή επιφάνεια (Pad).....	12
2.4.2 Αγωγιμες διαδρομές (Traces).....	12
2.4.3 Στρώμα Μεταξοτυπίας (Silk Layer).....	13
2.4.4 Επάνω και Κάτω Στρώμα (Top and Bottom Layer).....	13
2.4.5 Μονωτικό Στρώμα (Solder Mask).....	13
2.5 Υλικά και Εσωτερική Δομή Πλακετών PCB .....	14
2.6 Τεχνικές κατασκευής PCB .....	16
2.6.1 Φωτολιθογραφία.....	16
2.6.2 Τεχνολογία Άμεσης Απεικόνισης με Laser (Laser Direct Imaging – LDI).....	19
2.6.3 Τεχνική PCB Milling και DMD .....	20
2.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διαχείριση αποβλήτων PCB .....	21
2.8 Επίλογος.....	23

Κεφάλαιο 3ο:	Κατασκευή Θαλάμου Φωτοευαίσθητων Πλακετών .....	24
3.1	Εισαγωγή.....	24
3.2	Βήματα που Ακολουθήθηκαν για την Κατασκευή.....	24
3.3	Εξαρτήματα Σύνδεσης.....	25
3.4	Προγραμματισμός και Διάγραμμα Ροής .....	26
3.5	Ανάλυση Λειτουργίας και Επιλογή Όλων των Εξαρτημάτων .....	28
3.5.1	Arduino Uno R3 .....	28
3.5.2	LCD 16 x 2 .....	29
3.5.3	Πρωτόκολλο I2C .....	30
3.5.4	Keypad 4 x 4.....	30
3.5.5	Ποτενσιόμετρο.....	31
3.5.6	MOSFET IRF520 .....	31
3.5.7	Buzzer.....	32
3.5.8	Κύκλωμα με Κόκκινο LED .....	33
3.5.9	Τροφοδοτικό.....	34
3.5.10	Διακόπτης ON/OFF.....	34
3.5.11	Πηγή Υπεριώδης Ακτινοβολίας .....	35
3.6	Ακριβής Συνδεσμολογία Όλων των Εξαρτημάτων και Τελική Λειτουργία Θαλάμου .....	36
3.7	Επίλογος.....	39
Κεφάλαιο 4ο:	Πειραματική Διαδικασία και Αρχικά Πειράματα .....	41
4.1	Εισαγωγή.....	41
4.2	Υλικά και Εξοπλισμός.....	41
4.3	Μεθοδολογία .....	42
4.4	Περιγραφή Πειραμάτων .....	45
4.4.1	Κύκλωμα με Arduino .....	45
4.4.2	Κύκλωμα LED.....	47
4.4.3	Πλακέτα με απλές γραμμές .....	48
4.4.4	Πλακέτα με κυκλικές συνδέσεις.....	48
4.4.5	Πλακέτα με γραμμές και κυκλικές συνδέσεις .....	49
4.4.6	Κύκλωμα με ολοκληρωμένο 555.....	50
4.5	Επίλογος.....	51
Κεφάλαιο 5ο:	Βελτιστοποίηση και Ανάλυση Συνθηκών.....	52
5.1	Εισαγωγή.....	52
5.2	Ανάλυση Παραμέτρων Έκθεσης στον Θάλαμο .....	52
5.3	Ανάλυση Χημικής Διαδικασίας .....	55

5.4	Ανάλυση Ποιότητας και Βέλτιστες Συνθήκες.....	59
5.5	Επίλογος.....	60
Κεφάλαιο 6ο:	Τελικά Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης .....	62
6.1	Συμπεράσματα.....	62
6.2	Προτάσεις Βελτίωσης .....	62
6.3	Κόστος Κατασκευής.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO.....		67

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Εξέλιξη πλακετών PCB .....	5
Σχήμα 2.2: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης PCB .....	6
Σχήμα 2.3: Πλακέτα μονής όψης .....	8
Σχήμα 2.4: Διαφορές SMD και Through - hole .....	9
Σχήμα 2.5: PCB διπλής όψης χωρίς επιμεταλλωμένες οπές και με επιμεταλλωμένες οπές .....	10
Σχήμα 2.6: Συνδεση μέσω jumper wire σε πλακέτα διπλής όψης χωρίς επιμετάλλωση .....	10
Σχήμα 2.7: Δομή πολυστρωματικών PCB .....	11
Σχήμα 2.8: Μέρη πλακέτας PCB .....	14
Σχήμα 2.9: Σρώσεις εσωτερικής δομής PCB .....	15
Σχήμα 2.10: Βήματα φωτολιθογραφίας PCB.....	19
Σχήμα 2.11: Ακτίνες κεφαλής έκθεσης.....	21
Σχήμα 2.12: Όγκος των ηλεκτρονικών αποβλήτων σε διάφορες περιοχές του κόσμου .....	22
Σχήμα 3.1: Ταινία LED πάνω στο κόντρα πλακέ .....	24
Σχήμα 3.2: Ξύλινος σκελετός θαλάμου .....	25
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής .....	27
Σχήμα 3.4: Arduino Uno R3 .....	29
Σχήμα 3.5: Οθόνη LCD 16 x 2.....	30
Σχήμα 3.6: Πλακέτα που βασίζεται το πρωτόκλλο I2C .....	30
Σχήμα 3.7: Πληκτρολόγιο 4 x 4 .....	31
Σχήμα 3.8: Ποτενσιόμετρο.....	31
Σχήμα 3.9: Συνδεσμολογία MOSFET με Arduino .....	32
Σχήμα 3.10: Buzzer .....	33
Σχήμα 3.11: Κύκλωμα κόκκινου LED .....	34
Σχήμα 3.12: Τροφοδοτικό .....	34
Σχήμα 3.13: Διακόπτης .....	35
Σχήμα 3.13: Ρεαλιστικό κύκλωμα του εσωτερικού του θαλάμου .....	38
Σχήμα 3.14: Τελική μορφή Θαλάμου .....	39
Σχήμα 4.1: Κύκλωμα στο σχηματικό του προγράμματος KiCad .....	42
Σχήμα 4.2: Σχεδίαση PCB στο πρόγραμμα KiCad .....	43
Σχήμα 4.3: Κύκλωμα πάνω σε διαφανές φύλλο A4.....	43
Σχήμα 4.4: Εμφάνιση κυκλώματος πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα .....	44
Σχήμα 4.5: Διαδικασία αποχάλκωσης μέσα στο χημικό διάλυμα.....	45
Σχήμα 4.6: Φωτοευαίσθητη πλακέτα μετά από την αποχάλκωση .....	45
Σχήμα 4.7: Κυκλωμα Arduino πριν και μετά από την αποχάλκωση.....	46
Σχήμα 4.8: Κυκλωμα LED πριν και μετά από την αποχάλκωση .....	47
Σχήμα 4.9: Κυκλωμα με απλές γραμμές πριν και μετά από την αποχάλκωση .....	48
Σχήμα 4.10: Κυκλωμα με κυκλικές συνδέσεις πριν και μετά από την αποχάλκωση.....	49
Σχήμα 4.11: Κυκλωμα με γραμμές και κυκλικές συνδέσεις πριν και μετά από την αποχάλκωση .....	50
Σχήμα 5.1: Διαφορές στις φωτοευαίσθητες πλακέτες ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης .....	54
Σχήμα 5.2: Μεγάλος χρόνος έκθεσης στα UV LED .....	54
Σχήμα 5.3: Εμφάνιση πλακέτας μετά από το διάλυμα της καυστικής σόδας .....	55
Σχήμα 5.4: Διαφορά στην εμφάνιση ανάλογα με την ποσότητα της καυστικής σόδας .....	55
Σχήμα 5.5: Μεγάλος χρόνος αποχάλκωσης .....	58
Σχήμα 5.6: Κύκλωμα με θετική και αρνητική μάσκα .....	59

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Διαφορές μεταξύ UV LED και λάμπες φθορισμού UV .....	35
Πίνακας 3.2: Διαφορές ανάμεσα στα LED 3528 και LED 5050 .....	36
Πίνακας 5.1: Θετικά αποτελέσματα πειραμάτων ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης .....	52
Πίνακας 5.2: Θετικά αποτελέσματα ανάλογα με την ένταση του φωτός .....	53
Πίνακας 5.3: Ελάχιστη διάρκεια μέσα στον θάλαμο ανάλογα με την ένταση του φωτός .....	55
Πίνακας 5.4: Χρόνος εμφάνισης ανάλογα με τα γραμμάρια της καυστικής σόδας .....	56
Πίνακας 5.5: Χρόνος εμφάνισης της φωτοευαίσθητης πλακέτας .....	56
Πίνακας 5.6: Αποτελεσματική αναλογία διαλύματος αποχάλκωσης .....	57
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα πειραμάτων με διαφορετικές συνθήκες .....	58
Πίνακας 5.8: Ιδανικές συνθήκες πειράματος .....	60
Πίνακας 6.1: Κόστος κατασκευής .....	63



## Σύντομογραφίες

PCB	Printed Circuit Board
LDI	Laser Direct Imaging
DMD	Digital Micromirror Device
SMD	Surface Mount Devices
PTH	Plated Through Hole
VLSI	Very-Large-Scale Integration
DIL	Dual In Line
IC	Integrated Circuit
DC	Direct Current
SMOBC	Solder Mask Over Bare Copper
FR4	Flame Retardant 4
CEM-1	Composite Epoxy Material-1
CEM-4	Composite Epoxy Material-4
HDI	High Density Interconnect
LSO	Large Scan Optics
WPCB	Waste Printed Circuit Board
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
LED	Light-Emitting Diode
OSB	Oriented Strand Board.
LCD	Liquid Crystal Display
PWM	Pulse Width Modulation
IDE	Integrated Development Environment
GND	Ground
VCC	Voltage at the Common Collector
SDA	Serial Data
SCL	Serial Clock
UV	Ultraviolet
RGB	Red, Green, and Blue
SIG	Signal
PDF	Portable Document Format

I/O	Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
γρ	γραμμάτια

# Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη, σχεδίαση, κατασκευή και αξιολόγηση ενός θαλάμου αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCBs) μέσω φωτολιθογραφικής διαδικασίας. Η φωτολιθογραφία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνικές στη σύγχρονη ηλεκτρονική, καθώς επιτρέπει την ακριβή μεταφορά ηλεκτρονικών κυκλωμάτων πάνω σε φωτοευαίσθητες επιφάνειες με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας και χημικών διεργασιών.

Αρχικό στάδιο της εργασίας αποτέλεσε η θεωρητική μελέτη της λειτουργίας ενός φωτοευαίσθητου θαλάμου, με στόχο την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας του, των απαιτήσεων φωτισμού και των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα της αποτύπωσης των κυκλωμάτων. Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τις μεθόδους φωτολιθογραφίας, τις ιδιότητες των φωτοευαίσθητων πλακετών, τα διάφορα είδη PCB και τις ιδιότητές τους, τη χρήση UV φωτισμού, καθώς και τις χημικές διαδικασίες εμφάνισης και αποχάλκωσης. Τέλος, γίνεται μικρή αναφορά στις οικολογικές συνέπειες των αποβλήτων των PCB. Μέσα από τη μελέτη αυτή καθορίστηκαν οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές της κατασκευής.

Η κατασκευή του θαλάμου βασίστηκε στη χρήση UV LED ως πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας, τα οποία τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό ξύλινης κατασκευής με κατάλληλη διάταξη, ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή φωτός στην επιφάνεια της φωτοευαίσθητης πλακέτας. Η επιλογή των UV LED πραγματοποιήθηκε λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, της μεγάλης διάρκειας ζωής, του μικρού μεγέθους και της δυνατότητας ακριβούς ελέγχου της φωτεινής έντασης.

Για την καλύτερη διαχείριση και αυτοματοποίηση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε μικροελεγκτής Arduino Uno R3, μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε ο προγραμματισμός της λειτουργίας του θαλάμου. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε σύστημα ρύθμισης του χρόνου έκθεσης της πλακέτας στην UV ακτινοβολία, καθώς και έλεγχος της φωτεινότητας των LED. Για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα ενσωματώθηκαν οθόνη LCD για την εμφάνιση πληροφοριών λειτουργίας, πληκτρολόγιο για την εισαγωγή χρόνου και εντολών, καθώς και ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της έντασης φωτισμού. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ένας λειτουργικός θάλαμος αποτύπωσης, κατάλληλος για πειραματική και εκπαιδευτική χρήση.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής ακολούθησε η πειραματική αξιολόγηση του θαλάμου, με σκοπό τον έλεγχο της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας του. Για την υλοποίηση των πειραμάτων σχεδιάστηκαν ηλεκτρονικά κυκλώματα μέσω του λογισμικού KiCad, τα οποία εκτυπώθηκαν σε διαφανή φύλλα και χρησιμοποιήθηκαν ως μάσκες έκθεσης πάνω στις φωτοευαίσθητες πλακέτες. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η έκθεση των πλακετών στην υπεριώδη ακτινοβολία μέσα στον θάλαμο και ακολούθησαν οι απαραίτητες χημικές διαδικασίες εμφάνισης και αποχάλκωσης, με χρήση διαλυμάτων καυστικής σόδας, υδροχλωρικού οξέος και υπεροξειδίου του υδρογόνου.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές δοκιμές με διαφορετικούς χρόνους έκθεσης, ποσοστά έντασης φωτισμού και αναλογίες χημικών διαλυμάτων, με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Μέσα από τη σύγκριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων προσδιορίστηκαν οι καταλληλότερες συνθήκες λειτουργίας, ώστε να επιτυγχάνεται καθαρή αποτύπωση, σωστή αποχάλκωση και αξιόπιστη δημιουργία αγωγίμων διαδρομών. Παράλληλα,

εξετάστηκαν πιθανά προβλήματα και αστοχίες που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς και οι αιτίες που τα προκάλεσαν, συμβάλλοντας έτσι στη συνολική αξιολόγηση και βελτίωση της κατασκευής.

### 1.2 Σκοπός και Στόχοι

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η υλοποίηση ενός λειτουργικού και αποτελεσματικού θαλάμου αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών, ικανού να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων μέσω της διαδικασίας της φωτολιθογραφίας. Η εργασία επικεντρώθηκε τόσο στη σωστή λειτουργία της κατασκευής όσο και στη διερεύνηση των συνθηκών που απαιτούνται ώστε η διαδικασία αποτύπωσης να πραγματοποιείται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία.

Αρχικός στόχος της εργασίας αποτέλεσε η επιβεβαίωση της λειτουργικότητας του θαλάμου, δηλαδή η δυνατότητά του να αποτυπώνει επιτυχώς ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα πάνω σε φωτοευαίσθητη πλακέτα μέσω της έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πολλαπλά πειράματα με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, ώστε να διαπιστωθεί εάν η κατασκευή μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά τη διαδικασία φωτολιθογραφίας. Μέσα από την πειραματική διαδικασία επιβεβαιώθηκε ότι ο θάλαμος μπορούσε να πραγματοποιήσει επιτυχημένη αποτύπωση κυκλωμάτων πάνω σε φωτοευαίσθητες επιφάνειες.

Στη συνέχεια, βασικός στόχος της εργασίας ήταν η δημιουργία μίας πλήρως λειτουργικής πλακέτας PCB η οποία θα είχε κατασκευαστεί αποκλειστικά μέσω του ίδιου του θαλάμου. Για την επίτευξη του στόχου αυτού σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μία πλακέτα με ένα μικρό κύκλωμα LED, το οποίο τοποθετήθηκε και λειτούργησε μέσα στον ίδιο τον θάλαμο. Η επιτυχής λειτουργία της συγκεκριμένης πλακέτας αποτέλεσε ουσιαστική επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας της κατασκευής, καθώς αποδείχθηκε ότι ο θάλαμος ήταν ικανός να δημιουργήσει λειτουργικά τυπωμένα κυκλώματα με τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας.

Συνολικά, η επιτυχής σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία του φωτοευαίσθητου θαλάμου, καθώς και η δημιουργία λειτουργικών πλακετών PCB μέσω αυτού, οδήγησαν στην ολοκλήρωση μιας επιτυχημένης διπλωματικής εργασίας, η οποία συνδυάζει θεωρητική μελέτη, πρακτική υλοποίηση και πειραματική αξιολόγηση στον τομέα της φωτολιθογραφίας και των ηλεκτρονικών κατασκευών.

### 1.3 Διαμόρφωση Κειμένου

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι βασικά κεφάλαια, στα οποία παρουσιάζονται η θεωρητική μελέτη, η σχεδίαση και κατασκευή του θαλάμου φωτοευαίσθητων πλακετών, η πειραματική διαδικασία, καθώς και η ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, περιλαμβάνονται πρόλογος, περίληψη, abstract, ευχαριστίες, κατάλογος σχημάτων και πινάκων, συντομογραφίες, βιβλιογραφία και παράρτημα με τον κώδικα του Arduino.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, όπου αναλύονται το αντικείμενο, ο σκοπός και οι στόχοι της, καθώς και η συνολική δομή του κειμένου. Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τα τυπωμένα κυκλώματα (PCB), τις κατηγορίες και τα βασικά μέρη τους, τα υλικά κατασκευής και τις σημαντικότερες τεχνικές κατασκευής, με έμφαση στη φωτολιθογραφία. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής του θαλάμου φωτοευαίσθητων πλακετών, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν, η λειτουργία τους, η συνδεσμολογία και ο προγραμματισμός του συστήματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διαδικασία και παρουσιάζονται τα αρχικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν

για την αξιολόγηση της λειτουργίας του θαλάμου και της ποιότητας αποτύπωσης των κυκλωμάτων. Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση και βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας, εξετάζοντας την επίδραση του χρόνου έκθεσης, της έντασης φωτισμού και των χημικών διαδικασιών στο τελικό αποτέλεσμα της φωτολιθογραφίας. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις της κατασκευής και της συνολικής διαδικασίας. Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η βιβλιογραφία καθώς και παράρτημα με τον κώδικα Arduino που χρησιμοποιήθηκε για τη λειτουργία του θαλάμου.

## Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB), οι οποίες αποτελούν βασικό στοιχείο των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων. Αρχικά γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των PCB, από τις πρώτες τεχνολογικές προσεγγίσεις έως τη σημερινή τους μορφή, αναδεικνύοντας τη συμβολή σημαντικών ερευνητών και τεχνικών εξελίξεων στη διαμόρφωση της σύγχρονης τεχνολογίας τους.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι βασικές κατηγορίες PCB, όπως οι πλακέτες μονής όψης, διπλής όψης και πολλαπλών στρώσεων, καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν κάθε τύπο ως προς τη δομή, τη χρήση και τις δυνατότητές του. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα βασικά μέρη μιας πλακέτας, όπως τα pads, οι αγωγίμες διαδρομές, το solder mask και το silk layer, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις τεχνικές κατασκευής PCB, με βασικότερη τη φωτολιθογραφία, καθώς και σε σύγχρονες μεθόδους όπως η Άμεση Απεικόνιση με Laser (LDI), η μηχανική κατεργασία PCB και η τεχνολογία DMD. Τέλος, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή και απόρριψη των PCB, καθώς και η σημασία της ανακύκλωσης και της ορθής διαχείρισης των ηλεκτρονικών αποβλήτων. Με τον τρόπο αυτό, το κεφάλαιο θέτει τη θεωρητική βάση για την κατανόηση της μελέτης και κατασκευής του θαλάμου αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών.

### 2.2 Ιστορική αναδρομή

Η αρχική ιδέα για τη δημιουργία των τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB) δημιουργήθηκε αρκετές δεκαετίες πριν από την ευρεία εμπορική τους χρήση. Σύμφωνα με διάφορες ιστορικές αναφορές, η ανάπτυξη των PCB συνδέεται κυρίως με τον Αυστριακό μηχανικό Paul Eisler, ο οποίος το 1936 κατασκεύασε το πρώτο PCB για χρήση σε ραδιοφωνική συσκευή. Παρ' όλα αυτά, προγενέστερες πατέντες και τεχνολογικές προσεγγίσεις συνέβαλαν σημαντικά στη διαμόρφωση της σύγχρονης τεχνολογίας PCB.

Μία από τις πρώτες σχετικές αναφορές εντοπίζεται το 1888, όταν ο Baynes δημοσίευσε πατέντα που αφορούσε κυρίως τον χώρο της τέχνης. Σε αυτήν περιγραφόταν μια μέθοδος χάραξης σχεδίων πάνω σε πάνελ με χρήση τεχνικών παρόμοιων με εκείνες της φωτογραφίας. Αργότερα, το 1904, ο Frank Sprague διατύπωσε την ιδέα της κατάργησης της καλωδίωσης σημείο προς σημείο (point-to-point wiring). Με τη συμβολή του μέντορά του, Thomas Edison, εξετάστηκε η δυνατότητα εναπόθεσης αργύρου πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα ως μέθοδος δημιουργίας αγωγίμων διαδρομών.

Στη συνέχεια ακολούθησαν αρκετές σημαντικές πατέντες. Το 1925, ο Charles Ducas πρότεινε την απευθείας εναπόθεση αγωγίμων μεταλλικών διαδρομών πάνω σε μονωτικό υλικό, με στόχο την απλοποίηση της κατασκευής ηλεκτρικών συσκευών. Για τον σχηματισμό των αγωγών χρησιμοποίησε stencil και αγωγή πάστα, δημιουργώντας έτσι μια από τις πρώτες μορφές τυπωμένων κυκλωμάτων. Λίγες ημέρες αργότερα, ο Francis T. Harmann κατέθεσε πατέντα για την αφαιρετική μέθοδο (subtractive method) κατασκευής PCB, η οποία αποτέλεσε τη βάση της τεχνολογίας χημικής χάραξης. Το 1928, ο Samuel Charles Ryder κατέθεσε πατέντα σχετική με την κατασκευή πηνίων επαγωγής για ραδιοφωνικές εφαρμογές, χρησιμοποιώντας τεχνικές εκτύπωσης αγωγίμων υλικών.

Η σημαντικότερη συμβολή στη σύγχρονη τεχνολογία PCB αποδίδεται στον Paul Eisler, ο οποίος εισήγαγε τη χρήση μονωτικών φύλλων επικαλυμμένων με χαλκό (copper clad laminates) ως βασικό υλικό κατασκευής κυκλωμάτων. Σύμφωνα με τη μέθοδο του, ένα προστατευτικό υλικό (resist) με το επιθυμητό σχέδιο του κυκλώματος εκτυπωνόταν πάνω στην επιφάνεια του χαλκού, ενώ το ακάλυπτο μέταλλο αφαιρούνταν μέσω χημικής χάραξης. Επιπλέον, πρότεινε την ανάπτυξη αγωγίμων διαδρομών και στις δύο πλευρές του υποστρώματος, με διασύνδεση μέσω μεταλλικών οπών (eyelets). Η προσέγγιση αυτή έθεσε τις βάσεις για τη μαζική παραγωγή PCB, προσφέροντας παράλληλα μείωση βάρους και εξοικονόμηση χώρου, χαρακτηριστικά ιδιαίτερα σημαντικά για τις ηλεκτρονικές εφαρμογές της εποχής.

Κατά την περίοδο 1953–1955, η Motorola εισήγαγε τη διαδικασία επιμετάλλωσης με χαλκό για τη διασύνδεση των δύο πλευρών ενός PCB, μέθοδος που αποδείχθηκε ιδιαίτερα κατάλληλη για μαζική παραγωγή. Στη δεκαετία του 1960 αναπτύχθηκε η ηλεκτροχημική μέθοδος χωρίς εξωτερικό ρεύμα (electroless plating), ενώ το 1964 παρουσιάστηκε η πλήρως προσθετική διαδικασία (fully additive process), στην οποία το βασικό υπόστρωμα αρχικά δεν διαθέτει χαλκό και η επιμετάλλωση πραγματοποιείται μόνο στα επιθυμητά σημεία διασύνδεσης.

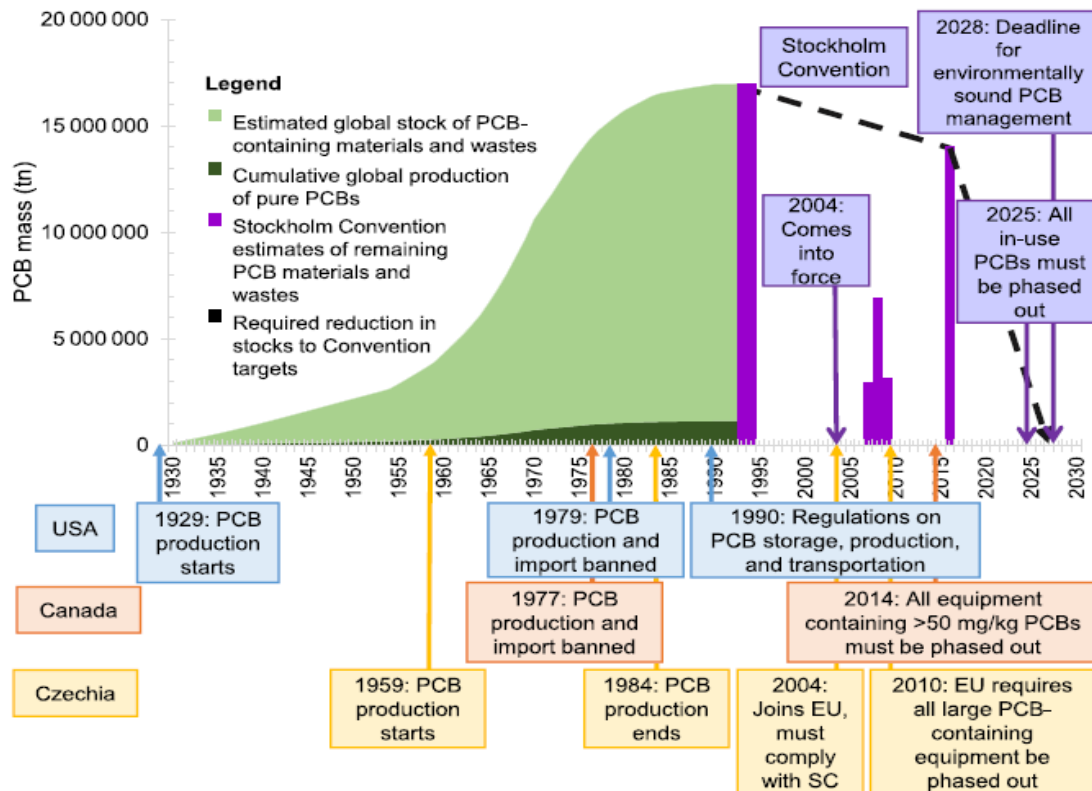
Η ραγδαία ανάπτυξη των καταναλωτικών ηλεκτρονικών στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και κατά τη δεκαετία του 1970 οδήγησε στην ευρεία καθιέρωση των PCB στις ηλεκτρονικές συσκευές. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν νέες τεχνικές όπως τα φωτοευαίσθητα φιλμ, τα dry-film και wet-film resist, το solder mask και οι τεχνικές εκτύπωσης σημάτων (legend printing). Η εξέλιξη των πολυστρωματικών PCB συνέβαλε σημαντικά στη μείωση του μεγέθους και στην αύξηση της πολυπλοκότητας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Σήμερα, η συνεχής αύξηση της λειτουργικότητας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και του αριθμού των ακροδεκτών (I/O pins) δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για PCB υψηλής πυκνότητας και ακρίβειας. Με την πάροδο των χρόνων, τα PCB εξελίχθηκαν σε μικρότερα, αποδοτικότερα, οικονομικότερα και πιο αξιόπιστα συστήματα, αποτελώντας πλέον βασικό στοιχείο της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας.

Από την πρώτη πατέντα μέχρι τη σημερινή μορφή των PCB μεσολάβησαν πολλά στάδια τεχνολογικής εξέλιξης. Κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας υπήρξαν αρκετές συζητήσεις σχετικά με το ποιος μπορεί να θεωρηθεί ο πραγματικός εφευρέτης των PCB. Ωστόσο, είναι σαφές ότι η ανάπτυξή τους δεν αποτέλεσε έργο ενός μόνο ανθρώπου, αλλά το αποτέλεσμα της συνδυασμένης συμβολής επιστημόνων και ερευνητών από διαφορετικά πεδία, όπως η χημεία, η μηχανική, τα ηλεκτρονικά, καθώς και οι τεχνολογίες εκτύπωσης και φωτοχάραξης [9],[11]. Στο Σχήμα 2.1 υπάρχει η τεχνολογική εξέλιξη των PCB ανά τα χρόνια. Επίσης στο Σχήμα 2.2 υπάρχει ένα χρονοδιάγραμμα το οποίο απεικονίζει τα πιο σημαντικά γεγονότα που αφορούν την εξέλιξη των PCB.



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη πλακετών PCB



Σχήμα 2.2: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης PCB

### 2.3 Κατηγορίες PCB

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα τρία βασικά είδη φωτοευαίσθητων πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB):

- πλακέτες μονής όψης (Single-Sided PCB),
- πλακέτες διπλής όψης (Double-Sided PCB),
- πολυστρωματικές πλακέτες (Multi-Layer Boards).

Τα τυπωμένα κυκλώματα μπορούν επίσης να ταξινομηθούν με βάση τα χαρακτηριστικά, τη χρήση και τις εφαρμογές τους. Παραδοσιακά, διακρίνονταν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- καταναλωτικά PCB (consumer),
- επαγγελματικά PCB (professional),
- PCB υψηλής αξιοπιστίας (high reliability).

Τα καταναλωτικά PCB χρησιμοποιούνταν κυρίως σε προϊόντα ευρείας κατανάλωσης, όπως ραδιόφωνα, τηλεοράσεις. Κατασκευάζονταν συνήθως από χαμηλότερου κόστους υλικά, με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής. Για τον λόγο αυτό, δεν δινόταν ιδιαίτερη έμφαση στις ηλεκτρικές ιδιότητες ή στη μακροχρόνια σταθερότητά τους. Αντίθετα, τα επαγγελματικά PCB κατασκευάζονταν από υλικά καλύτερης ποιότητας, ώστε να πληρούν αυστηρότερες ηλεκτρικές και περιβαλλοντικές προδιαγραφές. Τα PCB υψηλής αξιοπιστίας σχεδιάζονταν για εφαρμογές όπου απαιτούνταν υψηλή απόδοση και αξιοπιστία, με χρήση ποιοτικών υλικών και αυστηρά ελεγχόμενων διαδικασιών

κατασκευής. Στη σύγχρονη ηλεκτρονική βιομηχανία, η διάκριση μεταξύ καταναλωτικών και επαγγελματικών PCB έχει σε μεγάλο βαθμό περιοριστεί. Οι σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές που απευθύνονται στο ευρύ κοινό είναι πλέον ιδιαίτερα σύνθετες και απαιτητικές, γεγονός που επιβάλλει υψηλές προδιαγραφές σχεδίασης και κατασκευής ακόμη και σε προϊόντα καθημερινής χρήσης.

### 2.3.1 Μονής Όψης (Single-Sided PCB)

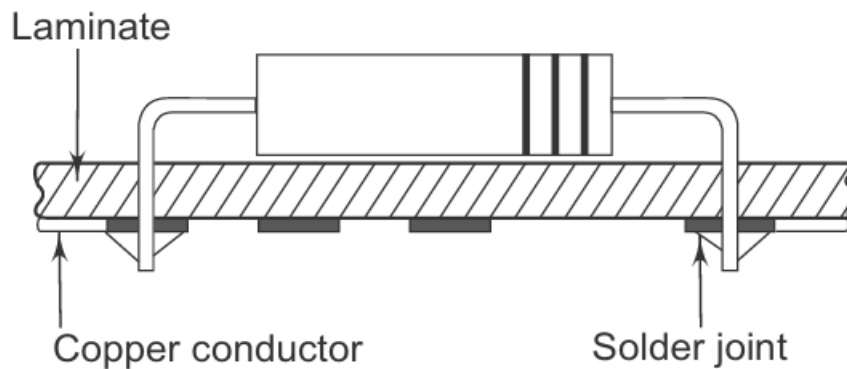
Ο όρος «μονής όψης» αναφέρεται σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων στις οποίες η αγωγή καλωδίωση βρίσκεται μόνο στη μία πλευρά του μονωτικού υποστρώματος. Η πλευρά όπου σχηματίζεται το κύκλωμα ονομάζεται «πλευρά συγκόλλησης» (solder side), ενώ η αντίθετη πλευρά, στην οποία τοποθετούνται τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ονομάζεται «πλευρά εξαρτημάτων» (component side) [11],[15],[19]. Οι πλακέτες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως σε απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα και σε εφαρμογές όπου απαιτείται χαμηλό κόστος κατασκευής. Παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας των PCB, οι πλακέτες μονής όψης εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο σε επαγγελματικές όσο και σε μη επαγγελματικές εφαρμογές, λόγω της απλότητας και της οικονομίας που προσφέρουν.

Κατά τον σχεδιασμό μιας πλακέτας μονής όψης, η τοποθέτηση των εξαρτημάτων αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο, ειδικά σε πιο σύνθετα κυκλώματα. Τα εξαρτήματα δεν είναι απαραίτητο να τοποθετούνται με αυστηρά ευθυγραμμισμένο ή συμμετρικό τρόπο. Αντίθετα, η διάταξή τους πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η συντομότερη και αποδοτικότερη δυνατή δρομολόγηση των αγωγικών διαδρομών. Ακόμη και μία λανθασμένη διαδρομή μπορεί να δυσκολέψει σημαντικά τη συνολική σχεδίαση της πλακέτας, περιορίζοντας τη δυνατότητα διέλευσης άλλων διαδρομών [12],[16].

Τα PCB μονής όψης κατασκευάζονται κυρίως με τη μέθοδο «print and etch» ή με την τεχνική «die-cut». Η τεχνική die-cut περιλαμβάνει το σχέδιο της καλωδίωσης και δημιουργείται είτε μέσω φωτοχάραξης είτε μέσω μηχανικής χάραξης. Σε πολλές περιπτώσεις, τα ίδια τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα χρησιμοποιούνται για τη γεφύρωση αγωγικών διαδρομών. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, χρησιμοποιούνται καλώδια γεφύρωσης (jumper wires) [11-12].

Ο σχεδιασμός πλακετών μονής όψης βασίζεται σε μια ισορροπία μεταξύ του μεγέθους της πλακέτας και του αριθμού των jumper wires που απαιτούνται. Σχεδόν κάθε πλακέτα μονής όψης χρειάζεται ορισμένες γεφυρώσεις, ωστόσο είναι σημαντικό ο αριθμός τους να διατηρείται όσο το δυνατόν μικρότερος, ώστε να εξασφαλίζεται καλύτερη λειτουργικότητα και ευκολότερη κατασκευή [16]. Παρόλα αυτά, για οικονομικούς και κατασκευαστικούς λόγους, ο αριθμός των jumper wires δεν μπορεί να αυξάνεται υπερβολικά, γεγονός που σε πιο πολύπλοκες εφαρμογές οδηγεί στη χρήση πλακετών

διπλής όψης [11-12]. Στο παρακάτω Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μία πλακέτα μονής όψης.

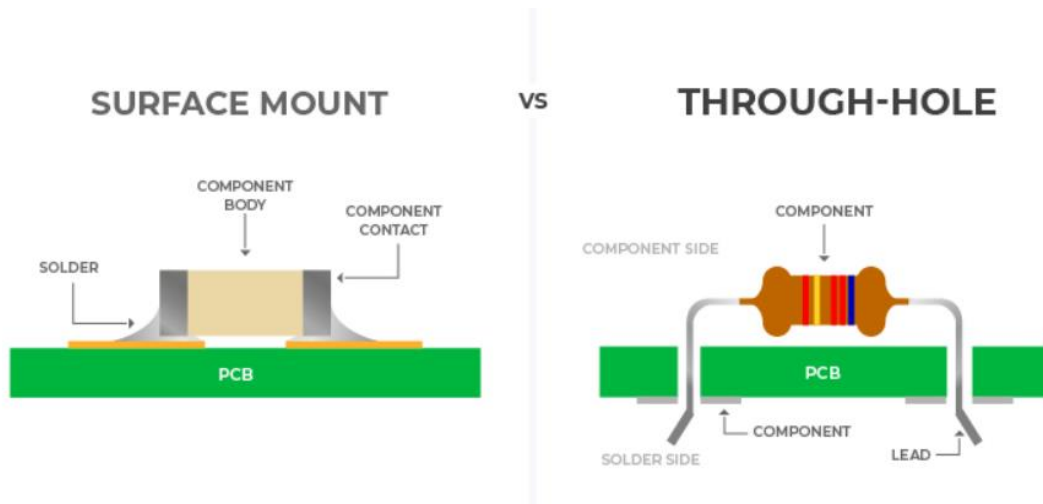


Σχήμα 2.3: Πλακέτα μονής όψης

Η τοποθέτηση εξαρτημάτων σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) πραγματοποιείται κυρίως με δύο μεθόδους: την τεχνολογία through-hole και την τεχνολογία επιφανειακής στήριξης (SMD). Η τεχνολογία through-hole προσφέρει ισχυρότερη μηχανική σύνδεση, καθώς οι ακροδέκτες των εξαρτημάτων διαπερνούν την πλακέτα, επιτρέποντας μεγαλύτερη αντοχή σε μηχανικές και περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές υψηλής αξιοπιστίας, όπως στρατιωτικά, αυτοκινητιστικά και αεροδιαστημικά συστήματα, αλλά και σε πρωτότυπα και δοκιμαστικές εφαρμογές όπου απαιτείται συχνή αντικατάσταση εξαρτημάτων.

Αντίθετα, τα εξαρτήματα επιφανειακής στήριξης (SMDs), παρότι είναι μικρότερα και πιο διαδεδομένα στη σύγχρονη ηλεκτρονική, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως δυσκολία στη χειροκίνητη συναρμολόγηση και μικρότερη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, υψηλές θερμοκρασίες και εφαρμογές υψηλής ισχύος.

Επιπλέον, τα through-hole εξαρτήματα, και ιδιαίτερα οι πυκνωτές, εμφανίζουν αυξημένη αντοχή σε κραδασμούς και θερμικές καταπονήσεις λόγω των συρμάτινων ακροδεκτών τους, οι οποίοι λειτουργούν ως μηχανισμός απορρόφησης κραδασμών. Για τον λόγο αυτό παραμένουν σημαντικά σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένη αξιοπιστία και μηχανική ανθεκτικότητα [28]. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η διαφορά ανάμεσα στην σύνδεση των εξαρτημάτων με SMD και με Through-hole πάνω στο PCB.



Σχήμα 2.4: Διαφορές SMD και Through – hole

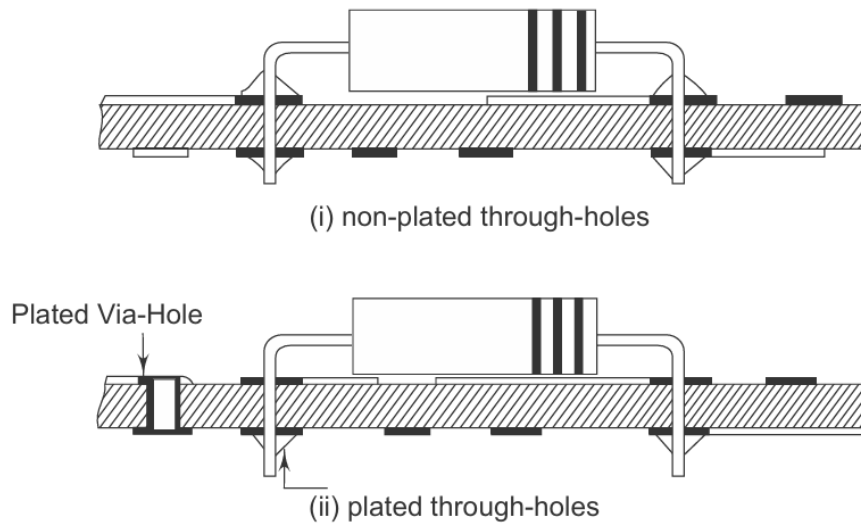
### 2.3.2 Διπλής Όψης (Double-Sided PCB)

Τα τυπωμένα κυκλώματα διπλής όψης διαθέτουν αγωγικές διαδρομές και στις δύο πλευρές του μονωτικού υποστρώματος, δηλαδή τόσο στην πλευρά των εξαρτημάτων όσο και στην πλευρά συγκόλλησης. Η χρήση και των δύο επιφανειών επιτρέπει μεγαλύτερη πυκνότητα εξαρτημάτων και αγωγικών γραμμών σε σύγκριση με τα PCB μονής όψης. Για τον λόγο αυτό, οι πλακέτες διπλής όψης χρησιμοποιούνται κυρίως σε πιο σύνθετα ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπου απαιτείται αυξημένος αριθμός διασυνδέσεων και καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου [11],[19].

Η σχεδίαση πλακετών διπλής όψης προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη δρομολόγηση των αγωγικών διαδρομών, καθώς το επιπλέον στρώμα επιτρέπει την ευκολότερη σύνδεση των εξαρτημάτων. Παρόλα αυτά, η σωστή τοποθέτηση των εξαρτημάτων εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία και κατασκευή της πλακέτας. Η υπερβολική χρήση πολύπλοκων διαδρομών μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδοτικό σχεδιασμό και σε αύξηση της δυσκολίας κατασκευής [11].

Η χειροκίνητη κατασκευή PCB διπλής όψης είναι αρκετά πιο απαιτητική σε σχέση με τα PCB μονής όψης. Ωστόσο, η ανάπτυξη εξειδικευμένων τεχνολογιών και η χρήση σύγχρονων μεθόδων παραγωγής επιτρέπουν την εύκολη κατασκευή τους από εξειδικευμένες εταιρείες παραγωγής PCB [15]. Συνήθως χρησιμοποιούνται δυο τύποι PCB διπλής όψης:

- i) PCB διπλής όψης χωρίς επιμεταλλωμένες οπές (non-PTH) Σχήμα 2.5
- ii) PCB διπλής όψης με επιμεταλλωμένες οπές (Plated Through Hole – PTH) Σχήμα 2.5

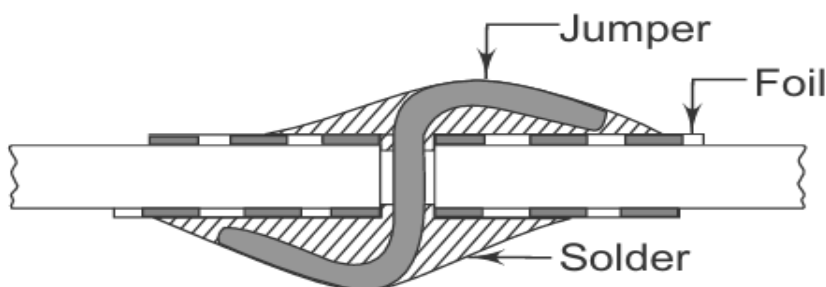


Σχήμα 2.5: PCB διπλής όψης χωρίς επιμεταλλωμένες οπές κα με επιμεταλλωμένες οπές

Τα PCB τύπου PTH διαθέτουν αγωγίμα κυκλώματα και στις δύο πλευρές του υποστρώματος, τα οποία συνδέονται μέσω επιμεταλλωμένων οπών. Η επιμετάλλωση πραγματοποιείται στα τοιχώματα των οπών που διαπερνούν την πλακέτα, επιτρέποντας έτσι την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των δύο πλευρών. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί σήμερα τη βασική μέθοδο κατασκευής των περισσότερων σύγχρονων PCB, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής πολυπλοκότητας και αυξημένης πυκνότητας κυκλωμάτων.

Αντίθετα, τα PCB διπλής όψης χωρίς επιμεταλλωμένες οπές αποτελούν μια πιο οικονομική λύση, καθώς δεν απαιτείται η διαδικασία επιμετάλλωσης. Στην περίπτωση αυτή, η σύνδεση μεταξύ των δύο πλευρών πραγματοποιείται με τη χρήση jumper wires ή άλλων αγωγίμων γεφυρώσεων. Κατά τον σχεδιασμό τέτοιων πλακετών, είναι σημαντικό να περιορίζεται ο αριθμός των σημείων συγκόλλησης στην πλευρά των εξαρτημάτων, ώστε να διευκολύνεται η συντήρηση και η αντικατάσταση εξαρτημάτων όταν αυτό απαιτείται. Για τον λόγο αυτό, συνιστάται οι περισσότερες αγωγίμες διαδρομές να τοποθετούνται στην πλευρά χωρίς εξαρτήματα και μόνο οι απολύτως απαραίτητες στην πλευρά των εξαρτημάτων [11].

Η τεχνική διασύνδεσης χωρίς επιμετάλλωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6, όπου η σύνδεση των δύο πλευρών πραγματοποιείται μέσω jumper wire. Συγκεκριμένα, ένα μονωμένο συμπαγές σύρμα διέρχεται μέσα από την οπή της πλακέτας, λυγίζεται κατάλληλα και συγκολλάται στα pads των αγωγών και στις δύο πλευρές της πλακέτας.



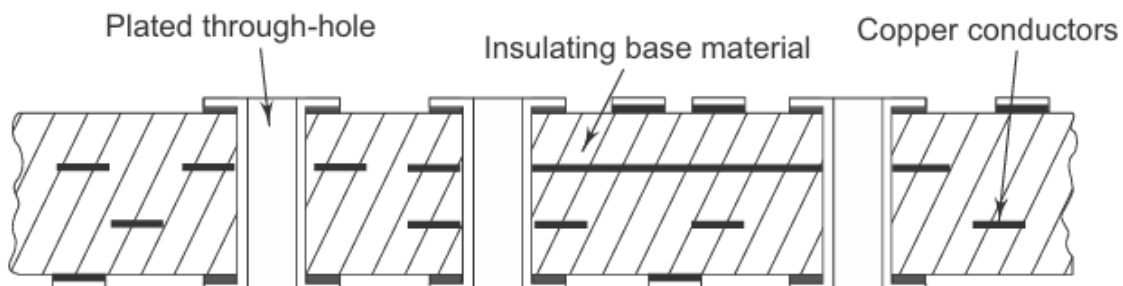
Σχήμα 2.6: Σύνδεση μέσω jumper wire σε πλακέτα διπλής όψης χωρίς επιμετάλλωση

### 2.3.3 Πολλαπλών Όψεων (Multi-Layer PCB)

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας επιμεταλλωμένων οπών διέλευσης (plated through-hole technology) συνέβαλε σημαντικά στη μείωση των διασταυρώσεων των αγωγίμων διαδρομών μεταξύ διαφορετικών επιπέδων κυκλωμάτων. Ως αποτέλεσμα, κατέστη δυνατή η καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου και η αύξηση της πυκνότητας τοποθέτησης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων πάνω στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων. Παρόλα αυτά, η συνεχής εξέλιξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (VLSI), καθώς και άλλων σύγχρονων ηλεκτρονικών διατάξεων με μεγάλο αριθμό ακροδεκτών, οδήγησε σε ακόμη μεγαλύτερη πυκνότητα συσκευασίας και σημαντική αύξηση των απαιτούμενων γραμμών διασύνδεσης [11],[14],[19]. Η αυξημένη αυτή πυκνότητα δημιούργησε νέα και πιο σύνθετα προβλήματα σχεδίασης, όπως:

- ηλεκτρικό θόρυβο (noise),
- παρεμβολές μεταξύ γραμμών σήματος (cross-talk),
- παρασιτικές χωρητικότητες (stray capacitances),
- ανεπιθύμητες πτώσεις τάσης λόγω γειτονικών ή παράλληλων αγωγίμων διαδρομών.

Τα προβλήματα αυτά δεν μπορούσαν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με τη χρήση PCB μονής ή διπλής όψης, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη των πολυστρωματικών πλακετών (multi-layer boards). Τα πολυστρωματικά PCB αποτελούνται από περισσότερα από δύο στρώματα αγωγίμων κυκλωμάτων, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται λεπτά μονωτικά στρώματα υλικού prepreg, δημιουργώντας μία σύνθετη δομή τύπου «sandwich», όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Δομή πολυστρωματικών PCB

Το εξωτερικό στρώμα ενός πολυστρωματικού PCB είναι παρόμοιο με εκείνο ενός συμβατικού PCB, με τη διαφορά ότι τα εξαρτήματα τοποθετούνται πολύ πιο κοντά μεταξύ τους, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλότερη πυκνότητα κυκλώματος και καλύτερη αξιοποίηση της επιφάνειας της πλακέτας. Η αυξημένη αυτή πυκνότητα απαιτεί τη χρήση επιπλέον εσωτερικών στρωμάτων για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ηλεκτρικών διασυνδέσεων.

Τα πολυστρωματικά PCB διαθέτουν συνήθως τρία ή περισσότερα στρώματα κυκλωμάτων, ενώ σε εξειδικευμένες εφαρμογές μπορούν να φτάσουν ακόμη και να ξεπεράσουν τα 60 στρώματα. Η χρήση πολλαπλών στρωμάτων αγωγών επιτρέπει σημαντική μείωση του όγκου και του βάρους των διασυνδέσεων σε σχέση με το μέγεθος και το πλήθος των εξαρτημάτων που συνδέονται. Επιπλέον, τα πολυστρωματικά PCB προσφέρουν βελτιωμένη ηλεκτρική απόδοση, καλύτερη οργάνωση των γραμμών σήματος και μεγαλύτερη αξιοπιστία σε απαιτητικές ηλεκτρονικές εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και υψηλής πυκνότητας. [11], [14].

## 2.4 Μέρη ενός PCB

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται τα βασικά δομικά στοιχεία μίας πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board – PCB). Ειδικότερα, εξετάζονται τα (pads), οι αγωγίμες διαδρομές (traces), το στρώμα μεταξοτυπίας (silk layer), τα επάνω και κάτω στρώματα της πλακέτας (top and bottom layer), καθώς και το προστατευτικό στρώμα (solder mask). Η κατανόηση της λειτουργίας και του ρόλου των συγκεκριμένων στοιχείων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο τη σχεδίαση όσο και την ηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά του PCB.

### 2.4.1 Αγωγή Επιφάνεια (Pad)

Το pad αποτελεί μία αγωγή επιφάνεια χαλκού πάνω στην οποία τοποθετούνται και συγκολλούνται οι ακροδέκτες των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Βασική λειτουργία του είναι η παροχή μηχανικής στήριξης στα εξαρτήματα, καθώς και η εξασφάλιση αξιόπιστης ηλεκτρικής σύνδεσης με τις αγωγίμες διαδρομές της πλακέτας [17].

Το μέγεθος, το σχήμα και οι διαστάσεις των pads εξαρτώνται όχι μόνο από τον τύπο του εξαρτήματος που χρησιμοποιείται, αλλά και από τη μέθοδο κατασκευής και συναρμολόγησης του PCB, καθώς και από διάφορους σχεδιαστικούς και τεχνολογικούς παράγοντες. Στην πράξη, ακολουθούνται συγκεκριμένες σχεδιαστικές πρακτικές για τα pads γενικής χρήσης. Για παράδειγμα, τα pads εξαρτημάτων με ακροδέκτες διέλευσης οπών, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και δίοδοι, κατασκευάζονται συνήθως σε κυκλικό σχήμα. Αντίθετα, για εξαρτήματα τύπου Dual In Line (DIL), όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs), προτιμάται η χρήση οβάλ pads, καθώς διευκολύνουν τη συγκόλληση και βελτιώνουν τη μηχανική σταθερότητα των συνδέσεων [16].

### 2.4.2 Αγωγή Διαδρομές (Traces)

Στα τυπωμένα κυκλώματα (PCB), η ηλεκτρική σύνδεση των εξαρτημάτων δεν πραγματοποιείται με τη χρήση συμβατικών καλωδίων, αλλά μέσω αγωγίμων διαδρομών από αγωγή υλικό, συνήθως χαλκό. Οι διαδρομές αυτές αποτελούν το μέσο ηλεκτρικής διασύνδεσης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ονομάζονται traces ή αγωγή διαδρομές [17].

Δεν υπάρχει ένα κοινώς αποδεκτό πρότυπο για τις διαστάσεις των αγωγίμων διαδρομών. Το πλάτος κάθε διαδρομής καθορίζεται κυρίως από τις ηλεκτρικές απαιτήσεις της σχεδίασης, τον διαθέσιμο χώρο δρομολόγησης, τις απαιτούμενες αποστάσεις μεταξύ των αγωγίμων στοιχείων, καθώς και από τις σχεδιαστικές επιλογές του κατασκευαστή. Κάθε PCB παρουσιάζει διαφορετικές ηλεκτρικές απαιτήσεις και, κατά συνέπεια, είναι συνηθισμένη η χρήση διαδρομών διαφορετικού πλάτους ακόμη και στην ίδια πλακέτα. Σε γενικές γραμμές, προτιμάται η χρήση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου πλάτους διαδρομών, καθώς οι ευρύτερες διαδρομές εμφανίζουν μικρότερη αντίσταση συνεχούς ρεύματος (DC resistance), χαμηλότερη επαγωγή και καλύτερη θερμική συμπεριφορά. Παράλληλα, διευκολύνουν τη διαδικασία χάραξης κατά την κατασκευή, καθώς και τον έλεγχο και την επιδιόρθωση της πλακέτας.

Για τον λόγο αυτό, συνιστάται η χρήση όσο το δυνατόν μεγαλύτερων διαστάσεων διαδρομών και αποστάσεων μεταξύ τους, εκτός εάν οι απαιτήσεις της εφαρμογής επιβάλλουν μικρότερες τιμές. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η διέλευση μιας διαδρομής ανάμεσα σε pads ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ή άλλων εξαρτημάτων, εφαρμόζεται συχνά η τεχνική “necking” ή “necking down”. Η τεχνική αυτή αναφέρεται στη μετάβαση μιας διαδρομής από μεγαλύτερο πλάτος σε μικρότερο και στη συνέχεια ξανά σε μεγαλύτερο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συνδυασμός χαμηλής αντίστασης στις κύριες διαδρομές και αυξημένης ευελιξίας δρομολόγησης σε περιορισμένους χώρους.

Στην πράξη, το πλάτος μιας αγωγίμης διαδρομής εξαρτάται από το ρεύμα που τη διαρρέει και από τη μέγιστη επιτρεπτή αύξηση θερμοκρασίας. Κάθε διαδρομή παρουσιάζει συγκεκριμένη ηλεκτρική αντίσταση και, συνεπώς, αναπτύσσει θερμότητα κατά τη διέλευση ρεύματος, παρόμοια με μία ηλεκτρική αντίσταση. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της διαδρομής, τόσο μικρότερη είναι η αντίστασή της και η παραγόμενη θερμότητα. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των διαδρομών διαδραματίζουν το πάχος του χαλκού της πλακέτας καθώς και το είδος της τελικής επικάλυψης συγκόλλησης [16]. Η μορφή μιας αγωγίμης διαδρομής (trace) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8.

### 2.4.3 Στρώμα Μεταξοτυπίας (Silk Layer)

Το silk layer χρησιμοποιείται για την εκτύπωση γραμμών, κειμένου ή οποιουδήποτε σχεδίου στην επιφάνεια του PCB. Συνήθως, για τη μεταξοτυπία χρησιμοποιείται εποξική μελάνη. Το silk layer μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο επάνω και/ή στο κάτω στρώμα του PCB, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη, και είναι γνωστό ως silk screen TOP και silk screen Bottom.

### 2.4.4 Επάνω και Κάτω Στρώμα (Top and Bottom Layer)

Στο επάνω στρώμα (top layer) του PCB τοποθετούνται όλα τα εξαρτήματα της πλακέτας. Συνήθως, το στρώμα αυτό έχει πράσινο χρώμα. Στο κάτω στρώμα (bottom layer) του PCB πραγματοποιείται η συγκόλληση των εξαρτημάτων μέσω των οπών και των ακροδεκτών τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το επάνω και/ή το κάτω στρώμα του PCB καλύπτεται με ένα πράσινο στρώμα, το οποίο είναι γνωστό ως solder mask.

### 2.4.5 Μονωτικό Στρώμα (Solder Mask)

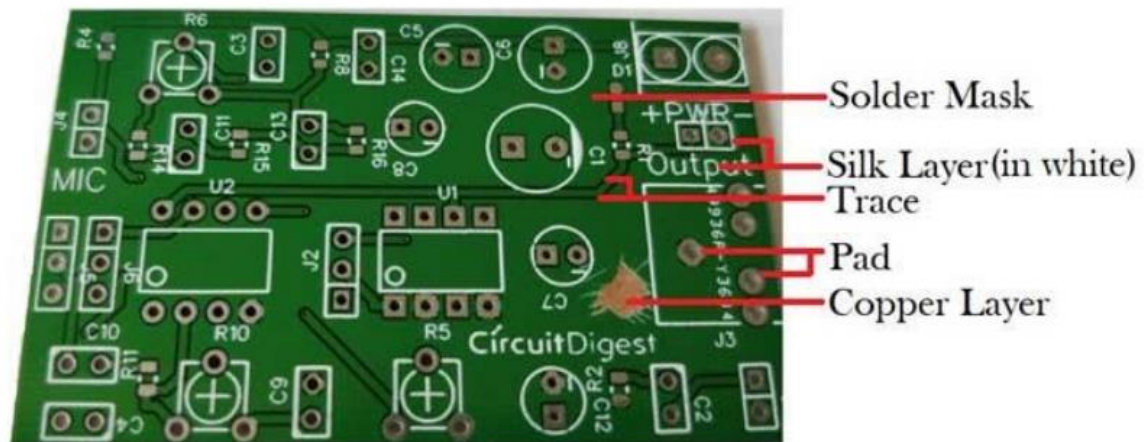
Το solder mask αποτελεί ένα επιπλέον μονωτικό στρώμα το οποίο εφαρμόζεται πάνω από τις αγωγίμες διαδρομές χαλκού της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Συνήθως έχει πράσινο χρώμα, αν και είναι δυνατό να κατασκευαστεί και σε άλλες χρωματικές αποχρώσεις, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής ή του κατασκευαστή. Η βασική λειτουργία του solder mask είναι η ηλεκτρική μόνωση και η προστασία των αγωγίμων τμημάτων της πλακέτας, αποτρέποντας την τυχαία επαφή των pads με άλλα αγωγίμα υλικά [17].

Το solder mask αποτελεί μία λεπτή πολυμερική επίστρωση, η οποία περιβάλλει τα pads και περιορίζει τη δημιουργία ανεπιθύμητων γεφυρώσεων συγκόλλησης μεταξύ γειτονικών ακροδεκτών κατά τη διαδικασία συγκόλλησης. Η χρήση του είναι ιδιαίτερα σημαντική σε κυκλώματα που περιλαμβάνουν εξαρτήματα επιφανειακής στήριξης (Surface Mount Devices – SMD), καθώς και εξαρτήματα μικρού βήματος ακροδεκτών (fine pitch devices), όπου οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγίμων στοιχείων είναι ιδιαίτερα μικρές. Το διάκενο που δημιουργείται μεταξύ του pad και του solder mask ονομάζεται “mask expansion” και αποτελεί σημαντική παράμετρο κατά τη διαδικασία σχεδίασης του PCB.

Τα solder masks διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες: τα solder masks μεταξοτυπίας (silkscreen) και τα φωτοαπεικονίσιμα solder masks (photo imageable). Τα φωτοαπεικονίσιμα solder masks παρουσιάζουν υψηλότερη ανάλυση και μεγαλύτερη ακρίβεια ευθυγράμμισης, γεγονός που τα καθιστά προτιμότερα στις σύγχρονες εφαρμογές PCB υψηλής πυκνότητας.

Στις περισσότερες πλακέτες συμβατικής ποιότητας, το solder mask εφαρμόζεται απευθείας πάνω στις γυμνές αγωγίμες διαδρομές χαλκού. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως Solder Mask Over Bare Copper (SMOBC) και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία κατασκευής PCB. Παρότι υπάρχουν και άλλοι τύποι προστατευτικών επικαλύψεων για τις αγωγίμες διαδρομές, αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε πιο

εξειδικευμένες και απαιτητικές εφαρμογές [16]. Στο Σχήμα 2.8 παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα μέρη μιας πλακέτας PCB.

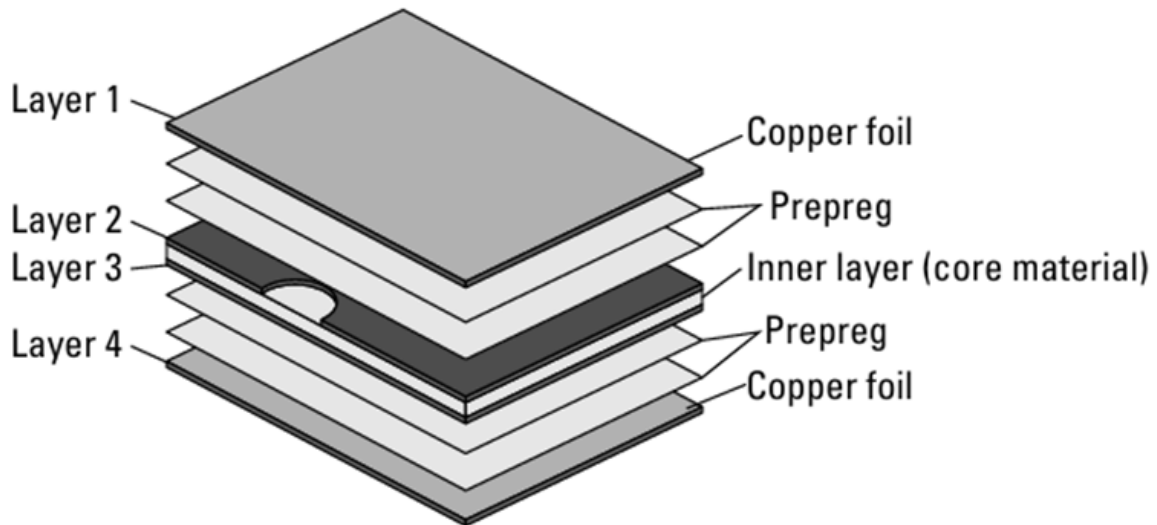


Σχήμα 2.8: Μέρη πλακέτας PCB

## 2.5 Υλικά και Εσωτερική Δομή Πλακετών PCB

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα στη σύγχρονη βιομηχανία κατασκευάζονται κυρίως με τη χρήση πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB). Οι πλακέτες αυτές αποτελούνται από διηλεκτρικό υπόστρωμα, το οποίο μπορεί να είναι άκαμπτο ή εύκαμπτο, και συνδυάζεται με αγωγικό υλικό, συνήθως χαλκό, για τη δημιουργία των ηλεκτρικών διασυνδέσεων. Αντί των συμβατικών καλωδίων, τα PCB χρησιμοποιούν αγωγικές διαδρομές χαλκού που συνδέουν μεταξύ τους τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και σχηματίζουν το τελικό κύκλωμα [17].

Η κατασκευή ενός βασικού PCB ξεκινά από υπόστρωμα υαλονήματος επικαλυμμένο με χαλκό (copper-clad fiberglass material) ή από λεπτά φύλλα χαλκού προσκολλημένα στη μία ή και στις δύο πλευρές της πλακέτας. Το βασικό υλικό (core material) αποτελείται συνήθως από άκαμπτο φύλλο υαλονήματος με εποξική ρητίνη, πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα φύλλα χαλκού. Για την κατασκευή πολυστρωματικών PCB χρησιμοποιούνται επιπλέον στρώματα prepreg, δηλαδή υφαντό γυαλί εμποτισμένο με μερικώς σκληρυμένη εποξική ρητίνη, τα οποία τοποθετούνται μεταξύ των στρωμάτων χαλκού και συμπιέζονται ώστε να σχηματίσουν ενιαία δομή. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή ενός PCB [19].



Σχήμα 2.9: Στρώσεις εσωτερικής δομής PCB

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή PCB πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές απαιτήσεις, όπως υψηλή αντίσταση μόνωσης, χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες, κατάλληλο συντελεστή θερμικής διαστολής και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, τα υλικά πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις πυραντοχής που καθορίζονται από το πρότυπο UL 94V-0 [20].

Το πιο διαδεδομένο υπόστρωμα στη βιομηχανία ηλεκτρονικών είναι το FR4, το οποίο αποτελείται από εποξική ρητίνη και υφαντό γυαλί με επιβραδυντικά φλόγας. Το FR4 παρουσιάζει υψηλή μηχανική αντοχή και πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών PCB. Άλλα συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά είναι τα FR-1 και FR-2, τα οποία βασίζονται σε χαρτί και φαινολικές ενώσεις και χρησιμοποιούνται κυρίως σε PCB μονής στρώσης. Επίσης, τα υλικά CEM-1 και CEM-3 αποτελούν εναλλακτικές λύσεις του FR4, με διαφορετικά χαρακτηριστικά μηχανικής αντοχής και κόστους. Για εύκαμπτα PCB χρησιμοποιείται κυρίως πολυϊμίδιο (Polyimide), το οποίο παρουσιάζει υψηλή ευκαμψία, καλή χημική αντοχή και δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών [17].

Η τοποθέτηση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα πραγματοποιείται μέσω διαδικασίας συναρμολόγησης, η οποία μπορεί να εκτελεστεί χειροκίνητα ή με αυτοματοποιημένο εξοπλισμό. Τα εξαρτήματα στερεώνονται στην πλακέτα με συγκολλήσεις (solder joints), ενώ οι αγωγίμες διαδρομές χαλκού εξασφαλίζουν την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους [19].

Στις σύγχρονες εφαρμογές PCB χρησιμοποιούνται επίσης τεχνολογίες ενσωματωμένων παθητικών στοιχείων, όπως οι ενσωματωμένες αντιστάσεις (embedded resistors). Για την κατασκευή τους εφαρμόζονται είτε αφαιρετικές (subtractive) είτε προσθετικές (additive) τεχνολογίες. Στις αφαιρετικές τεχνολογίες, ένα στρώμα υλικού αντίστασης καλύπτει αρχικά την επιφάνεια του PCB και στη συνέχεια αφαιρείται από τις περιοχές όπου δεν απαιτείται η δημιουργία αντίστασης. Η εναπόθεση του υλικού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τεχνικές όπως μεταξοτυπία, sputtering, inkjet printing ή ηλεκτροεπιμετάλλωση.

Μία από τις πιο γνωστές τεχνολογίες ενσωματωμένων αντιστάσεων είναι η Ohmega Ply, η οποία βασίζεται σε αφαιρετικές μεθόδους και χρησιμοποιεί λεπτό στρώμα φωσφιδίου του νικελίου (NiP) πάνω σε φύλλο χαλκού. Μέσω διαδικασιών φωτολιθογραφίας και χημικής χάραξης δημιουργούνται οι

αγώγιμες διαδρομές και τα στοιχεία αντίστασης πάνω στο PCB. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση παθητικών στοιχείων απευθείας στην πλακέτα, συμβάλλοντας στη μείωση του όγκου και στην αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων [18].

### 2.6 Τεχνικές κατασκευής PCB

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση των βασικών τεχνικών κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB). Ειδικότερα, εξετάζονται η τεχνική της φωτολιθογραφίας, η Τεχνολογία Άμεσης Απεικόνισης με Laser (Laser Direct Imaging – LDI), η τεχνική μηχανικής κατεργασίας PCB (PCB Milling) καθώς και η τεχνολογία Ψηφιακών Μικροκατόπτρων (Digital Micromirror Device – DMD). Μέσα από την ανάλυση των συγκεκριμένων μεθόδων παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας, τα βασικά χαρακτηριστικά, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τεχνικής κατασκευής PCB.

#### 2.6.1 Φωτολιθογραφία

Η τεχνική της φωτολιθογραφίας με υπεριώδη ακτινοβολία (UV photolithography) αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για τη μαζική παραγωγή τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB). Πριν από τη διαδικασία μαζικής παραγωγής, είναι απαραίτητη η κατασκευή πρωτοτύπων PCB, με σκοπό τον έλεγχο, την αξιολόγηση και την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Οι πλακέτες PCB κατασκευάζονται συνήθως από υπόστρωμα υαλοεποξικής ρητίνης (Glass Epoxy – FR4), το οποίο είναι επικαλυμμένο με λεπτό στρώμα χαλκού. Μέσω της διαδικασίας της φωτολιθογραφίας απομακρύνεται το ανεπιθύμητο τμήμα του χαλκού, σύμφωνα με τη σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των αγώγιμων διαδρομών και των απαραίτητων συνδέσεων του κυκλώματος.

Η φωτολιθογραφία αποτελεί διαδικασία μεταφοράς ενός συγκεκριμένου προτύπου επάνω σε υπόστρωμα με τη βοήθεια υπεριώδους ακτινοβολίας και χημικών ουσιών. Μέσω της διαδικασίας χάραξης του ίδιου του υποστρώματος, είναι δυνατή η δημιουργία γεωμετρικών σχημάτων και αγώγιμων διαδρομών υψηλής ακρίβειας σε επιφάνειες που διαθέτουν λεπτό στρώμα υλικού. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη χρήση φωτοευαίσθητου υλικού, γνωστού ως φωτοαντιστάτης (photoresist), το οποίο επικαλύπτει την επιφάνεια του υποστρώματος όπου πρόκειται να σχηματιστεί το επιθυμητό πρότυπο.

Στη συνέχεια, το επικαλυμμένο υπόστρωμα εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα ο φωτοαντιστάτης να μεταβάλλει τις ιδιότητές του ανάλογα με τον τύπο του. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αρνητικού φωτοαντιστάτη, οι εκτεθειμένες περιοχές σκληραίνουν, ενώ στην περίπτωση θετικού φωτοαντιστάτη αποδυναμώνονται και απομακρύνονται ευκολότερα κατά τη διαδικασία εμφάνισης. Για τη μεταφορά του σχεδίου χρησιμοποιείται φωτομάσκα, η οποία τοποθετείται επάνω στο υπόστρωμα και δημιουργεί διαφανείς και αδιαφανείς περιοχές, επιτρέποντας ή εμποδίζοντας αντίστοιχα τη διέλευση της UV ακτινοβολίας προς την επιφάνεια του φωτοαντιστάτη.

Η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV exposure) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια της φωτολιθογραφικής διαδικασίας, καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια και την ποιότητα της τελικής αποτύπωσης. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι έκθεσης του φωτοαντιστάτη σε UV ακτινοβολία, με την απλούστερη να βασίζεται στη χρήση μίας μάσκας και μίας πηγής εκπομπής UV φωτός. Η μάσκα αποτελείται συνήθως από λεπτό διαφανές φύλλο πλαστικού ή γυαλιού, επάνω στο οποίο έχει αποτυπωθεί το επιθυμητό σχέδιο του κυκλώματος. Το υπόστρωμα τοποθετείται επάνω ή πολύ κοντά στη μάσκα, επιτρέποντας την έκθεση μόνο συγκεκριμένων περιοχών στην υπεριώδη ακτινοβολία.

Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι σχετικά απλή και οικονομική, παρουσιάζει σημαντικά περιθώρια σφάλματος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ των αγωγίων γραμμών.

Μία πιο εξελιγμένη προσέγγιση αποτελεί η χρήση συστημάτων ευθυγράμμισης μάσκας (mask aligners), τα οποία επιτρέπουν την ακριβή στόχευση και ευθυγράμμιση των περιοχών που πρόκειται να εκτεθούν στην UV ακτινοβολία. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια και βελτιωμένη ποιότητα αποτύπωσης, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές μικροηλεκτρονικής και κατασκευής κυκλωμάτων υψηλής πυκνότητας. Ωστόσο, ο απαιτούμενος εξοπλισμός χαρακτηρίζεται από αυξημένο κόστος και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα λειτουργίας.

Μετά τη διαδικασία έκθεσης ακολουθεί η εμφάνιση (developing), η οποία αποτελεί χημική διαδικασία κατά την οποία απομακρύνεται το μη εκτεθειμένο φωτοευαίσθητο υλικό, αφήνοντας στην επιφάνεια το αποτυπωμένο πρότυπο της μάσκας. Η διαδικασία αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του φωτοαντιστάτη που χρησιμοποιείται, δηλαδή αν πρόκειται για αρνητικό ή θετικό photoresist .

Η ίδια μέθοδος φωτολιθογραφίας χρησιμοποιείται για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων υψηλής ακρίβειας, τα οποία διαθέτουν πολύ λεπτό στρώμα χαλκού επάνω σε υπόστρωμα FR4. Η τεχνική αυτή παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας προτύπων και γεωμετρικών σχημάτων με ελεγχόμενο τρόπο και μεγάλη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, η μέθοδος περιορίζεται κυρίως στη δημιουργία επίπεδων δομών και δεν είναι κατάλληλη για την κατασκευή πολύπλοκων τρισδιάστατων σχημάτων [25-27]. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα:

- Καθαρισμός Υποστρώματος PCB και Εφαρμογή Φωτοαντιστάτη

Το υπόστρωμα των πλακετών PCB αποτελείται από λεπτό στρώμα χαλκού, το οποίο λόγω της έκθεσής του στο περιβάλλον ενδέχεται να παρουσιάζει επιφανειακές ακαθαρσίες, υπολείμματα ή φαινόμενα οξείδωσης. Η παρουσία τέτοιων ατελειών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα πρόσφυσης του φωτοαντιστάτη στην επιφάνεια του χαλκού και, κατ' επέκταση, την ακρίβεια της φωτολιθογραφικής διαδικασίας. Για τον λόγο αυτό, πριν από την εφαρμογή του φωτοευαίσθητου υλικού απαιτείται σχολαστικός καθαρισμός της επιφάνειας με τη χρήση νερού και ακετόνης, ώστε να απομακρυνθούν οι ρύποι.

Μετά τον καθαρισμό εφαρμόζεται επάνω στο υπόστρωμα αρνητικό φωτοευαίσθητο φιλμ (negative photoresist). Για τη βελτίωση της πρόσφυσης μεταξύ φωτοαντιστάτη και επιφάνειας χαλκού, η πλακέτα πιέζεται επάνω σε θερμαινόμενη επιφάνεια θερμοκρασίας περίπου 50°C για χρονικό διάστημα ενός λεπτού. Στη διαδικασία είναι επίσης δυνατή η χρήση θετικού φωτοαντιστάτη (positive photoresist), σε συνδυασμό με αντίστοιχη θετική μάσκα του επιθυμητού προτύπου.

- Ευθυγράμμιση Μάσκας και Έκθεση σε UV Ακτινοβολία

Μετά την εφαρμογή του φωτοαντιστάτη, το υπόστρωμα είναι έτοιμο για έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Η φωτομάσκα που περιλαμβάνει το επιθυμητό σχέδιο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία διαφανών και αδιαφανών περιοχών, επιτρέποντας τον επιλεκτικό φωτισμό του φωτοαντιστάτη από την πηγή UV ακτινοβολίας. Η μάσκα τοποθετείται και ευθυγραμμίζεται με υψηλή ακρίβεια επάνω στην πλακέτα, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή μεταφορά του σχεδίου στο υπόστρωμα.

Στη συνέχεια, η πλακέτα εκτίθεται σε έντονη υπεριώδη ακτινοβολία. Τα τμήματα του φωτοαντιστάτη που εκτίθενται στην ακτινοβολία υφίστανται πολυμερισμό και σκληραίνουν, ενώ οι περιοχές που δεν

εκτίθενται παραμένουν μαλακές και διαλυτές. Οι μη εκτεθειμένες περιοχές απομακρύνονται κατά το επόμενο στάδιο με τη χρήση διαλύματος εμφάνισης (developer).

- Εμφάνιση (Developing)

Η διαδικασία εμφάνισης αποτελεί ένα από τα βασικά στάδια της φωτολιθογραφίας και πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικού διαλύματος εμφάνισης, το οποίο διαλύει αποτελεσματικά τα μη εκτεθειμένα τμήματα του φωτοαντιστάτη. Μέσω της διαδικασίας αυτής αποκαλύπτεται το τελικό πρότυπο του κυκλώματος στην επιφάνεια του χαλκού. Το διάλυμα εμφάνισης παρασκευάζεται συνήθως από ανθρακικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) και νερό, σε κατάλληλες αναλογίες ώστε να εξασφαλίζεται αποτελεσματική και ομοιόμορφη εμφάνιση του σχεδίου.

- Χάραξη (Etching)

Η χάραξη αποτελεί τη διαδικασία απομάκρυνσης των ανεπιθύμητων μεταλλικών περιοχών από την επιφάνεια της πλακέτας. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με ξηρή χάραξη (dry etching), όπως στην περίπτωση της χάραξης πλάσματος χωρίς χρήση χημικών ουσιών, είτε με υγρή χάραξη (wet etching), η οποία βασίζεται σε χημικές αντιδράσεις.

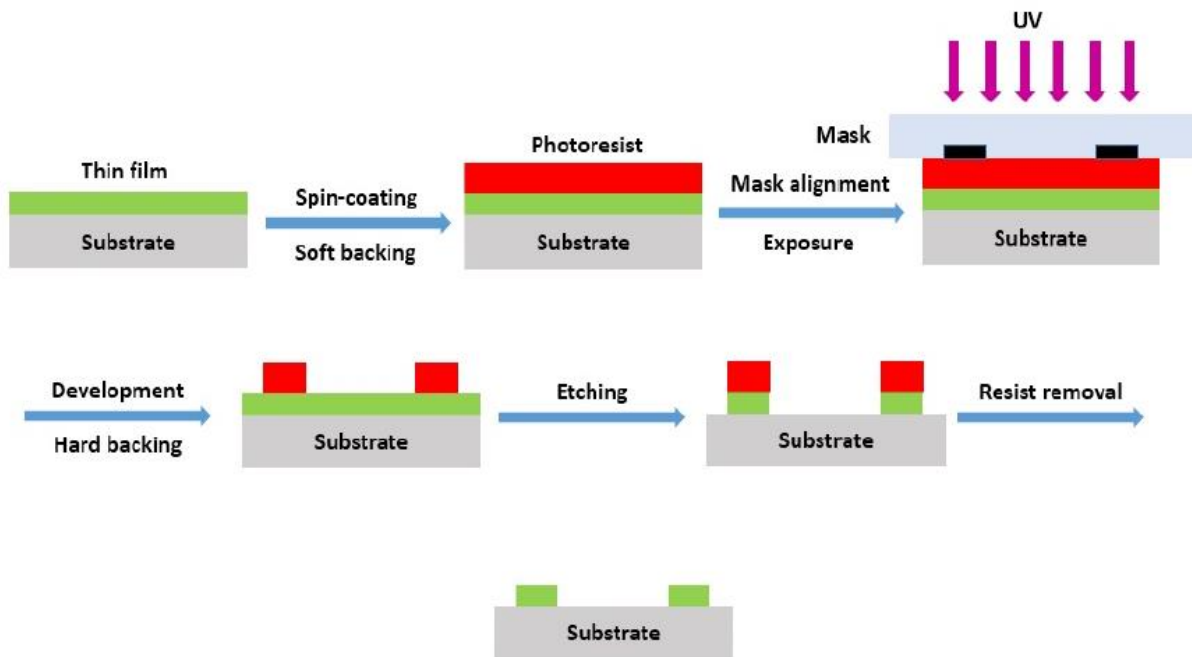
Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εμφάνισης, οι περιοχές του χαλκού που δεν προστατεύονται από τον φωτοαντιστάτη αφαιρούνται μέσω χημικής χάραξης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται συνήθως διάλυμα χλωριούχου σιδήρου ( $\text{FeCl}_3$ ), το οποίο διαβρώνει επιλεκτικά τον εκτεθειμένο χαλκό, αφήνοντας ανέπαφες τις προστατευμένες περιοχές του κυκλώματος.

- Απογύμνωση Φωτοαντιστάτη (Photoresist Stripping)

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χάραξης, ο φωτοαντιστάτης λειτουργεί ως προστατευτικό στρώμα για τις περιοχές του κυκλώματος που πρέπει να διατηρηθούν. Μετά την ολοκλήρωση της χάραξης, είναι απαραίτητη η απομάκρυνση του σκληρυμένου φωτοαντιστάτη, ώστε η πλακέτα να είναι έτοιμη για περαιτέρω επεξεργασία ή χρήση.

Η διαδικασία απογύμνωσης πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικού διαλύματος απογύμνωσης, το οποίο παρασκευάζεται συνήθως από υδροξείδιο του νατρίου ( $\text{NaOH}$ ) και νερό [26]. Το διάλυμα αυτό διαλύει αποτελεσματικά τον πολυμερισμένο φωτοαντιστάτη, αποκαλύπτοντας πλήρως τις αγώγιμες διαδρομές του τελικού κυκλώματος [25-27]. Στη διαδικασία κατασκευής και λειτουργίας του θαλάμου μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες χημικές μέθοδοι, με σκοπό την επίτευξη του επιθυμητού τελικού αποτελέσματος. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, κατά το στάδιο της χημικής επεξεργασίας και ειδικότερα της αποχάλκωσης του κυκλώματος, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά χημικά διαλύματα.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η διαδικασία όλων των βημάτων που αφορά την διαδικασία της φωτολιθογραφίας για την δημιουργία πλακέτας PCB.



Σχήμα 2.10: Βήματα φωτολιθογραφίας PCB

### 2.6.2 Τεχνολογία Άμεσης Απεικόνισης με Laser (Laser Direct Imaging – LDI)

Από το 2004, η τεχνολογία Άμεσης Απεικόνισης με Laser (Laser Direct Imaging – LDI) έχει καθιερωθεί ως μία από τις πλέον προηγμένες και ολοκληρωμένες μεθόδους απεικόνισης για πλακέτες υψηλής πυκνότητας διασυνδέσεων (High Density Interconnect – HDI). Η τεχνολογία αυτή εισήχθη εμπορικά από την Orbotech μέσω της μηχανής Paragon 9000, η οποία σχεδιάστηκε ειδικά για εφαρμογές κατασκευής PCB υψηλής ακρίβειας.

Η τεχνολογία LDI βασίζεται στη χρήση εστιασμένης δέσμης λέιζερ για την άμεση έκθεση επιφανειών PCB που έχουν επικαλυφθεί με φωτοαντιστάτη (photoresist). Με την εφαρμογή της μεθόδου αυτής καταργείται η ανάγκη χρήσης φυσικών φωτομασκών, γεγονός που επιτρέπει την αποφυγή σημαντικών προβλημάτων που εμφανίζονται στις συμβατικές φωτολιθογραφικές διαδικασίες. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται τα επαναλαμβανόμενα σφάλματα που προκαλούνται από τον χειρισμό των φωτοεργαλείων (phototools) και την ανεπαρκή επαφή κατά την έκθεση, η μειωμένη διαστασιακή σταθερότητα των φωτομασκών λόγω μεταβολών θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και οι διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά μεταξύ διαφορετικών πλακετών ή ακόμη και μεταξύ πλακετών της ίδιας παρτίδας παραγωγής.

Η διαδικασία της άμεσης απεικόνισης πραγματοποιείται μέσω δέσμης λέιζερ, η οποία σαρώνει την επιφάνεια του φωτοαντιστάτη και ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται δυναμικά μέσω ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου, σύμφωνα με το επιθυμητό κυκλωματικό πρότυπο. Τα σύγχρονα συστήματα LDI είναι ικανά να δημιουργούν εξαιρετικά λεπτές γραμμές και αποστάσεις επάνω στον φωτοαντιστάτη, επιτυγχάνοντας ανάλυση μικρότερη από 10 μm, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία κατάλληλη για ιδιαίτερα απαιτητικές εφαρμογές μικροηλεκτρονικής και PCB υψηλής πυκνότητας.

Η μηχανή Paragon 9000 της Orbotech έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές μαζικής παραγωγής PCB και, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, μπορεί να επεξεργάζεται έως και 160 πλακέτες ανά

ώρα. Ο εσωτερικός οπτικός σχεδιασμός του συστήματος (LSO) παρουσιάζει ομοιότητες με αυτόν ενός επιτραπέζιου εκτυπωτή λέιζερ, ενώ η συσκευή χρησιμοποιεί UV λέιζερ υψηλής ισχύος 15 Watt και μήκους κύματος 355 nm.

Χάρη στον τηλεκεντρικό οπτικό σχεδιασμό, η δέσμη λέιζερ μπορεί να εστιαστεί σε εξαιρετικά μικρό σημείο, διαμέτρου περίπου 5  $\mu\text{m}$ . Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την παραγωγή κυκλωματικών προτύπων με πυκνότητα έως και 8/8  $\mu\text{m}$  (γραμμές/αποστάσεις), καλύπτοντας τις απαιτήσεις των πλέον προηγμένων σχεδιάσεων PCB και εφαρμογών υψηλής ολοκλήρωσης.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας LDI είναι η σημαντική μείωση του αριθμού των απαιτούμενων σταδίων κατασκευής για τη δημιουργία προτύπων επάνω σε PCB. Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή καθιστά δυνατή τη μαζική παραγωγή πλακετών HDI, κάτι που δεν μπορούσε να επιτευχθεί αποτελεσματικά με τις συμβατικές μεθόδους φωτολιθογραφίας [27].

### 2.6.3 Τεχνική PCB Milling και DMD

Εκτός από τη συμβατική φωτολιθογραφία, έχουν αναπτυχθεί και άλλες τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB), όπως η μηχανική κατεργασία πλακετών (PCB milling), η εκτύπωση PCB με λέιζερ και η οπτικά ελεγχόμενη φωτολιθογραφία χωρίς μάσκα μέσω Ψηφιακών Μικροκατόπτρων (Digital Micromirror Devices – DMD). Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν, οι τεχνολογίες αυτές χαρακτηρίζονται είτε από αυξημένο κόστος υλοποίησης είτε από περιορισμούς που σχετίζονται με την αξιοπιστία και την ακρίβεια της διαδικασίας κατασκευής.

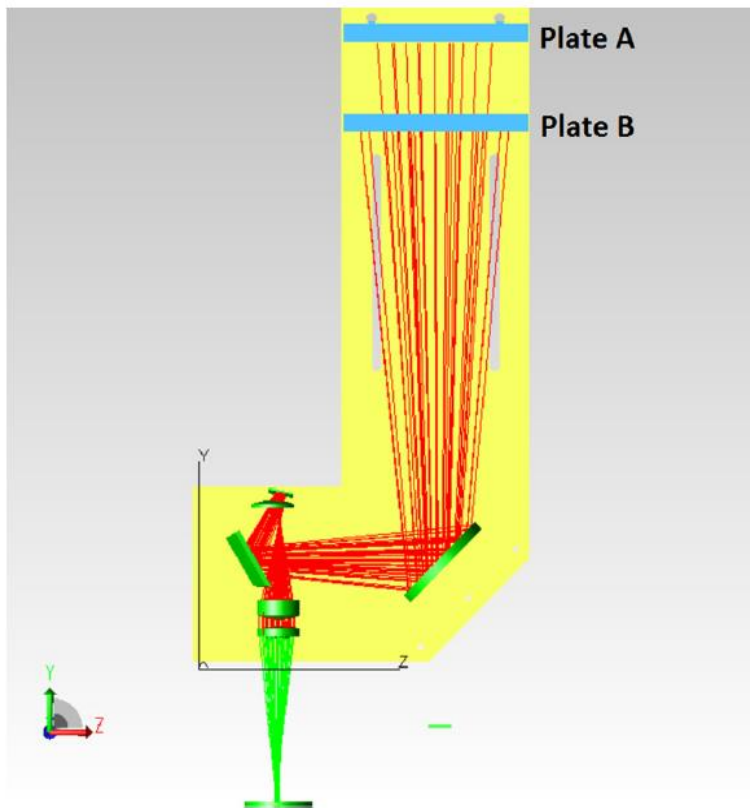
Η τεχνική PCB milling αποτελεί μία μέθοδο κατασκευής, κατά την οποία το ανεπιθύμητο στρώμα χαλκού απομακρύνεται μηχανικά μέσω της χρήσης κατάλληλου εργαλείου κοπής ή τρυπανιού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές πρωτοτυποποίησης μικρής κλίμακας, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση χημικών ουσιών ή φωτοευαίσθητων υλικών. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά της περιορίζεται σημαντικά στην περίπτωση σύνθετων κυκλωμάτων υψηλής πυκνότητας, δεδομένου ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των αγωγικών γραμμών εξαρτάται άμεσα από τις διαστάσεις του διαθέσιμου εργαλείου κοπής.

Αντίστοιχα, η εκτύπωση PCB με λέιζερ βασίζεται στην απομάκρυνση του ανεπιθύμητου χαλκού μέσω δέσμης λέιζερ αντί μηχανικού εργαλείου. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια και μειωμένη μηχανική καταπόνηση της επιφάνειας του υποστρώματος, ωστόσο χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος λειτουργίας και εξοπλισμού, καθώς απαιτεί τη χρήση πηγών λέιζερ υψηλής ισχύος και εξειδικευμένων συστημάτων ελέγχου.

Από την άλλη πλευρά, η οπτικά ελεγχόμενη φωτολιθογραφία χωρίς μάσκα αποτελεί μία ιδιαίτερα αξιόπιστη και υψηλής ακρίβειας τεχνική, η οποία συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των σφαλμάτων που σχετίζονται με τη χρήση συμβατικών φωτομασκών. Η λειτουργία της βασίζεται σε ψηφιακά ελεγχόμενη διάταξη μικροκατόπτρων, τα οποία ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται δυναμικά ανάλογα με το επιθυμητό πρότυπο που πρόκειται να μεταφερθεί στην επιφάνεια του PCB. Με τον τρόπο αυτό, το σχέδιο μεταφέρεται απευθείας στο υπόστρωμα χωρίς την ανάγκη χρήσης φυσικής μάσκας.

Η διαδικασία υλοποιείται μέσω του κατοχυρωμένου οπτικού συστήματος Digital Micromirror Device (DMD), το οποίο αναπτύχθηκε από την Texas Instruments. Η τεχνολογία αυτή καθιστά δυνατή τη γρήγορη και ευέλικτη κατασκευή πρωτοτύπων PCB, περιορίζοντας παράλληλα την ανάγκη χρήσης πολύπλοκων χημικών διεργασιών και μειώνοντας τον χρόνο ανάπτυξης ηλεκτρονικών

συστημάτων[27]. Στο Σχήμα 2.11 παρακάτω παρουσιάζεται οι ακτίνες κεφαλής έκθεσης ψηφιακών μικροκατόπτρων.



Σχήμα 2.11: Ακτίνες κεφαλής έκθεσης

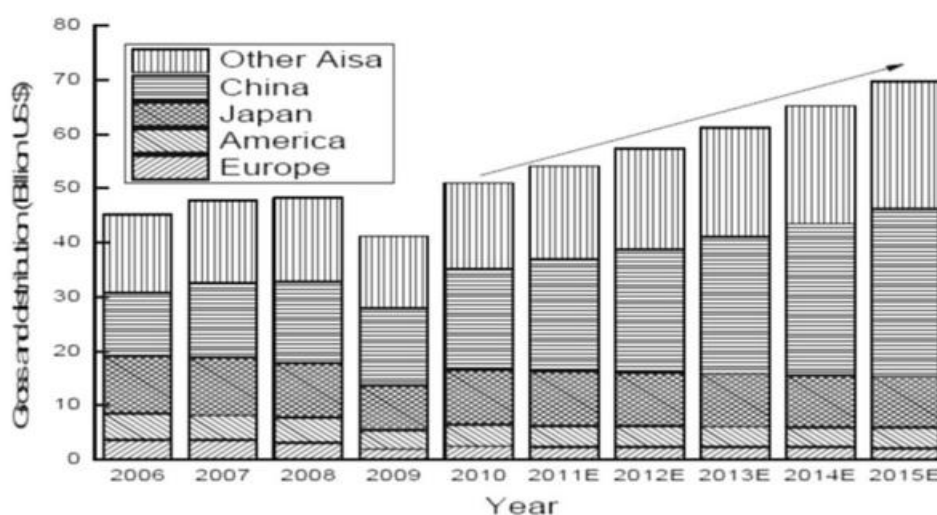
## 2.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διαχείριση αποβλήτων PCB

Η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συσκευών, σε συνδυασμό με τη συνεχή τεχνολογική αναβάθμιση και τη μείωση της διάρκειας ζωής τους, έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των αποβλήτων ηλεκτρονικού εξοπλισμού (Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE). Η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρονικών αποβλήτων αυξάνεται συνεχώς, δημιουργώντας σοβαρές περιβαλλοντικές και υγειονομικές προκλήσεις, ιδιαίτερα λόγω της παρουσίας τοξικών ουσιών και της ανεπαρκούς εφαρμογής κατάλληλων μεθόδων διαχείρισης και ανακύκλωσης. Η κατάσταση επιβαρύνεται περαιτέρω από την εξαγωγή ηλεκτρονικών αποβλήτων από ανεπτυγμένες προς αναπτυσσόμενες χώρες, όπου εφαρμόζονται συχνά ανεπίσημες και μη ασφαλείς πρακτικές ανακύκλωσης, προκαλώντας σημαντική περιβαλλοντική ρύπανση και κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία [20-21].

Οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards – PCB ή PrCB) αποτελούν βασικό στοιχείο των σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών, παρέχοντας τις απαραίτητες ηλεκτρικές διασυνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τα PCB έχουν γίνει ιδιαίτερα πολύπλοκα, πολυστρωματικά και υψηλών ταχυτήτων, με εφαρμογές σε σχεδόν όλα τα ηλεκτρονικά, αμυντικά και αεροδιαστημικά συστήματα. Η κατασκευή τους είναι ιδιαίτερα σύνθετη και απαιτεί

σημαντικές επενδύσεις σε εξοπλισμό και τεχνολογία, γεγονός που έχει συμβάλει στη μεταφορά μεγάλου μέρους της παγκόσμιας παραγωγής προς την Ασία, κυρίως στην Κίνα, την Ιαπωνία και την Ταϊβάν[22].

Η συνεχής αύξηση των ηλεκτρονικών αποβλήτων οδηγεί και σε σημαντική αύξηση των αποβλήτων πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (WPCB). Παρότι τα WPCB αποτελούν μικρό ποσοστό των συνολικών WEEE, παράγονται σε ιδιαίτερα μεγάλες ποσότητες και παρουσιάζουν περιορισμένες δυνατότητες ανακύκλωσης λόγω της πολύπλοκης δομής και της σύνθεσης διαφορετικών υλικών. Ωστόσο, τα PCB περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις πολύτιμων μετάλλων, όπως χρυσό, άργυρο, χαλκό και παλλάδιο, συχνά σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από εκείνες των φυσικών μεταλλευμάτων. Για τον λόγο αυτό, θεωρούνται σημαντική δευτερογενής πηγή πρώτων υλών και η ανακύκλωσή τους παρουσιάζει ιδιαίτερο περιβαλλοντικό και οικονομικό ενδιαφέρον [23]. Στο παρακάτω Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται ο όγκος των ηλεκτρονικών αποβλήτων σε διάφορες περιοχές του κόσμου, ο οποίος παρουσιάζει συνεχή αύξηση με την πάροδο των ετών.



Σχήμα 2.12: Όγκος των ηλεκτρονικών αποβλήτων σε διάφορες περιοχές του κόσμου

Οι βασικές τεχνολογίες ανάκτησης πολύτιμων μετάλλων από PCB είναι η πυρομεταλλουργία και η υδρομεταλλουργία, ενώ η ανάπτυξη αποτελεσματικότερων μεθόδων ανακύκλωσης αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας. Παράλληλα, τα συμβατικά άκαμπτα PCB παρουσιάζουν σοβαρές προκλήσεις βιωσιμότητας, λόγω της ενεργοβόρας παραγωγής τους, της χρήσης επικίνδυνων ουσιών και της δυσκολίας επεξεργασίας των μη μεταλλικών υπολειμμάτων, τα οποία συχνά οδηγούνται σε υγειονομική ταφή ή αποτέφρωση. Αντίθετα, τα εύκαμπα υποστρώματα εμφανίζονται ως πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση, καθώς απαιτούν λιγότερες πρώτες ύλες και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας κατά την κατασκευή τους [20].

Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλούν επίσης τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (Polychlorinated Biphenyls – PCBs), τα οποία αποτελούν έμμοτους οργανικούς ρύπους με υψηλή τοξικότητα, μεγάλη ανθεκτικότητα στη διάσπαση και ικανότητα βιοσυσσώρευσης. Τα PCBs χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα ως διηλεκτρικά υγρά και επιβραδυντικά φλόγας σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό, προκαλώντας σημαντική περιβαλλοντική ρύπανση και σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, όπως νευροαναπτυξιακές διαταραχές και προβλήματα του ανοσοποιητικού και νευρικού συστήματος. Η αναγνώριση της

επικινδυνότητάς τους οδήγησε στη σταδιακή επιβολή περιορισμών και στη μείωση της παγκόσμιας παραγωγής τους από τη δεκαετία του 1970 [24].

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με τα WEEE και τα PCB έχουν θεσπιστεί διεθνείς και ευρωπαϊκές νομοθεσίες, όπως οι οδηγίες WEEE και RoHS, οι οποίες στοχεύουν στον περιορισμό των επικίνδυνων ουσιών και στη βελτίωση της διαχείρισης και ανακύκλωσης των ηλεκτρονικών αποβλήτων. Παρά τις σημαντικές προσπάθειες, πολλές χώρες εξακολουθούν να μην διαθέτουν ολοκληρωμένα κανονιστικά πλαίσια, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συνεχή ανάπτυξη πιο βιώσιμων τεχνολογιών παραγωγής και ανακύκλωσης ηλεκτρονικού εξοπλισμού [21].

## 2.8 Επίλογος

Η συνεχής εξέλιξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας έχει καταστήσει τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη σύγχρονων ηλεκτρονικών διατάξεων και συστημάτων. Η αυξανόμενη ανάγκη για μικρότερο μέγεθος, υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη αξιοπιστία οδήγησε στη σημαντική πρόοδο τόσο των υλικών όσο και των τεχνικών κατασκευής PCB.

Μέσα από την ανάλυση που προηγήθηκε παρουσιάστηκαν οι βασικές κατηγορίες πλακετών, τα κύρια δομικά τους στοιχεία και τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή τους. Παράλληλα, έγινε εκτενής αναφορά στις σημαντικότερες τεχνολογίες παραγωγής PCB, όπως η φωτολιθογραφία, η τεχνολογία Άμεσης Απεικόνισης με Laser (LDI), η τεχνική PCB milling και η τεχνολογία DMD, αναδεικνύοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τις δυνατότητες και τους περιορισμούς κάθε μεθόδου.

Από τη μελέτη των παραπάνω τεχνολογιών προκύπτει ότι η φωτολιθογραφία εξακολουθεί να αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες και αποτελεσματικές μεθόδους κατασκευής PCB υψηλής ακρίβειας, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν λεπτές αγωγίμες διαδρομές και υψηλή ακρίβεια. Παράλληλα, οι σύγχρονες τεχνολογίες χωρίς μάσκα, όπως η LDI και η DMD, προσφέρουν αυξημένη ευελιξία και βελτιωμένη ακρίβεια, συμβάλλοντας σημαντικά στην ταχύτερη ανάπτυξη πρωτοτύπων και στη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.

Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η περιβαλλοντική διάσταση της παραγωγής και διαχείρισης PCB, καθώς η συνεχής αύξηση των ηλεκτρονικών αποβλήτων δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για αποτελεσματικές διαδικασίες ανακύκλωσης και βιώσιμης διαχείρισης υλικών. Η ανάπτυξη πιο φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών και η εφαρμογή σύγχρονων πρακτικών ανακύκλωσης αποτελούν πλέον αναγκαία προϋπόθεση για τη βιώσιμη εξέλιξη της ηλεκτρονικής βιομηχανίας.

Συνολικά, η θεωρητική ανάλυση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό παρέχει το απαραίτητο επιστημονικό και τεχνολογικό υπόβαθρο για την κατανόηση των διαδικασιών που ακολουθούνται στην κατασκευή φωτοευαίσθητων πλακετών και συμβάλλει στην πληρέστερη προσέγγιση της μελέτης και ανάπτυξης του θαλάμου αποτύπωσης UV PCB που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

## Κεφάλαιο 3ο: Κατασκευή Θαλάμου Φωτοευαίσθητων Πλακετών

### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται βήμα προς βήμα η διαδικασία κατασκευής του θαλάμου για την τύπωση φωτοευαίσθητων πλακετών. Παρουσιάζονται οι επιλογές που πραγματοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό της κατασκευής, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε και τοποθετήθηκε κάθε επιμέρους εξάρτημα. Η αρχική σκέψη αφορούσε τον τρόπο και τον χώρο τοποθέτησης της κατασκευής. Εξετάστηκαν διάφορες εναλλακτικές επιλογές, όπως η κατασκευή από πλεξιγκλάς, η χρήση ενός έτοιμου πλαστικού κουτιού ή ακόμα και η αξιοποίηση ενός παλιού, μη λειτουργικού scanner. Έπειτα από έρευνα και παρακολούθηση σχετικών βίντεο, επιλέχθηκε τελικά η κατασκευή ενός ξύλινου κουτιού με καπάκι, καθώς θεωρήθηκε θα πρόσφερε καλύτερη λειτουργικότητα και μεγαλύτερη αντοχή. Επιπλέον, αποφασίστηκε η χρήση ταινίας LED αντί για λαμπτήρες φθορίου, καθώς η τοποθέτηση της στο εσωτερικό της ξύλινης κατασκευής ήταν ευκολότερη και πιο πρακτική.

### 3.2 Βήματα που Ακολουθήθηκαν για την Κατασκευή

Ο θάλαμος σχεδιάστηκε με διαστάσεις 20 x 30cm και ύψος 20cm. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν ο σχεδιασμός της κατασκευής σε χαρτί, ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι διαστάσεις των ξύλινων τμημάτων που θα χρησιμοποιούνταν. Αρχικά τοποθετήθηκε η ταινία LED. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα φύλλο κόντρα πλακέ, ελαφρώς μικρότερο από τη βάση της κατασκευής. Πάνω σε αυτό τοποθετήθηκαν οι ταινίες LED, οι οποίες κόπηκαν σε ίσα κομμάτια, ώστε να είναι ομοιόμορφα τοποθετημένες. Πριν από την επικόλληση των LED, τοποθετήθηκε αλουμινοταινία στην επιφάνεια του κόντρα πλακέ, με στόχο τη βελτίωση της ανάκλασης του φωτός και κατά επέκταση την απόδοση του φωτισμού. Στη συνέχεια τα κομμάτια της ταινίας LED τοποθετήθηκαν πάνω στο κόντρα πλακέ και συγκολλήθηκαν μεταξύ τους με καλαί, με τη βοήθεια κολλητηριού. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε δοκιμή λειτουργίας με τη χρήση μπαταρίας, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι συνδέσεις είχαν γίνει σωστά και ότι όλα τα LED λειτουργούσαν κανονικά. Στο παρακάτω Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το κόντρα πλακέ όπου υπάρχουν κολλημένα τα κομμάτια ταινίας LED και είναι εννοημένα μεταξύ τους με καλαί.



Σχήμα 3.1: Ταινία LED πάνω στο κόντρα πλακέ

Το επόμενο στάδιο αφορούσε την κατασκευή του ξύλινου θαλάμου. Επιλέχθηκε ξύλο τύπο OSB, καθώς αποτελεί ένα ελαφρύ και οικονομικό υλικό. Αρχικά κόπηκαν τα ξύλινα τμήματα στις επιθυμητές διαστάσεις, κι έπειτα συναρμολογήθηκαν με κόλλα και βίδες, ώστε να δημιουργηθεί ο βασικό σκελετός της κατασκευής. Πριν την ολοκλήρωση της ξύλινης κατασκευής, κρίθηκε απαραίτητος ο σχεδιασμός των ηλεκτρονικών λειτουργιών του θαλάμου. Αρχικά, αποφασίστηκε η τοποθέτηση οθόνης, ώστε να εμφανίζεται η αντίστροφη μέτρηση του χρόνου έκθεσης. Για τον λόγο αυτό προστέθηκε και πληκτρολόγιο, μέσω του οποίου θα ήταν δυνατή η εισαγωγή του επιθυμητού χρόνου έκθεσης της φωτοευαίσθητης πλακέτας στον φωτισμό LED. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση ποτενσιόμετρου, με την περιστροφή του οποίου, ελέγχεται η ένταση φωτισμού LED. Παράλληλα, τοποθετήθηκε διακόπτης ON/OFF για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της συσκευής, καθώς κι ένα μικρό κόκκινο LED για την ένδειξη λειτουργίας του θαλάμου, το οποίο αναβοσβήνει κατά τη χρήση του.

Το σημαντικότερο στοιχείο της κατασκευής ήταν ο μικροελεγκτής, μέσω του οποίου θα υλοποιούνταν και θα ελέγχονταν όλες οι λειτουργίες του συστήματος. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε η πλακέτα Arduino Uno R3, καθώς παρέχει τη δυνατότητα προγραμματισμού και διαχείρισης όλων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων της συσκευής. Τέλος, στο εσωτερικό του θαλάμου στερεώθηκε, λίγα εκατοστά κάτω από το καπάκι, μια γυάλινη επιφάνεια. Πάνω σε αυτό μπορεί να τοποθετηθεί η εκτύπωση του κυκλώματος σε διαφανές φύλλο A4, ενώ ακριβώς από κάτω βρίσκεται η φωτοευαίσθητη πλακέτα, ώστε το κύκλωμα να αποτυπώνεται επάνω στην επιφάνεια της μέσω της έκθεσης στο φως των LED. Στο παρακάτω Σχήμα 3.2 απεικονίζεται το κόντρα πλακέ με την ταινία LED μέσα στον σκελετό του θαλάμου.



Σχήμα 3.2: Ξύλινος σκελετός θαλάμου

### 3.3 Εξαρτήματα σύνδεσης

Το επόμενο στάδιο της κατασκευής αφορούσε τον προγραμματισμό και την διασύνδεση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μέσω του Arduino Uno R3. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η σύνδεση της οθόνης τύπου LCD 16 x 2, στην οποία ενσωματώθηκε ελεγκτής LCD I2C, με σκοπό την μείωση των απαιτούμενων συνδέσεων και την ευκολότερη επικοινωνία με τον μικροελεγκτή. Στη συνέχεια συνδέθηκε πληκτρολόγιο 4 x 4, μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τον επιθυμητό χρόνο έκθεσης. Ο χρόνος αυτός εμφανίζεται στην οθόνη LCD και χρησιμοποιείται για την αντίστροφη

μέτρηση κατά την λειτουργία του θαλάμου. Για τον έλεγχο της έντασης φωτισμού των LED μέσω του Arduino, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση τρανζίστορ MOSFET τύπου IRF520. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε η ρύθμιση της έντασης του φωτισμού ανάλογα με τις απαιτήσεις της διαδικασίας έκθεσης. Επιπλέον, στην αρχή του κυκλώματος τοποθετήθηκε διακόπτης ON/OFF, ώστε να είναι δυνατή η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του θαλάμου. Για την τροφοδοσία όλων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων επιλέχθηκε τροφοδοτικό κλειστού τύπου 12V και 8A. Η επιλογή της έντασης του ρεύματος του τροφοδοτικού βασίστηκε στην κατανάλωση ισχύος της ταινίας LED. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή, η ταινία LED λειτουργεί στα 12V και κάθε μέτρο καταναλώνει 11,52 Watt. Με βάση τη σχέση:

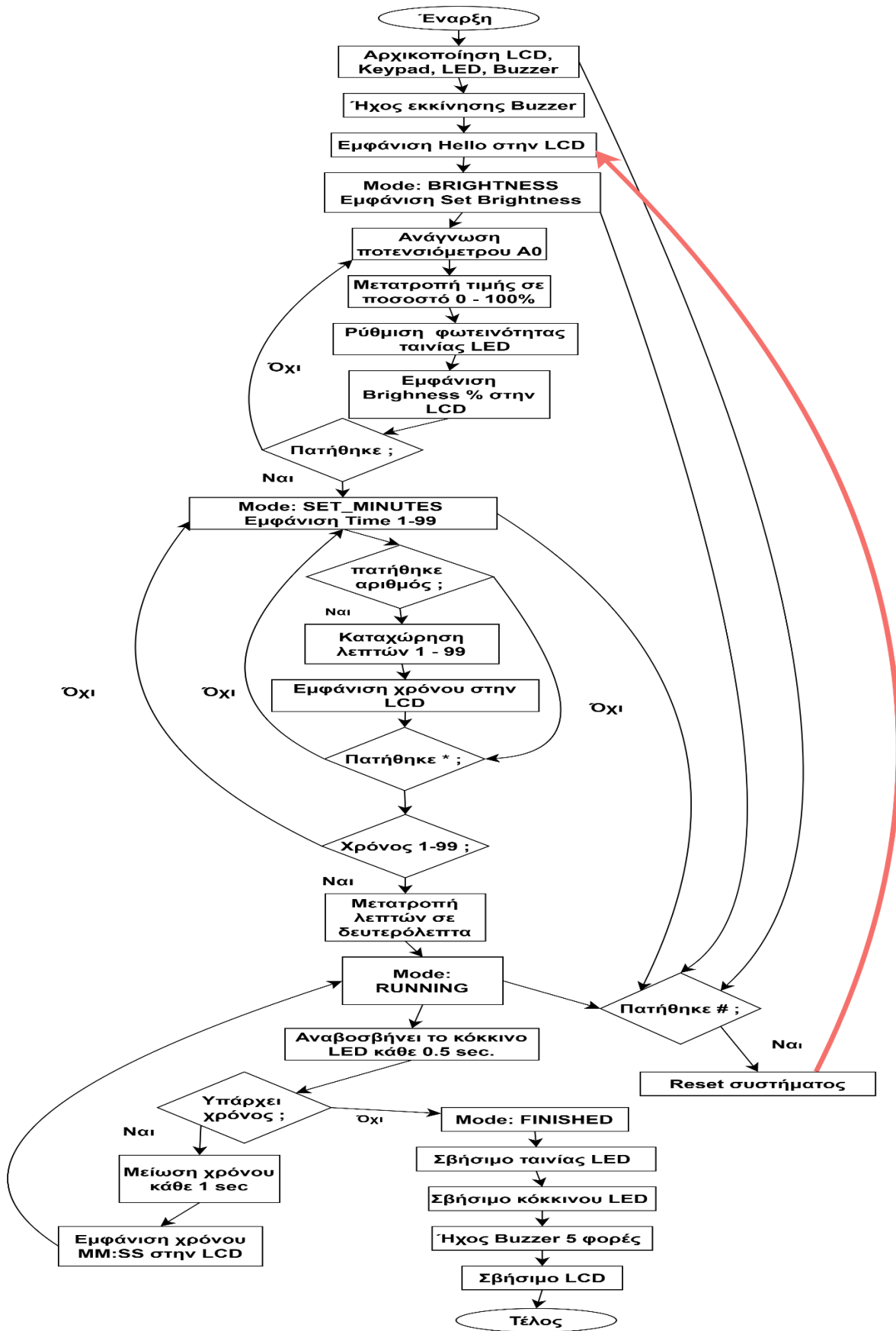
$$I = \frac{P}{V} \quad (3.1)$$

Υπολογίστηκε ότι το απαιτούμενο ρεύμα λειτουργίας ήταν περίπου 4,8A. Για λόγους ασφαλείας και σωστής λειτουργίας επιλέχθηκε τροφοδοτικό με δυνατότητα παροχής τουλάχιστον 20% μεγαλύτερου ρεύματος από το απαιτούμενο, γεγονός που οδήγησε στην επιλογή τροφοδοτικού 8A. Τέλος, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, που περιελάμβανε ένα μικρό κόκκινο LED ένδειξης λειτουργίας. Το κύκλωμα τυπώθηκε σε φωτοευαίσθητη πλακέτα με την χρήση του ίδιου του θαλάμου, ώστε να ελεγχθεί η λειτουργικότητα και η αποτελεσματικότητά του. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε μια ολοκληρωμένη πλακέτα, η οποία τοποθετήθηκε στην κατασκευή και χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή της σωστής λειτουργίας του συστήματος.

### 3.4 Προγραμματισμός και Διάγραμμα Ροής

Ο προγραμματισμός του Arduino σχεδιάστηκε με στόχο τη δημιουργία ενός σταθερού και εύχρηστου συστήματος ελέγχου για τον θάλαμο φωτοευαίσθητων πλακετών. Ο κώδικας οργανώθηκε σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας (HELLO, BRIGHTNESS, SET\_MINUTES, RUNNING, FINISHED), ώστε κάθε στάδιο λειτουργίας του συστήματος να εκτελείται με σαφή και οργανωμένο τρόπο. Με αυτήν τη μεθοδολογία επιτεύχθηκε καλύτερη δομή του προγράμματος και ευκολότερη διαχείριση των λειτουργιών του θαλάμου. Για τη διαχείριση του χρόνου χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `millis()` αντί της `delay()`, ώστε το πρόγραμμα να μπορεί να εκτελεί πολλές λειτουργίες ταυτόχρονα χωρίς να σταματά η λειτουργία του μικροελεγκτή. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατή η ταυτόχρονη λειτουργία της οθόνης LCD, του πληκτρολογίου, του βομβητή και της αντίστροφης μέτρησης.

Η ρύθμιση της φωτεινότητας των UV LED πραγματοποιήθηκε μέσω τεχνικής PWM με τη χρήση της εντολής `analogWrite()`. Η τιμή του ποτενσιόμετρου μετατρέπεται σε ποσοστό φωτεινότητας, επιτρέποντας την ομαλή μεταβολή της έντασης φωτισμού ανάλογα με τις απαιτήσεις της διαδικασίας έκθεσης. Επιπλέον, στον κώδικα ενσωματώθηκαν έλεγχοι εγκυρότητας ώστε να επιτρέπεται η εισαγωγή χρόνου μόνο από 1 έως 99 λεπτά, αποφεύγοντας λανθασμένη λειτουργία του συστήματος. Τέλος, δημιουργήθηκε ξεχωριστή συνάρτηση επαναφοράς (`resetSystem()`), η οποία επαναφέρει όλες τις μεταβλητές και τις εξόδους του συστήματος στην αρχική κατάσταση λειτουργίας. Στο παρακάτω Σχήμα 3.3 παρατηρείται το διάγραμμα ροής για την καλύτερη κατανόηση του προγραμματισμού.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα Ροής

Το διάγραμμα ροής παρουσιάζει τη συνολική λειτουργία του συστήματος ελέγχου του θαλάμου αποτύπωσης, το οποίο υλοποιήθηκε με χρήση μικροελεγκτή του Arduino Uno R3 . Η λειτουργία του προγράμματος βασίζεται σε διαδοχικές καταστάσεις λειτουργίας (modes), οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος κατά την εκτέλεση. Αρχικά πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των βασικών περιφερειακών μονάδων του συστήματος, όπως η οθόνη LCD, το πληκτρολόγιο (Keypad), τα LED και ο βομβητής (Buzzer). Μετά την αρχικοποίηση ενεργοποιείται ένας σύντομος ηχητικός τόνος εκκίνησης και εμφανίζεται το μήνυμα “Hello” στην οθόνη LCD, επιβεβαιώνοντας την ορθή εκκίνηση του συστήματος.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα μεταβαίνει στη λειτουργία ρύθμισης φωτεινότητας (BRIGHTNESS mode). Σε αυτή τη λειτουργία γίνεται συνεχής ανάγνωση της τιμής του ποτενσιόμετρου από την αναλογική είσοδο A0 και μετατροπή της σε ποσοστό φωτεινότητας από 0 έως 100%. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της φωτεινότητας της UV ταινίας LED μέσω τεχνικής PWM, ενώ παράλληλα εμφανίζεται στην οθόνη LCD. Με το πάτημα του πλήκτρου \*, το σύστημα μεταβαίνει στη λειτουργία εισαγωγής χρόνου (SET\_MINUTES mode). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει χρονική διάρκεια από 1 έως 99 λεπτά μέσω του πληκτρολογίου και η τιμή εμφανίζεται στην LCD.

Μετά την επιβεβαίωση του χρόνου μέσω του πλήκτρου \*, πραγματοποιείται μετατροπή των λεπτών σε δευτερόλεπτα και ξεκινά η λειτουργία εκτέλεσης (RUNNING mode). Κατά τη διάρκεια αυτής της κατάστασης πραγματοποιείται αντίστροφη μέτρηση του χρόνου, ενώ στην οθόνη LCD εμφανίζεται ο υπολειπόμενος χρόνος σε μορφή λεπτών και δευτερολέπτων (MM:SS). Παράλληλα, το κόκκινο LED αναβοσβήνει ανά 0,5 δευτερόλεπτα, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα βρίσκεται σε ενεργή λειτουργία.

Όταν ολοκληρωθεί η αντίστροφη μέτρηση, το σύστημα μεταβαίνει στη λειτουργία ολοκλήρωσης (FINISHED mode). Σε αυτή τη φάση απενεργοποιείται η UV ταινία LED, σβήνει το LED κατάστασης και ενεργοποιείται ο βομβητής πέντε φορές ως ηχητική ειδοποίηση ολοκλήρωσης της διαδικασίας και τέλος απενεργοποιείται η οθόνη LCD. Επιπλέον, σε οποιοδήποτε στάδιο λειτουργίας του συστήματος, ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει επαναφορά (Reset) μέσω του πλήκτρου #, επαναφέροντας το πρόγραμμα στην αρχική κατάσταση εκκίνησης.

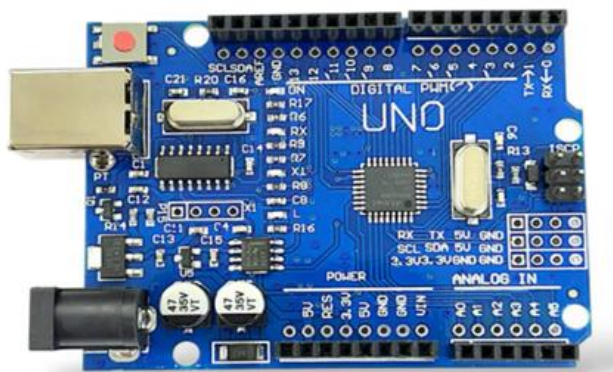
### 3.5 Ανάλυση Λειτουργίας και Επιλογή Όλων των Εξαρτημάτων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του θαλάμου φωτοευαίσθητων πλακετών, καθώς και οι λόγοι επιλογής τους. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται ο μικροελεγκτής Arduino Uno R3, η οθόνη LCD 16 x 2, το πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C, το πληκτρολόγιο 4 x 4, το ποτενσιόμετρο, η μονάδα MOSFET IRF520, το buzzer, το κύκλωμα ένδειξης με κόκκινο LED, το τροφοδοτικό, ο διακόπτης ON/OFF και η πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας UV LED. Για κάθε εξάρτημα αναλύονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, η λειτουργία του μέσα στο σύστημα, καθώς και η συμβολή του στη συνολική λειτουργία του θαλάμου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα εξαρτήματα, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το κόστος, η ευκολία διασύνδεσης, η αξιοπιστία και οι απαιτήσεις της εφαρμογής.

#### 3.5.1 Arduino Uno R3

Το Arduino Uno R3 αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες πλακέτες μικροελεγκτών και βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328. Διάθετει ψηφιακές και αναλογικές ακίδες εισόδου/ εξόδου (I/O), οι οποίες επιτρέπουν τη σύνδεση με διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και κυκλώματα, προσφέροντας τη δυνατότητα υλοποίησης πολλών διαφορετικών εφαρμογών. Η πλακέτα διαθέτει 14 ψηφιακές

εισόδους/εξόδους, από τις οποίες οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εξοδοί PWM, καθώς και 6 αναλογικές εισόδους. Επιπλέον, υποστηρίζει προγραμματισμό μέσω του λογισμικού Arduino IDE με τη χρήση καλωδίου USB τύπου B [1]. Ο μικροελεγκτής ATmega328 είναι αρχιτεκτονικής 8-bit, λειτουργεί στα 5V και διαθέτει μνήμη προγράμματος χωρητικότητας 32kB [2]. Το Arduino Uno R3 αποτελεί μια οικονομική, εύχρηστη και ανοιχτού κώδικα πλακέτα, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εκπαιδευτικές εφαρμογές, πειραματισμούς και κατασκευές αυτοματισμού. Για τους λόγους αυτούς, επιλέχθηκε ως ο βασικός μικροελεγκτής του θαλάμου φωτοευαίσθητων πλακετών [3]. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η μορφή του Arduino Uno R3.



Σχήμα 3.4: Arduino Uno R3

### 3.5.2 LCD 16 x 2

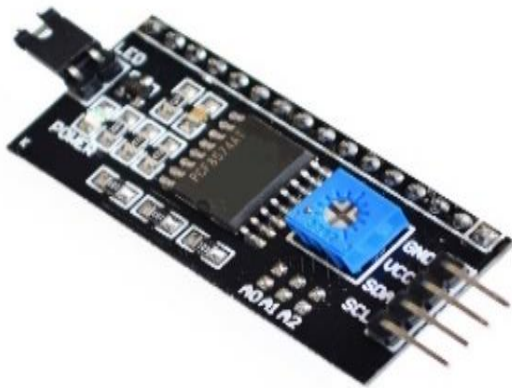
Η οθόνη LCD (Liquid Crystal Display) χρησιμοποιεί υγρούς κρυστάλλους για την απεικόνιση χαρακτήρων και δεδομένων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται ευρέως σε ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τηλεοράσεις, υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα. Οι LCD οθόνες αποτελούν μία οικονομική και πρακτική επιλογή για εφαρμογές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συστημάτων μικροελεγκτών [3]. Η οθόνη διαθέτει ενσωματωμένο φωτισμό υποβάθρου (backlight), γεγονός που επιτρέπει την εύκολη ανάγνωση των πλήκτρων με σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Στην παρούσα κατασκευή χρησιμοποιήθηκε οθόνη LCD 16 x 2, η οποία μπορεί να εμφανίσει 16 χαρακτήρες σε 2 γραμμές. Η επιλογή της συγκεκριμένης οθόνης πραγματοποιήθηκε λόγω του χαμηλού κόστους, της απλής διασύνδεσης με το Arduino και της δυνατότητας εμφάνισης των βασικών πληροφοριών που απαιτούνται για τη λειτουργία του θαλάμου, όπως ο χρόνος έκθεσης και η αντίστροφη μέτρηση. Στο παρακάτω Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μορφή μιας LCD οθόνης.



Σχήμα 3.5: Οθόνη LCD 16 x 2

### 3.5.3 Πρωτόκολλο I2C

Το πρωτόκολλο I2C (Inter-Integrated Circuit) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1982 ως μέσο επικοινωνίας μεταξύ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Στη συνέχεια βελτιώθηκε και καθιερώθηκε ως βιομηχανικό πρότυπο για σειριακή επικοινωνία μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών [5]. Το I2C αποτελεί ένα σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της απλότητας και της ευκολίας διασύνδεσης που προσφέρει. Η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω τεσσάρων ακροδεκτών (pins): GND, VCC, SDA και SCL. Η γραμμή SDA (Serial Data) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των συσκευών, ενώ η γραμμή SCL (Serial Clock) είναι υπεύθυνη για τον συγχρονισμό της επικοινωνίας στον δίαυλο. Οι γραμμές SDA και SCL είναι κοινές για όλες τις συσκευές που συνδέονται στον ίδιο δίαυλο I2C, γεγονός που επιτρέπει τη σύνδεση πολλών περιφερειακών χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό ακροδεκτών [4]. Στην παρούσα κατασκευή, η πλακέτα I2C χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση της LCD οθόνης με το Arduino Uno R3. Χωρίς τη χρήση του I2C, η σύνδεση της LCD θα απαιτούσε σημαντικά περισσότερες καλωδιώσεις σε ψηφιακές εισόδους/εξόδους του Arduino. Με τη χρήση του πρωτοκόλλου I2C, η σύνδεση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μόνο τέσσερις ακροδέκτες, γεγονός που απλοποίησε σημαντικά το κύκλωμα και εξοικονόμησε διαθέσιμα pins για τις υπόλοιπες λειτουργίες του συστήματος. Επομένως, η χρήση του κρίθηκε απαραίτητη για την υλοποίηση του θαλάμου. Στο παρακάτω Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η πλακέτα η οποία συνδέεται στο πίσω μέρος της LCD 16 x 2 και ουσιαστικά σε αυτήν βασίζεται το πρωτόκολλο I2C.



Σχήμα 3.6: Πλακέτα που βασίζεται το πρωτόκολλο I2C

### 3.5.4 Keypad 4 x 4

Το πληκτρολόγιο 4 X 4 χρησιμοποιείται ως συσκευή εισόδου για την ανάγνωση και επεξεργασία των εντολών του χρήστη. Στην παρούσα κατασκευή χρησιμοποιήθηκε πληκτρολόγιο μεμβράνης 4 x 4, το οποίο διαθέτει τέσσερις σειρές και τέσσερις στήλες πλήκτρων. Το συγκεκριμένο είδος πληκτρολογίου επιλέχθηκε του χαμηλού κόστους, της απλής λειτουργίας και της ανθεκτικότητάς του. Μέσω αυτού, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τον επιθυμητό χρόνο έκθεσης της φωτοευαίσθητης πλακέτας, ο οποίος έπειτα εμφανίζεται στην οθόνη LCD και χρησιμοποιείται από το σύστημα για αντίστροφη μέτρηση. Η σύνδεση του πληκτρολογίου με το Arduino Uno R3 απαιτεί συνολικά 8 ακροδέκτες (pins), από τους οποίους οι τέσσερις αντιστοιχούν στις σειρές και οι υπόλοιπες τέσσερις στις στήλες του πληκτρολογίου. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ένα πληκτρολόγιο 4 x 4.



Σχήμα 3.7: Πληκτρολόγιο 4 x 4

### 3.5.5 Ποτενσιόμετρο

Το ποτενσιόμετρο αποτελεί ηλεκτρονικό εξάρτημα μεταβλητής αντίστασης και χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο ηλεκτρικών μεγεθών, όπως η τάση και η ένταση φωτισμού. Σε αυτή την περίπτωση τοποθετήθηκε ποτενσιόμετρο 5 kΩ για τη ρύθμιση των UV LED του θαλάμου έκθεσης. Με την περιστροφή του άξονα του μεταβάλλεται η αντίσταση του κυκλώματος, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο της φωτεινότητας των LED. Η παρουσία του κρίθηκε απαραίτητη, καθώς διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας μπορεί να απαιτούν διαφορετική ένταση φωτισμού. Στο παρακάτω Σχήμα 3.7 απεικονίζεται ένα ποτενσιόμετρο.



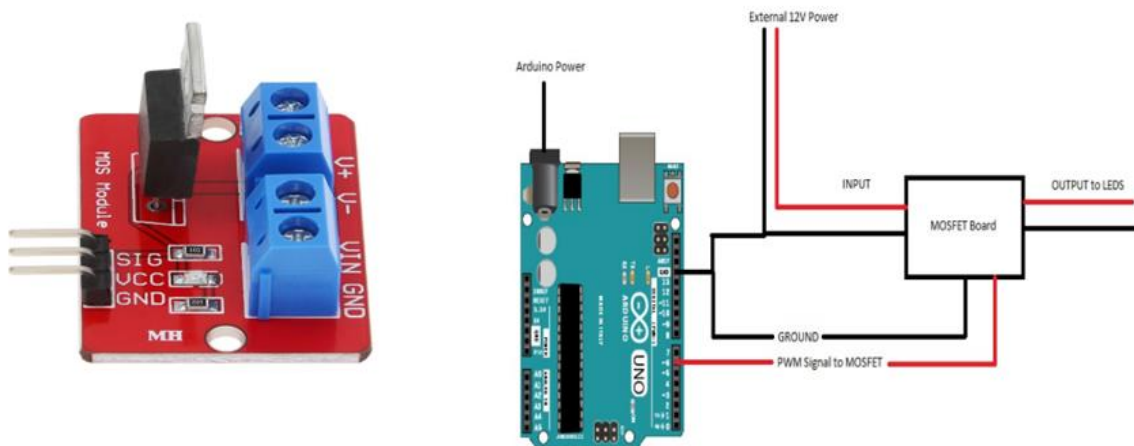
Σχήμα 3.8: Ποτενσιόμετρο

### 3.5.6 MOSFET IRF520

Το IRF520 MOSFET είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο φορτίων μεγαλύτερης μέτρησης ισχύος μέσω του Arduino Uno R3. Η μονάδα αυτή επιτρέπει στο Arduino, το οποίο λειτουργεί με τάση 0-5V DC, να ελέγχει συσκευές που απαιτούν μεγαλύτερη τάση και ρεύμα, όπως οι ταινίες LED. Το κύκλωμα λειτουργεί με τάση 3.3-5V DC, ενώ μπορεί να ελέγξει φορτία τάσης έως 24V DC. Το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας του μικρότερο από 5A, ενώ για μεγαλύτερα ρεύματα απαιτείται η χρήση ψύκτρας για καλύτερη απαγωγή θερμότητας. Στην παρούσα κατασκευή, το IRF520 χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της έντασης των UV LED, μέσω σήματος PWM (Pulse Width

Modulation). Έτσι, κατέστη δυνατή η μεταβολή της φωτεινότητας των LED ανάλογα με τις απαιτήσεις της διαδικασίας έκθεσης. Η πλακέτα IRF520 MOSFET διαθέτει ακροδέκτες εισόδου και εξόδου για την εύκολη σύνδεσή της με το Arduino και το φορτίο. Οι βασικοί ακροδέκτες εισόδου είναι οι VVC, GND, SIG, όπου το pin SIG χρησιμοποιείται για τη λήψη του σήματος ελέγχου από το Arduino. Επιπλέον, η πλακέτα διαθέτει ενδεικτικό LED λειτουργίας, το οποίο ανάβει όταν το pin SIG βρίσκεται σε κατάσταση HIGH και σβήνει όταν βρίσκεται σε κατάσταση LOW. Στην πλευρά εξόδου υπάρχουν οι ακροδέκτες V+ και V- για τη σύνδεση του φορτίου και οι ακροδέκτες Vin και GND για την είσοδο της τροφοδοσίας [6].

Το κύκλωμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8 δείχνει τον τρόπο σύνδεσης του Arduino Uno με τη μονάδα MOSFET IRF520 και την τροφοδοσία των UV LED. Το Arduino χρησιμοποιείται για την αποστολή σήματος ελέγχου PWM προς το MOSFET, ενώ η κύρια τροφοδοσία των LED πραγματοποιείται από εξωτερικό τροφοδοτικό 12V. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η απευθείας τροφοδότηση των LED από το Arduino, το οποίο δεν μπορεί να παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα λειτουργίας. Συγκεκριμένα, το pin PWM του Arduino συνδέεται με την είσοδο SIG της μονάδας MOSFET και λειτουργεί ως σήμα ελέγχου της φωτεινότητας των LED. Παράλληλα, οι ακροδέκτες GND του Arduino και του MOSFET συνδέονται μεταξύ τους ώστε να υπάρχει κοινή γείωση και σωστή λειτουργία του κυκλώματος. Η εξωτερική τροφοδοσία 12V συνδέεται στην είσοδο της πλακέτας MOSFET, ενώ στην έξοδο της συνδέεται η ταινία UV LED. Το MOSFET λειτουργεί ουσιαστικά ως ηλεκτρονικός διακόπτης, επιτρέποντας στο Arduino να ελέγχει μεγαλύτερα φορτία ισχύος με ασφάλεια. Μέσω της τεχνικής PWM μεταβάλλεται η μέση τάση που εφαρμόζεται στα LED και έτσι επιτυγχάνεται η ρύθμιση της έντασης φωτισμού ανάλογα με τις απαιτήσεις της διαδικασίας έκθεσης. Στο παρακάτω Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του MOSFET με το Arduino.



Σχήμα 3.9: Συνδεσμολογία MOSFET με Arduino

### 3.5.7 Buzzer

Στον θάλαμο χρησιμοποιήθηκε ένα Active Buzzer για την παραγωγή ηχητικών ειδοποιήσεων κατά τη λειτουργία της κατασκευής. Χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την ενημέρωση του χρήστη σχετικά με την ολοκλήρωση της διαδικασίας έκθεσης ή άλλες λειτουργίες του συστήματος, όπως η πίεση των πλήκτρων. Η σύνδεση του με το Arduino Uno R3 είναι απλή, καθώς απαιτούνται μόνο τρεις συνδέσεις τροφοδοσία, γείωση και σήμα ελέγχου.

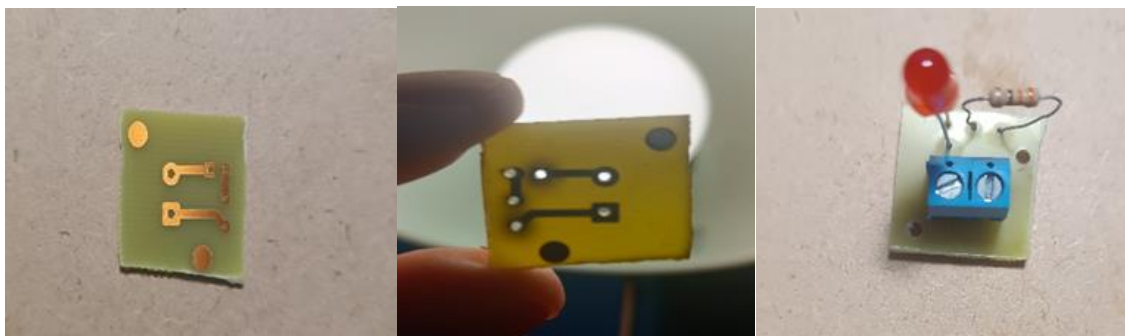
Οι βομβητές (buzzers) αποτελούν ηλεκτρονικές διατάξεις παραγωγής ηχητικού σήματος και χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ειδοποίησης και ενδείξεων. Ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους είναι ο πιεζοηλεκτρικός βομβητής (piezo buzzer), ο οποίος βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Συγκεκριμένα, όταν εφαρμοστεί τάση σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, αυτός διαστέλλεται ή συστέλλεται, προκαλώντας τη δόνηση ενός διαφράγματος και την παραγωγή ηχητικών κυμάτων. Οι βομβητές διαθέτουν δύο ακροδέκτες σύνδεσης και λειτουργούν με τάση συνεχούς ρεύματος (DC). Τα βασικά χαρακτηριστικά τους περιλαμβάνουν τη συχνότητα λειτουργίας, την τάση λειτουργίας και τη στάθμη ήχου, η οποία εκφράζεται σε decibel (dB). Οι περισσότεροι βομβητές λειτουργούν σε συχνότητες μεταξύ 2 kHz και 4 kHz, εύρος στο οποίο το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία [15]. Στο παρακάτω Σχήμα 3.9 απεικονίζεται μια πλακέτα με ένα buzzer.



Σχήμα 3.10: Buzzer

### 3.5.8 Κύκλωμα με κόκκινο LED

Στην κατασκευή τοποθετήθηκε επίσης ένα μικρό κύκλωμα με κόκκινο LED ένδειξης λειτουργίας. Το κύκλωμα σχεδιάστηκε και τυπώθηκε σε φωτοευαίσθητη πλακέτα με την βοήθεια του ίδιου του θαλάμου, ώστε να ελεγχθεί και στην πράξη η αποτελεσματικότητα της κατασκευής. Στη συνέχεια η πλακέτα τρυπήθηκε και πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες κολλήσεις των εξαρτημάτων. Το κύκλωμα είναι απλό και αποτελείται από μια αντίσταση 330Ω, ένα κόκκινο LED και μια μικρή κλέμμη πλακέτας για την σύνδεση του θετικού (+) και του αρνητικού (-) πόλου του κυκλώματος. Στο παρακάτω Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής της πλακέτας του κυκλώματος LED από την αποχάλκωση μέχρι και την τελική της μορφή.



Σχήμα 3.11: Κύκλωμα κόκκινου LED

### 3.5.9 Τροφοδοτικό

Στον θάλαμο χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό κλειστού τύπου με τάση εξόδου 12V και μέγιστο ρεύμα 8A. Η επιλογή του συγκεκριμένου τροφοδοτικού πραγματοποιήθηκε με βάση τις απαιτήσεις κατανάλωσης της ταινίας LED, η οποία απαιτεί περίπου 5A για τη σωστή λειτουργία της στα 12V. Επομένως, το συγκεκριμένο τροφοδοτικό κρίθηκε ιδανικό για την συσκευή, καθώς μπορεί να παρέχει μεγαλύτερο ρεύμα από το απαιτούμενο, εξασφαλίζοντας ασφαλή και σταθερή λειτουργία του συστήματος. Το τροφοδοτικό διαθέτει στρογγυλό βύσμα σύνδεσης και χρησιμοποιήθηκε τόσο για την τροφοδοσία των LED όσο και η τροφοδοσία του Arduino Uno R3. Παρακάτω στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η μορφή ενός τροφοδοτικού.



Σχήμα 3.32: Τροφοδοτικό

### 3.5.10 Διακόπτης ON/OFF

Για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του θαλάμου χρησιμοποιήθηκε διακόπτης ON/OFF υψηλής αντοχής. Ο συγκεκριμένος διακόπτης υποστηρίζει μέγιστη τάση 250V και μέγιστο ρεύμα 10A, χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για την ασφαλή λειτουργία της κατασκευής. Στο παρακάτω Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η μορφή ενός διακόπτη.



Σχήμα 3.43: Διακόπτης

### 3.5.11 Πηγή υπεριώδης ακτινοβολίας

Στον θάλαμο φωτοευαίσθητων πλακετών, για την αποτύπωση του κυκλώματος πάνω στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια, είναι απαραίτητη η έκθεση της πλακέτας σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Παραδοσιακά, τα συστήματα έκθεσης χρησιμοποιούν λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων ή λαμπτήρες φθορισμού UV, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές φωτοχάραξης. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί σημαντικά η χρήση UV LED, τα οποία αποτελούν μία σύγχρονη και πρακτική εναλλακτική λύση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές μεταξύ των UV LED και λαμπτήρων φθορισμού UV, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε η χρήση ταινίας UV LED για την κατασκευή του θαλάμου [8].

Πίνακας 3.1: Διαφορές μεταξύ UV LED και λάμπες φθορισμού UV

UV LED	Λαμπτήρες φθορισμού UV
Εκπέμπουν στενό εύρος μήκους κύματος UV αλλά με υψηλότερη συγκέντρωση και ενέργεια από τους λαμπτήρες φθορισμού UV.	Εκπέμπουν ευρύτερο μήκους κύματος UV αλλά με χαμηλότερη συγκέντρωση και ενέργεια από τους λαμπτήρες φθορισμού UV.
Δεν υπάρχουν πολλές επιλογές στο φάσμα της υπεριώδης ακτινοβολίας. Πιο συνηθες είναι στα (360nm, 380nm, 400nm).	Υπάρχουν πολλαπλές επιλογές και σε μεγαλύτερο εύρος όπως, (254nm, 313nm, 404 nm, 437nm και 546nm)
Χαμηλότερη κατανάλωση (περίπου 12V DC)	Υψηλότερη κατανάλωση (περίπου 110V AC)
Ελαφρύτερα και μικρότερο μέγεθος	Βαρύτερος και μεγαλύτερο μέγεθος
Διάρκεια ζωής έως 50.000 ώρες	Διάρκεια ζωής περίπου 10.000 ώρες

[8]

Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) αποτελούν ευρέως διαδεδομένες ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες βασίζονται σε επαφές ημιαγωγών τύπου p-n και εκπέμπουν φως όταν πολώνονται ορθά. Τα λεπτά στρώματα ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται στα LED επιτρέπουν την εκπομπή φωτός σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Τα LED έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τις παραδοσιακές πηγές φωτισμού λόγω της πολύ υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης, της μεγάλης διάρκειας ζωής και της αυξημένης αντοχής τους. Επιπλέον, λειτουργούν σε χαμηλή τάση και θερμοκρασία, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα σε συγκεκριμένες εφαρμογές [7].

Τα LED μπορούν επίσης να εκπέμπουν στην υπεριώδη περιοχή (UV) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η UV ακτινοβολία παράγεται κυρίως με ημιαγωγών, ενώ το εύρος της εκτείνεται από 100 nm έως 380 nm. Η UV ακτινοβολία διακρίνεται στις κατηγορίες UV-A, UV-B και UV-C, καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως αισθητήρες, σάρωση barcode, αποστείρωση επιφανειών και έλεγχος εγγράφων.

- UV-A (380 –315 nm): Υψηλή απόδοση, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές σκλήρυνση υλικών όπως κόλλες, επιστρώσεις και μελάνια.
- UV-B (315–280 nm): Χρησιμοποιείται σε ιατρικές και γεωγραφικές εφαρμογές. .
- UV-C (200–280 nm): Ιδιαίτερα αποτελεσματική στην εξόντωση βακτηρίων και ιών και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές απολύμανσης νερού, αέρα και επιφανειών.
- Vacuum UV (<200 nm): Απορροφάται από τον αέρα και απαιτεί ειδικές συνθήκες λειτουργίας [7].

Υπάρχουν δυο τύποι LED τεχνολογίας SMD 3528 και SMD 5050. Στην παρούσα κατασκευή χρησιμοποιήθηκε ταινία UV LED τύπου 5050 SMD με μήκος κύματος 395 – 405nm, το οποίο ανήκει στην περιοχή UV – Α και είναι κατάλληλο για την έκθεση φωτοευαίσθητων πλακετών. Η ονομασία 5050 αναφέρεται στις διαστάσεις του κάθε LED, οι οποίες είναι 5.0 mm x 5.0 mm. Τα LED τύπου 5050 περιλαμβάνουν τρεις διόδους φωτισμού σε κάθε στοιχείο και διατίθενται τόσο σε μονόχρωμες όσο και σε πολύχρωμες εκδόσεις (RGB). Κάθε LED καταναλώνει περίπου 0,24Watt και μπορεί να αποδώσει περίπου 12 lumen φωτεινότητας.

Πίνακας 3.2: Διαφορές ανάμεσα στα LED 3528 και LED 5050

LED 3528	LED 5050
1 δίοδος	3 δίοδοι
Μέγεθος 3,5mm X 2,8mm	Μέγεθος 5,0mm X 5,0mm
Το κάθε LED κοντά στο άλλο	Μεγαλύτερη απόσταση το κάθε LED
Κατανάλωση 0,08 Watt κάθε LED	Κατανάλωση 0,24Watt κάθε LED
Παράγει 4 lumen	Παράγει 12 lumen
Φωτισμός μονόχρωμος	Φωτισμός μονόχρωμος ή πολύχρωμος
Φωτεινότητα κάθε LED χαμηλή έως μέτρια	Φωτεινότητα κάθε LED μέτρια έως υψηλή
Κόστος οικονομικό	Κόστος ακριβό

### 3.6 Ακριβής συνδεσμολογία όλων των εξαρτημάτων και τελική λειτουργία θαλάμου

Η βάση όλης της κατασκευής είναι ο μικροελεγκτής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε Arduino Uno, μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο έλεγχος των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων του θαλάμου. Αρχικά συνδέθηκε το πληκτρολόγιο 4 x 4 με το Arduino. Για την σύνδεση του χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 8 ψηφιακά pins και συγκεκριμένα τα pins 2 έως 9. Στην συνέχεια συνδέθηκε η οθόνη LCD με την μονάδα I2C. Η μονάδα I2C διαθέτει τέσσερις ακροδέκτες: GND, VCC, SDA και SCL. Ο ακροδέκτης GND συνδέθηκε σε υποδοχή του Arduino, ενώ ο ακροδέκτης VCC συνδέθηκε στο pin 5V. Οι ακροδέκτες SDA και SCL συνδέθηκαν στα pins A4 και A5 αντίστοιχα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία I2C.

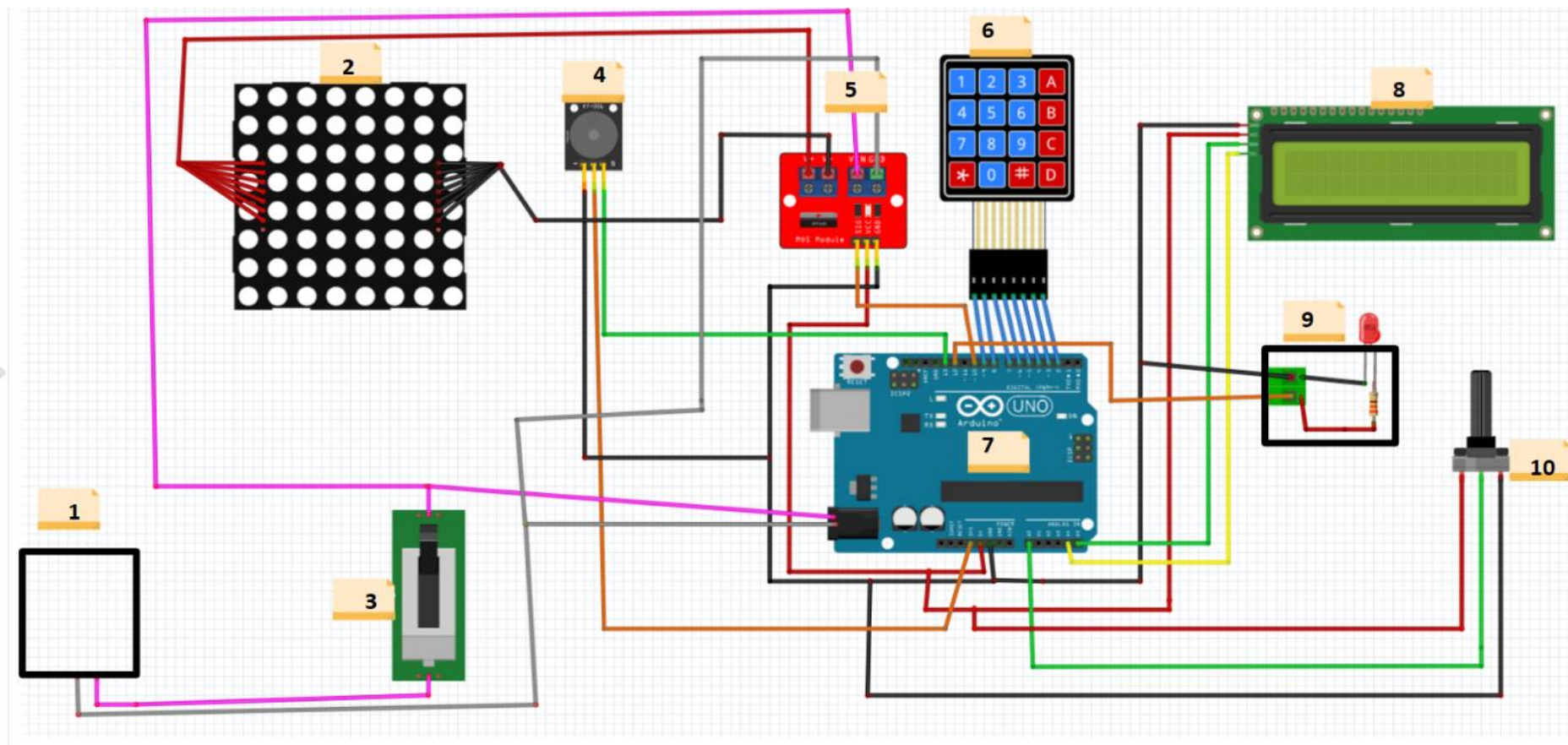
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η σύνδεση του Buzzer, το οποίο διαθέτει τρεις επαφές. Η επαφή VCC συνδέθηκε στο pin 3.3V του Arduino, η επαφή GND στη γείωση, ενώ η επαφή I/O συνδέθηκε στο ψηφιακό pin 10. Το κύκλωμα με το κόκκινο LED διαθέτει δύο επαφές, από τις οποίες η μια συνδέθηκε στα 5V και η άλλη στη γείωση του Arduino. Ακολούθησε η σύνδεση της μονάδας IRF520 MOSFET. Η μονάδα διαθέτει τρεις ακροδέκτες εισόδου για τη σύνδεση με το Arduino: SIG, VCC και GND συνδέθηκαν στα 5V και στην γείωση αντίστοιχα. Επιπλέον, το MOSFET συνδέθηκε με την εξωτερική τροφοδοσία και με την ταινία LED. Συγκεκριμένα, τα καλώδια της τροφοδοσίας συνδέθηκαν στο Vin και στο GND, ενώ οι έξοδοι V+ και V- συνδέθηκε με το θετικό και το αρνητικό καλώδιο της ταινίας LED αντίστοιχα. Το ποτενσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν 5 kΩ και διαθέτει τρεις ακροδέκτες. Ο ένας ακριανός ακροδέκτης συνδέθηκε στα 5V, ο άλλος στη γείωση, ενώ ο μεσαίος ακροδέκτης συνδέθηκε στο αναλογικό pin A0 του Arduino. Μέσω αυτής της σύνδεσης δίνεται η δυνατότητα

ρύθμισης της έντασης φωτισμού των UV LED. Τέλος, συνδέθηκε ο διακόπτης ON/OFF, ο οποίος τοποθετήθηκε αμέσως μετά το βύσμα τροφοδοσίας. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η παροχή ρεύματος προς το Arduino και την ταινία LED. Η συνολική συνδεσμολογία της κατασκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13 το κύκλωμα το οποίο σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος fritzing.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, η λειτουργία του θαλάμου πραγματοποιείται με συγκεκριμένη διαδικασία. Αρχικά, όταν ο διακόπτης τοποθετηθεί στη θέση ON, ενεργοποιείται η οθόνη LCD, η ταινία LED και το κόκκινο LED ένδειξης λειτουργίας. Στην οθόνη εμφανίζεται αρχικά το μήνυμα “HELLO” και στη συνέχεια στην πάνω γραμμή της οθόνης το μήνυμα “Set Brightness” ενώ στην κάτω γραμμή “Brightness:”. Σε αυτό το στάδιο ο χρήστης, περιστρέφοντας το ποτενσιόμετρο, επιλέγει την επιθυμητή ένταση φωτισμού των LED και εμφανίζεται στην δεύτερη γραμμή της LCD οθόνης. Αφού επιλεγεί το κατάλληλο ποσοστό έντασης, ο χρήστης πατά το πλήκτρο “\*” για επιβεβαίωση.

Αμέσως μετά εμφανίζεται στην οθόνη το μήνυμα “Enter minutes”, ώστε ο χρήστης να εισάγει τον επιθυμητό χρόνο έκθεσης ο οποίος εμφανίζεται στην δεύτερη γραμμή της οθόνης. Μετά την πληκτρολόγηση του χρόνου και την επιβεβαίωση με το πλήκτρο “\*”, ξεκινά η αντίστροφη μέτρηση. Κατά το πάτημα κάθε πλήκτρου ακούγεται ένας σύντομος ήχος από το buzzer, ώστε ο χρήστης να επιβεβαιώνει ότι η εντολή έχει καταχωρηθεί. Κατά τη διάρκεια της αντίστροφης μέτρησης, το κόκκινο LED αναβοσβήνει, λειτουργώντας ως ένδειξη ότι η διαδικασία βρίσκεται σε εξέλιξη.

Όταν ολοκληρωθεί η αντίστροφη μέτρηση, τα UV LED απενεργοποιούνται αυτόματα, το κόκκινο LED σβήνει και ακούγεται επαναλαμβανόμενος ήχος από το buzzer, ο οποίος ενημερώνει τον χρήστη ότι η διαδικασία έκθεσης έχει ολοκληρωθεί. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα επαναφοράς της διαδικασίας. Μετά την ολοκλήρωση της αντίστροφης μέτρησης ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο της διαδικασίας, ο χρήστης μπορεί να πατήσει το πλήκτρο “#”, ώστε να επιστρέψει στο αρχικό στάδιο επιλογών και να πραγματοποιήσει νέα αποτύπωση. Στο παρακάτω Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η τελική μορφή του Θαλάμου για τύπωση φωτοευαίσθητων πλακετών.



- |                |                         |
|----------------|-------------------------|
| 1- Τροφοδοτικό | 6- Πληκτρολόγιο         |
| 2- Ταινία LED  | 7- Arduino Uno R3       |
| 3- Διακόπτης   | 8- LCD Οθόνη            |
| 4- Buzzer      | 9- Κύκλωμα κόκκινου LED |
| 5- MOSFET      | 10- Ποτενσιόμετρο       |

Σχήμα 3.5: Ρεαλιστικό Κύκλωμα του εσωτερικού του θαλάμου



Σχήμα 3.6: Τελική μορφή θαλάμου

### 3.7 Επίλογος

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής ενός θαλάμου έκθεσης φωτοευαίσθητων πλακετών, από την αρχική ιδέα ως και την ολοκλήρωση της τελικής κατασκευής. Δόθηκε έμφαση στα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου του θαλάμου. Αρχικά περιγράφηκαν οι βασικές επιλογές που αφορούσαν τη μορφή και τα υλικά του θαλάμου, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε η ξύλινη κατασκευή με το καπάκι. Η επιλογή αυτή κρίθηκε κατάλληλη, καθώς προσέφερε αντοχή, σταθερότητα και δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες του συστήματος.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα ηλεκτρονικά μέρη της κατασκευής και στον τρόπο με τον οποίο αυτά συνεργάζονται μεταξύ τους. Με τη χρήση του μικροελεγκτή Arduino Uno R3 αυτοματοποιήθηκαν βασικές λειτουργίες του θαλάμου, όπως η ρύθμιση του χρόνου έκθεσης, η εμφάνιση πληροφοριών στην οθόνη LCD, ο έλεγχος της έντασης φωτισμού των UV LED. Με τον τρόπο αυτό, ο θάλαμος απέκτησε πιο πρακτική και ελεγχόμενη λειτουργία.

Παράλληλα, η επιλογή της ταινίας UV LED αποδείχθηκε κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς προσφέρει χαμηλή κατανάλωση, εύκολη τοποθέτηση και επαρκή ένταση φωτισμού για την έκθεση των φωτοευαίσθητων πλακετών. Επιπλέον, η χρήση εξαρτημάτων όπως το MOSFET, το ποτενσιόμετρο, το πληκτρολόγιο και η οθόνη LCD συνέβαλαν στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου.

Σημαντικό στοιχείο της κατασκευής αποτέλεσε και η δημιουργία λειτουργικής πλακέτας με το κόκκινο LED, η οποία τυπώθηκε με τη χρήση του ίδιου του θαλάμου και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στην κατασκευή. Η διαδικασία αυτή ανέδειξε τον βασικό στόχο της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή την κατασκευή ενός θαλάμου ικανού να χρησιμοποιηθεί για την αποτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε φωτοευαίσθητες πλακέτες.

### Κεφάλαιο 3

Συνολικά, η κατασκευή του θαλάμου αποτέλεσε ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα εφαρμογής ηλεκτρονικών, προγραμματισμού και πρακτικής κατασκευής. Η επιτυχής συναρμολόγηση και λειτουργία του συστήματος αποτέλεσε η βάση για την επόμενη φάση της εργασίας, η οποία αφορά την πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης του θαλάμου και τον προσδιορισμό των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας.

## Κεφάλαιο 4ο: Πειραματική Διαδικασία και Αρχικά Πειράματα

### 4.1 Εισαγωγή

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής απαραίτητο ήταν να πραγματοποιηθούν κάποια πειράματα για να ελεγχθεί η ποιότητα και η αποτελεσματικότητα του θαλάμου. Το πιο σημαντικό σημείο όλης της εργασίας ήταν η επιτυχής έκβαση των πειραμάτων. Μέσω των πειραμάτων επιδιώκεται να εξεταστεί κατά πόσο ο θάλαμος μπορεί να αποτυπώσει με ακρίβεια ηλεκτρονικά σχέδια σε φωτοευαίσθητες πλακέτες. Σκοπός των πειραμάτων ήταν να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του θαλάμου μέσω της δημιουργίας ενός μικρού κυκλώματος, το οποίο τοποθετήθηκε για χρήση μέσα στον ίδιο τον θάλαμο. Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα αποσκοπούν στον έλεγχο της ποιότητας αποτύπωσης απλών και σύνθετων κυκλωμάτων.

Ο λόγος ο οποίος είναι σημαντικό να γίνουν τα πειράματα εκτός από την αποτελεσματικότητα του θαλάμου είναι και το να βρεθεί η σωστή λειτουργία του. Δηλαδή τα ποια υλικά είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση του κυκλώματος το οποίο θα τυπωθεί πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα. Ακόμα είναι απαραίτητο να βρεθούν κάποιες βασικές παράμετροι, όπως ο χρόνος έκθεσης και η ένταση του φωτισμού. Ύστερα από την έκθεση της πλακέτας στην υπεριώδη ακτινοβολία ήταν απαραίτητο να βρεθούν οι σωστές αναλογίες των χημικών, καθώς και οι ποσότητες του καθενός για την αποτελεσματικότερη εκτύπωση του κυκλώματος πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα.

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων θα είναι σημαντικό να ελεγχθεί η ποιότητα των εκτυπώσεων το πόσο καθαρό είναι το κύκλωμα πάνω σε αυτήν. Επίσης αν έχει γίνει σωστά η αποχάλκωση του κυκλώματος το πόσο αποτελεσματικές και λειτουργικές είναι οι συνδέσεις των στοιχείων πάνω στην πλακέτα. Τέλος για επιβεβαίωση της λειτουργίας θα πρέπει να φτιαχτεί κάποιο κύκλωμα. Πρώτα να εμφανιστεί το κύκλωμα πάνω στην πλακέτα μετά να γίνει η αποχάλκωση έπειτα να γίνει η τρυπήση και η κόλληση των στοιχείων του κυκλώματος.

Για να επιτευχθεί ο βασικός στόχος της διπλωματικής είναι να δημιουργηθεί μέσα από την ίδια την κατασκευή ένα λειτουργικό κύκλωμα. Σαν μετέπειτα στόχος είναι να εξεταστούν συμπεράσματα σχετικά με τις κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας του θαλάμου, ώστε να επιτυγχάνονται τα βέλτιστα αποτελέσματα κατά την αποτύπωση των κυκλωμάτων και να είναι εφικτό να φτιαχτούν και πιο περίπλοκα κυκλώματα μέσα από τον θάλαμο.

### 4.2 Υλικά και Εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ήταν απαραίτητη η επιλογή των κατάλληλων υλικών και του αντίστοιχου εξοπλισμού. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία ήταν ο τύπος της φωτοευαίσθητης πλακέτας που θα χρησιμοποιούνταν. Υπάρχουν διαφορετικά είδη φωτοευαίσθητων πλακετών, όπως πλακέτες μονής-όψης και διπλής-όψης. Στην πρώτη περίπτωση, το φωτοευαίσθητο υλικό υπάρχει μόνο στη μια πλευρά της πλακέτας, ενώ στην δεύτερη υπάρχει και στις δύο πλευρές, επιτρέποντας τη δημιουργία κυκλώματος και στις δυο όψεις. Επιπλέον, οι φωτοευαίσθητες πλακέτες διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και πάχη. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε φωτοευαίσθητη πλακέτα μονής όψης, πάχους 1.5 mm και διαστάσεων 100 mm x 160mm.

Η σχεδίαση των κυκλωμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος KiCad. Για την εμφάνιση του κυκλώματος πάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό ήταν απαραίτητη η εκτύπωση του σχεδίου σε διαφανές φύλλο A4, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί σωστά η έκθεση της πλακέτας στην

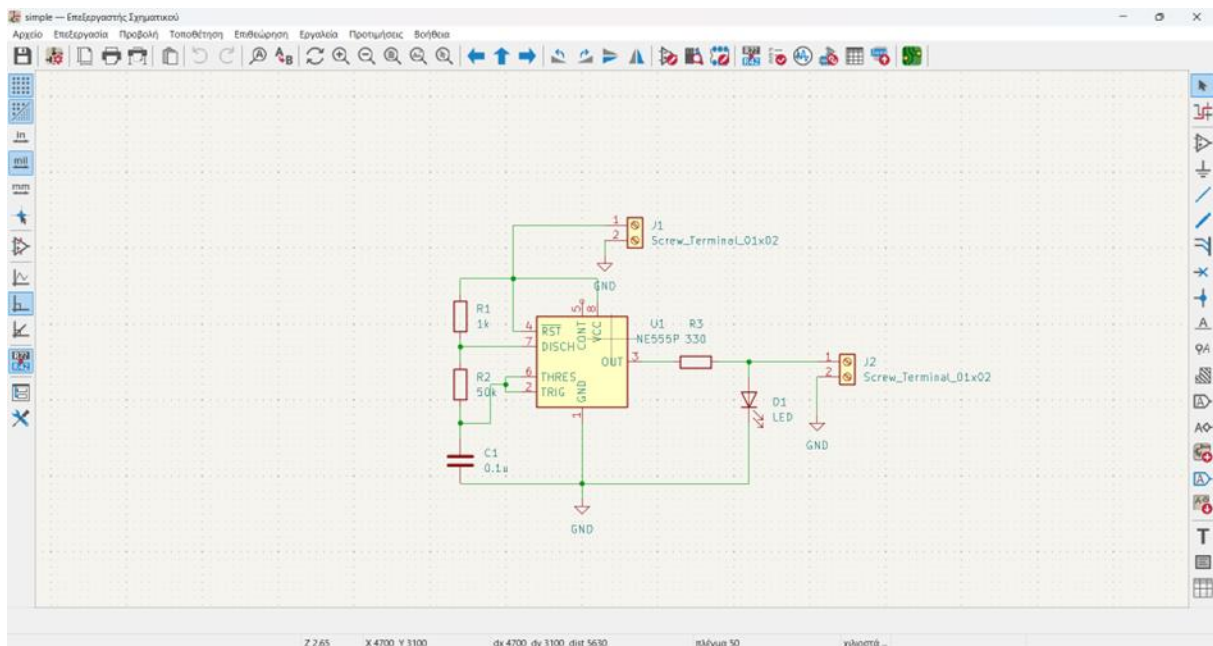
υπεριώδη ακτινοβολία. Απαραίτητος για την υλοποίηση των πειραμάτων ήταν ο θάλαμος έκθεσης με UV LED μήκους κύματος 395-405nm. Ο θάλαμος περιλαμβάνει σύστημα ελέγχου με Arduino Uno R3, οθόνη LCD, πληκτρολόγιο και ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της έντασης του φωτισμού.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής της πλακέτας χρησιμοποιήθηκαν επίσης χημικά υλικά, όπως καυστική σόδα (NaOH), υδροχλωρικό οξύ 6%(HCl), υδροξείδιο του υδρογόνου(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) και ασετόν(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία όπως κοπίδι και κοφτάκι για την κοπή της πλακέτας στο κατάλληλο μέγεθος, τρυπάνι για τη διάνοιξη οπών, καθώς και κολλητήρι με καλάι για τη συγκόλληση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και την επαλήθευση της λειτουργίας των κυκλωμάτων.

### 4.3 Μεθοδολογία

Το πρώτο βήμα για την δημιουργία ενός κυκλώματος πάνω σε μια φωτοευαίσθητη πλακέτα είναι η σχεδίαση του μέσω κατάλληλου λογισμικού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα KiCad. Αρχικά δημιουργήθηκε το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση της πλακέτας PCB.

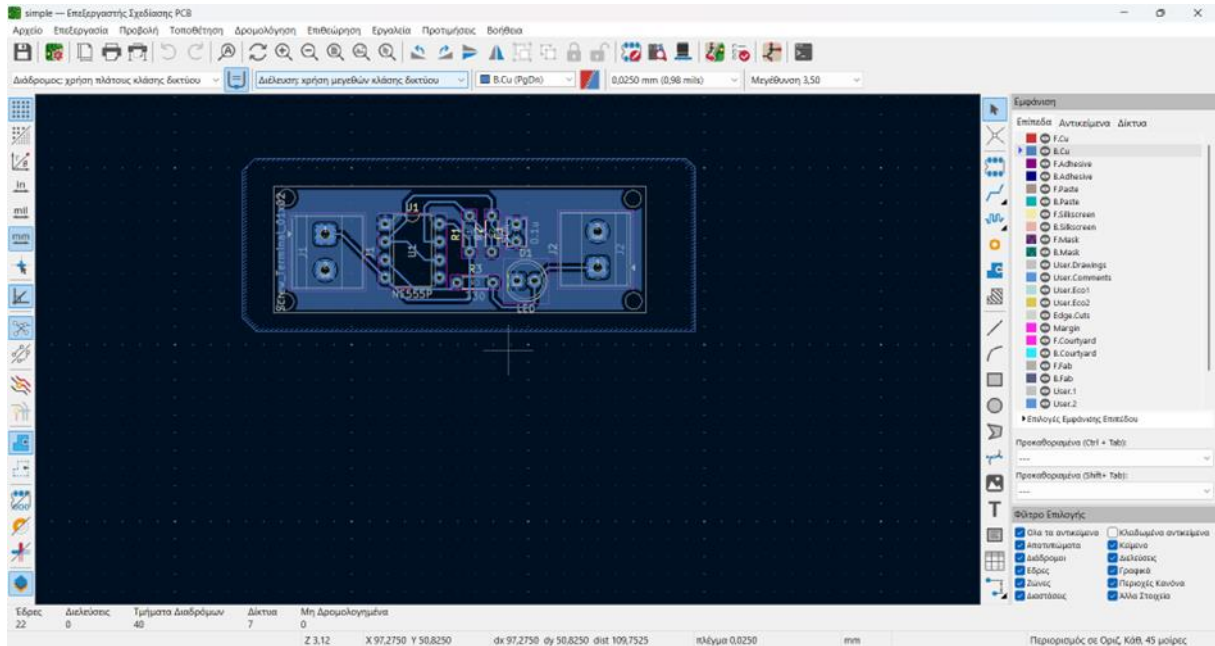
Στο παρακάτω Σχήμα 4.1 φαίνεται ένα κύκλωμα με το ολοκληρωμένο NE555, το οποίο περιλαμβάνει τρεις αντιστάσεις, ένας πυκνωτής, μια φωτεινή δίοδος (LED) και δυο διπλές κλέμες καλωδίων. Στο σχηματικό διάγραμμα υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των επιμέρους εξαρτημάτων και ορισμού τιμών τους. Επιπλέον, το πρόγραμμα επιτρέπει την τροποποίηση χαρακτηριστικών των στοιχείων, όπως το μέγεθος, το σχήμα και η ονομασία του. Τέλος υπάρχουν πολλές δυνατότητες από τις μπάρες του προγράμματος στο πάνω, στο δεξιά και στο αριστερά μέρος του.



Σχήμα 4.1: Κύκλωμα στο σχηματικό του προγράμματος KiCad

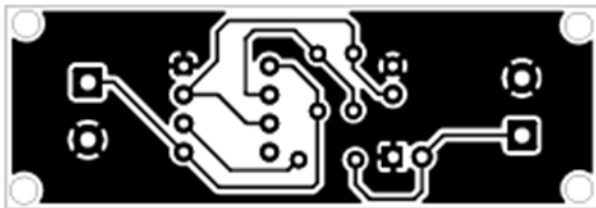
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το αποτύπωμα του κυκλώματος, δηλαδή η σχεδίαση της πλακέτας PCB. Η πλακέτα μπορεί να σχεδιαστεί σε διάφορα σχήματα, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής χώρος για τη σωστή τοποθέτηση των εξαρτημάτων και τη δημιουργία των αγωγίμων διαδρομών. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα επιλογής του πάχους κάθε αγωγίμης διαδρομής, καθώς και του μεγέθους κάθε

επαφής. Όπως και στο σχηματικό διάγραμμα, έτσι και στη σχεδίαση PCB, το πρόγραμμα παρέχει πολλές δυνατότητες επεξεργασίας μέσω των διαθέσιμων εργαλείων του.



Σχήμα 4.2: Σχεδίαση PCB στο πρόγραμμα KiCad

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης του PCB στο KiCad, το κύκλωμα αποθηκεύτηκε σε αρχείο PDF. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εκτύπωση του σε ειδικό διαφανές φύλλο A4, ώστε το φως των UV LED να μπορεί να περάσει από τα κατάλληλα σημεία και να σχηματίσει το κύκλωμα πάνω στη φωτοευαίσθητη πλακέτα. Στο παρακάτω Σχήμα 4.3 αναπαρίσταται το κύκλωμα πάνω στο διαφανές φύλλο A4.

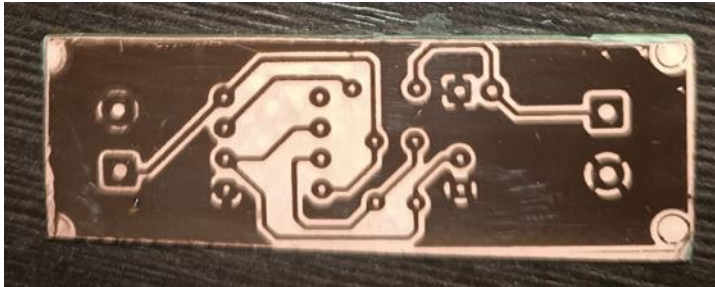


Σχήμα 4.3: Κύκλωμα πάνω σε διαφανές φύλλο A4

Μετά την εκτύπωση του κυκλώματος ακολούθησε η κοπή της φωτοευαίσθητης πλακέτας στο επιθυμητό μέγεθος, με την βοήθεια κοπιδιού. Η κοπή έπρεπε να γίνει με ακρίβεια, ώστε η πλακέτα να αντιστοιχεί στο ακριβές μέγεθος της εκτύπωσης. Στην συνέχεια, η εκτύπωση τοποθετήθηκε πάνω στο γυαλί του θαλάμου. Αφαιρέθηκε το προστατευτικό από την φωτοευαίσθητη πλακέτα και με όσο το δυνατόν μικρότερη έκθεση στο φως, η πλακέτα τοποθετήθηκε πάνω από την εκτύπωση και ευθυγραμμίστηκε προσεκτικά. Έπειτα, τοποθετήθηκε ένα δεύτερο κομμάτι γυαλιού πάνω από τη φωτοευαίσθητη πλακέτα, ώστε να διατηρηθεί σταθερή η θέση της κατά την έκθεση.

Στην συνέχεια μόλις κλείσει το καπάκι της κατασκευής και ο διακόπτης του θαλάμου τοποθετείται στην θέση ON. Ο χρήστης επιλέγει την ένταση του φωτισμού μέσω του ποτενσιόμετρου και αμέσως μετά ρυθμίζει τον χρόνο έκθεσης. Με την έναρξη της διαδικασίας ξεκινάει η αντίστροφη μέτρηση και μόλις ολοκληρωθεί ο χρόνος, ο θάλαμος απενεργοποιεί αυτόματα τα UV LED.

Μετά την έκθεση της φωτοευαίσθητης πλακέτας ακολουθήσε η χημική διαδικασία εμφάνισης του κυκλώματος. Αρχικά, η πλακέτα αφαιρέθηκε προσεκτικά από τον θάλαμο, αποφεύγοντας όσο το δυνατόν περισσότερο την επιπλέον έκθεση της στο φως. Σε πλαστικό μπουκάλι μισού λίτρου, γεμάτο με νερό, διαλύθηκε συγκεκριμένη ποσότητα καυστικής σόδας, η οποία κυμάνθηκε από 2 έως 20 γρ, ανάλογα με το πείραμα. Το διάλυμα αναδεύτηκε με απαλές κινήσεις μέχρι να διαλυθεί πλήρως η καυστική σόδα. Κατά τη διαδικασία αυτή παρατηρείται συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος. Αφού το διάλυμα ομογενοποιήθηκε, μεταφέρθηκε σε πλαστικό δοχείο και μέσα σε αυτό τοποθετήθηκε η πλακέτα. Μέσα στα επόμενα λεπτά, ανάλογα με τη δραστηριότητα του διαλύματος, άρχισε να εμφανίζεται η αποτύπωση του κυκλώματος. Στο παρακάτω Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η φωτοευαίσθητη πλακέτα μετά από την αφαίρεση της από το χημικό διάλυμα της εμφάνισης.



Σχήμα 4.4 Εμφάνιση κυκλώματος πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα

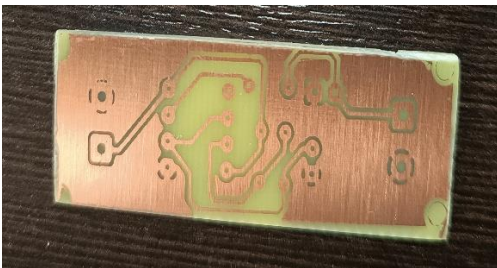
Μετά την εμφάνιση του κυκλώματος, η φωτοευαίσθητη πλακέτα πλύθηκε καλά με νερό και σκουπίστηκε προσεκτικά με χαρτί, ώστε να μην τραυματιστεί η επιφάνεια της. Αφού στέγνωσε, προετοιμάστηκε το διάλυμα της αποχάλκωσης. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα χημικά που χρησιμοποιούνται είναι δραστικά και επικίνδυνα. Για τον λόγο αυτό, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας είναι απαραίτητη η χρήση προστατευτικών γαντιών και γυαλιών, καθώς και η ύπαρξη καλού αερισμού στον χώρο.

Για την αποχάλκωση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 6% (κεζάπ) και υπεροξείδιο του υδρογόνου. Τα δύο χημικά τοποθετήθηκαν σε πλαστικό δοχείο και αναμείχθηκαν προσεκτικά. Η διαδικασία της αποχάλκωσης απαιτεί περισσότερο χρόνο σε σχέση με την εμφάνιση και για τον λόγο αυτό το διάλυμα ανακινούνταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Καθώς περνούσε ο χρόνος, το διάλυμα άλλαζε χρώμα και η αποχάλκωση προχώρουσε σταδιακά από τα εξωτερικά σημεία προς το εσωτερικό της πλακέτας. Στο παρακάτω Σχήμα 4.5 απεικονίζεται η διαδικασία της αποχάλκωσης μέσα στο χημικό διάλυμα.



Σχήμα 4.5: Διαδικασία αποχάλκωσης μέσα στο χημικό διάλυμα

Όταν ολοκληρώθηκε η αποχάλκωση, η πλακέτα πλύθηκε ξανά με νερό. Στην συνέχεια, τα υπολείμματα του φωτοευαίσθητου υλικού αφαιρέθηκαν με τη χρήση χαρτιού και μικρής ποσότητας ασετόν. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε έλεγχος αγωγιμότητας των διαδρομών με τη βοήθεια πολυμέτρου. Ακολούθησε το τρύπημα της πλακέτας στα απαραίτητα σημεία, με προσοχή ώστε να μην καταστραφούν οι αγωγίμες διαδρομές. Το τελευταίο στάδιο ήταν η συγκόλληση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα, με τη χρήση κολλητηριού και καλάνι. Η τελική μορφή της πλακέτας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10 του προηγούμενου κεφαλαίου. Στο Σχήμα 4.6 το οποίο βρίσκεται παρακάτω αναπαρίσταται η τελική μορφή της φωτοευαίσθητης πλακέτας μετά από την αποχάλκωση.



Σχήμα 4.6: Φωτοευαίσθητη πλακέτα μετά την αποχάλκωση

#### 4.4 Περιγραφή Πειραμάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας και της απόδοσης του θαλάμου έκθεσης φωτοευαίσθητων πλακετών. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν από απλές γραμμές μέχρι και πιο περίπλοκα κυκλώματα. Μέσω των πειραμάτων εξετάζεται η ακρίβεια αποτύπωσης, η ποιότητα των αγωγίμων διαδρομών, καθώς και η δυνατότητα κατασκευής λειτουργικών πλακετών. Παράλληλα, αξιολογείται η επίδραση βασικών παραμέτρων, όπως ο χρόνος έκθεσης, η ένταση του φωτισμού και οι ποσότητες των χημικών που χρησιμοποιήθηκαν, στο τελικό αποτέλεσμα. Κάθε πείραμα παρουσιάζεται ξεχωριστά, με αναφορά στον σκοπό του, στις συνθήκες διεξαγωγής του, καθώς και στα αποτελέσματα που προέκυψαν. Για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκε πολλαπλές φορές.

##### 4.4.1 Κύκλωμα με Arduino

Σκοπός του παρόντος πειράματος ήταν η αρχική αξιολόγηση της λειτουργίας του θαλάμου έκθεσης μέσω της αποτύπωσης ενός απλού ηλεκτρονικού κυκλώματος σε φωτοευαίσθητη πλακέτα, πριν την πλήρη ολοκλήρωση της κατασκευής. Ωστόσο το πείραμα πραγματοποιήθηκε υπό μη ιδανικές συνθήκες, καθώς δεν είχε τοποθετηθεί στο θάλαμο η γυάλινη επιφάνεια. Για αυτόν τον λόγο η φωτοευαίσθητη

## Κεφάλαιο 4

επιφάνεια και η εκτύπωση του κυκλώματος κολλήθηκαν στο καπάκι της κατασκευής για να εκτεθεί η φωτοευαίσθητη επιφάνεια στην υπεριώδη ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα το κύκλωμα να μην εμφανιστεί σωστά και να μην γίνει σωστά η αποχάλκωση του.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Arduino Uno
- LED
- Αντιστάσεις

Συνθήκες πειράματος:

- Χρόνος έκθεσης: 3 λεπτά
- Ένταση φωτισμού: 100%
- Ποσότητα καυστικής σόδας: 3γρ.
- Χρόνος εμφάνισης: 5 λεπτά
- Ποσότητα Υδροχλωρικού οξέος και Υπεροξειδίου του Υδρογόνου: 50γρ. και 2.5γρ.
- Χρόνος αποχάλκωσης : περίπου 60 λεπτά
- Επαναλήψεις πειράματος: 1 φορές
- Μέγεθος πλακέτας: 61mm X 58mm
- Έκβαση πειράματος: Απέτυχε

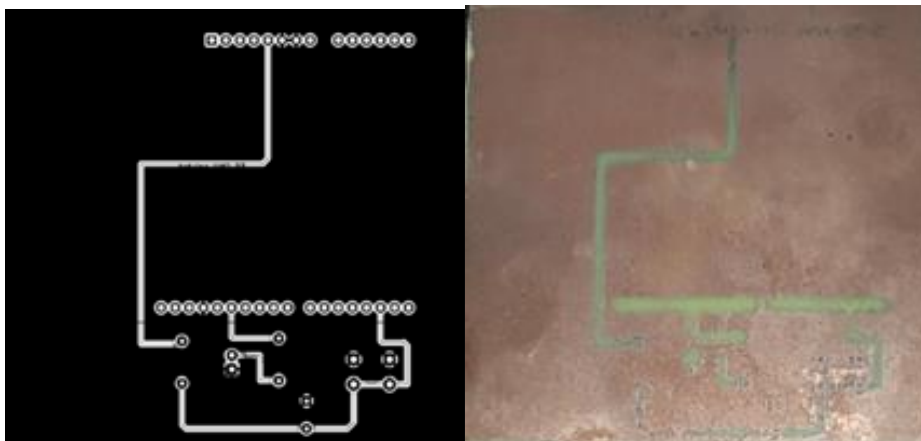
Αποτελέσματα:

Λόγω της λανθασμένης τοποθέτησης της πλακέτας και της εκτύπωσης η εμφάνιση του κυκλώματος δεν ήταν ικανοποιητική. Ως αποτέλεσμα, η αποχάλκωση δεν πραγματοποιήθηκε σωστά. Οι αγώγιμες διαδρομές και τα στοιχεία του κυκλώματος σε κάποια σημεία δεν εμφανίστηκαν καθόλου.

Παρατηρήσεις:

Το συγκεκριμένο κύκλωμα δεν επαναλήφθηκε πολλές φορές, κυρίως λόγω του μεγάλου του μεγέθους της πλακέτας. Επιπλέον, οι ποσότητες των χημικών που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν κατάλληλες, γεγονός που επηρέασε αρνητικά το τελικό αποτέλεσμα.

Στο Παρακάτω Σχήμα 4.7 παρατηρείται στην αριστερή μεριά του η μάσκα που χρησιμοποιήθηκε για την τύπωση του κυκλώματος πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα και στην δεξιά πλευρά την τελική μορφή της πλακέτας μετά από την αποχάλκωση.



Σχήμα 4.7: Κύκλωμα Arduino πριν και μετά από την αποχάλκωση

#### 4.4.2 Κύκλωμα LED

Σκοπός του πειράματος ήταν η κατασκευή ενός απλού ηλεκτρονικού κυκλώματος για την τροφοδοσία ενός κόκκινου LED, το οποίο χρησιμοποιείται ως ένδειξη λειτουργίας του θαλάμου. Μέσω του πειράματος αυτού αξιολογήθηκε η δυνατότητα του θαλάμου να αποτυπώνει απλά αλλά λειτουργικά κυκλώματα με μικρό αριθμό στοιχείων.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Ένα κόκκινο LED
- Μια αντίσταση (330Ω)
- Ακροδέκτες τροφοδοσίας

Συνθήκες πειραμάτων :

- Χρόνος έκθεσης: 3 - 30 λεπτά
- Ένταση φωτισμού: 25% - 100%
- Ποσότητα καυστικής σόδας: 4-8 γρ.
- Χρόνος εμφάνισης: 5 λεπτά
- Ποσότητα Υδροχλωρικού οξέος και Υπεροξειδίου του Υδρογόνου: 50 -120 γρ. και 2.5 -5γρ.
- Χρόνος αποχάλκωσης : περίπου 3 -120 λεπτά
- Επαναλήψεις πειράματος: 17 φορές
- Μέγεθος πλακέτας: 18mm X 20mm
- Έκβαση πειράματος: Επέτυχε

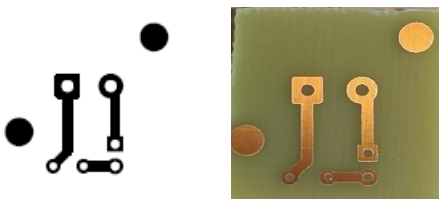
Αποτελέσματα:

Στις 10 από τις 17 επαναλήψεις το κυκλώματα αποτυπώθηκαν με επιτυχία. Οι αγωγίμες διαδρομές ήταν καθαρές και συνεχείς, χωρίς εμφανείς αστοχίες στις επιτυχημένες επαναλήψεις. Μετά την αποχάλκωση και την συγκόλληση των εξαρτημάτων, το LED λειτούργησε κανονικά, επιβεβαιώνοντας την ορθή κατασκευή της πλακέτας.

Παρατηρήσεις:

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε πολλές φορές, ώστε να προσδιοριστούν οι συνθήκες που πλησιάζουν πιο κοντά στις ιδανικές. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα το τοποθετήθηκαν αγωγίμες επιφάνειες με μεγαλύτερο πάχος από ότι στο προηγούμενο πείραμα. Επιπλέον, το κύκλωμα σχεδιάστηκε με αντίστροφη λογική σε σχέση με τα υπόλοιπα, δηλαδή η έκθεση της πλακέτας πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμείνουν μόνο οι αγωγίμες διαδρομές.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται στην αριστερή πλευρά του το κύκλωμα πριν την αποχάλκωση και στην δεξιά πλευρά το κύκλωμα μετά την αποχάλκωση.



Σχήμα 4.8: Κύκλωμα LED πριν και μετά από την αποχάλκωση

#### 4.4.3 Πλακέτα με απλές γραμμές

Σκοπός του πειράματος με τις γραμμές ήταν για να επιβεβαιωθεί η ευαισθησία του θαλάμου και η δυνατότητα του να αποτυπώσει λεπτομέρειες. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκε και τυπώθηκαν γραμμές διαφορετικού πάχους. Επιπλέον τυπώθηκαν και γραμμές με διάφορες κλίσεις, ώστε να διαπιστωθεί αν η μορφή των συνδέσεων επηρεάζει την ποιότητα της αποτύπωσης.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Γραμμές ευθείες πάχους: 0,2mm, 0,4mm, 0,6mm, 0,8mm, 1mm, 1,2mm και 1,5mm
- Γραμμές με κλίση πάχους: 0,2mm, 0,4mm, 0,6mm, 0,8mm, 1mm, 1,2mm και 1,5mm

Συνθήκες πειράματος:

- Χρόνος έκθεσης: 3 - 4 λεπτά
- Ένταση φωτισμού: 100%
- Ποσότητα καυστικής σόδας: 5-20 γρ.
- Χρόνος εμφάνισης: 10 δευτερόλεπτα – 3 λεπτά
- Ποσότητα Υδροχλωρικού οξέος και Υπεροξειδίου του Υδρογόνου: 50 - 80 γρ. και 3-5γρ.
- Χρόνος αποχάλκωσης : περίπου 4 -10 λεπτά
- Επαναλήψεις πειράματος: 5 φορές
- Μέγεθος πλακέτας: 18mm X 55mm
- Έκβαση πειράματος: Επέτυχε

Αποτελέσματα:

Στις 3 από τις 5 επαναλήψεις, το κύκλωμα αποτυπώθηκε με επιτυχία. Οι αγωγιμες διαδρομές ήταν καθαρές και συνεχείς, χωρίς εμφανείς αστοχίες στις επιτυχημένες επαναλήψεις.

Παρατηρήσεις:

Στα συγκεκριμένα πειράματα ελέγχθηκε η μέγιστη ποσότητας καυστικής σόδας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εμφάνιση του κυκλώματος πάνω στη φωτοευαίσθητη πλακέτα, χωρίς να προκληθεί αλλοίωση του σχεδίου.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η πλακέτα με τις απλές γραμμές στα αριστερά και στα δεξιά είναι το ίδιο κύκλωμα μετά από την αποχάλκωση



Σχήμα 4.9: Κύκλωμα με απλές γραμμές πριν και μετά από την αποχάλκωση

#### 4.4.4 Πλακέτα με κυκλικές συνδέσεις

Σκοπός του πειράματος με κυκλικές συνδέσεις είναι παρόμοιος με το πείραμα με τις γραμμές έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου στην ευαισθησία του φωτοευαίσθητου θαλάμου στην κυκλικές συνδέσεις. Στην προκειμένη περίπτωση εξετάζετε η ικανότητα του θαλάμου να ανιχνεύει διαμέτρους και πάχη περιμέτρου σε κυκλικές συνδέσεις, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η ακρίβεια του θαλάμου. Επιπλέον, λόγω του μικρού μεγέθους των κυκλικών συνδέσεων, δίνεται η δυνατότητα πειραματισμού

με αποχάλκωση μεγαλύτερης σε διαστάσεις πλακέτας, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς της απαιτεί να αποχάλκωθεί.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Κυκλικές επαφές διαμέτρου: 1mm, 1,2mm, 1,4mm, 1,6mm, 2mm, 2,4mm, 3mm, και 3,5mm
- Αντιστάσεις συνδεδεμένες μεταξύ τους ανά δύο

Συνθήκες πειράματος:

- Χρόνος έκθεσης: 4 - 20 λεπτά
- Ένταση φωτισμού: 40% - 100%
- Ποσότητα καυστικής σόδας: 2-8 γρ.
- Χρόνος εμφάνισης: 2 -20 λεπτά
- Ποσότητα Υδροχλωρικού οξέος και Υπεροξειδίου του Υδρογόνου: 50 -100 γρ. και 5 - 10 γρ.
- Χρόνος αποχάλκωσης : περίπου 4 - 40 λεπτά
- Επαναλήψεις πειράματος: 8 φορές
- Μέγεθος πλακέτας: 33mm X 65mm
- Έκβαση πειράματος: Επέτυχε

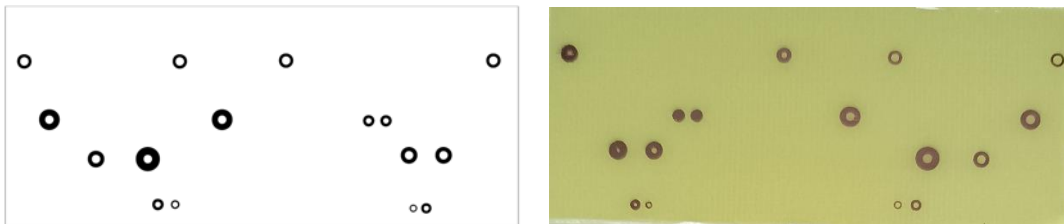
Αποτελέσματα:

Στις 2 από τις 8 επαναλήψεις το κύκλωμα αποτυπώθηκαν με επιτυχία. Στις επιτυχημένες περιπτώσεις οι αγωγίμες διαδρομές ήταν καθαρές και συνεχείς, χωρίς εμφανείς αστοχίες.

Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο πείραμα τοποθετήθηκαν διαφορετικές ποσότητες υδροχλωρικού οξέος και Υπεροξειδίου του υδρογόνου έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι σωστές συνθήκες χημικών για την αποχάλκωση. Το πείραμα αυτό ήταν από τα πιο απαιτητικά, καθώς οι κυκλικές επαφές απαιτούσαν μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την εμφάνιση και την αποχάλκωση, για αυτόν τον λόγο στο συγκεκριμένο πείραμα υπήρχαν λιγότερα θετικά αποτελέσματα.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται στην αριστερή του πλευρά η πλακέτα πριν την αποχάλκωση και στην δεξιά μετά από την αποχάλκωση.



Σχήμα 4.10 Κύκλωμα με κυκλικές συνδέσεις πριν και μετά από την αποχάλκωση

#### 4.4.5 Πλακέτα με γραμμές και κυκλικές συνδέσεις

Σκοπός του πειράματος με τις γραμμές και τις κυκλικές συνδέσεις είναι η εύρεση των διαθέσιμων επιλογών σχεδίασης, καθώς και η καταλληλότητα τους στην τύπωση σε κυκλώματα. Συγκεκριμένα μελετώνται γραμμές διαφορετικού πάχους οι οποίες συνδέονται με κυκλικές επαφές διαφορετικών διαμετρών. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να δούμε την ακρίβεια του θαλάμου. Επίσης από την

## Κεφάλαιο 4

παρατήρηση των αποτελεσμάτων μπορεί να διαπιστωθεί ποιοι συνδυασμοί είναι κατάλληλοι και τυπώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα συμπεράσματα από αυτά τα πειράματα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμα για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού για μελλοντικές εκτυπώσεις ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Γραμμές ευθείες πάχους: 0,2mm, 0,4mm, 0,6mm και 0,8mm
- Κυκλικές επαφές διαμέτρου: 1mm, 1,2mm, 1,4mm, 1,6mm, 2mm, 2,4mm, 3mm, και 3,5mm
- Αντιστάσεις συνδεδεμένες μεταξύ τους ανά δύο

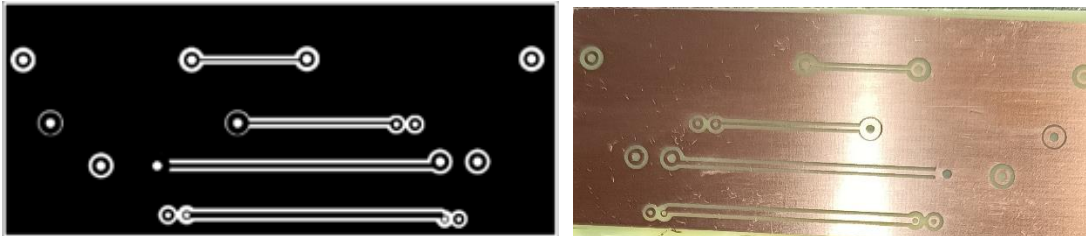
Συνθήκες πειράματος:

- Χρόνος έκθεσης: 3 - 10 λεπτά
- Ένταση φωτισμού: 50% - 100%
- Ποσότητα καυστικής σόδας: 4-8 γρ.
- Χρόνος εμφάνισης: 5 λεπτά
- Ποσότητα Υδροχλωρικού οξέος και υδρογόνου : 50 -150 γρ. και 2.5 -5γρ.
- Χρόνος αποχάλκωσης : περίπου 3 - 40 λεπτά
- Επαναλήψεις πειράματος: 4 φορές
- Μέγεθος πλακέτας: 33mm X 65mm
- Έκβαση πειράματος: Επέτυχε

Αποτελέσματα:

Στις 3 από τις 4 επαναλήψεις το κύκλωμα αποτυπώθηκαν με επιτυχία. Οι αγωγίμες διαδρομές ήταν καθαρές και συνεχείς, χωρίς εμφανείς αστοχίες στις επιτυχημένες επαναλήψεις.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται στην αριστερή πλευρά η πλακέτα πριν την αποχάλκωση και στην δεξιά πλευρά μετά από την αποχάλκωση.



Σχήμα 4.11: Κύκλωμα με γραμμές και κυκλικές συνδέσεις πριν και μετά από την αποχάλκωση

### 4.4.6 Κύκλωμα με ολοκληρωμένο 555

Το συγκεκριμένο πείραμα με το ολοκληρωμένο κύκλωμα NE555 έχει ως βασικό σκοπό την κατανόηση και αξιολόγηση των δυνατοτήτων του φωτοευαίσθητου θαλάμου σε πιο απαιτητικά και περίπλοκα κυκλώματα σε σύγκριση με τα προηγούμενα πειράματα. Μέσα από την υλοποίηση πιο περίπλοκων πειραμάτων εξετάζετε η δυνατότητα του θαλάμου να αποδίδει σε διάφορες συνδέσεις μεταξύ διάφορων στοιχείων σε ένα κύκλωμα. Παράλληλα, σκοπός του πειράματος ήταν η ποιότητα της αποχάλκωσης σε πιο απαιτητικά κυκλώματα στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το κύκλωμα πριν την αποχάλκωση ενώ στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το κύκλωμα μετά από την αποχάλκωση.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Γραμμές πάχους: 0,3mm

- Κυκλικές επαφές πάχους: 1,4mm, 1,6mm, 1,8mm, 2,6mm
- Τετράγωνες επαφές πάχους: 2,6mm x 2,6mm και 1,8mm x 1,8mm
- Αντιστάσεις (330Ω, 1kΩ, 50kΩ)
- LED
- NE555P ολοκληρωμένο κύκλωμα
- Πυκνωτής (0,1u)
- Δυο ακροδέκτες τροφοδοσίας

Συνθήκες πειράματος:

- Χρόνος έκθεσης: 3 - 10 λεπτά
- Ένταση φωτισμού: 50% - 100%
- Ποσότητα καυστικής σόδας: 4-8 γρ.
- Χρόνος εμφάνισης: 5 λεπτά
- Ποσότητα Υδροχλωρικού οξέος και υδρογόνου : 50 -120 γρ. και 3 -5γρ.
- Χρόνος αποχάλκωσης : περίπου 4 - 40 λεπτά
- Επαναλήψεις πειράματος: 4 φορές
- Μέγεθος πλακέτας: 20mm X 45mm
- Έκβαση πειράματος: Επέτυχε

Αποτελέσματα:

Στις 3 από τις 4 επαναλήψεις το κύκλωμα αποτυπώθηκαν με επιτυχία. Οι αγωγίμες διαδρομές ήταν καθαρές και συνεχείς, χωρίς εμφανείς αστοχίες στις επιτυχημένες επαναλήψεις. Το αποτέλεσμα αυτό έδειξε ότι ο θάλαμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για απλές δοκιμές γραμμών και επαφών, αλλά και για την κατασκευή πιο σύνθετων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

#### 4.5 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την λειτουργία και την αποτελεσματικότητα του θαλάμου έκθεσης φωτοευαίσθητων πλακετών. Περιγράφεται βήμα – βήμα όλη η διαδικασία από την εκτύπωση του κυκλώματος μέχρι το τελικό αποτέλεσμα της πλακέτας. Συγκεκριμένα αναλύονται τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρειάζεται για να δημιουργηθεί και να εκτυπωθεί πάνω σε μια διαφανή A4 το κύκλωμα το οποίο θα υλοποιηθεί. Στην συνέχεια η σωστή τοποθέτηση της φωτοευαίσθητης πλακέτας μέσα στο θάλαμο, καθώς επίσης και η σωστές αναλογίες από χημικά που χρησιμοποιήθηκαν για το τελικό αποτέλεσμα της πλακέτας.

Μέσα από μια σειρά πολλών πειραμάτων εξετάστηκαν διαφορετικές συνθήκες, όπως ο χρόνος έκθεσης στον θάλαμο, η ένταση του φωτισμού και οι αναλογίες των χημικών που χρησιμοποιήθηκαν για τα τελικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι ο θάλαμος μπορεί να αποτυπώσει με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο απλά όσο και πιο σύνθετα κυκλώματα, εφαρμόζοντας τις κατάλληλες συνθήκες. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι είναι σημαντικές οι συνθήκες για την έκβαση και την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

Μέσα από τις επαναλαμβανόμενες δοκιμές διαπιστώθηκαν πολλά και σημαντικά αποτελέσματα για τις συνθήκες που χρειάζεται για να τυπωθεί το κύκλωμα πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα. Επίσης εντοπίστηκαν και κάποιοι περιορισμοί κυρίως σε πολύ λεπτές γραμμές αγωγίων διαδρομών αλλά και σε λανθασμένες ποσότητες χημικών. Η επιτυχημένη κατασκευή και λειτουργία κυκλώματος, το οποίο τοποθετήθηκε μέσα στον θάλαμο επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητά του. Συνολικά, τα πειράματα απέδειξαν ότι ο θάλαμος έκθεσης που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την κατασκευή φωτοευαίσθητων πλακετών.

## Κεφάλαιο 5ο: Βελτιστοποίηση και ανάλυση συνθηκών

### 5.1 Εισαγωγή

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και την αξιολόγηση των αρχικών αποτελεσμάτων, απαραίτητη είναι η ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της τύπωσης κυκλωμάτων πάνω στις φωτοευαίσθητες πλακέτες. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης αποτελεί απαραίτητο στάδιο, διότι μέσα από αυτήν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι καταλληλότερες συνθήκες για την αποτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή διαδικασία του τελικού κυκλώματος, όπως είναι ο χρόνος έκθεσης στα UV LED, η ένταση του φωτός στον θάλαμο καθώς και οι αναλογίες των χημικών που χρησιμοποιήθηκαν για την αποχάλκωση της φωτοευαίσθητης πλακέτας. Μέσα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων εξετάζεται η επίδραση κάθε παραμέτρου, αρχικά της καθαρότητας της αποτύπωσης και μετέπειτα της σωστής και αγωγίμης διαδρομής μετά την αποχάλκωση της φωτοευαίσθητης πλακέτας. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια εντοπισμού των συνηθέστερων προβλημάτων και αστοχιών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς και των αιτιών που τα προκάλεσαν.

Βασικός στόχος του κεφαλαίου είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του θαλάμου, ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή και αξιόπιστη κατασκευή φωτοευαίσθητων πλακετών με μεγαλύτερη ακρίβεια και όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη επανάληψη. Η διαδικασία αυτή συμβάλει στην καλύτερη και βέλτιστη αποτελεσματικότητα της κατασκευής καθώς επίσης και στην εύρεση μελλοντικών βελτιώσεων πάνω σε αυτήν.

### 5.2 Ανάλυση Παραμέτρων Έκθεσης στον Θάλαμο

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια για την υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα είναι η έκθεση από την υπεριώδη ακτινοβολία. Επομένως, η σωστή λειτουργία του θαλάμου και η κατάλληλη τοποθέτηση των UV LED μέσα σε αυτόν, αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την επιτυχημένη αποτύπωση του κυκλώματος. Μετά την εκτύπωση του κυκλώματος πάνω σε διαφανές φύλλο A4, η φωτοευαίσθητη πλακέτα τοποθετείται στον θάλαμο και εκτίθεται στην ακτινοβολία των UV LED. Σε αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί ο κατάλληλος χρόνος έκθεσης, καθώς και η κατάλληλη ένταση φωτισμού. Για τον λόγο αυτόν πραγματοποιήθηκαν πολλαπλά πειράματα με διαφορετικούς χρόνους έκθεσης και διαφορετικά ποσοστά έντασης φωτισμού.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν έξι διαφορετικές κατηγορίες πειραμάτων, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το πείραμα με το LED πραγματοποιήθηκε τις περισσότερες φορές, καθώς το μέγεθος του ήταν μικρότερο και επέτρεπε ευκολότερες επαναλήψεις. Στην παρούσα ενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με βάση τον χρόνο έκθεσης και την ένταση του φωτός UV.

Πίνακας 5.1: Θετικά αποτελέσματα πειραμάτων ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης

Χρόνος Έκθεσης	Αριθμός πειραμάτων	Αποτέλεσμα
1-3 λεπτά	10	3/10
4-6 λεπτά	16	10/16
10 λεπτά	8	7/8

15 -30 λεπτά	4	1/4
--------------	---	-----

Παραπάνω γίνεται αναφορά στον Πίνακα 5.1, όπου παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη ο χρόνος έκθεσης στην δεύτερη στήλη ο αριθμός των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και τέλος στην Τρίτη στήλη τα συνολικά θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα. Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται ότι ο κατάλληλος χρόνος που χρειάζεται η φωτοευαίσθητη πλακέτα να εκτεθεί στην υπεριώδη ακτινοβολία είναι 10 λεπτά, καθώς στις περισσότερες δοκιμές οδήγησε σε επιτυχημένο αποτέλεσμα. Αντίθετα, οι πολύ μικροί έκθεσης, από 1 έως 3 λεπτά, καθώς και οι πολύ μεγάλοι χρόνοι, από 15 έως 30 λεπτά, παρουσίασαν χαμηλότερη αποτελεσματικότητα.

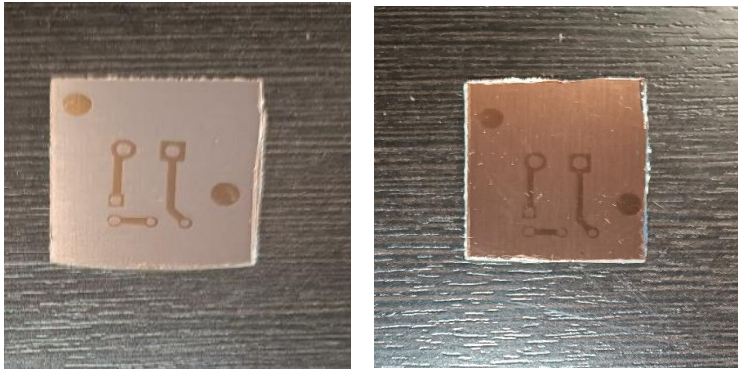
Πίνακας 5.2: Θετικά αποτελέσματα ανάλογα με την ένταση του φωτός

Ένταση φωτός	Αριθμός πειραμάτων	Αποτέλεσμα
100%	27	16/27
80%	2	1/2
50%	7	4/7
40%	1	0/1
25%	1	1/1

Παραπάνω γίνεται αναφορά στον Πίνακα 5.2, όπου παρουσιάζεται στην πρώτη το ποσοστό της έντασης του φωτός του θαλάμου στην δεύτερη στήλη ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων και στην τρίτη στήλη τα θετικά αποτελέσματα των πειραμάτων. Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται ότι η πιο κατάλληλη ένταση που χρειάζεται η φωτοευαίσθητη πλακέτα είναι να εκτεθεί στο 100% και λιγότερο αποτελεσματικό είναι στο 50%. Στα υπόλοιπα ποσοστά έγιναν ελάχιστες δοκιμές οπότε δεν μπορούν να επιβεβαιωθούν τα συγκεκριμένα πειράματα.

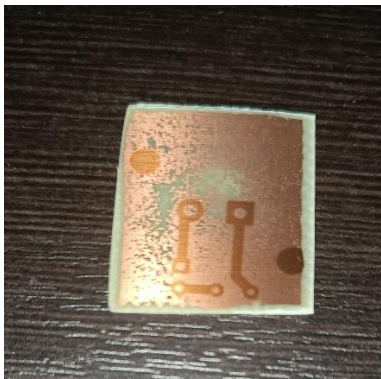
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με βάση τον χρόνο έκθεσης και την ένταση φωτισμού μέσα στον θάλαμο. Από τη συνολική αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τις κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Παρατηρήθηκε ότι όταν η φωτοευαίσθητη πλακέτα παραμένει στον θάλαμο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου 1–2 λεπτά, η αποτύπωση του κυκλώματος δεν είναι ικανοποιητική. Αντίστοιχα, μη ικανοποιητικά αποτελέσματα εμφανίζονται και σε περιπτώσεις υπερέκθεσης, δηλαδή όταν ο χρόνος έκθεσης υπερβαίνει τα 15 λεπτά.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.1 παρατηρείται ότι στο αριστερό κύκλωμα η εμφάνιση του κυκλώματος είναι πιο καθαρή και ομοιόμορφη συγκριτικά με το δεξί, όπου παρουσιάζονται αλλοιώσεις στην επιφάνεια της πλακέτας. Η καθαρότητα και ο χρωματισμός της εμφάνισης επηρεάζονται κυρίως από δύο παράγοντες. Ο πρώτος σχετίζεται με τον χρόνο έκθεσης της πλακέτας στην υπεριώδη ακτινοβολία και τη συνολική παραμονή της μέσα στον θάλαμο. Ο δεύτερος αφορά τη συγκέντρωση της καυστικής σόδας στο διάλυμα εμφάνισης, καθώς και τον χρόνο παραμονής της πλακέτας μέσα σε αυτό.



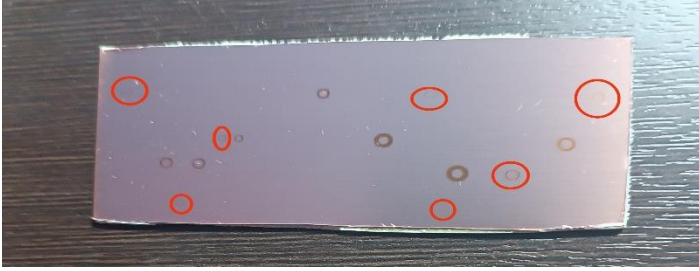
Σχήμα 5.1: Διαφορές στις φωτοευαίσθητες πλακέτες ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης

Συγκεκριμένα η ένταση και ο χρόνος που εκτίθεται η πλακέτα επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Σε αρκετά από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι χρειάζεται μια ελάχιστη παραμονή της φωτοευαίσθητης πλακέτας μέσα στον θάλαμο και αυτή είναι στα 3 λεπτά. Αλλά σημαντικό είναι και το ποσοστό έντασης, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση τόσο λιγότερο χρόνο χρειάζεται. Ενώ όσο μικρότερο είναι το ποσοστό της έντασης τόσο περισσότερα λεπτά χρειάζονται. Από την άλλη πλευρά δημιουργείτε πρόβλημα και στην υπερέκθεση της πλακέτας, παρατηρήθηκε ότι στο 100% της φωτεινότητας δεν πρέπει να παραμείνει παραπάνω από 20 λεπτά μέσα στον θάλαμο διότι δεν γίνεται σωστά η αποχάλκωση της. Στο παρακάτω Σχήμα 5.2 μπορούμε να δούμε μια πλακέτα η οποία εκτέθηκε πολύ ώρα μέσα στον θάλαμο το τελικό αποτέλεσμα της αποχάλκωση απέτυχε.



Σχήμα 5.2: Μεγάλος χρόνος έκθεσης στα UV LED

Ακόμα ένα πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί από την υπερβολική έκθεση της πλακέτας στον θάλαμο είναι η εμφάνιση του κυκλώματος πάνω σε αυτήν να μην έχει την ίδια ένταση. Πιο συγκεκριμένα στο παρακάτω Σχήμα 5.3 πολύ μικρές λεπτομέρειες εμφανίζονται αμυδρά ενώ σε κάποια σημεία δεν εμφανίζονται και καθόλου. Με κόκκινο κύκλο είναι τα σημεία τα οποία δεν εμφανίστηκαν έντονα μετά από το διάλυμα μέσα στην καυστική σόδα.



Σχήμα 5.3: Εμφάνιση πλακέτας μετά από το διάλυμα της καυστικής σόδας

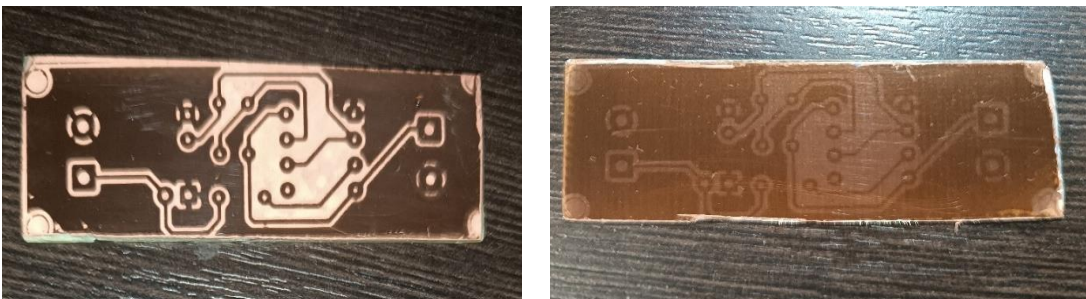
Στο παρακάτω Πίνακα 5.3 φαίνεται συγκεκριμένα ο ελάχιστος χρόνος που χρειάζεται για να εμφανιστεί το κύκλωμα πάνω στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια καθώς επίσης και η ένταση του φωτός των LED, έτσι ώστε να υπάρχουν περισσότερες πιθανότητες να είναι θετικό το αποτέλεσμα μετά από την αποχάλκωση της πλακέτας.

Πίνακας 5.3: Ελάχιστη διάρκεια μέσα στον θάλαμο ανάλογα με την ένταση του φωτός

Ένταση φωτός	Ελάχιστη διάρκεια μέσα στον θάλαμο
100%	3 λεπτά
80%	6 λεπτά
50%	10 λεπτά

### 5.3 Ανάλυση Χημικής Διαδικασίας

Μετά από την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία μέσα στον θάλαμο σειρά έχει η χημική διαδικασία για το τελικό αποτέλεσμα. Το πρώτο βήμα είναι να φτιαχτεί το χημικό διάλυμα με την καυστική σόδα και το νερό. Είναι πολύ σημαντικές οι αναλογίες οι οποίες θα πρέπει να αναμειξουμε στο νερό. Σε όλα τα πειράματα διαλύθηκαν κάποια γραμμάρια καυστικής σόδας μέσα σε 500 γρ. νερού. Όσο μεγαλύτερη ποσότητα καυστική σόδα που τοποθετείτε μέσα στο διάλυμα τόσο πιο ισχυρότερο το καθιστά. Συγκεκριμένα στις παρακάτω στο Σχήμα 5.4 παρατηρούμε το ίδιο πείραμα με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες η μόνη διαφορά ήταν ότι στην ποσότητα της καυστικής σόδας, πιο συγκεκριμένα στο αριστερά κύκλωμα έχουν διαλυθεί 8 γρ. καυστικής σόδας ενώ στο δεξιά κύκλωμα έχουν διαλυθεί 4γρ.



Σχήμα 5.4: Διαφορά στην εμφάνιση ανάλογα με την ποσότητα της καυστικής σόδας

## Κεφάλαιο 4

Η διαφορά μεταξύ των δυο εικόνων είναι φανερή στην πρώτη περίπτωση η αποτύπωση του κυκλώματος είναι πολύ καθαρή και έντονη ενώ στην δεύτερη ακριβώς το αντίθετο. Από την άλλη πλευρά δεν πρέπει να είναι το διάλυμα πολύ ισχυρό. Άρα είναι απαραίτητο να βρεθεί η σωστή ποσότητα καυστικής σόδας που θα διαλυθεί μέσα στο νερό. Στον παρακάτω Πίνακα 5.4 υπάρχει ο η ποσότητα της καυστικής σόδας μέσα σε 500γρ. νερού, η ταχύτητα εμφάνισης του κυκλώματος πάνω στην φωτοευαίσθητη πλακέτα και στην τελευταία στήλη υπάρχει ο συνολικός αριθμός πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε για κάθε διαφορετική περίπτωση.

Πίνακας 5.4: Χρόνος εμφάνισης ανάλογα με τα γραμμάρια της καυστικής σόδας

Γραμμάρια καυστικής σόδας	Ελάχιστος χρόνος εμφάνισης	Αριθμός πειραμάτων
2 γρ.	20 λεπτά	1
4 γρ.	3 λεπτά	5
5 γρ.	2 λεπτά	3
8γρ.	1 λεπτό	26
12γρ.	10 δευτερόλεπτα	2
20γρ.	Διαλύθηκε	1

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να καταλάβουμε το πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η ποσότητα της καυστικής σόδας. Όσο πιο δραστικό είναι το διάλυμα τόσο πιο γρήγορα γίνεται η εμφάνιση του κυκλώματος πάνω στην πλακέτα. Στην περίπτωση που βάλουμε 20 γρ, ή και παραπάνω η εμφάνιση γίνεται στιγμιαία με αποτέλεσμα επειδή το διάλυμα είναι τόσο ισχυρό να αρχίσει να καταστρέφει αμέσως το κύκλωμα το οποίο δημιουργεί. Από την άλλη πλευρά αν το διάλυμα είναι αδύναμο όπως στην περίπτωση με τα 2γρ. καυστικής σόδας η εμφάνιση γίνεται πολύ αργά και η εμφάνιση του κυκλώματος γίνεται νωθρά. Στην περίπτωση των 4γρ. η εμφάνιση γίνεται σχετικά γρήγορα με αρκετά πιο έντονη εμφάνιση του κυκλώματος πάνω στην πλακέτα. Τέλος τα πιο πολλά πειράματα πραγματοποιήθηκαν με ποσότητα 8γρ. όπου η εμφάνιση γίνεται πολύ γρήγορα και επίσης φαίνεται αρκετά έντονα πάνω στην πλακέτα.

Ακόμα παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος και η ένταση που βρίσκεται η πλακέτα μέσα στον θάλαμο επηρεάζετε με το πόσο ισχυρό είναι το διάλυμα επίσης συσχετίζεται και με την επόμενη χημική διαδικασία της αποχάλκωσης. Συγκεκριμένα στα πειράματα που η εμφάνιση γινόταν γρήγορα και έντονα με της κατάλληλες ποσότητες χημικών για την αποχάλκωση, τότε στις περισσότερες περιπτώσεις υπήρχε και θετικό τελικό αποτέλεσμα της πλακέτας. Σε άλλες περιπτώσεις που η εμφάνιση δεν ήταν έντονη είτε λόγο μη ιδανικής έκθεσης μέσα στο θάλαμο είτε λόγο μη σωστής ποσότητας καυστικής σόδας μέσα στο διάλυμα, τότε στις περισσότερες περιπτώσεις το τελικό αποτέλεσμα δεν ήταν πετυχημένο. Στο παρακάτω Πίνακα 5.5 παρατηρείται στην πρώτη στήλη ο χρόνος και το ποσοστό όπου σε όλες τις περιπτώσεις είναι σταθερός στην δεύτερη στήλη είναι ο χρόνος εμφάνισης και τέλος στην τρίτη στήλη απεικονίζεται το τελικό αποτέλεσμα εάν είναι δηλαδή θετικό ή αρνητικό.

Πίνακας 5.5: Χρόνος εμφάνισης της φωτοευαίσθητης πλακέτας

Χρόνος στο θάλαμο και ποσοστό	Εμφάνιση	Αποχάλκωση
-------------------------------	----------	------------

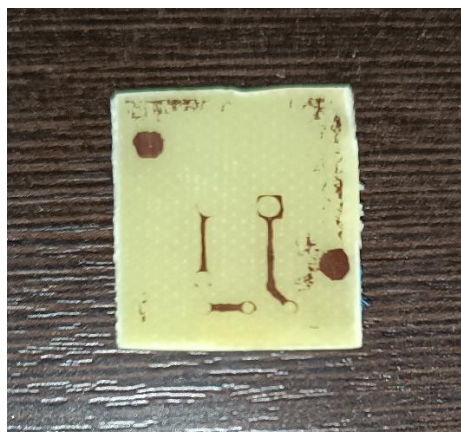
4-10 λεπτά & 100%	Λιγότερο από 1 λεπτό	Μη αποτελεσματικό
4-10 λεπτά & 100%	1-3 λεπτά	Αποτελεσματικό
4-10 λεπτά & 100%	Περισσότερα από 3	Μη αποτελεσματικό

Το επόμενο βήμα μετά από την εμφάνιση από το διάλυμα με την καυστική σόδα η φωτοευαίσθητη πλακέτα πρέπει να πλυθεί καλά κάτω από νερό να σκουπιστεί και στεγνώσει έτσι ώστε να μπει στο επόμενο χημικό διάλυμα. Αυτό το χημικό διάλυμα αποτελείται από υδροχλωρικό οξύ 6% (κεζάπ) και από υπεροξείδιο του υδρογόνου. Η αναλογία των συγκεκριμένων χημικών είναι εξίσου σημαντική με τις προηγούμενες διαδικασίες υλοποίησης του πειράματος. Συγκεκριμένα στον παρακάτω Πίνακα 5.6 παρατηρούνται οι σωστές και αποτελεσματικές ποσότητες των χημικών για την αποχάλκωση του κυκλώματος. Στην πρώτη στήλη του πίνακα υπάρχει η ποσότητα του Υδροχλωρικού οξέος στην δεύτερη στήλη η ποσότητα του Υπεροξειδίου του υδρογόνου και τέλος στην τρίτη στήλη απεικονίζεται αν το τελικό αποτέλεσμα ήταν θετικό ή αρνητικό.

Πίνακας 5.6: Αποτελεσματική αναλογία διαλύματος αποχάλκωσης

Υδροχλωρικό οξύ	Υπεροξείδιο του Υδρογόνου	Αποχάλκωση
50γρ.	3ml	Μη αποτελεσματικό
50γρ.	5ml	Αποτελεσματικό
100γρ.	3ml	Μη αποτελεσματικό
100γρ.	5ml	Μη αποτελεσματικό
100γρ.	8ml	Μη αποτελεσματικό
100γρ.	10ml	Αποτελεσματικό
120γρ.	3ml	Αποτελεσματικό
120γρ.	5ml	Αποτελεσματικό
150γρ.	20ml	Αποτελεσματικό

Σε περιπτώσεις που μένει για πολύ ώρα η φωτοευαίσθητη πλακέτα μέσα στο διάλυμα Υδροχλωρικού οξέος και υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι πιθανό το διάλυμα να καταστρέψει το κύκλωμα. Επίσης αυτό μπορεί να γίνει και σε κάποιο λάθος σε προηγούμενο βήμα της διαδικασίας ή ακόμα σε περίπτωση που το διάλυμα είναι πολύ ισχυρό. Στο παρακάτω Σχήμα 5.5 παρατηρείται η κακή αποχάλκωση του κυκλώματος. Στο συγκεκριμένο πείραμα μετά από περίπου 90 λεπτά στο διάλυμα άρχισε να καταστρέφεται το κύκλωμα. Η αποχάλκωση έγινε λάθος διότι έμεινε 30 λεπτά η πλακέτα μέσα στον θάλαμο με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει η αποχάλκωση στα σημεία που έπρεπε.



Σχήμα 5.5: Μεγάλος χρόνος αποχάλκωσης

Από το σύνολο των πειραμάτων διαπιστώνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις κάθε 10γρ. υδροχλωρικού οξέος χρειάζεται 1ml υπεροξειδίου του υδρογόνου. Τα περισσότερα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με 50γρ. υδροχλωρικού οξέος και 5 ml υπεροξειδίου του Υδρογόνου. Συγκεκριμένα στον παρακάτω Πίνακα 5.7 αναλύονται 6 πειράματα τα οποία γίνονται με διαφορετικές συνθήκες. Στην Πρώτη στήλη του πίνακα είναι ο αύξοντας αριθμός στην δεύτερη είναι το ποσοστό της έντασης και τα λεπτά μέσα στον θάλαμο στην τρίτη είναι η ποσότητα της καυστικής σόδας και τα λεπτά τα οποία χρειάστηκε η φωτοευαίσθητη πλακέτα να παραμείνει μέσα σε αυτό το διάλυμα. Στην τέταρτη και πέμπτη στήλη του πίνακα βρίσκονται οι ποσότητες από τα χημικά της αποχάλκωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην έκτη τα λεπτά απόχάλκωσης που χρειάστηκαν και στην τελευταία στήλη αναγράφεται το αποτέλεσμα.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα πειραμάτων με διαφορετικές συνθήκες

A/A	Ποσοστό έντασης & Λεπτά μέσα στον θάλαμο	Καυστική σόδα & Λεπτά μέσα στο διάλυμα	HCL	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Λεπτά Αποχάλκωση	Αποτέλεσμα
1	100% & 3 λεπτά	4γρ. & 3 λεπτά	50 γρ.	3ml	60 λεπτά	Αρνητικό
2	100% & 3 λεπτά	4γρ. & 3 λεπτά	120 γρ.	3ml	25 λεπτά	Θετικό
3	100% & 6 λεπτά	4γρ. & 3 λεπτά	50 γρ.	3ml	25 λεπτά	Θετικό
4	100% & 4 λεπτά	8γρ. & 1 λεπτό	50 γρ.	5ml	3 λεπτά	Θετικό
5	50% & 6 λεπτά	8γρ. & 1 λεπτό	50 γρ.	5ml	60 λεπτά	Αρνητικό
6	50% & 10 λεπτά	8γρ. & 1 λεπτό	50 γρ.	5ml	10 λεπτά	Θετικό

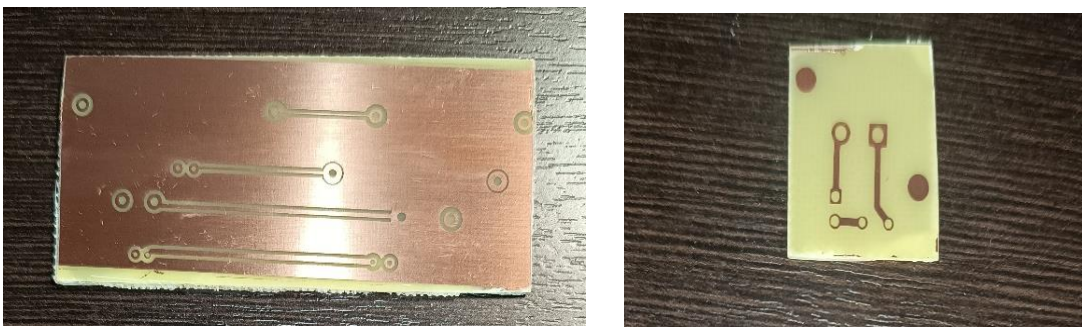
Στο παραπάνω πίνακα υπάρχουν διαφορετικές συνθήκες πειραμάτων και τα αποτελέσματά τους. Στα πειράματα 1 και 2 του πίνακα όλες οι συνθήκες είναι ίδιες εκτός από τα γραμμάρια του HCL τα οποία είναι στην 1 περίπτωση 50γρ. ενώ στην άλλη είναι 120γρ. Το τελικό αποτέλεσμα στην πρώτη περίπτωση είναι αρνητικό ενώ στην δεύτερη είναι θετικό. Αυτό προκύπτει διότι στα διάλυμα βάζουμε αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα HCL. Επίσης κάτι άλλο το ποιο μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση η αποχάλκωση διαρκεί 25 λεπτά, ο οποίος είναι αρκετός χρόνος.

Στα πειράματα 1 και 3 μπορούμε να δούμε ότι όλες οι ποσότητες των χημικών και των χρόνων είναι ακριβώς ίδιες εκτός από τα λεπτά που εκτίθεται η φωτοευαίσθητη πλακέτα στον θάλαμο. Αυτό όμως καθιστά την περίπτωση 3 επιτυχημένη ενώ στην περίπτωση 1 δεν υπάρχει θετικό αποτέλεσμα. Επίσης στο πείραμα 2 όπως και στο 3, ο χρόνος της αποχάλκωσης είναι 25 λεπτά εξίσου.

Στα πειράματα 5 και 6 το ποσοστό που εκτίθενται οι φωτοευαίσθητες πλακέτες στο θάλαμο είναι 50% στο πείραμα 5 για 6 λεπτά ενώ στο πείραμα 6 για 10 λεπτά. Αυτό έχει όσο αποτέλεσμα το πείραμα 6 να υπάρχει θετικό αποτέλεσμα μέσα σε 10 λεπτά ενώ στο 5 το τελικό αποτέλεσμα είναι αρνητικό. Στο πείραμα 4 είναι αυτό το οποίο έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα, καθώς ολοκληρώνεται το πείραμα από την αρχή μέχρι το τελικό αποτέλεσμα μέσα μόλις 8 λεπτά.

#### 5.4 Ανάλυση Ποιότητας και Βέλτιστες Συνθήκες

Για να υπάρχει καλό τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ακόμα και πριν την τοποθέτηση της φωτοευαίσθητη πλακέτα μέσα στον θάλαμο. Σημαντικό είναι το κύκλωμα που θα δημιουργηθεί μέσω του προγράμματος Kicad, υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι εμφάνισης του κυκλώματος ο ένας είναι να γίνει αποχάλκωσης ολόκληρου του κυκλώματος εκτός από τις αγωγίμες διαδρομές μεταξύ των στοιχείων του κυκλώματος. Ο άλλος τρόπος είναι να γίνει αποχάλκωση μόνο γύρω από τις αγωγίμες διαδρομές. Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να γίνει αποχάλκωση του μεγαλύτερου μέρους της πλακέτας από ότι στην δεύτερη περίπτωση. Στο παρακάτω Σχήμα 5.6 αναπαρίσταται οι διαφορές στους 2 διαφορετικούς τρόπους εμφάνισης του κυκλώματος.



Σχήμα 5.6: Κύκλωμα με θετική και αρνητική μάσκα

Ακόμα μετά τον τύπο του κυκλώματος που θα διαλέξουμε σειρά έχει η επιλογή των αγωγίμων διαδρομών και των επαφών του κυκλώματος. Πιο συγκεκριμένα το πόσο πάχος θα έχουν οι συνδέσεις είναι από τα πιο σημαντικά σημεία της εκτύπωσης. Μέσω των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σαν αποτέλεσμα είχαμε ότι ακόμα και αγωγίμες γραμμές 0,2mm και κυκλικές επαφές διαμέτρου 1mm, κάτω από τις καταλάλησες συνθήκες η τύπωση του κυκλώματος ήταν επιτυχής. Παρόλα αυτά όσο το δυνατό μεγαλύτερες αγωγίμες διαδρομές και συνδέσεις στοιχείων υπάρχουν τόσο περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν για να πετύχει το τελικό κύκλωμα. Από την άλλη πλευρά όσο μεγαλώνουμε τις αγωγίμες διαδρομές τόσο μεγαλύτερη θα γίνεται η φωτοευαίσθητη πλακέτα που θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να είναι λιγότερο εφικτό να φτιάχνουμε περίπλοκα κυκλώματα σε μικρότερα μεγέθη πάνω σε πλακέτες. Στον Πίνακα 5.8 αποτυπώνονται οι βέλτιστες συνθήκες για την δημιουργία μια φωτοευαίσθητης πλακέτας μέχρι και το τελικό αποτέλεσμα της αποχάλκωσης.

Πίνακας 5.8: Ιδανικές συνθήκες πειράματος

Παράμετρος	Βέλτιστη τιμή
Ένταση	100%
Χρόνος Έκθεσης	4 λεπτά
Καυστική σόδα	8 γρ
Χρόνος εμφάνισης	1 λεπτό
HCL	50 γρ.
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5ml
Χρόνος αποχάλκωσης	4-6 λεπτά

## 5.5 Επίλογος

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης των συνθηκών λειτουργίας του φωτοευαίσθητου θαλάμου και των χημικών διαδικασιών που ακολουθούν, απέδειξε ότι η επιτυχής κατασκευή φωτοευαίσθητων πλακετών εξαρτάται από τον σωστό συνδυασμό πολλών παραμέτρων. Μέσα από τη συστηματική ανάλυση των πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι τόσο ο χρόνος έκθεσης και η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας, όσο και οι αναλογίες των χημικών διαλυμάτων, επηρεάζουν καθοριστικά την ποιότητα της αποτύπωσης και το τελικό αποτέλεσμα της αποχάλκωσης.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η έκθεση της φωτοευαίσθητης πλακέτας σε υψηλή ένταση φωτισμού (100%) για χρονικό διάστημα περίπου 4 έως 10 λεπτών προσφέρει τις μεγαλύτερες πιθανότητες επιτυχούς αποτύπωσης του κυκλώματος. Παρατηρήθηκε ότι η μικρή διάρκεια έκθεσης οδηγεί σε ατελή εμφάνιση του κυκλώματος, ενώ η υπερέκθεση προκαλεί προβλήματα κατά την αποχάλκωση και αλλοίωση των λεπτομερειών του κυκλώματος. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η σωστή αναλογία καυστικής σόδας και νερού αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την καθαρή και έντονη εμφάνιση του κυκλώματος πάνω στην πλακέτα. Πολύ ασθενή διαλύματα οδηγούν σε αργή και ατελή εμφάνιση, ενώ υπερβολικά ισχυρά διαλύματα μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή της φωτοευαίσθητης επιφάνειας.

Αντίστοιχα, κατά τη διαδικασία της αποχάλκωσης, η αναλογία υδροχλωρικού οξέος και υπεροξειδίου του υδρογόνου επηρεάζει σημαντικά τόσο τον χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας όσο και την ποιότητα των αγωγίμων διαδρομών. Μέσα από τα πειράματα προέκυψε ότι οι πιο σταθερές και αποδοτικές συνθήκες επιτυγχάνονται με κατάλληλα ισορροπημένες ποσότητες χημικών, αποφεύγοντας τόσο την υπερβολικά αργή όσο και την υπερβολικά επιθετική αποχάλκωση.

Παράλληλα, η έρευνα ανέδειξε ότι η ποιότητα του τελικού κυκλώματος δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις χημικές και τις συνθήκες έντασης της φωτεινότητας, αλλά και από τον σχεδιασμό του ίδιου του κυκλώματος. Το πάχος των αγωγίμων διαδρομών, το μέγεθος των επαφών και η πολυπλοκότητα της σχεδίασης επηρεάζουν άμεσα την επιτυχία της κατασκευής. Παρότι αποδείχθηκε ότι είναι δυνατή η δημιουργία πολύ λεπτών διαδρομών και μικρών επαφών, οι μεγαλύτερες διαστάσεις προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και αυξημένες πιθανότητες επιτυχούς εκτύπωσης.

Συνολικά, η πειραματική διαδικασία απέδειξε ότι ο θάλαμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την κατασκευή φωτοευαίσθητων πλακετών με ικανοποιητική ακρίβεια και λεπτομέρεια. Μέσα από τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας κατέστη δυνατή η σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου κατασκευής, διατηρώντας παράλληλα υψηλή ποιότητα στο τελικό

αποτέλεσμα. Τα συμπεράσματα του παρόντος κεφαλαίου μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντικές βελτιώσεις της κατασκευής, όπως η αυτοματοποίηση της διαδικασίας, η χρήση διαφορετικών πηγών UV ακτινοβολίας ή η εφαρμογή πιο προηγμένων χημικών μεθόδων, με στόχο την περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας της φωτολιθογραφικής διαδικασίας.

## Κεφάλαιο 6ο: Τελικά Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης

### 6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως βασικό στόχο τη μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός λειτουργικού θαλάμου αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών, κατάλληλου για την υλοποίηση τυπωμένων κυκλωμάτων μέσω της διαδικασίας της φωτολιθογραφίας. Μέσα από τη θεωρητική μελέτη, την κατασκευή της συσκευής και την πειραματική διαδικασία, επιβεβαιώθηκε ότι ο θάλαμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την αποτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων πάνω σε φωτοευαίσθητες πλακέτες PCB.

Κατά τη διάρκεια της εργασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση των βασικών τεχνικών κατασκευής PCB, των υλικών που χρησιμοποιούνται, καθώς και των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα της φωτολιθογραφικής διαδικασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρήση UV LED ως πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας, καθώς προσφέρουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μεγάλη διάρκεια ζωής και δυνατότητα ελέγχου της έντασης φωτισμού.

Η χρήση του μικροελεγκτή Arduino Uno R3 επέτρεψε την αυτοματοποίηση της λειτουργίας του θαλάμου, δίνοντας τη δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου έκθεσης και της έντασης φωτισμού μέσω LCD οθόνης, πληκτρολογίου και ποτενσιόμετρου. Παράλληλα, η χρήση MOSFET για τον έλεγχο των UV LED συνέβαλε στη σταθερή και ασφαλή λειτουργία της κατασκευής.

Μέσα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος έκθεσης, η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας, καθώς και οι αναλογίες των χημικών διαλυμάτων επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα αποτύπωσης των κυκλωμάτων. Παρατηρήθηκε ότι πολύ μικρός χρόνος έκθεσης οδηγεί σε ατελή εμφάνιση του κυκλώματος, ενώ η υπερέκθεση προκαλεί αλλοιώσεις στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια. Επιπλέον, η σωστή αναλογία καυστικής σόδας και ο κατάλληλος χρόνος αποχάλκωσης κρίθηκαν ιδιαίτερα σημαντικοί για την επιτυχημένη εμφάνιση και δημιουργία των αγωγίμων διαδρομών.

Τέλος, η επιτυχής κατασκευή και λειτουργία πλακέτας PCB μέσω του ίδιου του θαλάμου επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα και τη λειτουργικότητα της κατασκευής. Συνολικά, η εργασία συνδύασε θεωρητική ανάλυση, ηλεκτρονική σχεδίαση, προγραμματισμό και πειραματική αξιολόγηση, οδηγώντας στην ανάπτυξη ενός πλήρως λειτουργικού και οικονομικού συστήματος φωτολιθογραφίας για εκπαιδευτική και πειραματική χρήση.

### 6.2 Προτάσεις Βελτίωσης

Παρότι η κατασκευή του θαλάμου αποτύπωσης φωτοευαίσθητων πλακετών λειτούργησε ικανοποιητικά και επέτυχε τον βασικό στόχο της εργασίας, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες περαιτέρω αναβάθμισης και βελτιστοποίησης του συστήματος.

Αρχικά, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί βελτίωση της ομοιομορφίας φωτισμού στο εσωτερικό του θαλάμου, μέσω διαφορετικής διάταξης των UV LED. Με τον τρόπο αυτό θα επιτυγχανόταν πιο ομοιόμορφη κατανομή της υπεριώδους ακτινοβολίας πάνω στη φωτοευαίσθητη πλακέτα, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια αποτύπωσης.

Σε επίπεδο αυτοματισμού, μελλοντικά θα μπορούσε να ενσωματωθεί αισθητήρας θερμοκρασίας και σύστημα ψύξης, ώστε να παρακολουθείται η θερμοκρασία λειτουργίας του θαλάμου και να αποφεύγεται πιθανή υπερθέρμανση κατά τη διάρκεια πολύωρης χρήσης. Παράλληλα, το λογισμικό του

Arduino θα μπορούσε να επεκταθεί με περισσότερες λειτουργίες, όπως αποθήκευση προκαθορισμένων ρυθμίσεων έκθεσης, εμφάνιση περισσότερων πληροφοριών στην οθόνη LCD ή δυνατότητα αυτόματης επιλογής συνθηκών λειτουργίας ανάλογα με τον τύπο της πλακέτας. Τέλος, σημαντική βελτίωση θα αποτελούσε η προσθήκη συστήματος ασφαλείας για την προστασία του χρήστη από την υπερϊώδη ακτινοβολία, όπως αυτόματη διακοπή λειτουργίας των UV LED κατά το άνοιγμα του θαλάμου. Με τον τρόπο αυτό θα αυξανόταν σημαντικά η ασφάλεια και η αξιοπιστία της κατασκευής.

### 6.3 Κόστος Κατασκευής

Για το κόστος της κατασκευής συνολικά ξοδεύτηκαν περίπου 150€. Ακολουθεί παρακάτω ο Πίνακας 6.1 με την αναλυτική περιγραφή και τα αντίστοιχα ποσά.

Πίνακας 6.1: Κόστος κατασκευής

Υλικά	Κόστος
Αλουμινοταινία	2,59€
Ξυλόκολλα	3,49€
Μεντεσέδες	1,58€
Φύλλα Λείανσης Ξύλου	0,98€
Βίδες	3,99€
Πιστόλι Θερμόκολλας	11,19€
Πόμολο	1,69€
Ξύλο	6€
MDF Ξύλο	0,70€
Γάντια για κοπή ξύλου	1,49€
Στηρίγματα Βάσης	1,29€
Τροφοδοτικό	20€
Φωτοευαίσθητες πλακέτες	20€
Διακόπτης ON/OFF	2,20€
Φις τροφοδοσίας	1,20€
Ασετόν	1,43€
Γάντια για τα χημικά	1,26€
Υπεροξειδίο Υδρογόνου 35%	5,10€
Υδροξείδιο του Νατρίου	4,50€
Καλώδια για Arduino	6,27€
LCD με I2C	4,49€

#### Κεφάλαιο 4

Πληκτρολόγιο	1,60€
Arduino Uno R3	7,57€
Δεύτερο Arduino Uno R3	10€
Ποτενσιόμετρο 10kΩ	2,30€
Ακροδέκτες Οπής για τον διακόπτη	0,50€
Μικρές βίδες για τα ηλεκτρονικά	0,50€
Τζάμι	8€
IRF520 Mosfet	0,60€
Buzzer	1,80€
Καπάκι για ποτενσιόμετρο	0,60€
Μόνωση καλωδίων	1€
Εκτυπώσεις για τις πλακέτες	12€

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y. Sangeetha, P. Sri. Sashank, Ch. V. Satyanarayana, and M. Geethika, Development of weight system embedded with tracking system using Arduino UNO Rev3. 2023, pp. 1411–1416. doi: 10.1109/iccmc56507.2023.10084100.
- [2] S. Gokulnath, R. Sumathi, J. Yuvaraj, C. Poorani, and K. L. Priya, “Analysis of Early Warning Tsunami Prediction System using the Arduino Uno R3 and DNN,” 2022 6th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, pp. 369–374, Dec. 2022, doi: 10.1109/iceca55336.2022.10009246.
- [3] D. Abuan, M. Lim, C. R. V. Lontoc, J. Sangrador, J. See, and E. P. Dadios, Arduino Based Obstacle Avoiding Robot with Ultrasonic Sensors and Motor Functions. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/ictbig59752.2023.10456159.
- [4] B. V. Vishakh, M. K. Khwaja, and C. M. Vidhyapathi, “Comprehensive automated device for hotel management using I2C protocol,” in *2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, 2015, pp. 1–4.
- [5] Grecu C., Iordache C. – “Portable I2C monitor and debugger”, 2015 IEEE 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 131-134
- [6] G. Kilari, R. Mohammed, and R. Jayaraman, *Automatic light intensity control using arduino UNO and LDR*. India, 2020, pp. 0862–0866. doi: 10.1109/iccsp48568.2020.9182238.
- [7] T. Bhattarai, A. Ebong, M. Y. A. Raja, and M. Munir, Advancements in 275 Nm UV-LED technology for deactivation of bacteriophages, PHI6 and MS2. 2023, pp. 120–125. doi: 10.1109/honet59747.2023.10374888.
- [8] W. A. W. Mahmud, N. F. M. Noor, and S. N. Muhamood, “UV LED printing device for PCB fabrication,” *Journal of Workforce Education & Research*, vol. 1, no. 1, Nov. 2024, doi: 10.36877/jwer.a0000520.
- [9] K. Petherbridge, P. Evans, and D. Harrison, “The origins and evolution of the PCB: a review,” *Circuit World*, vol. 31, no. 1, pp. 41–45, Sep. 2004, doi: 10.1108/03056120510553211.
- [10] G. U. Adie, L. Sun, X. Zeng, L. Zheng, O. Osibanjo, and J. Li, “Examining the evolution of metals utilized in printed circuit boards,” *Environmental Technology*, vol. 38, no. 13–14, pp. 1696–1701, Sep. 2016, doi: 10.1080/09593330.2016.1237552.
- [11] R. S. Khandpur, *Printed circuit boards: Design, Fabrication, and Assembly*. McGraw Hill Professional, 2005.
- [12] “Introduction to Printed Circuit Board,” Bay Area Circuits, accessed May 24, 2026.
- [13] K. Mitzner, *Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB Editor*. Newnes, 2009.
- [14] A. Mitzner, “The ABCs of PCBs,” in *Printed Circuit Board Basics for Dummies*. Hoboken, NJ, USA: Wiley Publishing, 2009, ch. 1, pp. 5–10.
- [15] G. McComb and E. Boysen, *Electronics for dummies*. John Wiley & Sons, 2005.
- [16] D. L. Jones, *PCB Design Tutorial*, Rev. A, Jun. 29, 2004. Alternate Zone
- [17] T. M. Selvakumari, *Designing & Fabrication of PCB*. Department of Physics

- [18] W. Jillek and W. K. C. Yung, "Embedded components in printed circuit boards: a processing technology review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 3–4, pp. 350–360, Jul. 2004, doi: 10.1007/s00170-003-1872-y.
- [19] N. R. Bhavsar, H. P. Shinde, and M. Bhat, "Determination of mechanical properties of PCB," *International Journal on Mechanical Engineering and Robotics (IJMER)*, vol. 2, no. 4, pp. [23-27], 2014.
- [20] K. Dušek, D. Koc, P. Veselý, D. Froš, and A. Géczy, "Biodegradable substrates for rigid and flexible circuit boards: a review," *Advanced Sustainable Systems*, vol. 9, no. 1, Oct. 2024, doi: 10.1002/adsu.202400518.
- [21] P. Hadi, M. Xu, C. S. K. Lin, C.-W. Hui, and G. McKay, "Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 283, pp. 234–243, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.032.
- [22] J. LaDou, "Printed circuit board industry," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 209, no. 3, pp. 211–219, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.ijheh.2006.02.001.
- [23] C. S. K. Lin, *Chemistry and chemical technologies in waste valorization*. Springer, 2019.
- [24] L. Melymuk *et al.*, "Persistent problem: Global challenges to managing PCBs," *Environmental Science & Technology*, vol. 56, no. 12, pp. 9029–9040, Jun. 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c01204.
- [25] R. Balma, K. Petsch, and T. Kaya, "Development of thin film photolithography process: Patterning printed circuit boards (PCBs) and copper electroplating," in *Proceedings of the 2011 ASEE NC & IL/IN Section Conference*, American Society for Engineering Education, 2011.
- [26] S. Shinde and H. Muthurajan, *PCB Fabrication Unit for Electronics Circuit Prototyping*. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/icaecct.2016.7942545.
- [27] R. Barbucha and J. Mizeraczyk, "Recent progress in direct exposure of interconnects on PCBs," *Circuit World*, vol. 42, no. 1, pp. 42–47, Jan. 2016, doi: 10.1108/cw-10-2015-0050.
- [28] M. Leupold, "Through-hole versus SMD components," [Vishay Intertechnology](#), Aug. 22, 2017.
- [29] I. Nevliudov, E. Razumov-Fryzyuk, D. Nikitin, D. Bliznyuk, and R. Strelets, "TECHNOLOGY FOR CREATING THE TOPOLOGY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS USING POLYMER 3D MASKS," *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, no. 1 (15), pp. 120–131, Mar. 2021, doi: 10.30837/itssi.2021.15.120.
- [29] Laminated Plastics, "FR-4," technical data sheet.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO

```
#include <Keypad.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

// KEYPAD
const byte rows = 4;
const byte cols = 4;

byte row_pins[rows] = {2,3,4,5};
byte col_pins[cols] = {6,7,8,9};

char keys[rows][cols] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};

Keypad keypad = Keypad(makeKeymap(keys), row_pins, col_pins, rows, cols);

// PINS
int ledPin = 10;
int statusLed = 12;
int buzzer = 13;
int potPin = A0;

// STATES
enum Mode {
  HELLO,
  BRIGHTNESS,
  SET_MINUTES,
  RUNNING,
  FINISHED
};

Mode mode = HELLO;

// VARIABLES
int brightnessPercent = 0;
int minutesInput = 0;
long seconds = 0;

unsigned long previousMillis = 0;
```

```

unsigned long ledMillis = 0;

bool ledState = LOW;

// HELLO timer
unsigned long helloMillis = 0;

// BEEP variables
unsigned long beepStart = 0;
bool beepPlaying = false;

char lastKey = NO_KEY;

void setup() {

    lcd.begin();
    lcd.backlight();

    pinMode(ledPin, OUTPUT);
    pinMode(statusLed, OUTPUT);
    pinMode(buzzer, OUTPUT);

    // STARTUP BUZZER SOUND
    tone(buzzer, 1000);
    delay(200);
    noTone(buzzer);

    lcd.setCursor(4,0);
    lcd.print("Hello");

    helloMillis = millis();
}

void loop() {

    char key = keypad.getKey();

    // BEEP μόνο σε συγκεκριμένα modes
    if(key != NO_KEY && key != lastKey) {

        if(mode == HELLO || mode == BRIGHTNESS || mode == SET_MINUTES) {

            tone(buzzer, 1000);

            beepStart = millis();
            beepPlaying = true;
        }
    }
}

```

```

lastKey = key;

// Σβήσιμο ήχου μετά από 50ms
if(beepPlaying && millis() - beepStart >= 50) {

    noTone(buzzer);
    beepPlaying = false;
}

// RESET με το πλήκτρο #
if(key == '#') {

    resetSystem();
    return;
}

// MODE 0: HELLO
if(mode == HELLO) {

    if(millis() - helloMillis > 2000) {

        mode = BRIGHTNESS;

        lcd.clear();

        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Set Brightness");
    }
}

// MODE 1: BRIGHTNESS
else if(mode == BRIGHTNESS) {

    int potValue = analogRead(potPin);

    brightnessPercent = map(potValue,0,1023,0,100);

    int ledValue = map(brightnessPercent,0,100,0,255);

    analogWrite(ledPin, ledValue);

    digitalWrite(statusLed, HIGH);

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Brightness:   ");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Brightness:");
    lcd.print(brightnessPercent);
}

```

```

lcd.print("%");

if(key == '*') {

    mode = SET_MINUTES;

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Time 1-99");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("0");

    minutesInput = 0;
}
}

// MODE 2: SET MINUTES
else if(mode == SET_MINUTES) {

    if(key && key >= '0' && key <= '9') {

        // Επιτρέπονται μόνο 2 ψηφία, δηλαδή 1-99 λεπτά
        if(minutesInput < 10) {

            minutesInput = minutesInput * 10 + (key - '0');
        }

        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("          ");

        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(minutesInput);
    }

    if(key == '*') {

        // Ξεκινάει μόνο αν ο χρόνος είναι από 1 έως 99 λεπτά
        if(minutesInput >= 1 && minutesInput <= 99) {

            seconds = minutesInput * 60L;

            mode = RUNNING;

            lcd.clear();

            previousMillis = millis();
            ledMillis = millis();

```

```

    }
  }
}

// MODE 3: RUNNING
else if(mode == RUNNING) {

  // Blink status LED
  if(millis() - ledMillis >= 500) {

    ledMillis = millis();

    ledState = !ledState;

    digitalWrite(statusLed, ledState);
  }

  if(seconds > 0) {

    if(millis() - previousMillis >= 1000) {

      previousMillis = millis();

      seconds--;
    }

    int minLeft = seconds / 60;
    int secLeft = seconds % 60;

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Time left      ");

    lcd.setCursor(0,1);

    if(minLeft < 10) lcd.print("0");

    lcd.print(minLeft);

    lcd.print(":");

    if(secLeft < 10) lcd.print("0");

    lcd.print(secLeft);

    lcd.print("  ");
  }

  else {

```

```

mode = FINISHED;

// ΣΒΗΣΙΜΟ LED
analogWrite(ledPin, 0);

digitalWrite(statusLed, LOW);

// BUZZER
for(int i=0;i<5;i++) {

    tone(buzzer,1000);
    delay(200);

    noTone(buzzer);
    delay(200);
}

// ΣΒΗΣΙΜΟ LCD
lcd.clear();
lcd.noBacklight();
}
}
}

// RESET
void resetSystem() {

    brightnessPercent = 0;
    minutesInput = 0;
    seconds = 0;

    mode = HELLO;

    lcd.backlight();

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(4,0);
    lcd.print("Hello");

    analogWrite(ledPin, 0);

    digitalWrite(statusLed, LOW);

    previousMillis = 0;
    ledMillis = 0;

    helloMillis = millis();
}

```