



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ Σ.Ε.Μ.Φ.Ε

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΠΤΙΚΗΣ  
ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΥΣΤΥΧΙΑΣ LED ΥΨΗΛΗΣ  
ΙΣΧΥΟΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ Ν. ΚΟΝΔΥΛΗΣ**

**Επιβλέπων :** Δημήτριος, Τσουκαλάς  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ Σ.Ε.Μ.Φ.Ε

# ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΥΣΤΥΧΙΑΣ LED ΥΨΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ, Ν. ΚΟΝΔΥΛΗΣ

**Επιβλέπων :** Δημήτριος Τσουκαλάς  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Ιούλιο 2024.

.....  
Δημήτριος Τσουκαλάς  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Εμμανουήλ Χουρδάκης  
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024

Ελευθέριος, Ν. Κονδύλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ελευθέριος Κονδύλης 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός συστήματος ακτινοβολήσης οπτικής λιθογραφίας. Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύχθηκε για να αξιοποιηθεί στο εργαστήριο προηγμένων υλικών και νάνο-διατάξεων της σχολής Ε.Μ.Φ.Ε. Πιο συγκεκριμένα το παρόν σύστημα είναι πολύ σημαντικό για την διεξαγωγή διαδικασιών οπτικής λιθογραφίας στον καθαρό χώρο του κτηρίου φυσικής.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη μίας συστοιχίας LED υψηλής ισχύος που εκπέμπει στο υπεριώδες φάσμα και αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για την ακτινοβολήση των δειγμάτων κατά την διεξαγωγή της διαδικασίας οπτικής λιθογραφίας και κατά προέκταση για τις διαδικασίες και τεχνικές εναπόθεσης υλικών, που απαιτούνται για την ανάπτυξη μικροηλεκτρονικών διατάξεων και αισθητήρων. Τα συγκεκριμένα LED εκπέμπουν στα 388.5 nm και επομένως αποτελούν ιδανική επιλογή για την ανάπτυξη μοτίβων ρητίνης (φωτοευαίσθητης ουσίας) με ελάχιστη διακριτική ικανότητα κοντά στο 1μm.

Η δημιουργία ενός συστήματος ακτινοβολήσης μέσω συστοιχίας LED, παρουσιάζει πολλά προβλήματα σχεδίασης, όσον αφορά την τελική κατανομή της έντασης ακτινοβολίας η οποία είναι επιθυμητό να είναι απολύτως ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια των δειγμάτων. Για τον λόγο αυτό πριν την κατασκευή της πλακέτας των LED υψηλής ισχύος υλοποιήθηκε μία προσομοίωση για την εκτίμηση της κατανομής της ακτινοβολίας και την τελική επιλογή των επιθυμητών χαρακτηριστικών των LED. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικά στοιχεία (LED και μετασχηματιστές) του εμπορίου για να κατασκευαστεί το τελικό σύστημα.

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής περιγράφονται η σημασία της διαδικασίας της οπτικής λιθογραφίας, τα είδη της καθώς και ο διαχωρισμός της σε θετική και αρνητική σε συνδυασμό με τις τεχνικές που ακολουθούν την εγχάραξη και το lift-off. Στην συνέχεια περιγράφεται η μαθηματική μοντελοποίηση και υλοποίηση μίας πειραματικής προσομοίωσης για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των LED, όπως είναι το πλήθος που χρησιμοποιήθηκε, η ένταση τους και η γωνία ακτινοβολήσης καθώς και η απόσταση που θα τοποθετηθεί το τελικό σύστημα από τα δείγματα. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι πειραματικές μετρήσεις και ο προσδιορισμός των χρόνων έκθεσης και για τις δύο περιπτώσεις λιθογραφίας, θετική και αρνητική. Επίσης αναζητήθηκε το ελάχιστο χαρακτηριστικό που μπορούσε να υλοποιηθεί με το συγκεκριμένο σύστημα, το οποίο ήταν 2μm. Τέλος υλοποιήθηκε ένας αισθητήρας τύπου αντίστασης και μετρήθηκε ηλεκτρικά για την ανάδειξη της ορθής λειτουργίας του συστήματος ακτινοβολήσης.



## Abstract

The purpose of this diploma thesis is the design and development of an optical lithography irradiation system. This system was developed for use in the laboratory of advanced materials and nano-devices at the department of applied physics and mathematics of NTUA. Specifically, this system is very important for conducting optical lithography processes in the clean room of the physics building.

This thesis focuses on the development of a high-power LED array that emits light in the ultraviolet spectrum, which is a crucial step for irradiating samples during the optical lithography process, and subsequently for material deposition processes and techniques required for the development of microelectronic devices and sensors. These LEDs emit at 388.5 nm, making them an ideal choice for developing resin patterns (photosensitive substance) with a minimum resolution close to 1  $\mu\text{m}$ .

Creating an irradiation system using an LED array presents several design challenges concerning the final distribution of radiation intensity, which is desirable to be perfectly uniform across the entire surface of the samples. Therefore, before constructing the high-power LED board, a simulation was implemented to estimate the radiation distribution and finally select the desired characteristics of the LEDs. It is important to mention that commercial electronic components (LEDs and transformers) were used to construct the final system.

The first chapter of the thesis describes the significance of the optical lithography process, its different types, and its separation into positive and negative along with the techniques that follow, etching and lift-off. In addition, the mathematical modeling and implementation of an experimental simulation are described for calculating the characteristics of the LEDs, such as the number used, their intensity, the angle of irradiation, and the distance the final system will be placed from the samples. The third chapter analyzes the experimental measurements and determination of exposure times for both positive and negative lithography processes. Additionally, we sought the minimum feature that could be implemented with this system, which was 2  $\mu\text{m}$ . Finally, a resistance change sensor was implemented and electrically measured to demonstrate the proper functioning of the irradiation system.





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτριο Τσουκαλά για την ευκαιρία που μου έδωσε να αναλάβω την ανάπτυξη μία χρήσιμης για το εργαστήριο συσκευής όπως και για την συνεχή στήριξη που μου παρείχε το εργαστήριο του.

Ευχαριστώ επίσης τους Χάρη Τσιούστα και Παναγιώτη Μπούσουλα για την αμέριστη βοήθεια και τον χρόνο που μου παρείχαν καθόλη την διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας αυτής .

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου Κονδύλη Νικόλαο για την υποστήριξη και κατανόηση σε κάθε δυσκολία κατά την διάρκεια φοίτησης μου.

Κονδύλης Ελευθέριος  
Αθήνα Ιούλιος 2024

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Abstract .....	7
Ευχαριστίες.....	9
Λιστα Σχημάτων.....	12
Κεφάλαιο 1. Λιθογραφία .....	14
1.1. Καθαροί χώροι .....	15
1.2. Εισαγωγή στην οπτική λιθογραφία .....	17
1.3. Είδη λιθογραφίας.....	18
1.3.1. Λιθογραφία επαφής.....	18
1.3.2. Λιθογραφία Απόστασης (proximity).....	19
1.3.3. Λιθογραφία ειδώλων .....	19
1.3.4. Λιθογραφία Ηλεκτρονιακής Δέσμης (E-beam).....	20
1.3.5. Λιθογραφία ακτινών X (X-ray).....	21
1.4. Θετική και αρνητική λιθογραφία .....	23
1.4.1. Θετική λιθογραφία .....	23
1.4.2. Αρνητική λιθογραφία .....	24
1.4.3. Λιθογραφία αντίστροφης απεικόνισης.....	25
1.5. Lift-off και εγχάραξη.....	26
1.5.1. Εγχάραξη (Etching).....	26
1.5.2. Lift off .....	30
1.6. Σκοπός Εργασίας.....	31
Κεφάλαιο 2. Προσομοίωση .....	32
2.1. Εισαγωγή και μεταβλητές προσομοίωσης.....	32
2.2. Μαθηματική μοντελοποίηση.....	33
2.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	36
Κεφάλαιο 3. Πειραματικό μέρος .....	42
3.1. Υπολογισμός χρόνου έκθεσης στην UV ακτινοβολία.....	44
3.2. Αποτελέσματα λιθογραφίας .....	45
3.2.1. Θετική λιθογραφία .....	45
3.2.2. Αρνητική λιθογραφία .....	48
3.3. Κατασκευή αισθητήρα τύπου αντίστασης .....	51
3.3.1. Εικόνες απο SEM .....	53
3.3.2. Ηλεκτρικές μετρήσεις.....	54

Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα και προεκτάσεις.....	56
Βιβλιογραφία.....	58
Παράρτημα Ι.....	60

## Λιστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατάταξη καθαρών χώρων κατά ISO.....	16
Σχήμα 2: Διαφορετικές μέθοδοι οπτικής λιθογραφίας.....	17
Σχήμα 3: Νόμος του Moore.....	18
Σχήμα 4: Λιθογραφία Απόστασης.....	19
Σχήμα 5: Λιθογραφία Ειδώλων.....	20
Σχήμα 6: Λιθογραφία Δέσμης Ηλεκτρονίων.....	21
Σχήμα 7 : Λιθογραφία ακτίνων X .....	22
Σχήμα 8 : Θετική λιθογραφία.....	24
Σχήμα 9 : Λιθογραφία αρνητικής απεικόνισης .....	26
Σχήμα 10 : Διαδικασία εγχάραξης.....	27
Σχήμα 11 : Ισοτροπική και ανισοτροπική απεικόνιση εγχάραξης .....	27
Σχήμα 12 : Κυλινδρικός εγχαράκτης.....	29
Σχήμα 13: Σύστημα Υψηλής Πυκνότητας Πλάσματος.....	29
Σχήμα 14 : : Επιφάνεια ακτινοβόλησης wafer .....	32
Σχήμα 15 : : Ενδεικτικές απεικονίσεις προσομείωσης επιφάνειας ακτινοβόλησης και επιφάνειας συστοιχίας των led. ....	33
Σχήμα 16 : Καμπύλη σχέσης έντασης-γωνίας led 30° .....	33
Σχήμα 17: Καμπύλη σχέσης έντασης-γωνίας led 130° .....	34
Σχήμα 18 : Curve fitting για led 130°.....	34
Σχήμα 19 : Γεωμετρική απεικόνιση γωνίας ακτινοβόλησης κάθε led .....	35
Σχήμα 20 : Προσομοιώσεις 1 και 2 .....	37
Σχήμα 21 : Προσομοιώσεις 3 και 4.....	37
Σχήμα 22 : Προσομοιώσεις 5 και 6.....	37
Σχήμα 23 : Προσομοιώσεις 7 και 8.....	38
Σχήμα 24 : Προσομοιώσεις 9 και 10.....	38
Σχήμα 25 : Προσομοιώσεις 11 και 12.....	38
Σχήμα 26 : Προσομοιώσεις 13 και 14.....	39
Σχήμα 27 : Προσομοιώσεις 15 και 16.....	39
Σχήμα 28 : Προσομοιώσεις 17 και 18.....	39
Σχήμα 29 Διαστάσεις και συστοιχία led.....	42
Σχήμα 30 : Τελική κατασκευή συστοιχίας led .....	43
Σχήμα 31 : Συσκευή spin coater.....	45

Σχήμα 32 : Συνολική διάταξη θετικής λιθογραφίας.....	46
Σχήμα 33 : Αποτελέσματα θετικής λιθογραφίας για 30 και 10 μm .....	46
Σχήμα 34 : Αποτελέσματα αρνητικής λιθογραφίας για 5 και 2 μm .....	47
Σχήμα 35 : Αποτελέσματα υπερβολικής έκθεσης 13 sec .....	47
Σχήμα 36 : Αποτελέσματα μη επαρκούς έκθεσης 2 sec στα 5μm.....	47
Σχήμα 37 : Συνολική διάταξη αρνητικής λιθογραφίας. ....	48
Σχήμα 38 : Αποτελέσματα αρνητικής λιθογραφίας για 30 και 10 μm. ....	49
Σχήμα 39 : Αποτελέσματα αρνητικής λιθογραφίας για 5 και 2 μm. ....	49
Σχήμα 40 Γραμμικό σχέδιο wafer Si. ....	50
Σχήμα 41: Ικανοποιητικές δομές 30μm , 10 μm, 5 μm, 2 μm.....	50
Σχήμα 42: Δομές 2μm οι οποίες δεν έχουν «ανοίξει».....	50
Σχήμα 43 : Υποστρώματα Kapton & οξειδίου του πυριτίου.....	51
Σχήμα 44 : Λιθογραφημένα δείγματα με επικάλυψη τιτανίου και χρυσού.....	52
Σχήμα 45: RF magnetron sputtering, E-gun, thermal evaporator και Nanogen. Το e-gun χρησιμοποιήθηκε για την επιμετάλλωση με Ti, ενώ ο thermal evaporator για την επιπρόσθετη επιμετάλλωση με Au. Η Nanogen χρησιμοποιήθηκε για την εναπόθεση Pt NPs. Όλα τα συστήματα λειτουργούν υπό υψηλό κενό. ....	52
Σχήμα 46 : Μικροσκόπιο SEM .....	53
Σχήμα 47: Συνολική διάταξη τελικού αισθητήρα .....	53
Σχήμα 48: Δομές 2 μm απο SEM.....	54
Σχήμα 49: Όργανο ηλεκτρικών μετρήσεων Keithley 4200.....	54
Σχήμα 50 : Καμπύλη I-V αισθητήρα τύπου αντίστασης.....	55

## Κεφάλαιο 1. Λιθογραφία

Η ραγδαία πρόοδος της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες έχει μεταμορφώσει θεμελιωδώς πολλές βιομηχανίες, με τους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας της κατασκευής κινητών τηλεφώνων και ηλεκτρονικών υπολογιστών να βιώνουν κάποιες από τις πιο σημαντικές αλλαγές. Βασικά στοιχεία που ευθύνονται για αυτή την ραγδαία πρόοδο είναι τα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα, που έχουν φέρει επανάσταση στο σχεδιασμό και τη λειτουργικότητα των ηλεκτρονικών συσκευών. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, γνωστά και ως μικροτσιπ ή ολοκληρωμένα κυκλώματα, είναι καθοριστικά για την ενίσχυση της απόδοσης, της ταχύτητας, της αξιοπιστίας και των δυνατοτήτων των σύγχρονων οχημάτων κινητών συσκευών και ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η ενσωμάτωση των μικροηλεκτρονικών στην αυτοκινητοβιομηχανία έχει φέρει επανάσταση στην απόδοση, την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα των οχημάτων. Τα σύγχρονα αυτοκίνητα είναι εξοπλισμένα με μία πληθώρα ηλεκτρονικών μονάδων ελέγχου που διαχειρίζονται τα πάντα, από την απόδοση του κινητήρα και τις εκπομπές ρύπων μέχρι την ψυχαγωγία στο αυτοκίνητο και τα προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγού. Η ανάπτυξη μικροηλεκτρονικών εξαρτημάτων, όπως οι μικροελεγκτές και οι αισθητήρες, έχει επιτρέψει λειτουργίες όπως η προσαρμοστική ρύθμιση ταχύτητας, η αυτόματη πέδηση έκτακτης ανάγκης και οι δυνατότητες αυτόνομης οδήγησης. Αντιστοίχως η βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας έχει γνωρίσει εκθετική ανάπτυξη χάρη στις προόδους της μικροηλεκτρονικής. Η μετάβαση από τα απλά κινητά τηλέφωνα στα «έξυπνα» τηλέφωνα σηματοδότησε ένα σημαντικό ορόσημο, που επιτεύχθηκε μέσω της σμίκρυνσης και της αυξημένης ισχύος των μικροηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Τα σύγχρονα κινητά τηλέφωνα ενσωματώνουν ισχυρούς επεξεργαστές, κάμερες υψηλής ανάλυσης, προηγμένους αισθητήρες και αποδοτικά συστήματα διαχείρισης μπαταρίας. Η εξέλιξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και των τεχνολογιών συστήματος σε τσιπ έχει επιτρέψει τη συνένωση πολλαπλών λειτουργιών σε μεμονωμένα τσιπ, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Αυτές οι καινοτομίες έχουν μετατρέψει τις κινητές συσκευές σε πολυλειτουργικά εργαλεία που είναι αναπόσπαστα στην καθημερινή ζωή, προωθώντας την εξάπλωση του κινητού διαδικτύου και της συνδεσιμότητας.

Είναι εμφανές λοιπόν πως η μικροηλεκτρονική αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της προόδου στη βιομηχανία υπολογιστών, οδηγώντας σε πρωτοφανή υπολογιστική ισχύ και σμίκρυνση. Η εξέλιξη από τους κεντρικούς υπολογιστές στους προσωπικούς υπολογιστές, τα laptops και πλέον στις φορητές συσκευές όπως τα «tablets» και τα «wearables» αποτελεί μαρτυρία των προόδων στην τεχνολογία των μικροτσιπ. Οι καινοτομίες στην κατασκευή ημιαγωγών, καθοδηγούμενες από τον Νόμο του Μουρ, έχουν διπλασιάσει σταθερά τον αριθμό των τρανζίστορ σε ένα τσιπ περίπου κάθε δύο χρόνια, βελτιώνοντας την ταχύτητα επεξεργασίας και την ενεργειακή απόδοση. Αυτή η αδιάκοπη πρόοδος έχει επιτρέψει πολύπλοκους υπολογισμούς, εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και υπολογιστές υψηλής απόδοσης, υποστηρίζοντας εξελίξεις σε διάφορους επιστημονικούς και βιομηχανικούς τομείς.

Η παραγωγή μικροηλεκτρονικών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ακρίβεια των διαδικασιών οπτικής λιθογραφίας. Η οπτική λιθογραφία, μια υποκατηγορία της φωτολιθογραφίας, περιλαμβάνει τη χρήση φωτός για τη μεταφορά γεωμετρικών προτύπων σε ένα υπόστρωμα, συνήθως δίσκους πυριτίου, οι οποίοι στη συνέχεια χαράσσονται για να

δημιουργήσουν περίπλοκα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα. Η ανάλυση και η ακρίβεια αυτών των προτύπων είναι υψίστης σημασίας, καθώς επηρεάζουν άμεσα την απόδοση και τη λειτουργικότητα των τελικών μικροηλεκτρονικών συσκευών. Για την επίτευξη λοιπόν υψηλής ακρίβειας είναι σημαντικό οι προαναφερθείσες διαδικασίες να λαμβάνουν χώρα σε ένα αυστηρά ελεγχόμενο περιβάλλον. Τα ελεγχόμενα αυτά περιβάλλοντα των εργαστηρίων και βιομηχανιών στα οποία κατασκευάζονται τα μικροηλεκτρονικά ονομάζονται καθαροί χώροι.

## 1.1. Καθαροί χώροι

Η ύπαρξη «καθαρών χώρων» λαμβάνει θεμελιώδη ρόλο στα εργαστήρια και τις βιομηχανίες οπτικής λιθογραφίας, όπου η ακρίβεια και ο έλεγχος του περιβάλλοντος είναι ουσιώδεις για την επιτυχία της λιθογραφικής διαδικασίας.

Οι διαδικασίες κατασκευής μικροηλεκτρονικών είναι εξαιρετικά ευαίσθητες. Ακόμα και τα μικρότερα ανεπιθύμητα σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα και την απόδοση του τελικού προϊόντος. Οι καθαροί χώροι σχεδιάζονται για να ελαχιστοποιούν τη μόλυνση από σκόνη, σωματίδια και άλλες ακαθαρσίες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαδικασία της λιθογραφίας. Για αυτόν τον λόγο τα εργοστάσια και τα εργαστήρια που παράγουν επεξεργαστές και μικροηλεκτρονικές διατάξεις έχουν ως απαραίτητη προϋπόθεση την χρήση και ύπαρξη καθαρών χώρων για την ανάπτυξη αυτών [2].

Χρόνο με τον χρόνο, οι ηλεκτρονικές δομές γίνονται όλο και μικρότερες και επομένως οι ανάγκες για ακρίβεια γίνονται όλο και σημαντικότερες. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται μια γενική χρονολογική εικόνα για το ποιο είναι το μέγεθος των σωματιδίων που μπορούν να επηρεάσουν την ορθή λειτουργία μιας μικροηλεκτρονικής διάταξης.

YEAR	1997	1999	2003	2006	2009	2012
Minimum feature size(nm)	<b>250</b>	<b>180</b>	<b>130</b>	<b>100</b>	<b>70</b>	<b>50</b>
Wafer Diameter(mm)	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>450</b>	<b>450</b>
Critical Defect size(nm)	<b>125</b>	<b>90</b>	<b>65</b>	<b>50</b>	<b>35</b>	<b>25</b>

Χρονολογική απεικόνιση μεγεθών wafer <sup>1</sup>

Είναι εμφανές ότι με το πέρασμα του χρόνου οι δομές των μικροηλεκτρονικών διατάξεων μικραίνουν όλο και περισσότερο και κατά προέκταση οι καθαροί χώροι είναι απαραίτητοι για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, επεξεργαστών και άλλων μικροηλεκτρονικών διατάξεων όπου η ακρίβεια και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες.

Το περιβάλλον ενός καθαρού χώρου οφείλει να είναι αυστηρά ελεγχόμενο. Για αυτόν το λόγο στους καθαρούς χώρους, εφαρμόζονται πρωτόκολλα για τη μείωση της δυνατότητας μόλυνσης. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση εξειδικευμένων ενδυμάτων, όπως

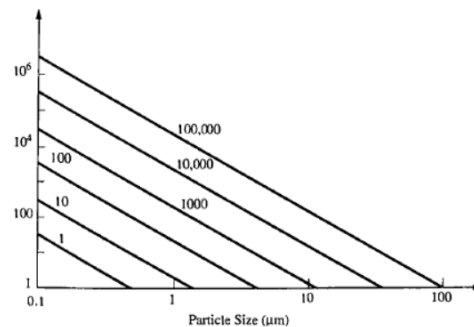
<sup>1</sup> [Plummer, J. D., Deal, M., & Griffin, P. D. \(2000\). Silicon VLSI technology: Fundamentals, practice, and modeling. Prentice Hall.](#)

κατάλληλες προστατευτικές στολές, ποδονάρια, γάντια νιτριλίου, καθώς και συστήματα φιλτραρίσματος του αέρα (High Efficiency Particulate Air HEPA) προκειμένου να υπάρχει ελεγχόμενο περιβάλλον. Η ατμόσφαιρα στα καθαρά δωμάτια διατηρείται σε συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας. Αξίζει να σημειωθεί πως για τους σκοπούς των πειραμάτων λιθογραφίας έχουν τοποθετηθεί στον χώρο φίλτρα υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας ώστε να μην επηρεάζονται οι φωτοευαίσθητες ουσίες-ρητίνες.

Οι καθαροί χώροι κατατάσσονται ανάλογα με το επίπεδο καθαριότητας του αέρα, της ποσότητας και του μεγέθους των σωματιδίων ανά όγκο αέρα. Η Διεθνής Οργάνωση για την Τυποποίηση (ISO) παρέχει ένα σύστημα ταξινόμησης γνωστό ως ISO 14644-1, το οποίο κυμαίνεται από ISO 1 (το πιο καθαρό) έως ISO 9 (αέρας δωματίου). Οι καθαροί χώροι φωτολιθογραφίας λειτουργούν συνήθως σε ISO 5 ή καθαρότερο, όπου η καταμέτρηση των σωματιδίων ελέγχεται και παρακολουθείται αυστηρά [4].

Οι κατηγορίες ISO αντιπροσωπεύονται με αριθμούς, όπου ένας χαμηλότερος αριθμός υποδηλώνει ένα πιο καθαρό περιβάλλον. Η κατηγοριοποίηση συνήθως σημειώνεται ως ISO Class X, όπου το "X" αντιπροσωπεύει τον αριθμό της κατηγορίας. Η κατηγορία καθορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_n = 10^N x \left(\frac{0.1}{D}\right)^{2.08} \quad (1)$$



Σχήμα 1: Κατάταξη καθαρών χώρων κατά ISO

Όπου

$C_n$ : Η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση σωματιδίων( $\text{particles}/m^3$ ) στον αέρα. Ο αριθμός αυτός στρογγυλοποιείται στον κοντινότερο φυσικό αριθμό.

$N$ : Ο αριθμός κλάσης καθαρού χώρου κατά ISO

$D$ : Το μέγεθος των σωματιδίων σε  $\mu\text{m}$ .

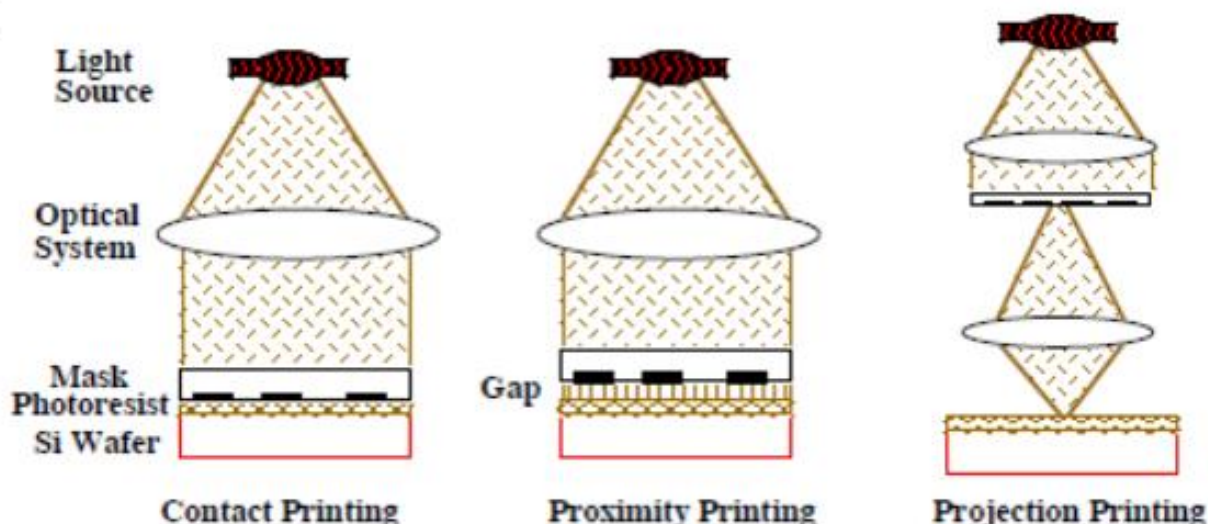
0.1 : Σταθερά με μονάδα μέτρησης τα  $\mu\text{m}$ .

Εν κατακλείδι οι καθαροί χώροι αποτελούν ένα θεμελιώδες στοιχείο των εργαστηρίων φωτολιθογραφίας, εξασφαλίζοντας την συνέπεια στην παραγωγή υψηλής ποιότητας ημιαγωγών συσκευών. Η συνεχής πρόοδος στην τεχνολογία και τις πρακτικές των καθαρών χώρων είναι κρίσιμη για να ανταποκριθεί στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για καθαρότητα και ακρίβεια στη βιομηχανία των ημιαγωγών.



## 1.2. Εισαγωγή στην οπτική λιθογραφία

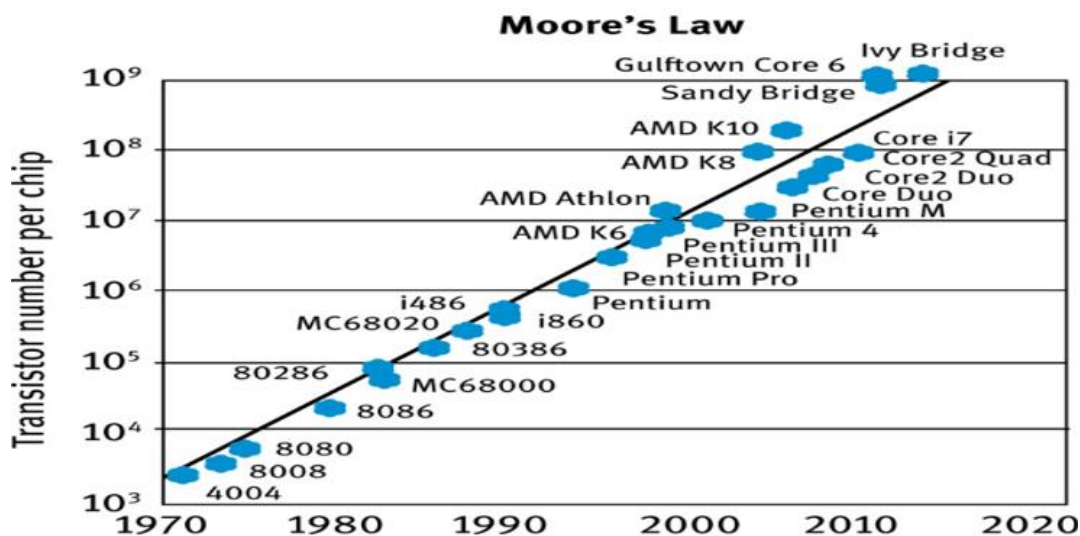
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η λιθογραφία αποτελεί μια από τις θεμελιώδεις μεθόδους στην βιομηχανία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων μοτίβων που καθορίζουν τη διάταξη των τρανζίστορ, αισθητήρων και άλλων μικροηλεκτρονικών στοιχείων. Η λιθογραφία χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ημιαγωγών για μεγάλης κλίμακας μαζική παραγωγή συσκευών με βάση το πυρίτιο (Si). Όπως θα αναφέρουμε και παρακάτω υπάρχουν αρκετά είδη λιθογραφίας όπως για παράδειγμα η απόστασης, επαφής, ειδώλων και λιθογραφία ηλεκτρονιακής δέσμης.



Σχήμα 2: Διαφορετικές μέθοδοι οπτικής λιθογραφίας

Η διαδικασία λιθογραφίας που χρησιμοποιούμε στα πειράματα μας είναι η οπτική λιθογραφία επαφής. Η λιθογραφία επαφής είναι μια τις πρώτες διαδικασίες που αναπτύχθηκαν και αποτελεί ακόμα και σήμερα μια από τις πιο απλές διαδικασίες με την οποία όμως μπορούμε να επιτύχουμε υψηλή ακρίβεια. Η οπτική λιθογραφία μοιράζεται ορισμένες θεμελιώδεις αρχές με τη φωτογραφία. Αξιοποιεί την ενέργεια του φωτός για τη μεταφορά περίπλοκων μοτίβων από μια μάσκα σε ένα υλικό ευαίσθητο στο φως, συνήθως ένα φωτοευαίσθητο πολυμερές, που έχει επικαλυφθεί πάνω σε ένα ημιαγωγίμο υπόστρωμα (wafer). Η χρήση της οπτικής λιθογραφίας επιτρέπει την υλοποίηση πυκνών δομών σε

κατάλληλα υποστρώματα, επιτρέποντας τη συνεχή ελαχιστοποίηση και βελτίωση των διατάξεων ημιαγωγών ακολουθώντας τον νόμο του Moore.



Σχήμα 3: Νόμος του Moore

### 1.3. Είδη λιθογραφίας

Η λιθογραφία, ως θεμελιώδης τεχνική στην κατασκευή ημιαγωγικών διατάξεων και μικροσυστημάτων, αξιοποιεί διάφορες μεθοδολογίες πέρα από την παραδοσιακή φωτολιθογραφία. Αυτές οι εναλλακτικές τεχνικές λιθογραφίας όπως ηλεκτρονιακής δέσμης (E-beam), ακτίνων X και ακραίου υπεριώδους (EUV) προσφέρουν τα δικά τους πλεονεκτήματα, αλλά και δημιουργούν διαφορετικές προκλήσεις. Μια εκτενής ανάλυση αυτών των μεθόδων παρέχει εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας της, τη χρησιμότητα και την τεχνολογική τους σημασία.

Πρωτού όμως προβούμε στην ανάλυση αυτών είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε την οπτική λιθογραφία σε 3 βασικές κλάσεις οι οποίες είναι η επαφής, απόστασης και ειδώλων ([σχήμα 2](#)).

#### 1.3.1. Λιθογραφία επαφής

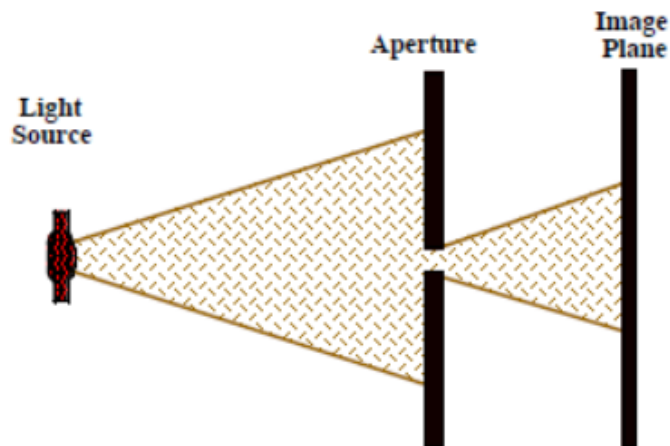
Η λιθογραφία επαφής χαρακτηρίζεται από τη φυσική επαφή μεταξύ της οπτικής μάσκας και του υποστρώματος κατά τη διαδικασία έκθεσης. Αυτή η μέθοδος αξιοποιεί μια απλή διάταξη όπου η μάσκα, που φέρει το μοτίβο του κυκλώματος με αδιαφανείς και διαφανείς περιοχές, τοποθετείται απευθείας πάνω σε ένα υπόστρωμα πυριτίου επικαλυμμένο με φωτοευαίσθητη ουσία. Κατά την έκθεση στο υπεριώδες φως, το μοτίβο από τη μάσκα μεταφέρεται στη φωτοευαίσθητη ουσία μέσω άμεσης επαφής, ελαχιστοποιώντας οποιαδήποτε διάθλαση φωτός και εξασφαλίζοντας υψηλή πιστότητα και ανάλυση του μοτίβου. Η άμεση επαφή μεταξύ της μάσκας και της επιφάνειας του υποστρώματος διευκολύνει την απόλυτη μεταφορά με εξαιρετική ακρίβεια χαρακτηριστικών. Ωστόσο, η επαναλαμβανόμενη χρήση της μάσκας μπορεί να οδηγήσει σε γρατσουνιές και συσσώρευση σωματιδίων, που υποβαθμίζουν την ποιότητα και μπορούν να

προκαλέσουν ελαττώματα σε επόμενες λιθογραφίες. Επιπλέον, η μηχανική πίεση κατά την επαφή μπορεί να παραμορφώσει τη ρητίνη, οδηγώντας σε αλλαγές των διαστάσεων των χαρακτηριστικών και πιθανώς να επηρεάσει την απόδοση της μικροηλεκτρονικής διάταξης.

### 1.3.2. Λιθογραφία Απόστασης (proximity)

Στη λιθογραφία απόστασης, η μάσκα και το πυρίτιο δεν έρχονται σε επαφή. Αντιθέτως, είναι χωρισμένα από ένα μικρό, ελεγχόμενο κενό, το οποίο κυμαίνεται συνήθως από μερικά μικρόμετρα έως δεκάδες μικρόμετρα. Αυτή η μέθοδος μειώνει τον κίνδυνο φυσικής βλάβης και στην οπτική μάσκα και στη φωτοευαίσθητη ουσία, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μάσκας και μειώνοντας τα ποσοστά ελαττωμάτων που σχετίζονται με μηχανική επαφή.

Ωστόσο, το κενό εισάγει ένα νέο σύνολο προκλήσεων, κυρίως σχετικών με τα φαινόμενα οπτικής διάθλασης. Καθώς το φως διαδίδεται μέσω του κενού ανάμεσα στη μάσκα και το πυρίτιο, πραγματοποιείται διάθλαση, η οποία μειώνει την ανάλυση και περιορίζει το ελάχιστο διακριτικό μέγεθος που μπορεί να επιτευχθεί. Αυτό καθιστά τη λιθογραφία απόστασης μη κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή ανάλυση, όπως προηγμένα κυκλώματα VLSI.



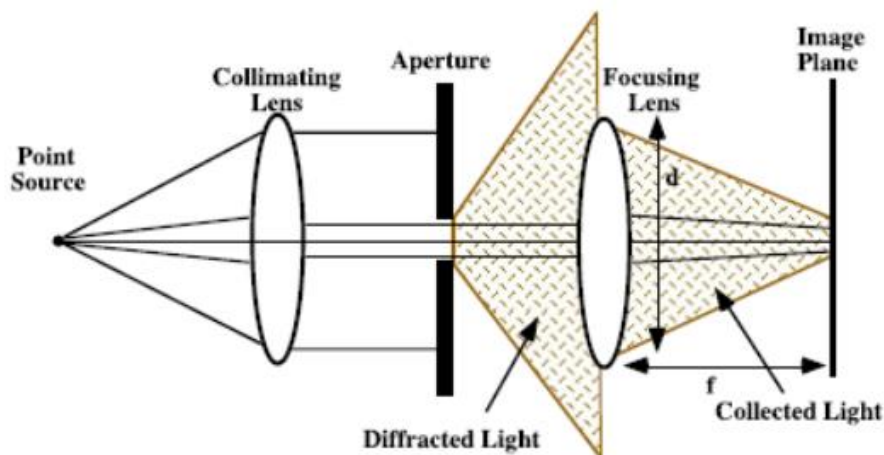
Σχήμα 4: Λιθογραφία Απόστασης

### 1.3.3. Λιθογραφία ειδώλων

Η λιθογραφία ειδώλων είναι μια πιο εξελιγμένη μέθοδος απόστασης που χρησιμοποιεί οπτικά συστήματα για να προβάλλει και να εστιάσει την εικόνα της οπτικής μάσκας στο πυρίτιο από απόσταση. Αυτή η τεχνική συνήθως αξιοποιεί ένα σύστημα οπτικών μείωσης της οπτικής δέσμης, το οποίο συρικνώνει το μοτίβο της μάσκας πάνω στο υπόστρωμα πυριτίου, επιτρέποντας την αναπαραγωγή πολύ μικρότερων χαρακτηριστικών

και υψηλότερων πυκνοτήτων ολοκλήρωσης σε σύγκριση με τις μεθόδους επαφής ή εγγύτητας.

Το βασικό πλεονέκτημα της λιθογραφίας ειδώλων βρίσκεται στην ικανότητά της να ελέγχει με ακρίβεια την τοποθέτηση της εικόνας και το μέγεθος των χαρακτηριστικών μέσω των συστημάτων φακών και ακριβούς διαχείρισης του μήκους κύματος του φωτός. Αυτή η μέθοδος μειώνει σημαντικά τα ελαττώματα και επιτρέπει τη δημιουργία περίπλοκων και πυκνών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε επίπεδο νανοκλίμακας. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των οπτικών συστημάτων και η ακρίβεια που απαιτείται στην ευθυγράμμιση της μάσκας και του πυριτίου καθιστούν τη λιθογραφία ειδώλων μια πιο δαπανηρή επιλογή, κατάλληλη κυρίως για μαζική παραγωγή όπου τα οικονομικά οφέλη μπορούν να επιτευχθούν σε μεγάλη κλίμακα.



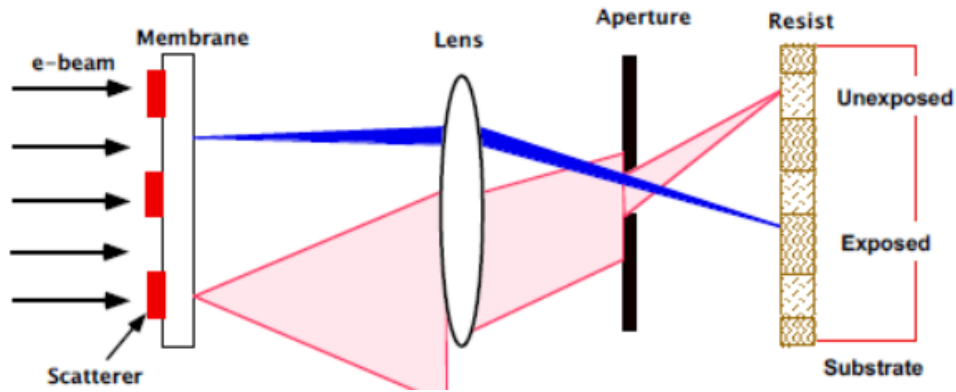
Σχήμα 5: Λιθογραφία Ειδώλων

#### 1.3.4. Λιθογραφία Ηλεκτρονιακής Δέσμης (E-beam)

Η λιθογραφία με ηλεκτρονιακή δέσμη είναι μία πιο σύγχρονη μέθοδος λιθογραφίας. Χρησιμοποιεί μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων για να χαράξει προσαρμοσμένα μοτίβα απευθείας σε ένα υπόστρωμα που έχει επικαλυφθεί με ρητίνη. Τα ηλεκτρόνια αλληλοεπιδρούν με την φωτοευαίσθητη ουσία, κάνοντας την πιο εύκολα διαλυτή στο διάλυμα ανάπτυξης (developer). Αυτή η τεχνική διακρίνεται στη δημιουργία εξαιρετικά μικρών χαρακτηριστικών μέχρι και λίγα νανόμετρα, καθιστώντας την ιδανική για σκοπούς έρευνας και ανάπτυξης όπου απαιτούνται μοτίβα με υψηλή ακρίβεια. Προσφέρει εξαιρετική ανάλυση και ευελιξία μοτίβου. Παρόλα αυτά η λιθογραφία με ηλεκτρονική δέσμη είναι σημαντικά πιο αργή και μεγαλύτερου κόστους, από άλλες μεθόδους λόγω της διαδικασίας της σειριακής γραφής. Επίσης, απαιτεί πολύπλοκο εξοπλισμό και μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο υπόστρωμα λόγω της υψηλής συγκεντρωσης ενέργειας της ηλεκτρονιακής δέσμης.

Το σύστημα της δέσμης ηλεκτρονίων πρέπει να λειτουργεί σε κενό για να αποτρέψει τη διασπορά των ηλεκτρονίων από τα μόρια του αέρα. Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης

μια φωτοευαίσθητη ουσία, συνήθως ένα πολυμερές υλικό σχεδιασμένο να σπάει ή να διασταυρώνεται όταν εκτεθεί σε ηλεκτρόνια, αλλάζοντας έτσι τη διαλυτότητά της. Η απόδοση του συστήματος μπορεί να επηρεαστεί από πολλαπλούς παράγοντες, όπως η σταθερότητα της δέσμης, η ευαισθησία της ρητίνης και η παρουσία ανακλασμένων ηλεκτρονίων, που μπορεί να οδηγήσουν σε εφέ προσέγγισης ή και μη προσδοκώμενη έκθεση γύρω από την στοχευμένη περιοχή [5].



Σχήμα 6: Λιθογραφία Δέσμης Ηλεκτρονίων

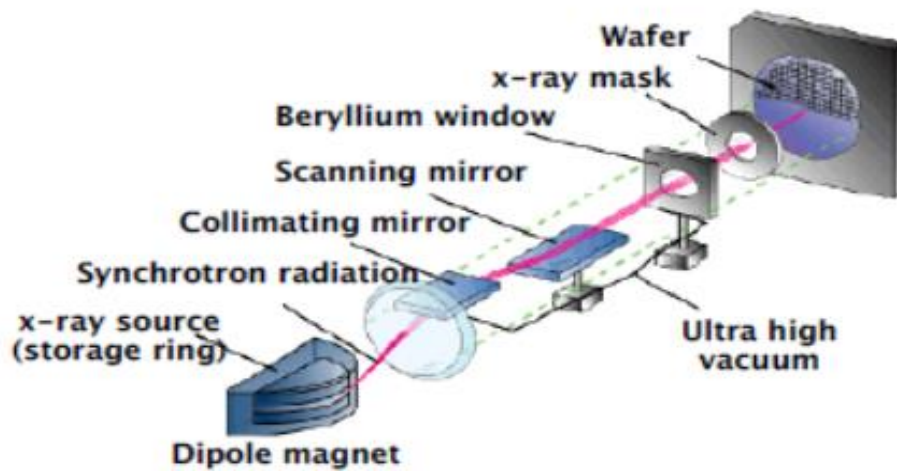
Παρά τα σημαντικά της πλεονεκτήματα (ακρίβεια, ευελιξία, υψηλή ανάλυση), η λιθογραφία με ηλεκτρονιακή δέσμη αντιμετωπίζει τεχνικές προκλήσεις όπως η περιορισμένη παραγωγικότητα λόγω της σειριακής διαδικασίας της και η ευαισθησία σε φαινόμενα διασποράς ηλεκτρονίων, τα οποία μπορούν να μειώσουν την ανάλυση. Η συνεχής τεχνολογική ανάπτυξη επικεντρώνεται στη βελτίωση της ταχύτητας αυτών των συστημάτων, μέσω καινοτομιών όπως η πολύ-δέσμη λιθογραφία, η οποία χρησιμοποιεί πολλαπλές δέσμες ταυτόχρονα για την αύξηση της παραγωγικότητας [6]. Επιπλέον, βελτιώσεις στα φωτοευαίσθητα πολυμή υλικά αναμένεται να ενισχύσουν την ευαισθησία και να μειώσουν τη διασπορά των ηλεκτρονίων, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα και την ανάλυση των συστημάτων λιθογραφίας με δέσμη ηλεκτρονίων.

### 1.3.5. Λιθογραφία ακτίνων X (X-ray)

Η λιθογραφία με ακτίνες X αποτελεί μία από τις πιο πρωτοποριακές τεχνολογίες κατασκευής μικροηλεκτρονικών, επιτρέποντας την παραγωγή χαρακτηριστικών συσκευών σε νανοκλίμακα με πρωτοφανή ακρίβεια και αποδοτικότητα. Η τεχνική χρησιμοποιεί ακτίνες X, οι οποίες διαθέτουν μικρά μήκη κύματος και μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικά λεπτομερή μοτίβα πέρα από τις δυνατότητες της παραδοσιακής φωτολιθογραφίας.

Η λιθογραφία με ακτίνες X στην κατασκευή μικροηλεκτρονικών διατάξεων χρησιμοποιούν φωτόνια με ενέργειες στο εύρος 1-10 KeV, που αντιστοιχούν σε μήκη κύματος περίπου 1 nm. Σε αυτά τα μήκη κύματος, τα φαινόμενα διάθλασης είναι ελάχιστα, καθιστώντας τη λιθογραφία με ακτίνες X κατάλληλη για τη δημιουργία χαρακτηριστικών μικρότερων από 0,1 μm με υψηλή ανάλυση [14]. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται συνήθως σε

ερευνητικά εργαστήρια και σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά μικρά μεγέθη χαρακτηριστικών. Η διαδικασία περιλαμβάνει μια μάσκα και ένα υπόστρωμα επικαλυμμένο με φωτοευαίσθητη ουσία στην ακτινοβολία. Οι ακτίνες X που διέρχονται από τη μάσκα τροποποιούν τη διαλυτότητά της, διευκολύνοντας την χάραξη περίπλοκων μοτίβων κατά τη φάση ανάπτυξης. Η ακρίβεια που προσφέρει η λιθογραφία X-ray είναι ουσιώδης για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή πυκνότητα, όπως προηγμένοι μικροεπεξεργαστές και μνήμες. Η λιθογραφία με ακτίνες X είναι καίρια στην κατασκευή ημιαγωγών, επιτρέποντας τη σμίκρυνση των αρχιτεκτονικών των συσκευών σε διαστάσεις νανομέτρων, διατηρώντας υψηλές αναλογίες πλευρικών και κατακόρυφων τοιχωμάτων κάτι το οποίο είναι ιδανικό για τρισδιάστατες δομές και δομές μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS).



Σχήμα 7 : Λιθογραφία ακτίνων X

Στη λιθογραφία με ακτίνες X, η εστίαση των ακτινών X αποτελεί σημαντική πρόκληση λόγω των ιδιοτήτων των ακτινών X. Ως εκ τούτου, τα συστήματα λιθογραφίας με ακτίνες X που χρησιμοποιούνται σήμερα εφαρμόζουν γενικά μεθόδους λιθογραφίας απόστασης (proximity). Αυτό περιλαμβάνει την τοποθέτηση της μάσκας ακτινών X κοντά στο πυρίτιο χωρίς άμεση επαφή, για να μειωθεί ο πιθανός κίνδυνος βλάβης και για να διατηρηθεί η ακεραιότητα της μάσκας και του πυριτίου.

Τα κύρια ζητήματα που περιορίζουν την ευρεία υιοθέτηση της λιθογραφίας με ακτίνες X στην παραγωγή είναι συνδεδεμένα με τις μάσκες και τις πηγές ακτινών X. Οι μάσκες για τη λιθογραφία με ακτίνες X πρέπει να έχουν «καθαρές» περιοχές που είναι διαφανείς στις ακτίνες X της τάξεως του 1 nm και «σκοτεινές» περιοχές που μπορούν να μπλοκάρουν αποτελεσματικά αυτές τις ακτίνες. Υλικά όπως ο χρυσός χρησιμοποιούνται στις σκοτεινές περιοχές για να απορροφήσουν τις ακτίνες X λόγω των υψηλών ατομικών αριθμών τους. Η ίδια η μάσκα κατασκευάζεται σε μια λεπτή μεμβράνη από υλικά όπως το νιτρίδιο του πυριτίου, που είναι διαφανή στις ακτίνες X αλλά μηχανικά εύθραυστα, απαιτώντας προσεκτικό χειρισμό και ακριβείς τεχνικές κατασκευής. Η λιθογραφία με ακτίνες X συχνά χρησιμοποιεί ένα σύστημα βήμα-και-επανάληψη, παρόμοιο με τα οπτικά steppers, για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις της δημιουργίας μεγάλων περιοχών μάσκας. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την κίνηση του πυριτίου κατά τμήματα για να εκτυπώσει

διαφορετικές ενότητες διαδοχικά, αντισταθμίζοντας το μικρότερο μέγεθος της μάσκας σε σχέση με την περιοχή του πυριτίου.

Συνολικά, ενώ η λιθογραφία με ακτίνες X προσφέρει δυνατότητες υψηλής ανάλυσης, η υιοθέτησή της σε ευρύτερα πλαίσια παραγωγής περιορίζεται από τις πολυπλοκότητες που συνδέονται με την παραγωγή μάσκας και την ανάγκη για αξιόπιστες και ανθεκτικές πηγές ακτινών X. Παρά λοιπόν τα πολλά τεχνολογικά οφέλη που προσφέρει, η λιθογραφία με ακτίνες X συνεπάγεται σύνθετες και δαπανηρές ρυθμίσεις που περιορίζουν την ευρεία υιοθέτησή της. Στο βιβλίο του Heuberger, A., Betz, H., & Pongratz, S. (1979) *Present status and problems of X-ray lithography* επισημαίνεται σχετική έρευνα που στοχεύει στη μείωση του κόστους το οποίο είναι συνδεδεμένο με τις πηγές ακτινών X και την ανάπτυξη πιο ευαίσθητων υλικών για την περαιτέρω ενίσχυση της αποδοτικότητας και της εφαρμοσιμότητας της διαδικασίας. Το μέλλον της λιθογραφίας με ακτίνες X, τροφοδοτούμενο από συνεχείς καινοτομίες, υπόσχεται περαιτέρω σμίκρυνση των ηλεκτρονικών συστατικών και επέκταση σε νέους τομείς εφαρμογής όπως η βιοτεχνολογία και η νανο-φωτονική [7].

## 1.4. Θετική και αρνητική λιθογραφία

Πέραν του διαχωρισμού λόγω της θέσης της μάσκας η μέθοδος της οπτικής λιθογραφίας διαχωρίζεται και με βάση την μέθοδο θετικής ή αρνητικής απεικόνισης της επιθυμητής δομής.

### 1.4.1. Θετική λιθογραφία

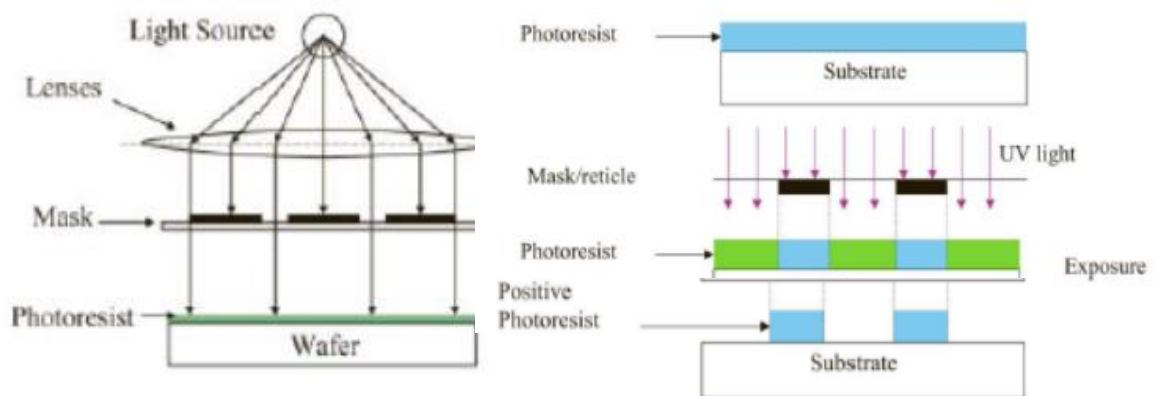
Η συνεχής ζήτηση για μικρότερες, ταχύτερες και πιο αποδοτικές ηλεκτρονικές διατάξεις έχει καταστήσει απαραίτητη την πρόοδο της οπτικής λιθογραφίας. Η θετική οπτική λιθογραφία, που διακρίνεται από τη χρήση ενός φωτοευαίσθητου υλικού του οποίου οι δεσμοί αποδυναμώνονται κατά την έκθεση του στο φως, επιτρέπει τη δημιουργία περίπλοκων μοτίβων που απαιτούνται από τη σύγχρονη μικροηλεκτρονική.

Η διαδικασία της θετικής οπτικής λιθογραφίας ξεκινά με την προετοιμασία του υποστρώματος, η οποία περιλαμβάνει μια ενδεδειγμένη καθαριότητα για να εξασφαλιστεί η αφαίρεση των όποιων σωματιδίων που θα μπορούσαν να εμποδίσουν την πρόσφυση και την ακεραιότητα της φωτοευαίσθητης ουσίας, η οποία θα τοποθετηθεί πάνω στο υπόστρωμα. Αυτή η διαδικασία καθαρισμού χρησιμοποιεί συνήθως μια συνδυασμένη μέθοδο χημικών «πλύσεων» και βημάτων ξεπλύματος για να επιτευχθεί μια όσο το δυνατόν καθαρότερη επιφάνεια. Συνήθως χρησιμοποιείται ξέπλυμα με ακετόνη, στη συνέχεια προπανόλη και υπερκάθαρο νερό ως βήματα καθαρισμού του δείγματος. Τέλος από το υπόστρωμα αφαιρείται όλη η υγρασία χρησιμοποιώντας άζωτο το οποίο είναι αδρανές αέριο και δεν θα οδηγήσει στην οξείδωση του.

Μετά την προετοιμασία του υποστρώματος, το wafer επικαλύπτεται με μια φωτοευαίσθητη πολυμερή στρώση, την ρητίνη. Η εφαρμογή της ρητίνης επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας περιστροφικής επίστρωσης (spin coating), όπου το υγρό φωτοευαίσθητο πολυμερές τοποθετείται στο κέντρο του περιστρεφόμενου υποστρώματος

(wafer). Οι κεντροφυγικές δυνάμεις απλώνουν τη ρητίνη προς τα έξω, δημιουργώντας μια ομοιόμορφη λεπτή μεμβράνη. Το πάχος αυτής της μεμβράνης είναι κρίσιμο και μπορεί να ελεγχθεί από το ιξώδες του διαλύματος καθώς και την ταχύτητα περιστροφής. Μετά την επίστρωση, η μικροηλεκτρονική διάταξη υπόκειται σε ένα ήπιο ψήσιμο (90-95° για 5-10') στερεοποιώντας έτσι τη μεμβράνη και βελτιώνοντας την πρόσφυσή της στο υπόστρωμα.

Το επόμενο βήμα είναι η ευθυγράμμιση (mask alignment) και η έκθεση στο υπεριώδες φως (UV) μέσω μιας οπτικής μάσκας, η οποία αποτυπώνει το επιθυμητό μοτίβο στην επιφάνεια της ρητίνης. Η μάσκα περιέχει το αντίστροφο του επιθυμητού μοτίβου και μπλοκάρει το UV φως σε ορισμένες περιοχές ενώ επιτρέπει τη διέλευσή του σε άλλες. Κατά την έκθεση, η χημική δομή των εκτεθειμένων περιοχών της θετικής ρητίνης αλλάζει, καθιστώντας αυτές τις περιοχές διαλυτές στο διάλυμα ανάπτυξης (developer).



Σχήμα 8 : Θετική λιθογραφία

Ακολουθεί η φάση ανάπτυξης (development), όπου το wafer βυθίζεται σε ένα διάλυμα (developer) που διαλύει επιλεκτικά τις εκτεθειμένες περιοχές της φωτοεαίσθητης ουσίας, αποκαλύπτοντας το υποκείμενο υπόστρωμα σε εκείνες τις περιοχές. Σημαντικό ρόλο σε αυτό το βήμα παίζει ο χρόνος έκθεσης του wafer στο διάλυμα για να διασφαλιστεί ότι αφαιρούνται μόνο οι περιοχές που έχουν εκτεθεί στην UV ακτινοβολία και ότι οι μη εκτεθειμένες περιοχές παραμένουν ανέπαφες, μεταφέροντας έτσι το μοτίβο από τη μάσκα στη στρώση της μεμβράνης.

Τέλος μετά το στάδιο της ανάπτυξης εκτελείται ένα ακόμη ψήσιμο για να σκληρύνει το μοτίβο της που έχει παραμείνει, ενισχύοντας την αντοχή του στις επόμενες διαδικασίες όπως κόψιμο, εναπόθεση μετάλλων ή και δεύτερη έκθεση με άλλη μάσκα.

#### 1.4.2. Αρνητική λιθογραφία

Η διαδικασία της αρνητικής λιθογραφίας έχει αρκετά κοινά με την θετική με κάποιες όμως θεμελιώδεις διαφορές.

Η διαδικασία της αρνητικής λιθογραφίας έχει δύο βασικά στάδια.



Έκθεση: Όταν η αρνητικού τόνου φωτοευαίσθητη ουσία εκτίθεται στο υπεριώδες φως η ενέργεια από τα φωτόνια προκαλεί μια φωτοχημική αντίδραση που οδηγεί στη διασύνδεση των πολυμερικών αλυσίδων μέσα στο πολυμερές. Αυτή η διασύνδεση αυξάνει το μοριακό βάρος των αλυσίδων στις εκτεθειμένες περιοχές και τις καθιστά αδιάλυτες στο διάλυμα ανάπτυξης (developer).

Ανάπτυξη: Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, οι μη εκτεθειμένες περιοχές της ρητίνης αφαιρούνται από τον διαλύτη (developer), αφήνοντας το επιθυμητό μοτίβο πάνω στο wafer πυριτίου. Οι περιοχές όπου η ρητίνη αρνητικού τόνου έχει γίνει αδιάλυτη σχηματίζουν το μοτίβο της μάσκας για τις επόμενες διαδικασίες εγχάραξης ή lift off που θα λάβουν χώρα στην συνέχεια.

Παρόλα αυτά όπως όλες οι μέθοδοι αντιμετωπίζει και αρκετές προκλήσεις οι οποίες σχετίζονται με τη ανάλυση. Οι αρνητικού τόνου γενικά προσφέρουν χαμηλότερη ανάλυση σε σύγκριση με τις θετικού. Αυτό οφείλεται στο φυσικό «φούσκωμα» που συμβαίνει κατά τη διαδικασία διασύνδεσης, το οποίο μπορεί να προκαλέσει ασάφειες στις άκρες των μοτίβων.

Γενικότερα η χρήση αρνητικών φωτοευαίσθητων ουσιών είναι μια κρίσιμη απόφαση που βασίζεται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις της διαδικασίας κατασκευής, ισορροπώντας την ανάγκη για ακρίβεια μοτίβου με την ικανότητα του υλικού να αντέχει σε επόμενα βήματα επεξεργασίας.

### 1.4.3. Λιθογραφία αντίστροφης απεικόνισης

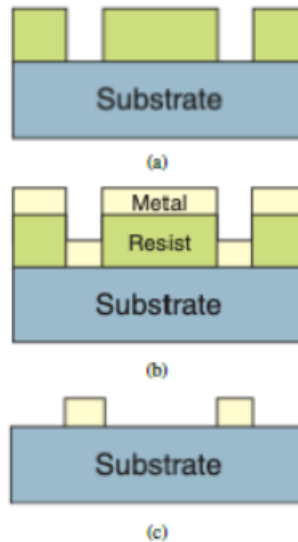
Αξίζει να σημειωθεί πως για τους σκοπούς του δικού μας πειράματος χρησιμοποιήθηκε μία συγκεκριμένη ρητίνη, η οποία έχει τις ιδιότητες και των 2 προαναφερθέντων. Το πολυμερές υλικό **AZ 5214 E Photoresist**, αντίθετα με τις παραδοσιακές ρητίνες που παρέχουν μόνο θετική ή αρνητική απεικόνιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δύο λειτουργίες<sup>2</sup>. Ωστόσο, χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στη λειτουργία αντίστροφης απεικόνισης, που περιλαμβάνει μια διαδικασία δύο βημάτων, όπου το αρχικά εκτεθειμένο σε υπεριώδη ακτινοβολία μοτίβο περνάει μια ακόμη διαδικασία ψήσιματος, η οποία ακολουθείται από μια ολική έκθεση (flood exposure) που αναπτύσσει μια αρνητική εικόνα της επιλεγμένης μάσκας.

Πιο συγκεκριμένα στην δική περίπτωση η διαδικασία είναι η εξής.

- Η πρώτη έκθεση γίνεται με την χρήση της οπτικής μάσκας και ακολουθείται από ένα επιπλέον ψήσιμο στους 120° για 1:30 min. Αυτό το βήμα ενεργοποιεί έναν παράγοντα διασύνδεσης στις εκτεθειμένες περιοχές της, καθιστώντας αυτές τις περιοχές αδιάλυτες στον διαλύτη (developer) και πλέον μη ευαίσθητες στο φως, αντίθετα με τη συμπεριφορά μιας τυπικής θετικής φωτοευαίσθητης ουσίας.
- Μετά το ψήσιμο, ολόκληρο το wafer πυριτίου υπόκειται σε ολική έκθεση (έκθεση σε φως χωρίς μάσκα), η οποία επηρεάζει μόνο τις μη εκτεθειμένες περιοχές καθιστώντας αυτές διαλυτές στο developer.

<sup>2</sup> <https://dvh.physics.illinois.edu/pdf/AZ5214E.pdf>

- Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία ανάπτυξης όπου χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο διάλυμα (όπως το AZ 351B ή το AZ 726), το οποίο αφαιρεί τις διαλυτές περιοχές της ρητίνης και αφήνει το αρνητικό μοτίβο της μάσκας στο υπόστρωμα.



Σχήμα 9 : Λιθογραφία αρνητικής απεικόνισης

Η συγκεκριμένη ουσία προορίζεται κυρίως για την τεχνική lift-off την οποία αναλύουμε παρακάτω.

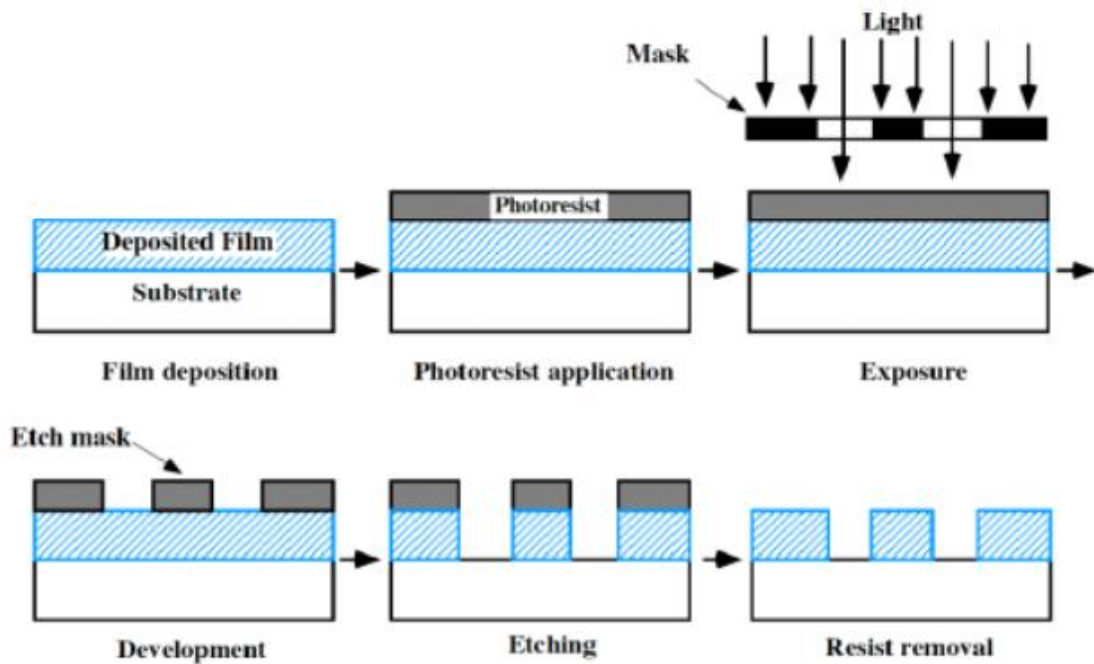
## 1.5. Lift-off και εγχάραξη

Οι τεχνικές του lift-off και εγχάραξης είναι δύο βασικές διαδικασίες στην οπτική λιθογραφία, όπου καθεμία εξυπηρετεί ξεχωριστό ρόλο στο σχηματισμό μοτίβων σε ένα υπόστρωμα για την ανάπτυξη μικροηλεκτρονικών διατάξεων και εφαρμογών. Ενώ και οι δύο στοχεύουν στη δημιουργία μοτίβων υψηλής ακρίβειας, χρησιμοποιούν ουσιαστικά διαφορετικές προσεγγίσεις. Αφαιρετική για την εγχάραξη (αφαιρούνται οι εκτεθειμένες περιοχές του υποστρώματος) και εναπόθεση υλικού ακολουθούμενη από αφαίρεση των μη επιθυμητών περιοχών για το lift-off (αφαίρεση του υλικού που βρίσκεται πάνω από τα μοτίβα της ρητίνης μέσω βύθισης του δείγματος σε διάλυμα ακετόνης). Η κατανόηση των λεπτομερειών, των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων της κάθε μεθόδου είναι σημαντική για την επιλογή της πιο κατάλληλης ανάλογα με τις ανάγκες κατασκευής.

### 1.5.1. Εγχάραξη (Etching)

Η εγχάραξη είναι μια κρίσιμη διαδικασία στην κατασκευή ημιαγωγών, χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ή να αφαιρέσει υλικό από το υπόστρωμα μέσω υγρών

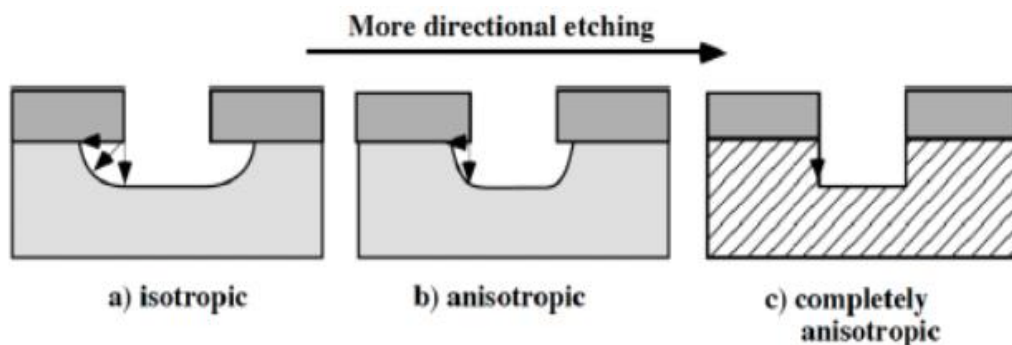
ή ξηρών μεθόδων. Παίζει θεμελιώδη ρόλο στο σχηματισμό τμημάτων των διατάξεων για τη δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Σχήμα 10 : Διαδικασία εγχάραξης

Η υγρή εγχάραξη περιλαμβάνει χημικά διαλύματα που αφαιρούν επιλεκτικά υλικά από το υπόστρωμα. Η διαδικασία είναι γνωστή για τις ιστροπικές της ιδιότητες εγχάραξης, το οποίο σημαίνει ότι η εγχάραξη γίνεται ομοιόμορφα στο υλικό σε όλες τις κατευθύνσεις, κάτι που όμως μπορεί να οδηγήσει σε χαράξεις κάτω από τη μάσκα. Συνηθισμένα εγχαρακτικά διαλύματα είναι το υδροφθορικό οξύ για την αφαίρεση του διοξειδίου του πυριτίου και ένα μείγμα νιτρικού, οξικού και φωσφορικού οξέος για την εγχάραξη των μετάλλων, όπως το αλουμίνιο [12].

Αυτή η μέθοδος είναι απλή και οικονομικά αποδοτική αλλά δεν διαθέτει την ακρίβεια για τη δημιουργία απότομα οριοθετημένων δομών που απαιτούνται στη σύγχρονη τεχνολογία VLSI λόγω της ιστροπικής της φύσης των χημικών.



Σχήμα 11 : Ισοτροπική και ανιστροπική απεικόνιση εγχάραξης

Αντιθέτως, η ξηρή εγχάραξη με πλάσμα ξεχωρίζει λόγω της ικανότητάς της να παράγει έντονα ανισοτροπικά προφίλ εγχάραξης, τα οποία είναι κρίσιμα για τη δημιουργία μοτίβων υψηλής ακρίβειας και καλά οριοθετημένων χαρακτηριστικών, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζεται στην ανάπτυξη VLSI ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η διαδικασία περιλαμβάνει την παραγωγή ενός πλάσματος από μερικά ιονισμένο αέριο που περιέχει ιόντα, ηλεκτρόνια και ουδέτερα είδη το οποίο διευκολύνει τη διαδικασία εγχάραξης μέσω φυσικών και χημικών αντιδράσεων. Υπάρχουν δύο κύρια ήδη εγχάραξης με πλάσμα η χημική και η ιοντική.

- Χημική Εγχάραξη:

Περιλαμβάνει ρίζες πλάσματος, οι οποίες αντιδρούν χημικά με το υλικό στην επιφάνεια του υποστρώματος. Οι ρίζες πλάσματος είναι υλικά τα οποία έχουν μη δεσμευμένα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στιβάδα. Οι αντιδράσεις αυτές συνήθως δημιουργούν πτητικά υποπροϊόντα που απομακρύνονται από το θάλαμο, αφαιρώντας αποτελεσματικά υλικό από το πυρίτιο. Όπως σημειώνεται, αυτός ο μηχανισμός μοιάζει με την υγρή χημική εγχάραξη, αλλά συμβαίνει σε αέρια φάση και μπορεί να γίνει και τοπικά στις περιοχές που εκτίθενται στο πλάσμα, παρέχοντας μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και έλεγχο.

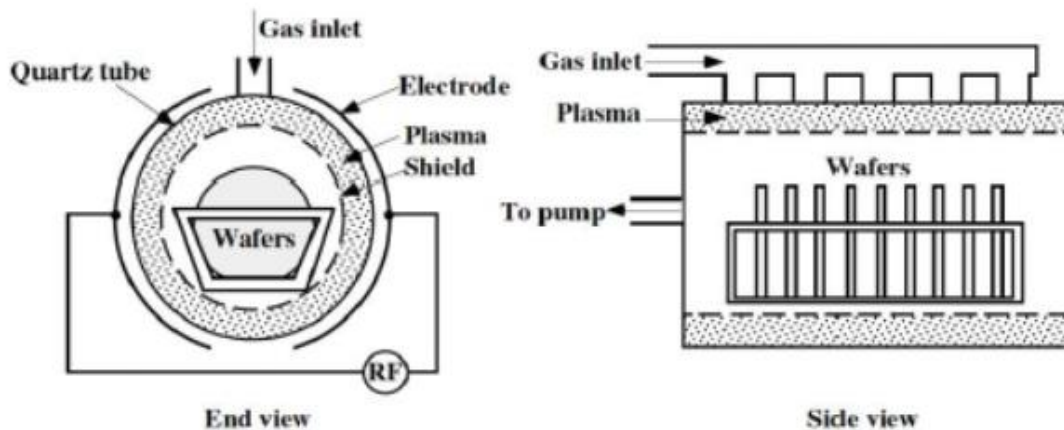
- Φυσική Εγχάραξη:

Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιεί ιόντα που επιταχύνονται από το πλάσμα προς το υπόστρωμα με υψηλές ενέργειες. Όταν χτυπούν την επιφάνεια, αυτά τα ιόντα αποκόπτουν άτομα υλικού. Αυτή η μέθοδος είναι πιο κατευθυντική από τη χημική εγχάραξη και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται ανισοτροπία, καθώς αποφεύγει κυρίως τις υποεγχαράξεις κάτω από τη μάσκα.

Ιοντική Ενίσχυση Εγχάραξης: Συνδυάζει τις παραπάνω δύο μεθόδους, όπου τα ιόντα όχι μόνο διασκορπίζουν υλικό αλλά και προωθούν χημικές αντιδράσεις διασπώντας τους χημικούς δεσμούς στο υλικό. Αρχικά στο δείγμα πυριτίου το οποίο βρίσκεται εντός του θαλάμου εγχάραξης απελευθερώνεται αέριο ( $\text{XeF}_2$ ) το οποίο πραγματοποιεί εγχάραξη σε πολύ χαμηλή συχνότητα. Στη συνέχεια μια δέσμη ιόντων κατευθύνεται στο δείγμα αυξάνοντας την συχνότητα εγχάραξης μέχρι και δέκα φορές [12]. Αυτή η μέθοδος ενισχύει τον ρυθμό και την επιλεκτικότητα της διαδικασίας εγχάραξης, επιτρέποντας λεπτομερέστερο έλεγχο σε περίπλοκες δομές.

Για την υλοποίηση των παραπάνω μεθόδων έχουν υλοποιηθεί διάφορα συστήματα εγχάραξης. Κάποια από αυτά αναλύονται παρακάτω.

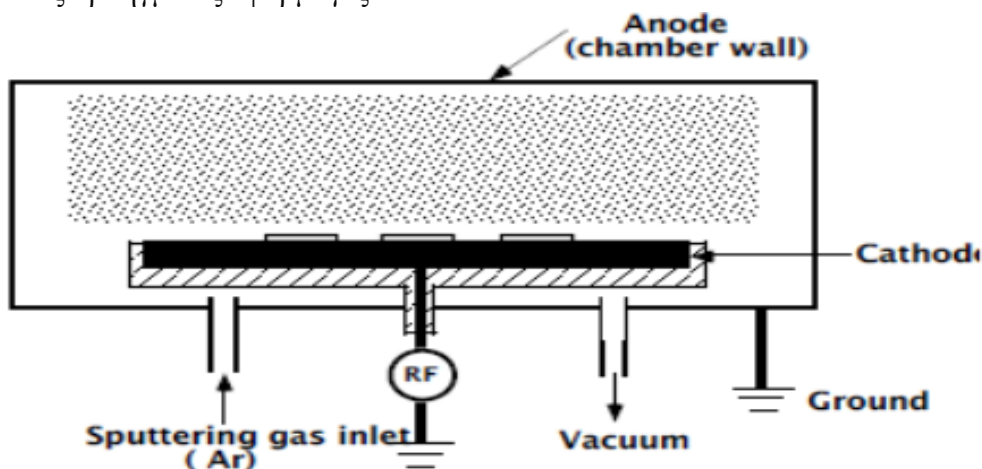
Κυλινδρικοί Χαρακτες : Αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για ισοτροπική εγχάραξη και είναι απλούστεροι και λιγότερο δαπανηροί από άλλους τύπους. Το υλικό χαράσσεται ομοιόμορφα από όλες τις κατευθύνσεις, κάτι που είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου η λεπτομέρεια ανάλυσης και η ανισοτροπία δεν είναι κρίσιμες.



Σχήμα 12 : Κυλινδρικός εγχάρακτης

Συστήματα Παράλληλων Πλακών: Χρησιμοποιούνται συνήθως για αντιδραστική ιοντική εγχάραξη (RIE), αυτά τα συστήματα αποτελούνται από δύο παράλληλες πλάκες με το πλάσμα που παράγεται μεταξύ τους. Η κάτω πλάκα κρατά το πυρίτιο και μπορεί να διαμορφωθεί για να ελέγχει την κατεύθυνση και την ενέργεια των ιόντων, κάνοντάς την ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή ανισοτροπική εγχάραξη.

Συστήματα Υψηλής Πυκνότητας Πλάσματος: Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν πλάσμα που συνδυάζεται επαγωγικά (ICP method) ή με ηλεκτρονική κυκλοτρονική αντίσταση (ECR) για να δημιουργήσουν ένα πλάσμα υψηλής πυκνότητας που παρέχει υψηλότερους ρυθμούς εγχάραξης και μεγαλύτερο έλεγχο στο προφίλ εγχάραξης. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για διαδικασίες βαθιάς εγχάραξης που απαιτούνται στην κατασκευή μνημών και στις προηγμένες εφαρμογές VLSI.



Σχήμα 13: Σύστημα Υψηλής Πυκνότητας Πλάσματος

## 1.5.2. Lift off

Η διαδικασία του lift-off είναι μια προηγμένη μέθοδος για τη διαμόρφωση υλικών σε υποστρώματα. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει αρχικά την εφαρμογή μίας φωτοευαίσθητης ουσίας στο υπόστρωμα, η οποία στη συνέχεια μορφοποιείται με λιθογραφία για να δημιουργηθούν συγκεκριμένες περιοχές όπου η τελική εναπόθεση υλικού δεν είναι επιθυμητή. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται λιθογραφία αρνητικής απεικόνισης (1.4.3). Μετά την εναπόθεση του υλικού σε όλο την μικροηλεκτρονική διάταξη, η διαδικασία lift-off είναι ισοδύναμη με την διάλυση της ρητίνης μέσα σε ένα διάλυμα ακετόνης, αφαιρώντας το ανεπιθύμητο υλικό που βρίσκεται πάνω από την ρητίνη και αφήνοντας το επιθυμητό σχέδιο. Αυτή η μέθοδος ξεχωρίζει για την ικανότητά της να δημιουργεί περίπλοκα σχέδια χωρίς άμεση εγχάραξη του υποστρώματος, ελαχιστοποιώντας έτσι την πιθανή ζημιά.

Ποιο αναλυτικά η διαδικασία είναι η εξής:

- Το wafer καλύπτεται με την φωτοευαίσθητη ουσία. Το πάχος και το είδος της ρητίνης που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τις επιθυμητές ιδιότητες και την απαιτούμενη ακρίβεια της εκάστοτε διάταξης.
- Η ρητίνη εκτίθεται στο υπεριώδες φως μέσω της οπτικής μάσκας ακολουθούμενο από τη διαδικασία ανάπτυξης (development). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει ρητίνη σε περιοχές όπου η τελική εναπόθεση δεν είναι επιθυμητή.
- Γίνεται η εναπόθεση υλικού καλύπτοντας όλο την διάταξη.
- Έπειτα, η μικροηλεκτρονική διάταξη βυθίζεται σε διάλυμα ακετόνης στο οποίο αφαιρείται η ρητίνη μαζί με το υλικό εναπόθεσης που την καλύπτει αφήνοντας τα επιθυμητά μοτίβα του υλικού, που έχει επιλεγεί.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Ακρίβεια: Επιτρέπει τη δημιουργία λεπτομερών μοτίβων χωρίς τον κίνδυνο εγχάραξης του υποστρώματος, που μπορεί να συμβεί με τις διαδικασίες εγχάραξης.
- Πολυπλοκότητα δομών: Μέσω του lift off είναι δυνατό να παραχθούν πολύπλοκες πολύ-στρωματικές δομές επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία με διάφορα υλικά τα οποία εναποθέτονται σε διαφορετικά στάδια.
- Ευελιξία Υλικού: Αποτελεσματική, με μια ευρεία γκάμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά για ηλεκτρόδια σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Ωστόσο, η τεχνική αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως περιορισμοί στην ανάλυση, οι οποίοι εξαρτώνται από την ανάλυση της ρητίνης και την ομοιομορφία της εναπόθεσης. Η διαδικασία είναι ευαίσθητη σε διακυμάνσεις στο πάχος της ρητίνης και του υλικού εναπόθεσης, που μπορεί να οδηγήσει σε ελαττωματικά μοτίβα και κακή πρόσφυση υλικού.

Ένα άλλο θέμα περιλαμβάνει τη δημιουργία "αυτιών", όπου η συσσώρευση υλικού στις άκρες του wafer περιπλέκει τη διαδικασία απομάκρυνσης και επηρεάζει την ποιότητα του προϊόντος. Παρά αυτές τις προκλήσεις, το lift off παραμένει ευρέως δημοφιλής τεχνική στην κατασκευή μικροηλεκτρονικών διατάξεων και μνημών, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά της μεθόδου.

## 1.6. Σκοπός Εργασίας

Έχοντας αναλύσει στο παρόν κεφάλαιο την σημασία της λιθογραφίας στην σύγχρονη μικροηλεκτρονική καθώς και όλες τις βασικές διαδικασίες που την διέπουν είναι σημαντικό να αναφερθούμε στον τελικό σκοπό της εργασίας αυτής.

Σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας συστοιχίας LED υψηλής ισχύος που εκπέμπει στο υπεριώδες φάσμα με στόχο την υλοποίηση ενός αισθητήρα τύπου αντίστασης μέσω της μεθόδου της αρνητικής λιθογραφίας.

Για να προχωρήσουμε στην κατασκευή της συστοιχίας αρχικά θα αναπτύξουμε στο επόμενο κεφάλαιο μία πειραματική προσωμοίωση η οποία με τη σειρά της θα βασίζεται σε ένα μαθηματικό μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει. Η προσωμοίωση είναι μείζωνος σημασίας για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των LED, όπως είναι το πλήθος που χρησιμοποιήθηκε, η ένταση τους και η γωνία ακτινοβολίας καθώς και η απόσταση που θα τοποθετηθεί το τελικό σύστημα από τα δείγματα ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της φωτεινής έντασης στην επιφάνεια ακτινοβολίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο έχοντας καταλήξει στην επιλογή των υλικών και της διάταξης τους κατασκευάζουμε την τελική συσκευή ακτινοβολίας και αναλύονται οι πειραματικές μετρήσεις σε σύγκριση με του υπολογισμούς που κάναμε ώστε να γίνει τελικός προσδιορισμός των χρόνων έκθεσης και για τις δύο περιπτώσεις λιθογραφίας, θετική και αρνητική. Ταυτόχρονα αναζητούμε το ελάχιστο μέγεθος χαρακτηριστικού που είναι εφικτό να υλοποιηθεί με αυτή την διάταξη.

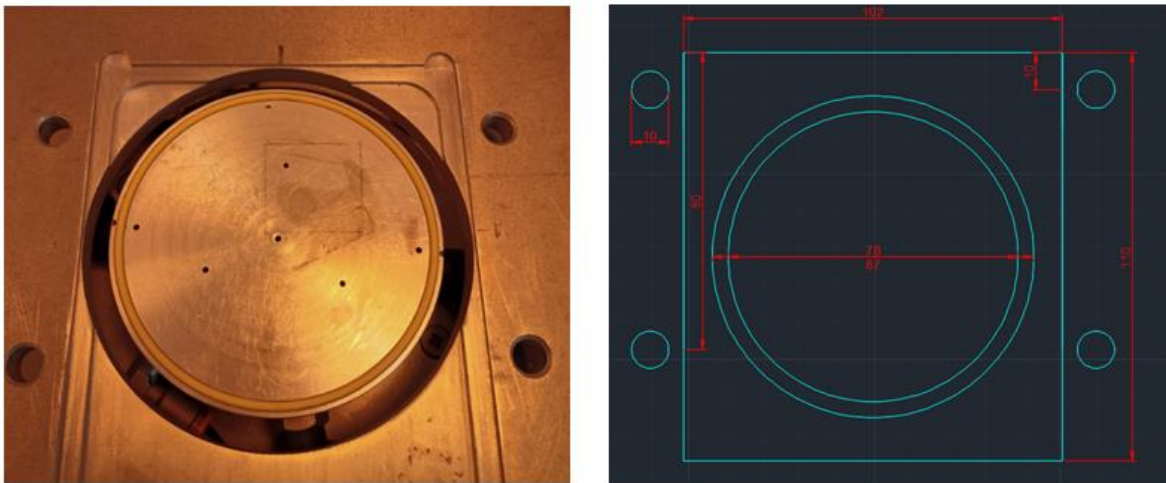
Μετά τον τελικό προσδιορισμό των χρόνων έκθεσης και του ελάχιστου χαρακτηριστικού θα χρησιμοποιήσουμε την διάταξη LED για την κατασκευή του αισθητήρα τύπου αντίστασης απο τον οποίο θα εξάγουμε ηλεκτρικές μετρήσεις και εικόνες που να επιβεβαιώνουν την λειτουργία του.

## Κεφάλαιο 2. Προσομοίωση

### 2.1. Εισαγωγή και μεταβλητές προσομοίωσης

Πρωτού ξεκινήσουμε με την κατασκευή της συσκευής led υπεριώδους ακτινοβολίας ήταν αναγκαίο να γίνει μια προσομοίωση της κατανομής και της έντασης του φωτός στην επιφάνεια έκθεσης. Η προσομοίωση αυτή έπαιξε σημαντικό ρόλο στην επιλογή του είδους των led (μέγιστη ένταση ακτινοβολίας, απαιτούμενος αριθμός και γωνία ακτινοβολίας), στην τελική κατανομή τους εντός της διάταξης led αλλά και στην τελική επιλογή του ύψους και διαμέτρου της όλης συσκευής. Για την υλοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του Matlab, με σκοπό τη δημιουργία ενός γραφήματος κατανομής της έντασης του φωτός στην επιφάνεια στην επιφάνεια έκθεσης. Το γράφημα αυτό είναι μείζωνος σημασίας και για την εύρεση του χρόνου έκθεσης του δείγματος.

Ως δεδομένα θεωρήσαμε πως τα led θα ισαπέχουν μεταξύ τους και ότι οι διαστάσεις της επιφανείας που θα τοποθετηθούν θα είναι 10X10 εκ. Ο λόγος για την επιλογή αυτή ήταν η ήδη υπάρχουσα επιφάνεια ακτινοβολίας είχε τις διαστάσεις που φαίνονται στο παρακάτω [σχήμα 14](#).



Σχήμα 14 :: Επιφάνεια ακτινοβολίας wafer

Καθώς χρειάστηκε να γίνει επιλογή από πληθώρα πηγών led έπρεπε να οριστούν μεταβλητές οι οποίες έχουν καθοριστικό ρόλο στην τελική κατανομή πάνω στην επιφάνεια.

Παρακάτω δίνεται μια λίστα των μεταβλητών που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση.

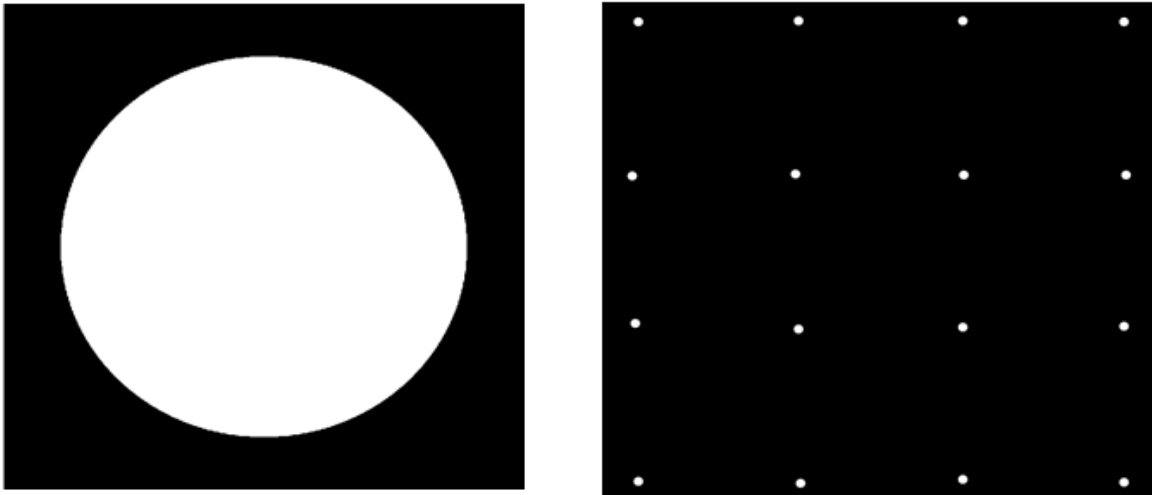
- number\_leds → Ο συνολικός αριθμός των led που χρειαζόμαστε.
- led\_placement → Η απόσταση που έχουν μεταξύ τους
- L → Το ύψος σε εκ. Από την επιφάνεια ακτινοβολίας
- Watt → Τα watt πηγής του κάθε led
- Angle → Η γωνία ακτινοβολίας φωτός του κάθε led



## 2.2. Μαθηματική μοντελοποίηση

Η υλοποίηση του κωδικα που χρησιμοποιηθηκε για την προσομοίωση βασίστηκε στην παρακάτω μαθηματική μοντελοποίηση.

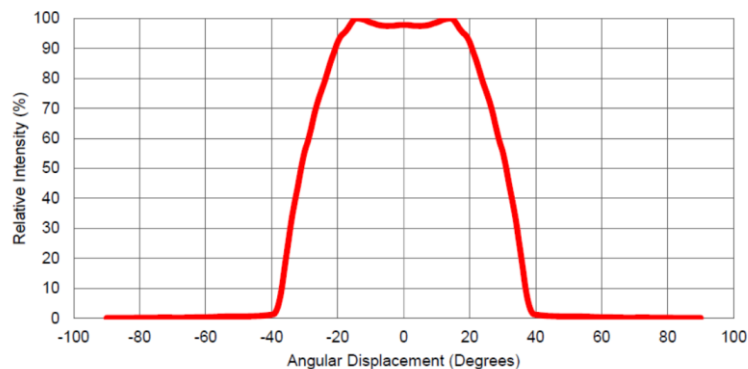
Αρχικά θεωρήσαμε πως υπάρχουν δύο επίπεδα. Αυτό της επιφάνειας ακτινοβολίας (device\_plane) και αυτο της επιφάνειας που έχουν τοποθετηθεί τα led (light\_source\_plane). Ενδεικτικά σχήματα των δύο αυτών επιφανειών που προέκυψαν απο την προσομοίωση σε Matlab παρουσιάζονται παρακάτω.



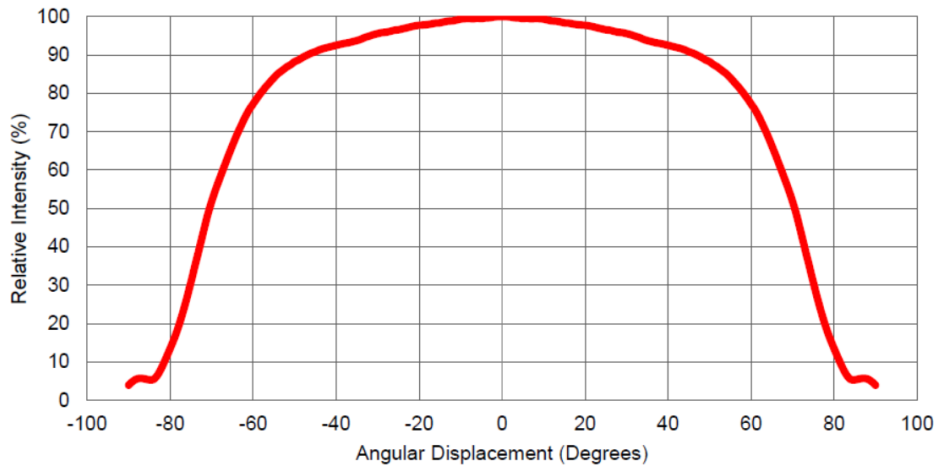
Σχήμα 15 : : Ενδεικτικές απεικονίσεις προσομείωσης επιφάνειας ακτινοβολήσης και επιφάνειας συστοιχίας των led.

Για την παραπάνω απεικόνιση ορίσαμε δύο πίνακες χιλίων θέσεων όπου το 0 αντιστοιχεί στο μαύρο χρώμα και το 1 στο λευκό. Η αριστερή απεικόνιση ταυτίζεται με το σχήμα 14 και αντιστοιχεί σε κύκλο διαμέτρου 7,8 εκ στο εσωτερικο μιας επιφάνειας 10X10 εκ. Η δεξιά απεικόνιση αντιστοιχεί στις θέσεις των led (στην συγκεκριμένη περίπτωση 16) σε μια επιφάνεια 10X10 εκ. την οποία έχουμε ορίσει εμείς και ισαπέχουν όλα μεταξύ τους.

Για να υπολογίσουμε την συνολική ένταση πάνω στην επιφάνεια φωτοβολίας χρειάζεται να υπολογιστεί η συμβολή φωτεινής ισχύος κάθε led ξεχωριστά πάνω σε όλα τα σημεία αυτής. Κάθε led έχει μια σχετική ένταση η οποία είναι ανάλογη της γωνίας ακτινοβολήσης του. Παρακάτω δίνονται 2 καμπύλες απο τα led για τα οποία κάναμε τις περισσότερες προσομοιώσεις .Πιο συγκεκριμένα ενός led 30° και ενός 130°.



Σχήμα 16 : Καμπύλη σχέσης έντασης-γωνίας led 30°



Σχήμα 17: Καμπύλη σχέσης έντασης-γωνίας led 130°

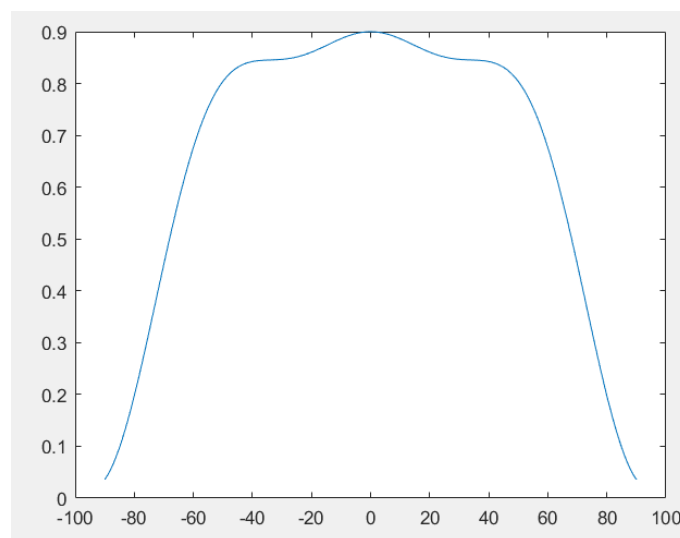
Αξίζει να σημειωθεί πως οι παραπάνω καμπύλες είναι κανονικοποιημένης ισχύος και πως στο τέλος της προσομοίωσης έγινε μετατροπή σε κανονικά watt με βάση την μέγιστη τιμή έντασης του κάθε led.

Για να μπορέσουμε να βρούμε την κατα προσέγγιση συνάρτηση με τη μεγαλύτερη ακρίβεια σχέσης κανονικοποιημένης ισχύος και γωνίας ακτινοβολήσης χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο curve fitting του Matlab. Μέσω αυτού εισάγοντας ορισμένες απο τις τιμές έντασης και γωνιών που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα μπορέσαμε να παράξουμε συναρτήσεις που τα προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι συναρτήσεις είχαν την παρακάτω μορφή.

$$I = a_1 \times \sin(b_1 \times angle + c_1) + a_1 \times \sin(b_1 \times angle + c_1) + a_1 \times \sin(b_1 \times angle + c_1) + a_1 \times \sin(b_1 \times angle + c_1)$$

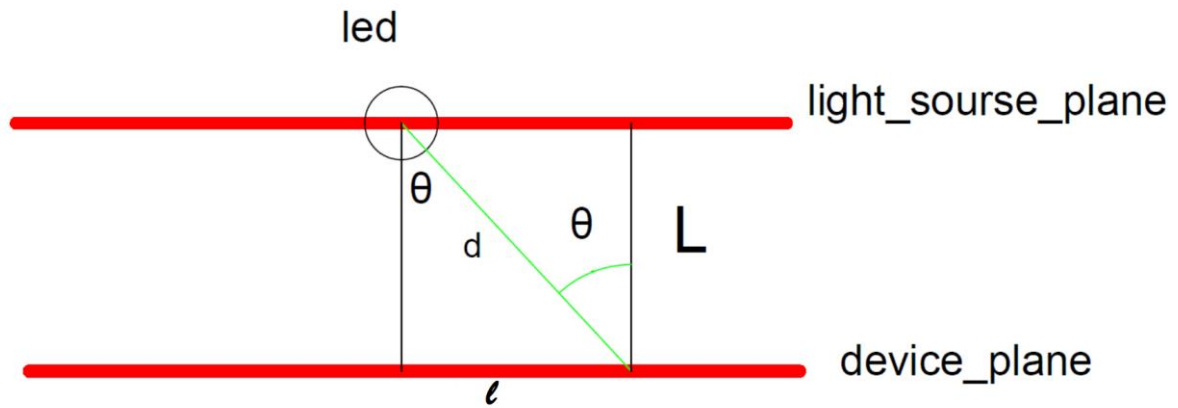
Όπου I η κανονικοποιημένη ένταση, angle η γωνία ακτινοβολήσης του led σε rad και a,b,c οι σταθερές που προέκυψαν με τη βοήθεια του εργαλείου curve fitting.

Για παράδειγμα η γραφική συνάρτηση που προέκυψε με βάση το [σχήμα 17](#) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 18 : Curve fitting για led 130°

Έχοντας βρεί την σχέση γωνίας και ισχύος μένει να υπολογιστούν όλες οι γωνίες σε σχέση με τη επιφάνεια ακτινοβολήσης για κάθε led ώστε να μπορέσουμε εν τέλη να αθροίσουμε όλες τις εντάσεις και να έχουμε την τελική κατανομή έντασης πάνω στην επιφάνεια .Για τον υπολογισμό της γωνίας  $\theta$  χρησιμοποιήθηκε απλή γεωμετρία η οποία αναλύεται παρακάτω .



Σχήμα 19 : Γεωμετρική απεικόνιση γωνίας ακτινοβολήσης κάθε led

Με βάση το παραπάνω σχήμα η γωνία  $\theta$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\cos \theta = \frac{L}{d}$$

Όπου

$$l = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

$$d = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + L^2}$$

και  $L$  το ύψος μεταξύ device\_plane και led .

Επομένως

$$\theta = \cos^{-1} \frac{L}{d}$$

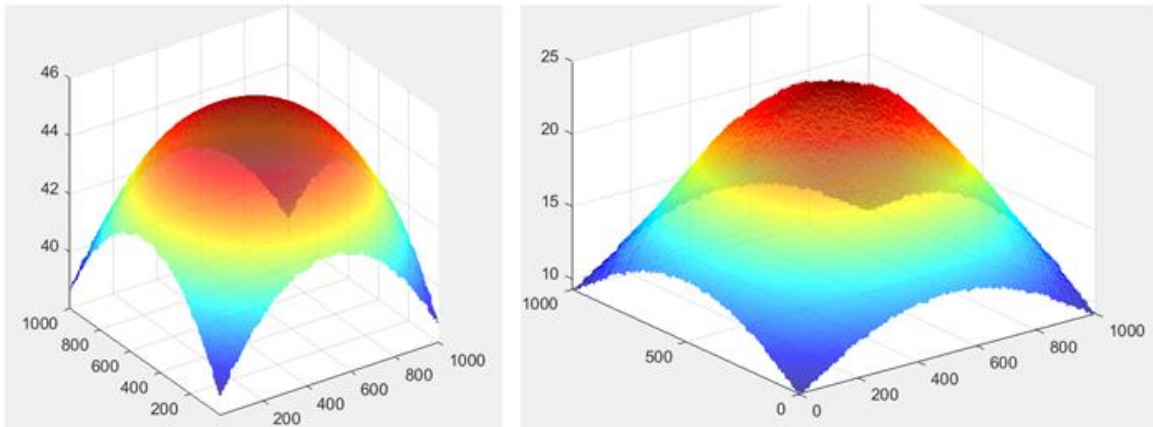
Έχοντας λοιπόν βρεί τρόπο να υπολογίσουμε όλες τις πιθανές γωνίες όπως και τη σχέση της έντασης με τη κάθε γωνία αρκεί να υπολογίσουμε την κατανομή της έντασης που εκπέμπει το κάθε led και να τις αθροίσουμε ώστε να λάβουμε τη συνολική κατανομή.

### 2.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

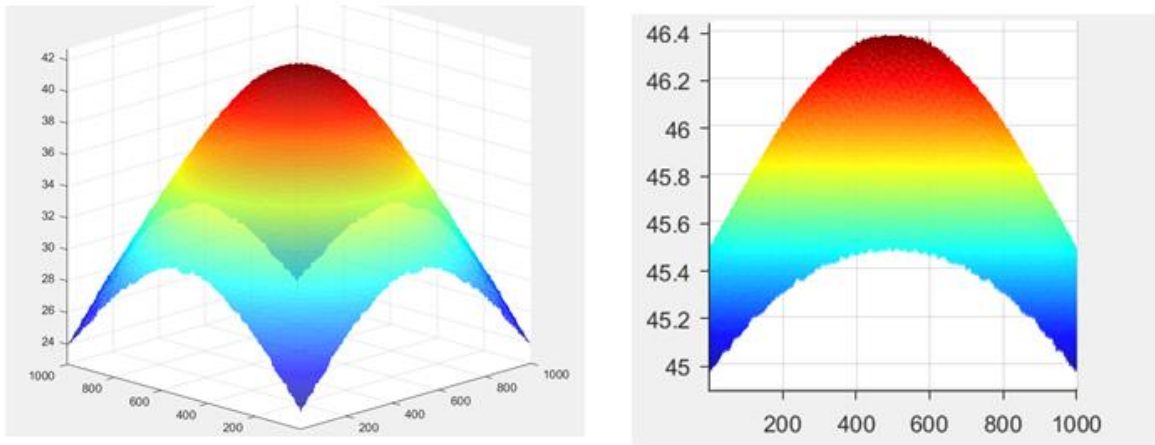
Για να καταλήξουμε στην επιλογή led έγιναν πάνω απο 20 προσομοιώσεις με διαφορετικό αριθμό πηγών φωτός, έντασης (watt) και οπτικής γωνίας. Παρακάτω δίνονται εικόνες τις προσομοιώσεις καθώς και ένας πίνακας με τις διαφορετικές μεταβλητές οι οποίες μας οδήγησαν σε συμπεράσματα για την τελική συστοιχία των led. Οι άξονες X,Y αντικατοπτρίζουν την επιφάνεια του δείγματος διάστασης 10X10εκ, ενώ ο άξονας Z την ένταση ακτινοβολίας σε watt.

Μιας και υπάρχει συμμετρία στην κατανομή των led ένας απο τους 2 άξονες(X,Y) είναι αρκετός για να μας δώσει μια γενική εικόνα

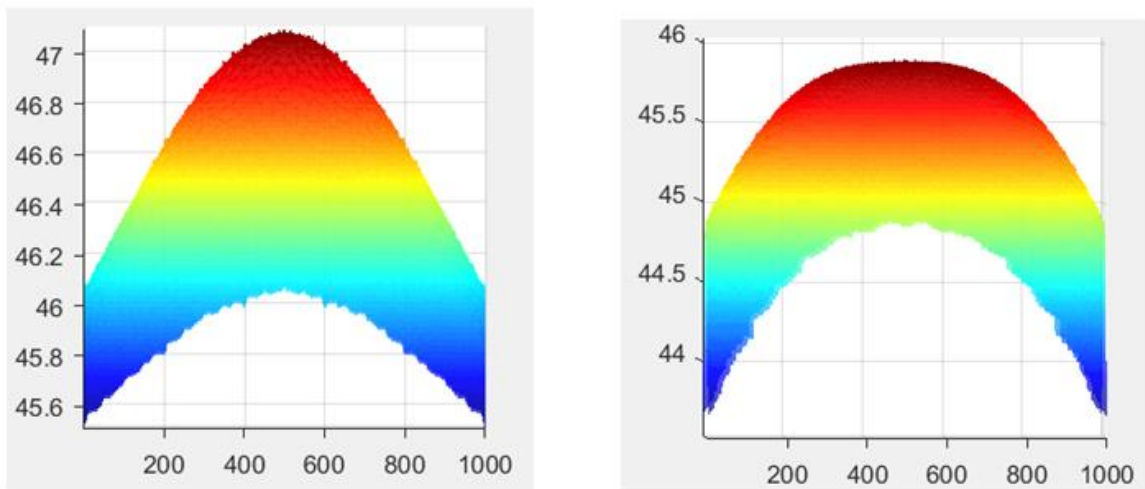
Αριθμός προσομοίωσης	Αριθμός LED	Υψος LED (L cm )	Γωνια	WATT (ενός led)	Watt (min)	Watt (max)	Ποσοστιαία μεταβολή εντασης
Προσομοίωση 1	16	5	130°	3	44,50	45,50	2,20%
Προσομοίωση 2	16	1	130°	3	20,00	24,00	16,67%
Προσομοίωση 3	16	2.5	130°	3	36,50	41,00	10,98%
Προσομοίωση 4	16	10	130°	3	46,00	46,30	0,65%
Προσομοίωση 5	16	15	130°	3	46,60	47,00	0,85%
Προσομοίωση 6	16	7.5	130°	3	45,50	45,75	<b>0,55%</b>
Προσομοίωση 7	9	7.5	130°	3	25,70	25,85	<b>0,58%</b>
Προσομοίωση 8	9	10	130°	3	25,90	26,20	1,15%
Προσομοίωση 9	9	15	130°	3	26,20	26,50	1,13%
Προσομοίωση 10	9	5	130°	3	25,00	25,50	1,96%
Προσομοίωση 11	9	1	130°	3	11,00	14,00	21,43%
Προσομοίωση 12	9	5	130°	3	11,00	11,40	3,51%
Προσομοίωση 13	3	5	30°	3	8,00	14,00	42,86%
Προσομοίωση 14	4	5	30°	3	15,00	23,00	34,78%
Προσομοίωση 15	4	10	30°	3	35,00	45,00	22,22%
Προσομοίωση 16	4	1	30°	3	4,00	0.2	<b>95,00%</b>
Προσομοίωση 17	4	15	30°	3	45,00	47,50	5,26%
Προσομοίωση 18	3	15	30°	3	26,00	27,00	3,70%



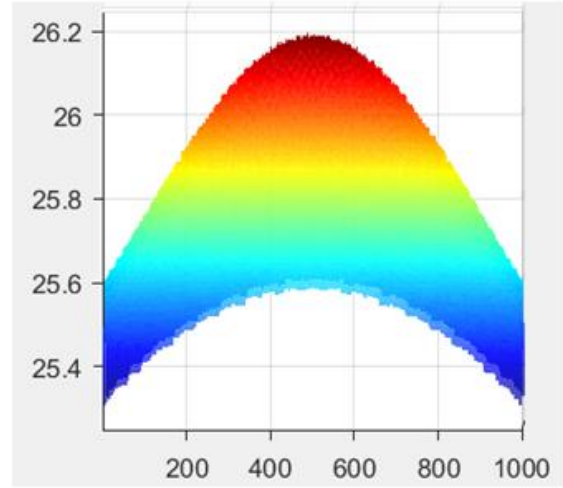
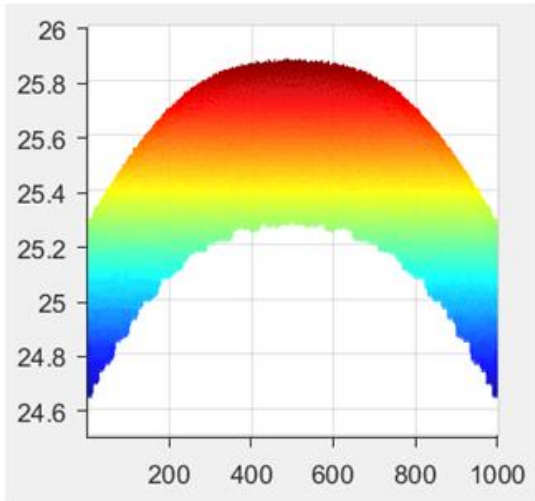
Σχήμα 20 : Προσομοιώσεις 1 και 2



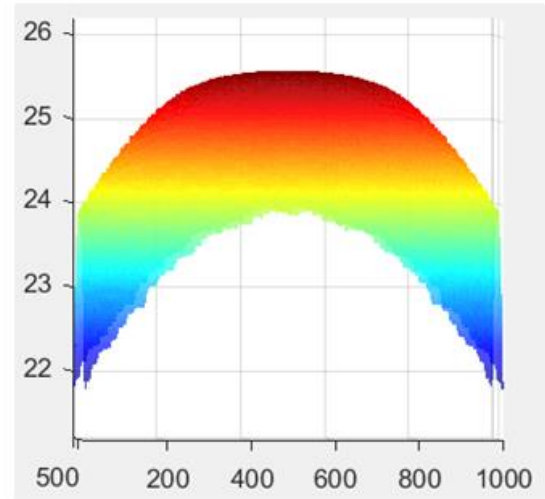
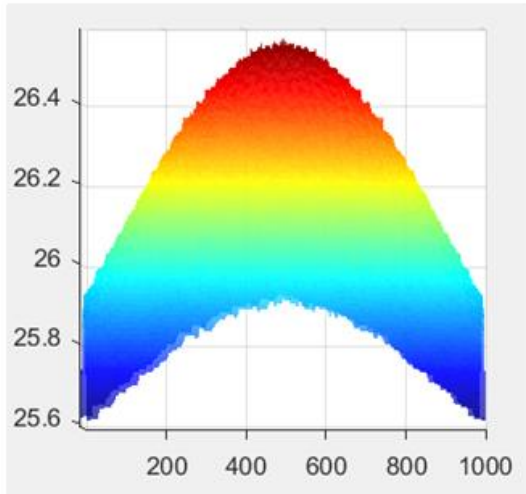
Σχήμα 21 : Προσομοιώσεις 3 και 4



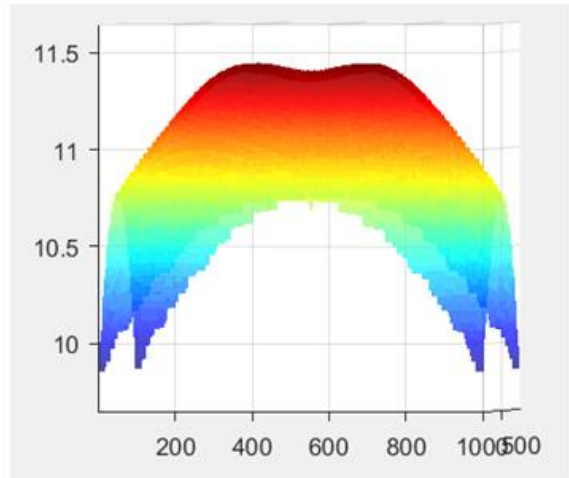
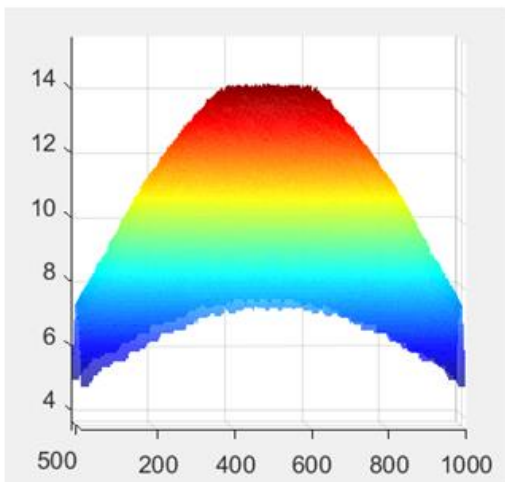
Σχήμα 22 : Προσομοιώσεις 5 και 6



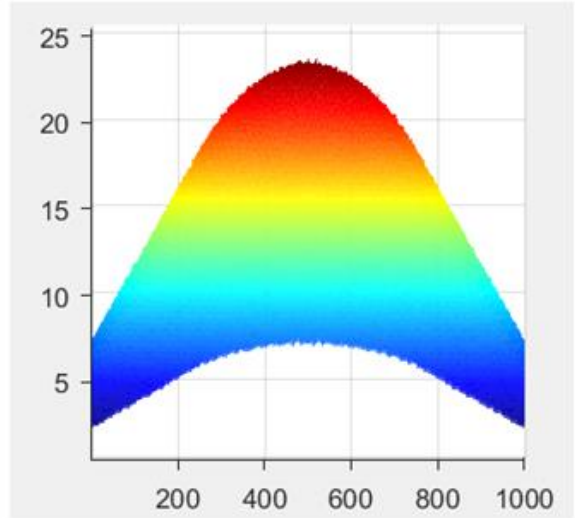
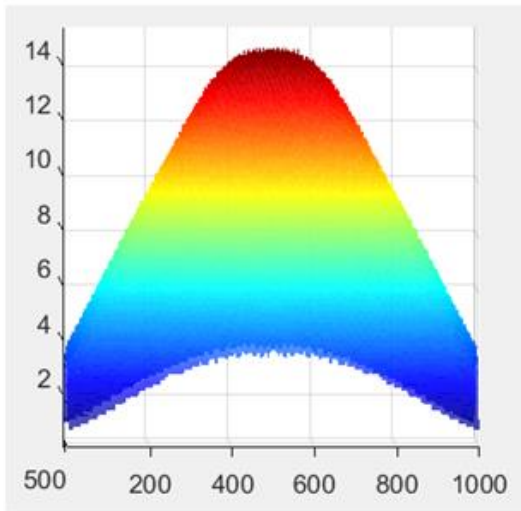
Σχήμα 23 : Προσομοιώσεις 7 και 8



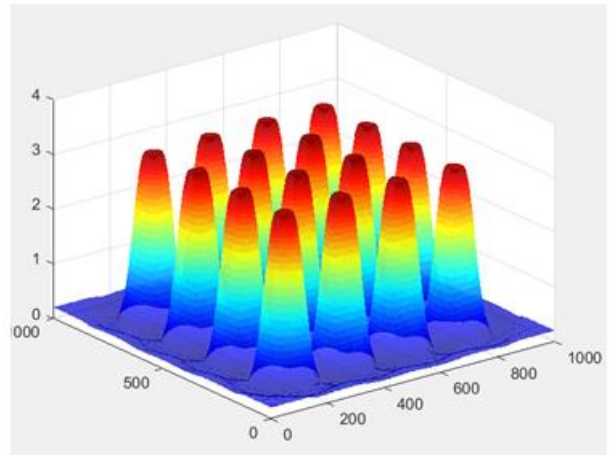
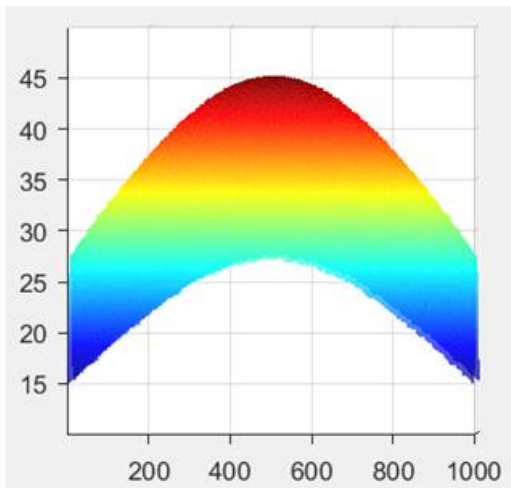
Σχήμα 24 : Προσομοιώσεις 9 και 10



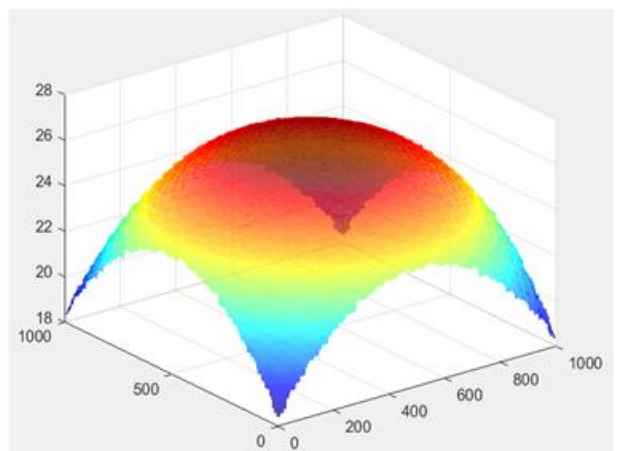
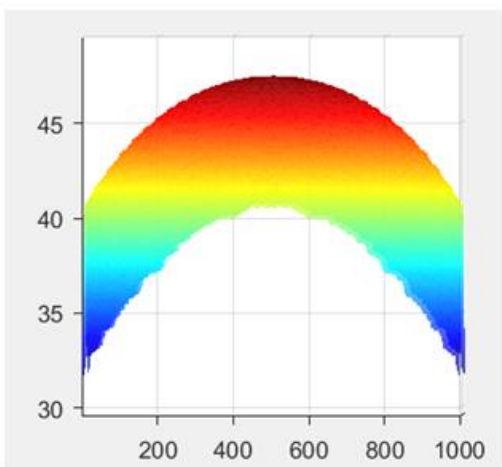
Σχήμα 25 : Προσομοιώσεις 11 και 12



Σχήμα 26 : Προσομοιώσεις 13 και 14



Σχήμα 27 : Προσομοιώσεις 15 και 16



Σχήμα 28 : Προσομοιώσεις 17 και 18

Πρωτού προβούμε σε οποιοδήποτε συμπέρασμα σημαντικό να αναφέρουμε πως για τους σκοπούς των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στοχεύαμε σε μια κατανομή υπερϊώδους ακτινοβολίας με μικρή απόκλιση έντασης στην κρίσιμη περιοχή ακτινοβολίας. Η κρίσιμη περιοχή ακτινοβολίας αντιστοιχεί σε μια κυκλική επιφάνεια η οποία είναι εμφανής στο [σχήμα 14](#) (εσωτερικός κύκλος διαμέτρου 7,8 εκ). Επομένως στα παραπάνω σχήματα προσομοιώσεων η περιοχή για ομοιομορφία και επιθυμητή τιμή έντασης που εξετάζουμε είναι μεταξύ 200-800mm.

Παρατηρώντας τις εικόνες των προσομοιώσεων 2,3,11,13,14 και 15 σε συνδυασμό με την στήλη «ποσοστιαία μεταβολή έντασης» του παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι τα ποσοστά τύπου της έντασης στην κρίσιμη επιφάνεια είναι αρκετά μεγάλα (10-40%). Οι διακυμάνσεις αυτές στην ένταση έχουν ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ελαττώματα στα επιθυμητά μοτίβα. Αυτό σημαίνει λιγότερες λειτουργικές συσκευές ανα παρτίδα παραγωγής. Επίσης μετά το στάδιο ανάπτυξης η ανομοιομορφα εκτεθειμένη ρητίνη είναι πιθανό να οδηγήσει σε ανομοιομορφη χάραξη η lift-off καθώς έχει ως αποτέλεσμα ασυνεπές πάχος στρωμάτων και χαρακτηριστικών.

Η απόκλιση της έντασης στις προσομοιώσεις 1,10,12,17,18 είναι αρκετά καλύτερη αλλά παρόλα αυτά δεν είναι ούτε εδώ ικανοποιητική καθώς υπάρχει ποσοστιαία μεταβολή της τάξεως 2-5% . Η ανομοιομορφη έκθεση αυτή και σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να δημιουργήσει παραμόρφωση των επιθυμητων μοτίβων , υποβάθμιση της ανάλυσης όπως και προβλήματα στην τελική χάραξη.

Αξιοσημείωτη προσομοίωση είναι η 16 στην οποία ορισμένες περιοχές της ρητίνης υποκεινται σε υπερβολική έκθεση ενώ άλλες δεν εκτείνονται επαρκώς. Η ποσοστιαία μεταβολή της έντασης είναι της τάξεως του 95%. Αυτή η ασυνέπεια θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα και απόδοση του τελικού προϊόντος σε βαθμό που αυτό δεν θα μπορεί να είναι λειτουργικό.

Είναι εμφανές λοιπόν πως στην UV λιθογραφία οι διακυμάνσεις στην ισχύ του φωτός μπορούν να επηράσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας και την ποιότητα των παραγόμενων μοτίβων. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων που αναφέρθηκαν είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ομοιομορφη ένταση φωτός σε όλη την επιφάνεια έκθεσης.

Με γνώμονα τα προαναφερθέντα οι πιο ικανοποιητικές προσομοιώσεις ήταν οι 4-9. Σε αυτές η ποσοστιαία μεταβολή της έντασης στην κρίσιμη επιφάνεια είναι της τάξεως του 0,5-1%. Από αυτές οι καλύτερες βάση ποσοστού μεταβολής ήταν οι 6 και η 7 (σχήματα 20,21) με ποσοστά μεταβολής 0,55% και 0,58% αντίστοιχα. Ένα όμως ακόμα κριτήριο επιλογής της ιδανικότερης προσομοίωσης ήταν η συνολική ένταση ακτινοβολίας. Στην προσομοίωση 6 ένας μέσος όρος έντασης είναι τα 45W ενώ στην προσομοίωση 6 τα 25W. Η διαφορά αυτή στην ένταση σχετίζεται με τον αριθμό των led που έχουν τοποθετηθεί στην κάθε συστοιχία (16, 4X4 στην προσομοίωση 6, 9 3X3 στην προσομοίωση 7).

Ο μετασχηματιστής που θα χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία των led μας δίνει τη δυνατότητα ρυθμίζοντας το ρεύμα εξόδου να μειώσουμε την συνολική ένταση στο επιθυμητό επίπεδο το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με το χρόνο έκθεσης. Για αυτό λοιπόν καταλήξαμε πως η προσομοίωση 6 (σχήμα 20) είναι η πιο κατάλληλη μιας και έχουμε τη δυνατότητα να μειώσουμε τη συνολική ένταση χωρίς να χρειαστεί να αλλάξουμε την διάταξη των led. Εάν επιλέγαμε την προσομοίωση 7 (σχήμα 21) υπήρχε κίνδυνος σε

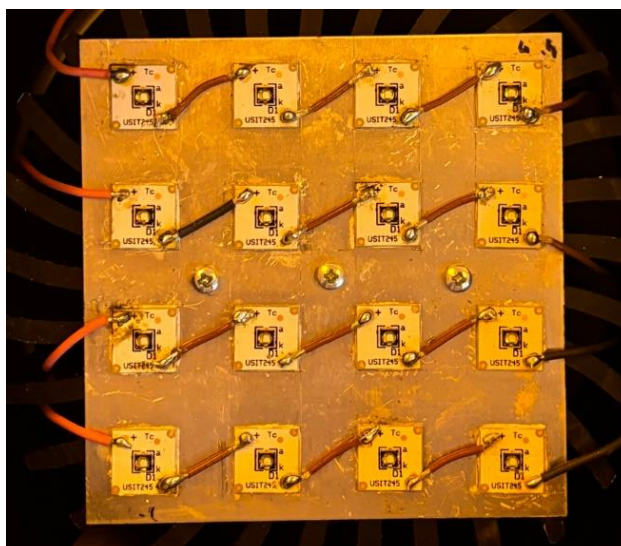
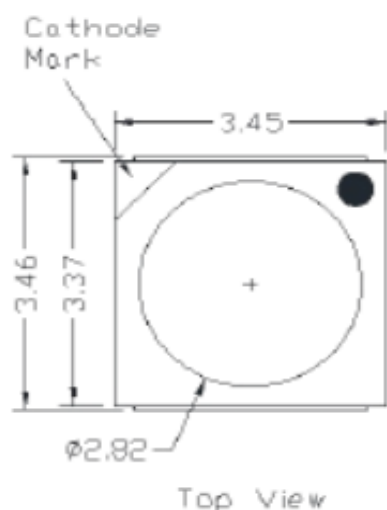


περίπτωση που θέλαμε να μειώσουμε τον χρόνο έκθεσης να μην επαρκεί η ένταση φωτισμού με αποτέλεσμα να χρειάζοταν να ξανακατασκευαστεί η διάταξη.

### Κεφάλαιο 3. Πειραματικό μέρος

Σκοπός της προσομοίωσης ήταν να καταλήξουμε σε συμπεράσματα τα οποία θα βοηθήσουν στην επιλογή της τελικής διάταξης led όπως και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της.

Αξιοποιώντας επομένως τις πληροφορίες από το κεφάλαιο 2.3 αρχικά επιλέξαμε led του οποίου η γωνία ακτινοβολήσης είναι  $130^\circ$  ώστε να έχουμε την επιθυμητή κατανομή έντασης στην επιφάνεια ακτινοβολίας. Δύο ακόμα σημαντικά στοιχεία τα οποία λάβαμε υπόψιν κατά την επιλογή των led ήταν η μέγιστη ισχύς τους και το μήκος κύματος τους. Η μέγιστη ισχύς των led που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν σε 3W και το μήκος κύματος του είναι 385-390nm. Τέλος, έπρεπε να γίνει και η κατάλληλη επιλογή σχετικά με τις διαστάσεις τους ώστε είναι εφικτό να τοποθετηθούν στην επιθυμητή διάταξη η οποία σύμφωνα με την προσομοίωση ήταν 4X4 (σχήμα 22). Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την UV πηγή δίνεται στο τέλος της σελίδας το τεχνικό της φυλλάδιο<sup>3</sup>.



Σχήμα 29 Διαστάσεις και συστοιχία led

Το μήκος κύματος των led που επιλέχθηκαν είναι άμεσα συνυφασμένο με τη ρητίνη που θα χρησιμοποιήσουμε. Στην δική μας περίπτωση η ρητίνη που χρησιμοποιούμε είναι η AZ 5214 photoresist<sup>4</sup> η οποία είναι φωτοευαίσθητη στο φάσμα 310-420nm. Σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου υλικού είναι πως παρόλο που χαρακτηρίζεται ως θετικά φωτοευαίσθητη ουσία χρησιμοποιείται κυρίως σε λιθογραφίες αρνητικής απεικόνισης η οποίες προορίζονται για τεχνικές lift-off. Η ρητίνη είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της λιθογραφίας καθώς σχετίζεται άμεσα με το είδος λιθογραφίας που θα επιλέξουμε (θετική, αρνητική) όπως και με τους χρόνους έκθεσης στο υπεριώδες φως, θέμα το οποίο θα αναλύσουμε στην επόμενη ενότητα.

<sup>3</sup> <https://www.tme.eu/Document/31771d47b86322db51a82acd8f56d456/PK2N-3LLE-V.pdf>

<sup>4</sup> <https://dvh.physics.illinois.edu/pdf/AZ5214E.pdf>

Για την ολοκλήρωση της διάταξης χρειάστηκε επίσης ένας κατάλληλος μετασχηματιστής, συνδεδεμένος με διακόπτη ON-OFF. Η επιλογή του μετασχηματιστή έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά των led που χρησιμοποιήθηκαν όπως και την συνδεσμολογία της διάταξης.

Ποιά συγκεκριμένα τα led τα οποία συνδέθηκαν όλα σε σειρά είχαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

$$I_{\text{ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ}} = 500\text{mA}$$

$$\text{και } V_{\text{ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ}} = 3,4\text{V}$$

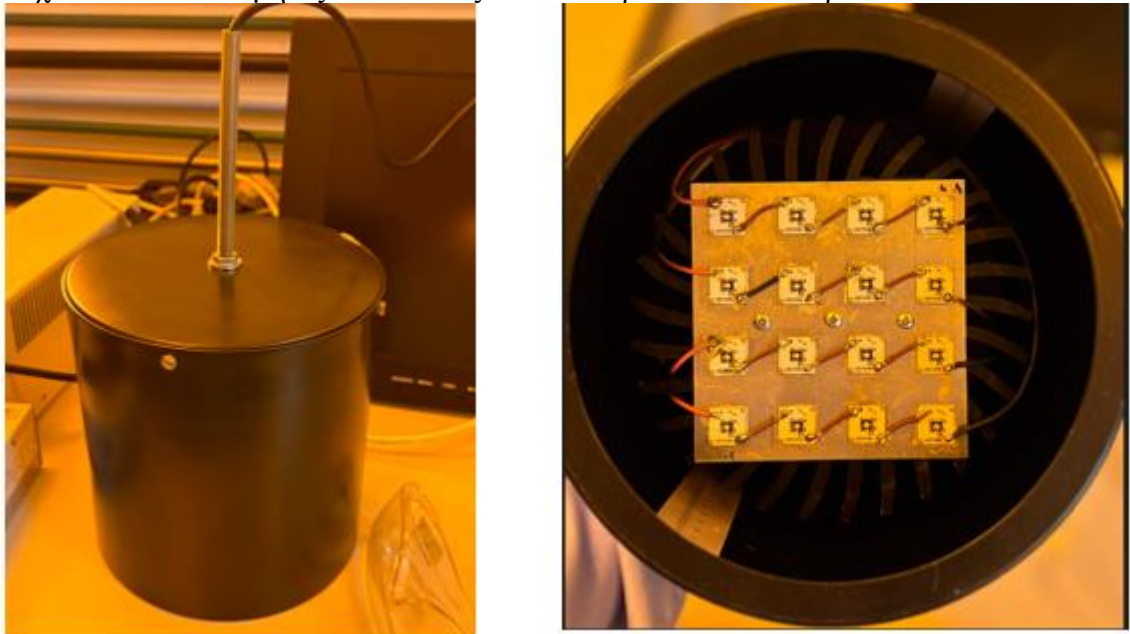
Η ένταση ρευματός σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο των led μπορεί να κυμανθεί απο 100-700mA προσφέροντας μας ευελιξία στην τελική επιλογή έντασης της διάταξης.

Ο μετασχηματιστής που επιλέχτηκε επομένως ήταν ο Phillips Xitanium 100W (220V) ο οποίος πληρεί τις απαιτούμενες προϋποθέσεις οι οποίες είναι :

$$V_{\text{total}} = 16 \times 3.4\text{V} = 54.4\text{V} \quad \text{και} \quad I_{\text{out}} = 100 - 700\text{mA}$$

Απο το τεχνικό φυλλάδιο<sup>5</sup> του μετασχηματιστή η τάση εξόδου του είναι 50-220V και το ρεύμα εξόδου 250-700ma δίνοντας μας την δυνατότητα να το μεταβάλουμε μέσω NFC.

Όλα τα παραπάνω ενσωματώθηκαν με μία επιπρόσθετη ψύκτρα διαμέτρου Φ120, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ψύξη των led και ένα βραχίονα μέσω του οποίου ρυθμίσαμε το ύψος L της συστοιχίας. Τα παραπάνω οδήγησαν στην κατασκευή του συνολικού συστήματος που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η επιλογή του μαύρου χρώματος έγινε για να αποφευχθούν οι ανεπιθύμητες ανακλάσεις στο εσωτερικό του κυλίνδρου.



Σχήμα 30 : Τελική κατασκευή συστοιχίας led

<sup>5</sup> [https://www.docs.lighting.philips.com/en\\_gb/oem/download/xitanium/Xitanium\\_100W\\_0.25-0.7A\\_220V\\_S\\_230V\\_929001529506.pdf](https://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/xitanium/Xitanium_100W_0.25-0.7A_220V_S_230V_929001529506.pdf)

Έχοντας κατασκευάσει την συσκευή UV ακτινοβολίας θέσαμε ως στόχο την αναζήτηση της μέγιστης δυνατής διακριτικής ικανότητας χρησιμοποιώντας οπτικές μάσκες με ελάχιστης διάσταση χαρακτηριστικών 2  $\mu\text{m}$ .

### 3.1. Υπολογισμός χρόνου έκθεσης στην UV ακτινοβολία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο χρόνος έκθεσης είναι άμεσα συσχετισμένος με την ρητίνη την οποία χρησιμοποιούμε. Σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης της φωτοευαίσθητης ουσίας AZ photoresist<sup>6</sup> ο χρόνος έκθεσης υπολογίζεται απο τον παρακάτω τύπο.

$$\text{exposure time} = \frac{\text{exposure dose } (\text{mJ}/\text{cm}^2)}{\text{lamp power } (\text{mW}/\text{cm}^2)} \quad (1)$$

Η δόση έκθεσης (exposure dose) εξαρτάται απο το πάχος της ρητίνης που έχει καλύψει το δείγμα που θα φωτοβοληθεί. Έπειτα από μετρήσεις στα δικά μας δείγματα με προφιλόμετρο βρέθηκε ότι ο μέσος όρος πάχους της ρητίνης με την διαδικασία spin coating που ακολουθούμε είναι περίπου **1,25  $\mu\text{m}$**  για ρυθμό περιστροφής 5000 rpm ανά 1 min. Με βάση τις οδηγίες χρήσης της ρητίνης η επιθυμητή δόση έκθεσης για θετική λιθογραφία είναι περίπου **90  $\text{mJ}/\text{cm}^2$** .

Επίσης για να υπολογίσουμε την ισχύ της λάμπας χρησιμοποιήσαμε το ισχύόμετρο maestro<sup>7</sup> της εταιρίας gentec από το οποίο πήραμε ως μέτρηση τα 28mW. Εδώ απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή καθώς ο αισθητήρας μέτρησης της οπτικής ισχύος είχε διάμετρο 1.5 cm. Επομένως έπρεπε να γίνει ο παρακάτω υπολογισμός.

$$\text{lamp power } \left( \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{28\text{mW}}{\pi \left( \frac{1,5}{2} \right)^2} = \mathbf{15.85 \text{ mW}/\text{cm}^2}$$

Παρατήρηση: Αξίζει να σημειωθεί ότι η ένταση αυτή είναι αρκετά μικρότερη της υπολογισμένης κατανομής μέσω της προσομοίωσης (46W). Ωστόσο δεν είναι ανησυχητικό καθώς μειώθηκε το ρεύμα οδήγησης μέσω του μετασχηματιστή για να αυξηθεί ο χρόνος έκθεσης και δεν λήφθηκε υπόψη η μείωση λόγω της απόστασης από τα δείγματα. Ένας ακόμη παράγοντας μείωσης της έντασης είναι το προστατευτικό γυάλινο κάλυμμα των led.

Επομένως ο χρόνος έκθεσης της θετικής λιθογραφίας με βάση τον τύπο (1) είναι

$$\text{exposure time} = \frac{90 (\text{mJ}/\text{cm}^2)}{15,85 (\text{mW}/\text{cm}^2)} = \mathbf{5.67 \text{ sec}}$$

<sup>6</sup> [https://nano.tau.ac.il/sites/shtans1-english.tau.ac.il/files/media\\_server/AZ%20Photoresist%20Process%20Guideline.pdf](https://nano.tau.ac.il/sites/shtans1-english.tau.ac.il/files/media_server/AZ%20Photoresist%20Process%20Guideline.pdf)

<sup>7</sup> [https://www.gentec-eo.com/Content/downloads/specifications-sheet/MAESTRO\\_2013\\_V1.0.pdf](https://www.gentec-eo.com/Content/downloads/specifications-sheet/MAESTRO_2013_V1.0.pdf)

Έχοντας υπολογίσει τον χρόνο έκθεσης για την θετική λιθογραφία με βάση τον τύπο και ακολουθώντας ένα γενικό κανόνα που δίνεται στο τεχνικό φυλλάδιο της ρητίνης μπορούμε να υπολογίσουμε και τον χρόνο τυφλής έκθεσης. Η ενέργεια απεικόνισης για την αρνητική λιθογραφία (imagewise exposure energy) όπως αναφέρει το τεχνικό φυλλάδιο είναι η υποδιπλάσια από αυτήν που χρειάζεται για την θετική λιθογραφία. Ενώ η ενέργεια για την τυφλή έκθεση (blank exposure) είναι η διπλάσια από την ενέργεια απεικόνισης. Επομένως θεωρήσαμε πως οι δύο κρίσιμοι χρόνοι έκθεσης για την αρνητική λιθογραφία θα είναι 3sec και 6sec αντίστοιχα.

Όπως είναι προφανές οι χρόνοι έκθεσης που υπολογίστηκαν από τους τύπους είναι πιθανό να έχουν κάποιες αποκλίσεις κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Για αυτόν τον λόγο έγιναν αρκετές δοκιμαστικές λιθογραφίες προς επιβεβαίωση των υπολογισμών καθώς και για να εξάγουμε συμπεράσματα σε περιπτώσεις υπερβολικής ή μη επαρκούς έκθεσης.

## 3.2. Αποτελέσματα λιθογραφίας

Με βάση τους χρόνους έκθεσης που υπολογίστηκαν υλοποιήσαμε θετικές και αρνητικές λιθογραφίες με σκοπό την επιβεβαίωση των υπολογισμών καθώς και της κατασκευής ενός αισθητήρα τύπου αντίστασης.

### 3.2.1. Θετική λιθογραφία

Για την διαδικασία της θετικής λιθογραφίας ακολουθήσαμε τα παρακάτω βήματα:

- Spin coating: Είναι η διαδικασία με την οποία εναποτίθεται η ρητίνη στο επιθυμητό πάχος (1,25μm). Για να επιτευχθεί αυτό ρυθμίζουμε την συσκευή spin coater στις 5000 rpm για 1min.

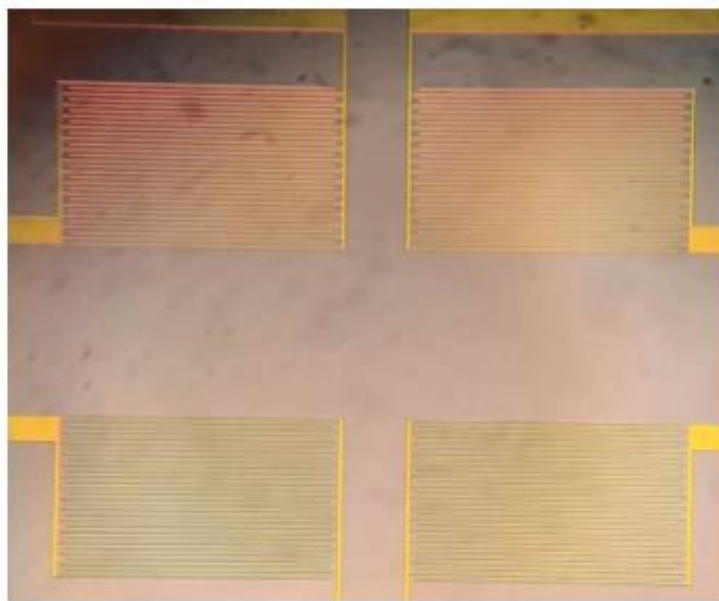


Σχήμα 31 : Συσκευή spin coater

- Soft bake σε ειδικό φούρνο στους 90-95C για 5-10 min
- Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία για 5sec
- Εμβάπτιση σε διάλυμα ανάπτυξης (developer) για 40sec.

Για την παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιήσαμε μια φωτομάσκα η οποία έχει δομές χαρακτηριστικών της τάξεως των 30, 10, 5 και 2 $\mu\text{m}$  . Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μάσκα ήταν η διαβάθμιση στις δομές ώστε να αναζητήσουμε τη μέγιστη διακριτική ικανότητα που μπορούμε να επιτύχουμε. Επιπλέον η μάσκα αυτή είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για τον τελικό αισθητήρα.

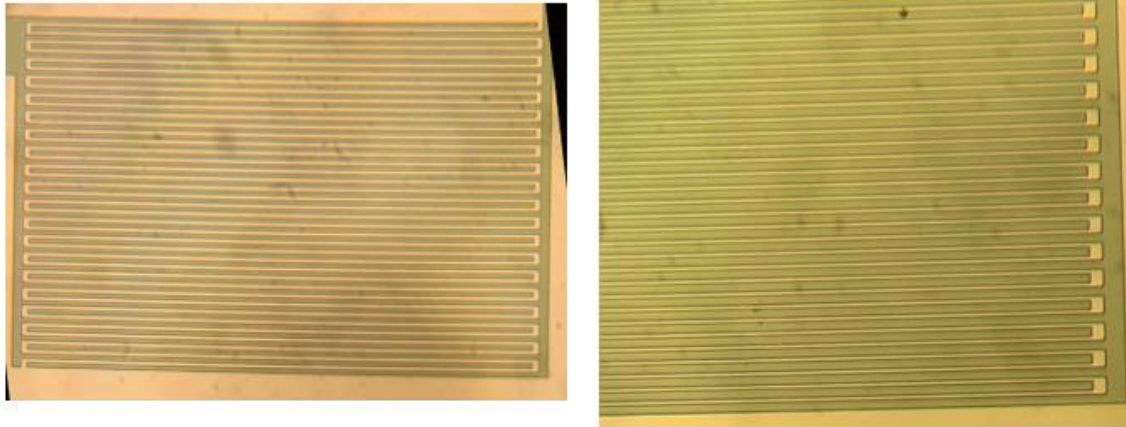
Παρακάτω δίνονται ορισμένες εικόνες αποτελεσμάτων απο το μικροσκόπιο του εργαστηρίου.



Σχήμα 32 : Συνολική διάταξη θετικής λιθογραφίας

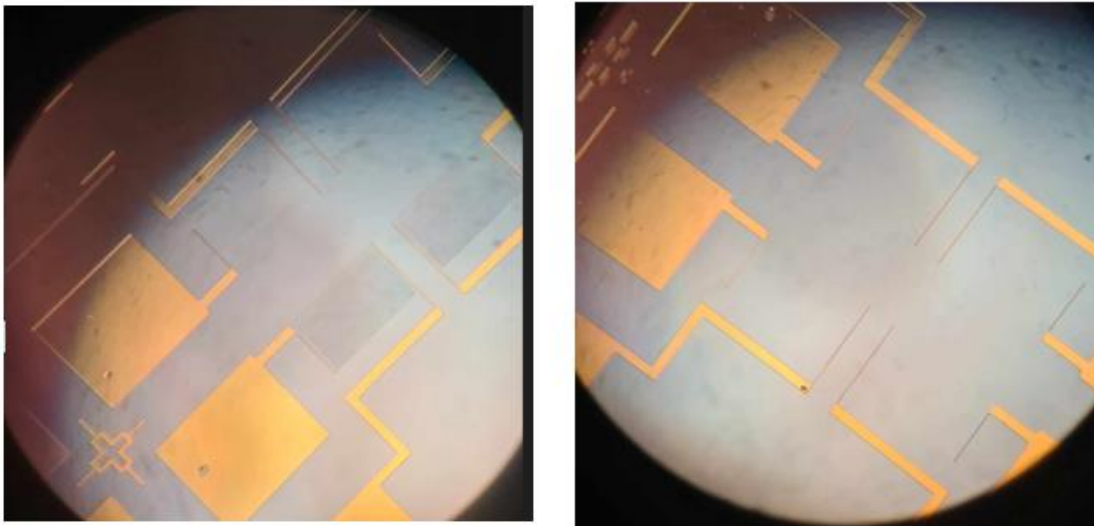


Σχήμα 33 : Αποτελέσματα θετικής λιθογραφίας για 30 και 10  $\mu\text{m}$

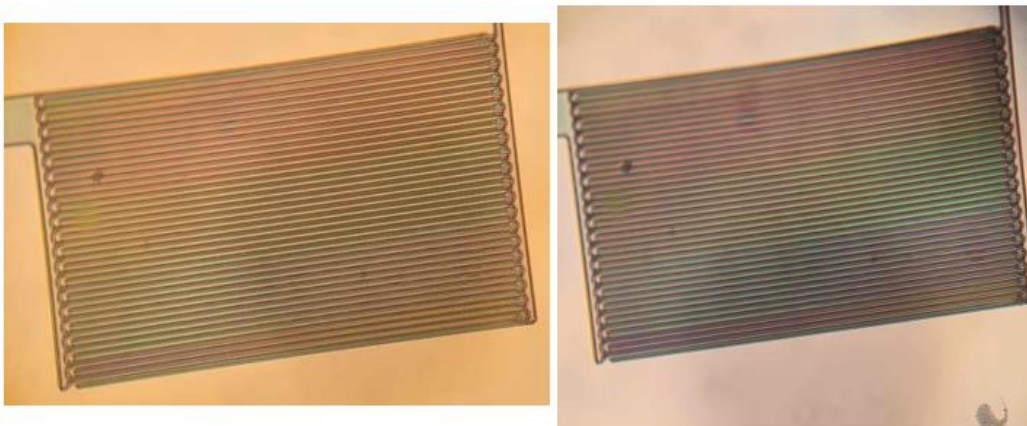


Σχήμα 34 : Αποτελέσματα αρνητικής λιθογραφίας για 5 και 2  $\mu\text{m}$

Οι παραπάνω εικόνες αντιστοιχούν σε χρόνο έκθεσης 5sec ο οποίος σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν είναι και ο κατάλληλος ώστε να υλοποιηθεί σωστά η λιθογραφία. Στις περιπτώσεις μεγαλύτερης η μικρότερης διάρκειας έκθεσης πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



Σχήμα 35 : Αποτελέσματα υπερβολικής έκθεσης 13 sec



Σχήμα 36 : Αποτελέσματα μη επαρκούς έκθεσης 2 sec στα 5 $\mu\text{m}$ .

Είναι εμφανές λοιπόν πως η υπερβολική έκθεση καταστρέφει πλήρως ακόμα και τις επιθυμητές δομές καθώς οι δεσμοί τις ρητίνης εξασθενούν σε βαθμό που κατά την διάρκεια του developing διαλύονται.

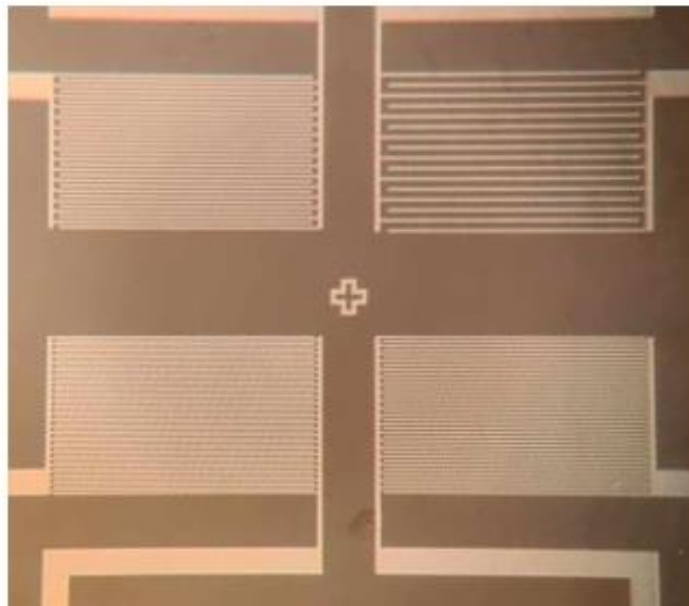
Αντιθέτως με μη επαρκή έκθεση η δεσμοί τις ρητίνης δεν προλαβαίνουν να εξασθενήσουν αρκετά με αποτέλεσμα να μην αφαιρείται πλήρως η ρητίνη απο τις επιθυμητές περιοχές και να έχουμε παραμόρφωση του μοτίβου (σχήμα 36).

### 3.2.2. Αρνητική λιθογραφία

Η διαδικασία της αρνητικής λιθογραφίας είναι αυτή που θα ακολουθήσουμε και για την κατασκευή του αισθητήρα στο επόμενο κεφάλαιο. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε για την αρνητική λιθογραφία περιγράφεται παρακάτω.

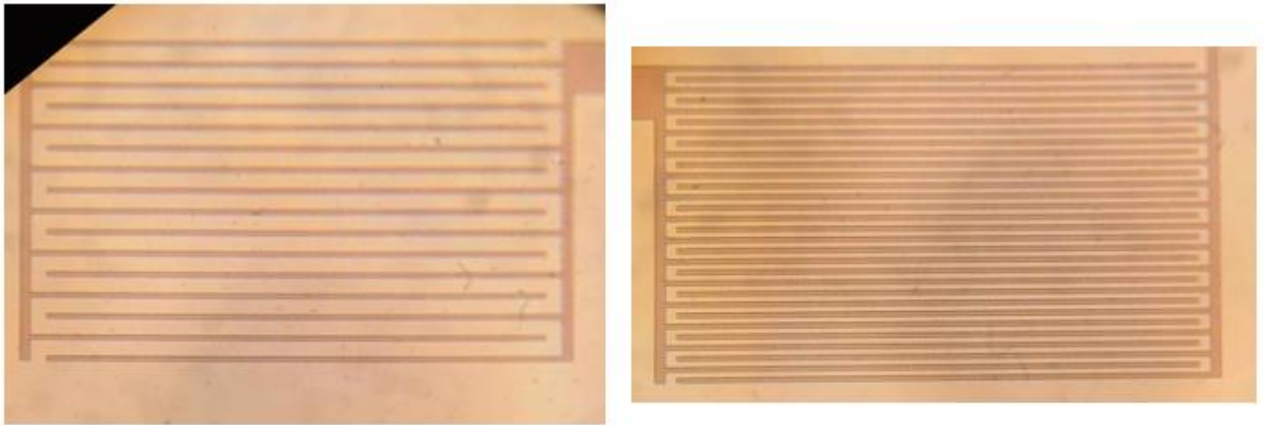
- Spin Coating: Στις 5000rpm για 1min.
- Pre exposure bake: Στους 110°C για 1.30 min.
- Έκθεση στην UV ακτινοβολία με την χρήση επιθυμητής μάσκας για 3sec.
- Post exposure bake: Στους 120°C για 1.30 min.
- Δεύτερη έκθεση στην UV ακτινοβολία χωρίς την χρήση μάσκας (blank exposure) για 6sec.
- Εμβάπτιση σε διάλυμα ανάπτυξης (developer) για 40sec.

Παρακάτω δίνονται ορισμένες εικόνες των αποτελεσμάτων αρνητικής λιθογραφίας.

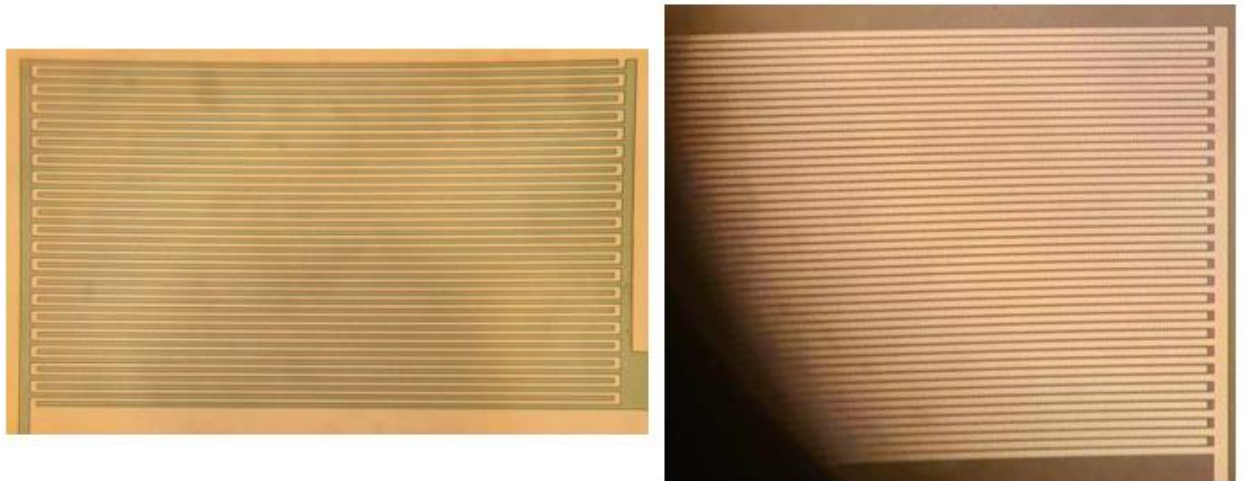


Σχήμα 37 : Συνολική διάταξη αρνητικής λιθογραφίας.





Σχήμα 38 : Αποτελέσματα αρνητικής λιθογραφίας για 30 και 10  $\mu\text{m}$ .

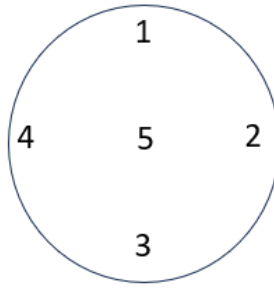


Σχήμα 39 : Αποτελέσματα αρνητικής λιθογραφίας για 5 και 2  $\mu\text{m}$ .

Συμπεραίνουμε επομένως ότι η ελάχιστη διάσταση των χαρακτηριστικών που μπορούμε να επιτύχουμε είναι τα 2 $\mu\text{m}$ . Σημειώνουμε ότι την διάσταση αυτή δεν την πετυχαίνουμε σε όλη την επιφάνεια του wafer διότι το σύστημα επαφής με κενό δεν είναι ιδανικό με αποτέλεσμα να υπάρχει κάποια αλλοίωση του μοτίβου της ρητίνης σε ορισμένες περιοχές. Παρόλα αυτά θα ήταν σημαντικό να κατασκευαστούν μάσκες οπτικής λιθογραφίας με ελάχιστα χαρακτηριστικά 1  $\mu\text{m}$  ή μερικές εκατοντάδες nm για να υπολογισθεί ακριβώς η ελάχιστη διακριτική ικανότητα του συστήματος της συστοιχίας των led.

### 3.2.3. Σχολιασμός πειραματικών αποτελεσμάτων

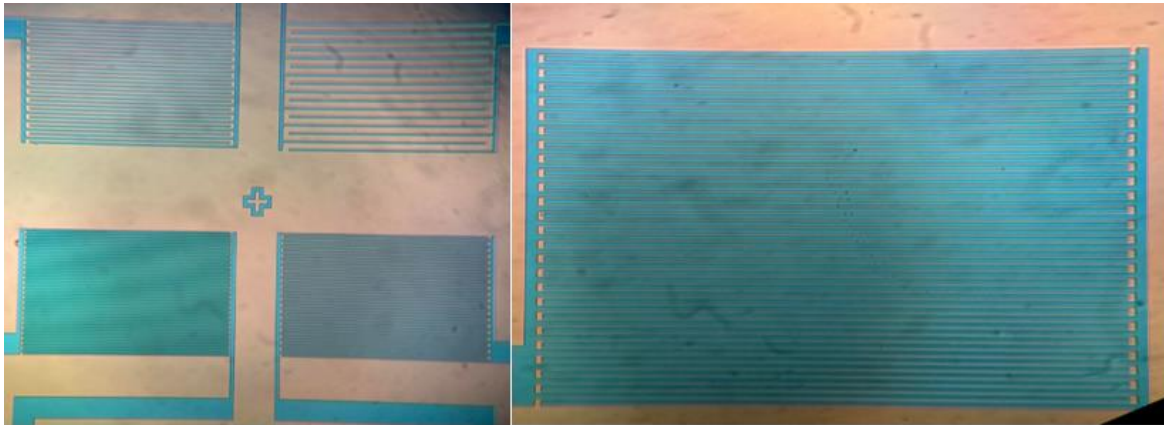
Σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως οι παραπάνω φωτογραφίες που παρουσιάζονται αντιστοιχούν σε ένα μεμονωμένο τμήμα ενός δείγματος υποστρώματος πυριτίου. Έχοντας λοιπόν παρατηρήσει οπτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω λιθογραφιών, καθώς και επόμενων λιθογραφιών οι οποίες έγιναν δοκιμαστικά σε υπόστρωμα Καρτον καλούμαστε να εξάγουμε ένα γενικότερο συμπέρασμα σχετικά με την συνολική επιφάνεια που ακτινοβολείται. Παρακάτω δίνεται ένα γραμμικό σχέδιο της επιφανειας ώστε να διευθετηθούν οι περιοχές τις και να σχολιάσουμε το κάθε σημείο της ξεχωριστά.



Σχήμα 40 Γραμμικό σχέδιο wafer Si.

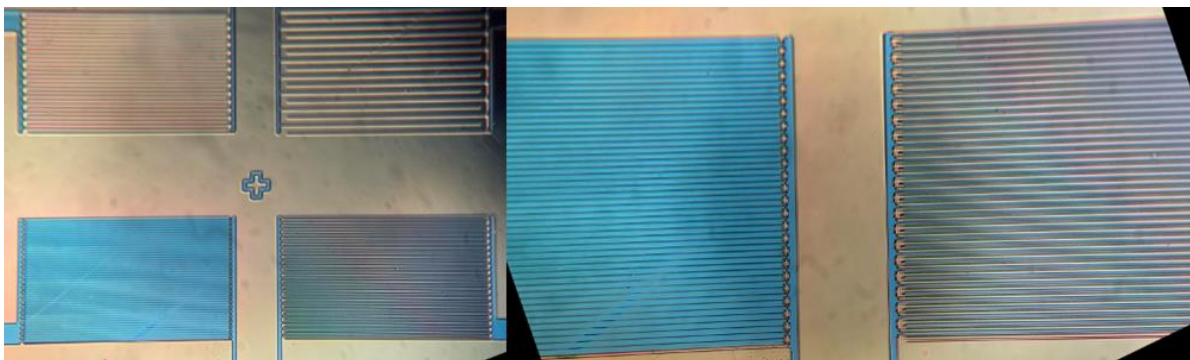
Στην περίπτωση του υποστρώματος πυριτίου παρατηρούμε τα εξής:

- Στις περιοχές 1,3 και 5 που αναγράφονται στο παραπάνω σχήμα οι επιθυμητές δομές έχουν δημιουργηθεί με ικανοποιητική συνέπεια σε όλες τις κρίσιμες τάξεις μεγέθους (30 $\mu\text{m}$  , 10  $\mu\text{m}$  , 5  $\mu\text{m}$  , 2  $\mu\text{m}$ ). Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω φωτογραφίες που πήραμε απο αυτές τις περιοχές.



Σχήμα 41: Ικανοποιητικές δομές 30 $\mu\text{m}$  , 10  $\mu\text{m}$  , 5  $\mu\text{m}$  , 2  $\mu\text{m}$ .

- Στα τεταρτημόρια πάνω απο τις περιοχές 2 και 4 παρατηρήθηκε ότι ενώ όλες οι δομές των 30 $\mu\text{m}$  , 10  $\mu\text{m}$  και 5  $\mu\text{m}$  ήταν ικανοποιητικές , οι δομές των 2  $\mu\text{m}$  σε αρκετά σημεία δεν είχαν «ανοίξει»



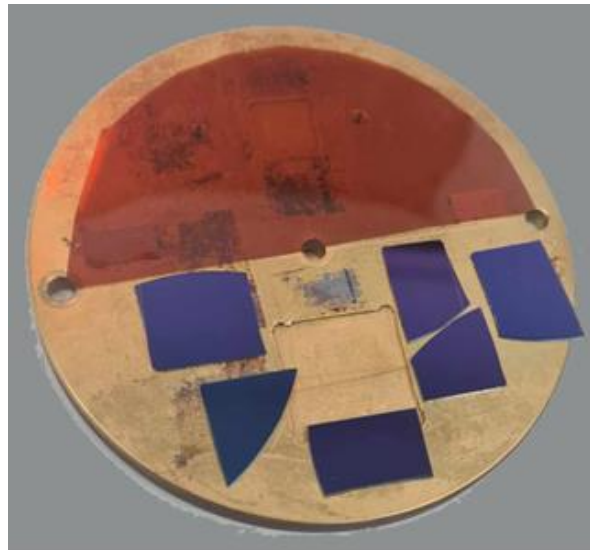
Σχήμα 42: Δομές 2 $\mu\text{m}$  οι οποίες δεν έχουν «ανοίξει»

Παρατήρηση: Στις ίδιες παρατηρήσεις καταλήξαμε και για την περίπτωση της θετικής λιθογραφίας σε υπόστρωμα πυριτίου, όπως και στην περίπτωση που το Kартon χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι η περιοχή στην οποία δεν ήταν επιτυχής η λιθογραφία των 2μm (περιοχές 2 και 4) εξαρτάται από την επαφή της οπτικής μάσκας με το 3-inch δείγμα και όχι από την συστοιχία led που κατασκευάστηκε.

### 3.3. Κατασκευή αισθητήρα τύπου αντίστασης

Έχοντας λοιπόν επιβεβαιώσει τους χρόνους έκθεσης στο υπεριώδες φως για την υλοποίηση αρνητικής λιθογραφίας θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο αυτή για την κατασκευή του τελικού αισθητήρα. Βασική διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες λιθογραφίες που υλοποιήθηκαν είναι πως το υλικό του υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Kартon και όχι οξειδωμένο wafer πυριτίου Si.

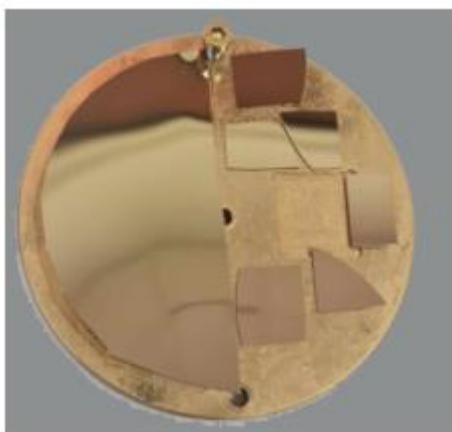
Το Kартon είναι ένα τύπος πολυιμιδίου το οποίο είναι αρκετά διαδεδομένο στον χώρο της ηλεκτρονικής λόγω των ιδιοτήτων του σαν υλικό. Έχει διηλεκτρικές ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό υλικό για την μόνωση ηλεκτρικών συσκευών. Επίσης παρόλο που έχει μικρές διαστάσεις πάχους είναι υλικό με υψηλή μηχανική αντοχή αλλά και χημική αντοχή κάτι που το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε μη φιλόξενα περιβάλλοντα και για εφαρμογές εύκαμπτων αισθητήρων.



Σχήμα 43 : Υποστρώματα Kартon & οξειδίου του πυριτίου

Τα βήματα που ακολουθήσαμε για την κατασκευή του αισθητήρα περιγράφονται παρακάτω

- Αρνητική λιθογραφία αντίστροφης απεικόνισης.
- Επιμετάλλωση των δειγμάτων με 5 nm τιτάνιο (Ti) και 40 nm χρυσό (Au). Το τιτάνιο χρησιμοποιείται ως μέσω πρόσφυσης του χρυσού με την επιφάνεια του υποστρώματος.



Σχήμα 44 : Λιθογραφημένα δείγματα με επικάλυψη τιτανίου και χρυσού

Οι τιμές επιμετάλλωσης των δύο υλικών παρουσιάζονται παρακάτω:

- Εναπόθεση τιτανίου (Ti)
  - $P=90W$
  - $I=0.83A$
  - $Rate = 0.21 A/s$
  - Χρόνος εναπόθεσης = 8 min
  - Τελικό πάχος εναπόθεσης =  $5nm=0.05KA$
  
- Εναπόθεση Χρυσού (Au)
  - $I=90A$
  - $V=2.1V$
  - $Rate\approx 1.5A/s$
  - Χρόνος εναπόθεσης = 5 min
  - Τελικό πάχος εναπόθεσης =  $40nm = 0.400KA$



Σχήμα 45: RF magnetron sputtering, E-gun, thermal evaporator και Nanogen. Το e-gun χρησιμοποιήθηκε για την επιμετάλλωση με Ti, ενώ ο thermal evaporator για την επιπρόσθετη επιμετάλλωση με Au. Η Nanogen χρησιμοποιήθηκε για την εναπόθεση Pt NPs. Όλα τα συστήματα λειτουργούν υπό υψηλό κενό.

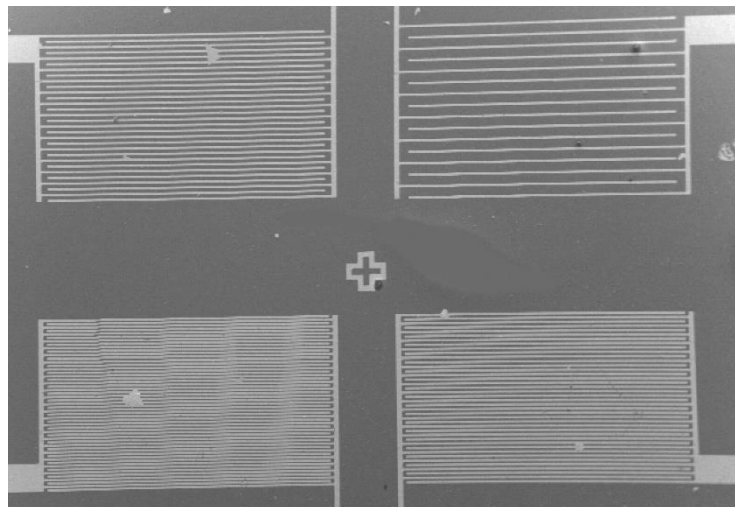
- Lift-off
- Εναπόθεση νανοσωματιδίων πλατίνα (Pt NPs) για 2 min.

### 3.3.1. Εικόνες απο SEM

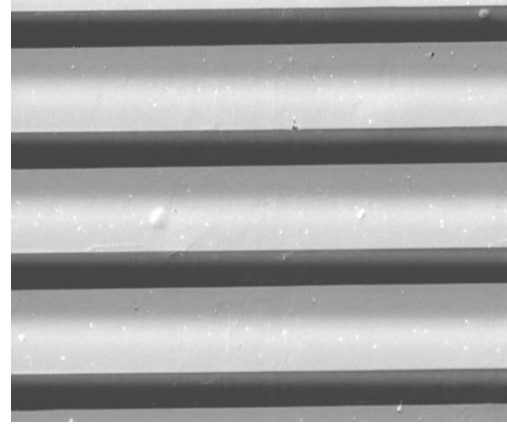
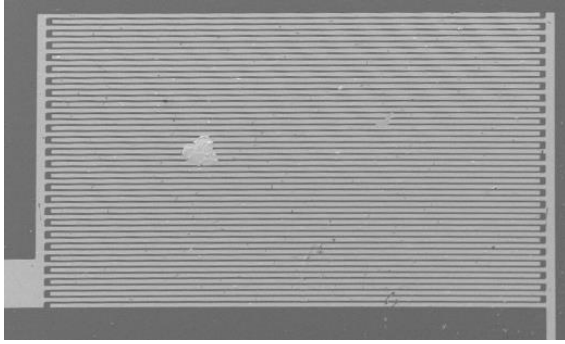
Έχοντας κατασκευάσει τον επιθυμητό αισθητήρα τύπου αντίστασης και επειδή η ακρίβεια στην ανάλυση απο το μικροσκόπιο δεν είναι η ιδανική για την εξαγωγή συμπερασμάτων προχωρήσαμε στην λήψη φωτογραφιών μέσω του SEM (scanning electron microscope). Το μικροσκόπιο αυτό μας δίνει την δυνατότητα κατευθύνοντας δέσμη ηλεκτρονίων να έχουμε εικόνες υψηλής ευκρίνειας και ακρίβειας.



**Σχήμα 46 :** Μικροσκόπιο SEM



**Σχήμα 47:** Συνολική διάταξη τελικού αισθητήρα

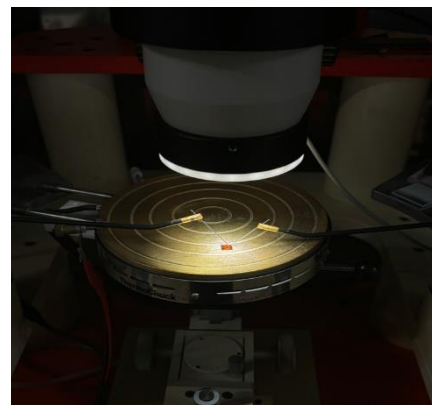
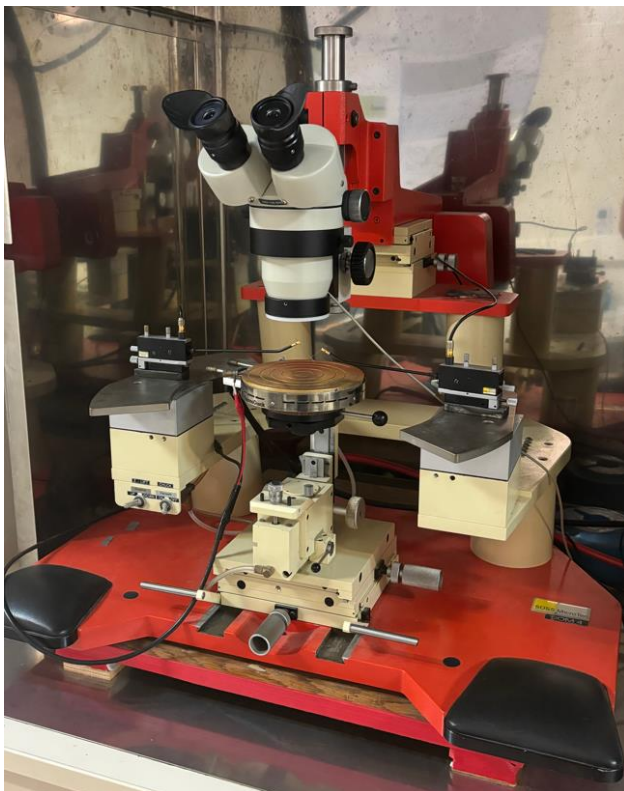


Σχήμα 48: Δομές 2  $\mu\text{m}$  απο SEM

Όπως είναι εμφανές οι δομές στα 2  $\mu\text{m}$  έχουν υλοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια από το σύστημα οπτικής λιθογραφίας που κατασκευάστηκε. Όσον αφορά τα Pt NPs που έχουν διαστάσεις μερικών nm δεν καταφέραμε να τα παρατηρήσουμε, καθώς είναι στο όριο της διακριτικής ικανότητας του μηχανήματος.

### 3.3.2. Ηλεκτρικές μετρήσεις

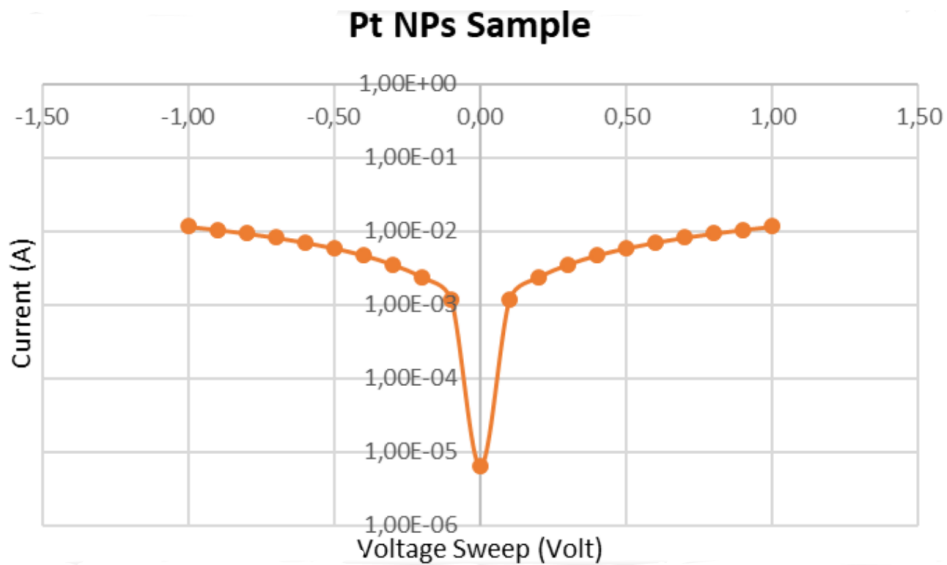
Αφού λοιπόν τα οπτικά αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά προχωρήσαμε στην λήψη ηλεκτρικών μετρήσεων μέσω του Keithley 4200 ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι οι ιδιότητες της τελικής συσκευής είναι οι επιθυμητές.



Σχήμα 49: Όργανο ηλεκτρικών μετρήσεων Keithley 4200

Για τους σκοπούς των μετρήσεων έχουμε δείγματα αναφοράς στα οποία δεν έχει γίνει εναπόθεση νανοσωματιδίων. Τα αποτελέσματα που περιμένουμε να εξάγουμε απο τις μετρήσεις σχετίζονται με την ωμική αντίσταση των δομών. Στην περίπτωση μη υπαρκτής νανοσωματιδίων η αντίσταση των δειγμάτων θα πρέπει να είναι κατά πολλές τάξεις μεγαλύτερη ( $>60\text{M}\Omega$ ) από αυτήν του δείγματος με την εναπόθεση σωματιδίων ( $\Omega\text{-k}\Omega$ ).

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η χαρακτηριστική I-V καμπύλη ενός αισθητήρα με Pt NPs. Παρατηρούμε ότι έχει αντίσταση της τάξεως  $\Omega$ . Συμπεραίνουμε επομένως ότι η κατασκευή των αισθητήρων ήταν επιτυχής και άρα το σύστημα οπτικής λιθογραφίας συστοιχίας UV led, που αναπτύχθηκε είναι ικανό να παράξει δομές με διαστάσεις έως  $2\ \mu\text{m}$ .



Σχήμα 50 : Καμπύλη I-V αισθητήρα τύπου αντίστασης

## Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα και προεκτάσεις

Στην παρούσα εργασία σχεδιάσαμε και αναπτύξαμε ένα σύστημα ακτινοβολίας με σκοπό την αξιοποίηση του στον καθαρό χώρο της σχολής Ε.Μ.Φ.Ε. για την διεξαγωγή της διαδικασίας οπτικής λιθογραφίας. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι πολύ σημαντική για την κατασκευή μικροηλεκτρονικών διατάξεων και αισθητήρων.

Πιο συγκεκριμένα:

- Αναπτύχθηκε μία μαθηματική μοντελοποίηση για την προσομοίωση του συστήματος και την εξαγωγή της κατανομής της έντασης ακτινοβολίας του συστήματος.
- Μέσω της προσομοίωσης υπολογίστηκαν οι παράμετροι που θα πρέπει να διαθέτουν τα led υψηλής ισχύος, όπως είναι ο αριθμός τους, η ισχύς τους, το άνοιγμα της γωνίας εκπομπής και η απόσταση τους από τα δείγματα. Επίσης, τα led θα πρέπει να λειτουργούν στο υπεριώδες φάσμα.
- Αναζητήθηκαν θεωρητικά και πειραματικά οι χρόνοι έκθεσης των δειγμάτων στη θετική λιθογραφία και στην αρνητική λιθογραφία χρησιμοποιώντας μία φωτοευαίσθητη ουσία (ρητίνη) αντίστροφης απεικόνισης.
- Επιπροσθέτως, αναζητήθηκε το ελάχιστο χαρακτηριστικό μέγεθος που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τις ήδη υπάρχουσες οπτικές μάσκες. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να δημιουργήσει μοτίβα 2  $\mu\text{m}$ , αποδεικνύοντας την σημασία του συγκεκριμένου συστήματος στον τομέα της μικροηλεκτρονικής.
- Στην συνέχεια αναπτύχθηκαν αισθητήρες τύπου αντίστασης για την επίδειξη της ορθής τους λειτουργίας και της πετυχημένης ανάπτυξης ενός συστήματος ακτινοβολίας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σύστημα ενώ είναι ικανό να πετύχει διαστάσεις κάτω των 5  $\mu\text{m}$ , αυτές δεν απαρτίζουν ολόκληρη την επιφάνεια του δείγματος λόγω της μη-τέλειας επαφής της οπτικής μάσκας και του δείγματος. Σε αυτό ευθύνεται το σύστημα επαφής μέσω κενού. Επομένως, σαν προέκταση προτείνεται η δημιουργία ενός νέου συστήματος επαφής για την υλοποίηση λιθογραφίας διαστάσεων μικρότερων των 5  $\mu\text{m}$  με επιτυχία σε όλη την επιφάνεια των δειγμάτων και η αναζήτηση του ελάχιστου χαρακτηριστικού σε νέες οπτικές μάσκες με διαστάσεις από μερικά εκατοντάδες nm έως 1  $\mu\text{m}$ .





## Βιβλιογραφία

- 1) C. Mack. "The Basics of Microlithography." *Semiconductor Lithography (Photolithography) - The Basic Process*.  
<http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html> (Accessed May 9, 2022).
- 2) *Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation* Author: W. Whyte Copyright 2001 John Wiley & Sons Ltd
- 3) Cerrina, F. (2000, June 21). *IOPscience*. *Journal of Physics D: Applied Physics*.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/33/12/201/meta>
- 4) Park, S. H., Kim, S., & Baek, J.-G. (2018). Kernel-density-based particle defect management for semiconductor manufacturing facilities. *Applied Sciences*, 8(224), 1-11.  
<https://doi.org/10.3390/app8020224>
- 5) McCord, M A.; Rooks, M.J. (2000). "2. Electron beam lithography". *Microlithography. SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication*. Vol. 1. Archived from the original on 2019-08-19. Retrieved 2007-01-04
- 6) Tseng, A. A., Chen, K., Chen, C. D., & Ma, K. J. (2003). Electron beam lithography in nanoscale fabrication: Recent development. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 26(2), 141.
- 7) Heuberger, A., Betz, H., Pongratz, S. (1979). Present status and problems of X-ray lithography. In: Treusch, J. (eds) *Festkörperprobleme 20. Advances in Solid State Physics*, vol 20. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0116745>
- 8) Zhang, J. X. J., & Hoshino, K. (2019). Fundamentals of nano/microfabrication and effect of scaling. In *Molecular sensors and nanodevices* (2nd ed., pp. 43–111). Academic Press. Available online:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148624000028>. Accessed May 21, 2022.
- 9) Yamazaki, K., Kurihara, K., Yamaguchi, T., Namatsu, H., & Nagase, M. (1997, December). *Novel proximity effect including pattern-dependent resist development in electron beam nanolithography*. NASA/ADS.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997JaJAP..36.7552Y/abstract>
- 10) van de Kerkhof, M. A., Benschop, J. P. H., & Banine, V. Y. (2019). Lithography for now and the future. *Solid State Electronics*, 155, 20-26.  
<https://doi.org/10.1016/j.sse.2019.03.006>
- 11) Jaizul-Aziz, D. (2020). *Principles of photolithography in semiconductor manufacturing*. MIME 571.

- 12) Plummer, J. D., Deal, M. D., & Griffin, P. B. (1999). *Silicon VLSI technology: Fundamentals, practice, and modeling*. Prentice Hall.
- 13) Laube, P. (2012). *Semiconductor technology from A to Z*. [www.halbleiter.org](http://www.halbleiter.org).
- 14) Smith, H. I., & Flanders, D. C. (1977). X-ray lithography. *Japanese Journal of Applied Physics*, 16(61). <https://doi.org/10.7567/JJAPS.16S1.61>

## Παράρτημα I

Παρακάτω αναγράφεται και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της προσομοίωσης.

```
clear all
close all
tic
%% OPTOLITHOGRAPHY SYSTEM for max_dim>radius
data_points = 10^10;
radius_of_device_plane = 7.8/2;
%in cm z=L PLANE OF LITHOGRAPHY
max_dim_light_source_plane = 10;
%in cm z=0 DEFINE PANEL LED
light_source_plane = zeros(10,10);
%in cm
number_leds_in_row = 4;
%DEFINE
number_leds = number_leds_in_row^2;
led_placement =
round(max_dim_light_source_plane/(number_leds_in_row+1),2
); %in cm
L = 5;
%in cm DEFINE
%% TRANSFORM IN μm
multiply_factor = 10^3;
light_source_plane =
zeros(multiply_factor,multiply_factor); %in μm
device_plane = light_source_plane;
%in μm
led_placement = multiply_factor*led_placement/10;
%in μm
radius_of_device_plane =
multiply_factor*radius_of_device_plane/10; %in μm z=L
max_dim_light_source_plane =
multiply_factor*max_dim_light_source_plane/10; % in μm
L = multiply_factor*L/10;
%% CREATING EFFECTIVE AREAS OF DEVICE AND LIGHT-SOURCE
PLANES
for i=0:number_leds_in_row-1
    for j=0:number_leds_in_row-1

light_source_plane(led_placement+i*led_placement,led_plac
ement+j*led_placement) = 1;
        end
    end
end
if max_dim_light_source_plane>radius_of_device_plane
```

```

    for i=1:multiply_factor
        for j=1:multiply_factor
            if (i-max_dim_light_source_plane/2)^2+(j-
max_dim_light_source_plane/2)^2<radius_of_device_plane^2
                device_plane(i,j) = 1;
            end
        end
    end
else
    device_plane =
zeros(2*radius_of_device_plane,2*radius_of_device_plane);
    for i=1:2*radius_of_device_plane
        for j=1:2*radius_of_device_plane
            if (i-radius_of_device_plane)^2+(j-
radius_of_device_plane)^2<radius_of_device_plane^2
                device_plane(i,j) = 1;
            end
        end
    end
end
end
%% ANGLE CHANGE OF POWER INTENSITY
angle = 0:90;
rad = angle*pi/(2*90);

param=[99.73,0.7486,1.571,5496,3.701,-1.571,-5483,3.697,-
1.571,13.79,5.343,1.571];
a1=param(1); b1=param(2); c1=param(3);
a2=param(4); b2=param(5); c2=param(6);
a3=param(7); b3=param(8); c3=param(9);
a4=param(10); b4=param(11); c4=param(12);
%intensity = a1*sin(b1*rad+c1)+a2*sin(b2*rad+c2);
intensity =
a1*sin(b1*rad+c1)+a2*sin(b2*rad+c2)+a3*sin(b3*rad+c3)+a4*
sin(b4*rad+c4);%allagh
intensity=(intensity>0).*intensity;

Watt = (0.5*3.6)/2;
intensity = Watt*intensity/max(intensity); %%
Regularization
plot(intensity);

%intensity = cos(0.4*rad); %%%to be definid
% intensity = cos(9718*rad)>=0
%Watt=3;
%intensity = intensity*Watt;

%plot(angle,intensity);

```

```

%% PRINCIPLE OF HYPERTENSION
[N,M]=find(light_source_plane==1);
intensity_2d_map =
zeros(multiply_factor,multiply_factor);
for k=1:length(N)
    k
    for i=1:multiply_factor
        for j=1:multiply_factor
            Distance_light_source_of_device_point =
sqrt((N(k)-i)^2+(M(k)-j)^2+L^2);
            theta =
acos(L/Distance_light_source_of_device_point);
            [val,index] = min(abs(rad-theta));
            intensity_2d_map(i,j) = intensity_2d_map(i,j)
+ intensity(index);
        end
    end
end
colormap(jet);
surf(intensity_2d_map,'EdgeColor','none');
alpha(0.7);

%surf(intensity_2d_map);

```