



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών
ΔΠΜΣ «Μικροσυστήματα & Νανοδιατάξεις»

Μεταπτυχιακή Εργασία:

“Λιθογραφία πυριτίου με Laser”

Μαθιουδάκης Ιωάννης

Επιβλέπουσα: Δρ. Ι. Ζεργιώτη, Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιφανειακή ανάπτυξη δομών και ο λεπτομερής χειρισμός τους στα στερεά υλικά με τη χρήση παλμικού laser παρουσιάζει και παρουσιάζει, ακόμη, μεγάλο ενδιαφέρον. Από τα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας, υπήρχε ραγδαία ανερχόμενο ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη τεχνολογία, η οποία ενισχύθηκε με τη παρουσία και την ανάπτυξη της τεχνολογίας της μικροηλεκτρονικής (και τώρα με την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας). Συγκεκριμένα, η δυνατότητα να δημιουργήσουμε με έμμεσο ή άμεσο τρόπο (λιθογραφία και εγχάραξη ή αποκόλληση – ablation) και να επεξεργαστούμε δομές και χαρακτηριστικά στοιχεία σε διαστάσεις μικρότερες του ενός μικρομέτρου (μm) σε διάφορα υλικά (όπως μέταλλα και ημιαγωγοί) έχει πολυάριθμες τεχνολογικές εφαρμογές.

Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται παρουσίαση της εφαρμογής και των αποτελεσμάτων μίας γρήγορης, άμεσης και υψηλής διακριτικής ικανότητας μεθόδου λιθογραφίας (**photon lithography**) για την ανάπτυξη δομών στην επιφάνεια δοκιμίων υποστρώματος πυριτίου (Si), στα οποία έχει γίνει εναπόθεση φωτοευαίσθητης πολυμερούς ρητίνης στην επιφάνειά τους. Χρησιμοποιήσαμε δύο είδη χημικά ενισχυμένων, εποξικών, τύπου Novolac (νεολάκκα) αρνητικού τόνου ρητινών, επιλέγοντας από ένα σημείο και μετά τη μία από τις δύο λόγω καλύτερων αποτελεσμάτων. Τα πειράματα διεξήχθησαν με την τέταρτη αρμονική ενός Nd:YAG LASER ($\lambda = 266 \text{ nm}$, $\tau = 4 \text{ ns}$). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν αρκετά οπτικά στοιχεία (φακοί, μάσκα, grating) και ένα μικρομηχανικό σύστημα κίνησης. Η διαδικασία εμφάνισης των δομών μετά την έκθεση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες καθαρού χώρου (clean room).

Η ποιότητα των δομών εξετάστηκε βάσει της ενεργειακής πυκνότητας, των διαστάσεων του spot και των παραμέτρων της διαδικασίας εμφάνισής τους.

Ο χαρακτηρισμός των δομών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (**Scanning Electron Microscope - SEM**) και μικροσκοπίου ατομικών δυνάμεων – σαρωτικής ανίχνευσης (**Atomic Force Microscope – AFM, Scanning Probe Microscope – SPM**). Απο το χαρακτηρισμό αυτό μετρήθηκαν χαρακτηριστικά μεγέθη των δομών αυτών (ύψος και περιοδικότητα) και ελήφθησαν εικόνες προσομοίωσης και πραγματικές απεικονίσεις τους.

ABSTRACT

The precise machining of solid materials surface, using laser pulses, presents a high interest. From the middle of nineties, there was a rapidly growing interest for this technology, which was amplified by the presence and development of microelectronic and microsystem technology (and now by the development of nanotechnology). In particular, the ability to create with indirect or direct manner (lithography and etching - ablation) and machine sub-micron structures and features on various materials (like metals and semiconductors) has many technological applications.

In the present text, we attempted to use the lithography in order to machine the sample's surface with substrate Si. On their surface, a photoresist was deposited. We were used two highly sensitive epoxy novolac - based chemically amplified negative resists and we choosed one of them, because of its better results. The experiments were carried out with a Nd:YAG LASER ($\lambda = 266 \text{ nm}$, $\tau = 4 \text{ ns}$). Also many basic optics (lens, grating and mask) and a micromachining system were used for this process. The development of the structures was carried out in a clean room.

The quality of structures was checked through the fluence (energy density), spot size and the parameters of development processing. The characterization of these structures was carried out with scanning electron microscopy (**SEM**) and atomic force – scanning probe microscopy (**AFM – SPM**).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1	ΤΕΧΝΙΚΗ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER ΚΑΙ PHASE MASK.....	7
1.2	ΟΠΤΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ.....	15
1.2.1	Κυματική Οπτική	15
1.2.2	Βασικά στοιχεία και ιδιότητες	17
1.2.3	Υλικά και τεχνολογία παραγωγής.....	22
1.2.4	Εφαρμογές.....	24
1.3	ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ.....	27
1.3.1	Πηγές φωτός.....	27
1.3.2	Συστήματα έκθεσης δοκιμίων	27
1.3.3	Φωτοπολυμερή υλικά (photoresists).....	33
2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	38
3	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΚΘΕΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ Si	44
3.1	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	45
3.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Si ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΔΟΜΩΝ	54
4	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ.....	58
4.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΓΡΑΦΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM).....	60
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ / ΣΑΡΩΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ (AFM / SPM).....	65
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟ- ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ.....	73
	Π.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY – SEM)	74
	Π.2 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ (ATOMIC FORCE MICROSCOPY – AFM)	77
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	84
	ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η λιθογραφία είναι ένας απλός τρόπος για να σχεδιαστούν, να δημιουργηθούν και να ολοκληρωθούν πολύπλοκες δομές (και εν συνεχεία διατάξεις). Η διαδικασία της λιθογραφίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, ανάλογα την επεξεργασία, την οποία θέλουμε να κάνουμε στην επιφάνεια του υλικού, το οποίο επιθυμούμε να χρησιμοποιήσουμε. Εξ' αιτίας της ραγδαίας εξέλιξης των τεχνολογικών εφαρμογών σε πολύ μικρές διαστάσεις (μικρότερες του ενός μm), η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας έγινε αναγκαία σε πολλούς τομείς. Έντονη χρήση της λιθογραφίας συναντάται εδώ και πάρα πολλά χρόνια στη τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής και των μικροσυστημάτων (και τώρα στη νανοτεχνολογία). Το υλικό, το οποίο κυριαρχεί στις τεχνολογίες αυτές, είναι το πυρίτιο (Si). Γενικά, τα υλικά, στα οποία έχουμε επιφανειακή επεξεργασία είναι διάφορα, όπως μέταλλα, ημιαγωγοί (όπως το πυρίτιο), πολυμερή (π.χ. πλαστικά). Επειδή όμως το πυρίτιο έχει πολύ καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες σαν υλικό για τις εφαρμογές αυτές, προτιμάται περισσότερες φορές από τα υπόλοιπα ή έχει κατ'εξοχήν το πρωτεύοντα ρόλο (τεχνολογία πυριτίου).

Exposure Technology	248nm DUV	248nm DUV	248nm or 193nm DUV	193nm DUV or ???	193nm DUV or ???	???
----------------------------	----------------------	----------------------	---------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	------------

Σχήμα 1.1 Ανάγκες της λιθογραφίας σε επίπεδο τεχνολογίας συστημάτων έκθεσης [34]

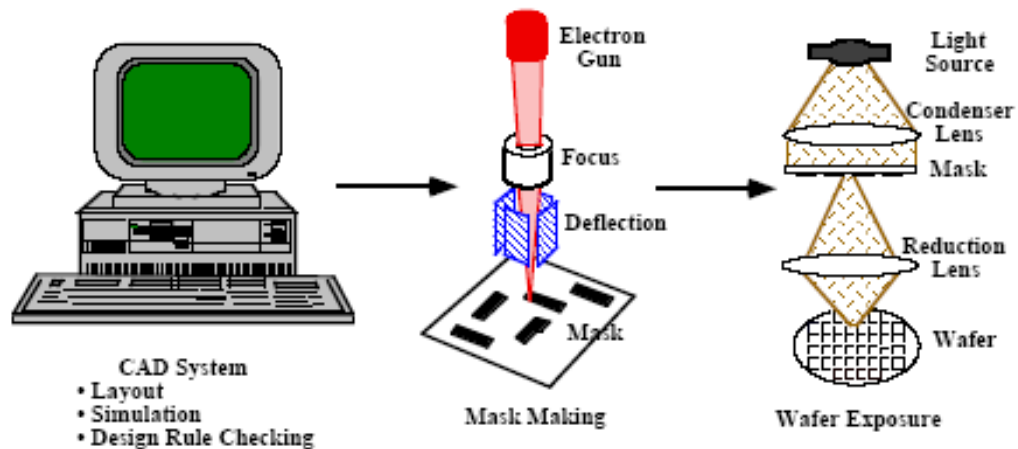
Ο κύριος στόχος, ο οποίος μας απασχολεί στην εφαρμογή της λιθογραφίας, είναι να πετύχουμε την επιθυμητή διακριτική ικανότητα (**resolution**), δηλαδή το επιθυμητό μέγεθος των διαστάσεων των δομών που δημιουργείται στην επιφάνεια του υλικού, το οποίο επεξεργαζόμαστε. Όσο υψηλότερη ανάλυση επιζητούμε, τόσο μικρότερο μήκος κύματος φωτονίων από τη πηγή φωτός χρειαζόμαστε, ώστε να εκθέσουμε τα δοκίμιά μας (**wafers**). Στο

σχήμα 1.1 διαπιστώνεται ότι η τεχνολογία έκθεσης (**exposure technology**), η οποία είναι βασικός τομέας της τεχνολογίας λιθογραφίας, χρειάζεται πηγές φωτός μικρότερου μήκους κύματος (**wavelength**), εξ' αιτίας της υψηλότερης διακριτικής ικανότητας, άρα και μικρότερων διαστάσεων, που χρειάζονται (**submicron structures**). Η κατασκευή και ανάπτυξη δομών στη νανοκλίμακα είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τις διατάξεις της επόμενης γενιάς στην επιστήμη και τη τεχνολογία. Υπάρχει μία γενική τάση να μειωθούν οι διαστάσεις των οπτο-μηχανικών στοιχείων, και επίσης υπάρχει μία αυξανόμενη ανάγκη για στοιχεία με διαστάσεις μικρότερου του ενός μικρού ($\sim 1 \mu\text{m}$). Στη σημερινή εποχή, η κατασκευή διδιάστατων και τρισδιάστατων δομών παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον (π.χ. οι φωτονικοί κρύσταλλοι). Έτσι, υπάρχει μία τεχνολογική πρόκληση για την ανάπτυξη γρήγορων, χαμηλού κόστους και ευμετάβλητες άμεσων διαδικασιών με τη χρήση laser. Γι' αυτό το λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθούν διατάξεις laser, για τις οποίες γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. μήκος κύματος φωτός, ενέργεια λειτουργίας, χρονική διάρκεια παλμού) και τις πολύ καλές ιδιότητές τους, όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η κατευθυντικότητα και η μονοχρωματικότητά του φωτός, η ισχυρή εντοπικότητά τους και ο χρονικός έλεγχος εφαρμογής τους. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι εφαρμογής της λιθογραφίας με τη χρήση laser για την επεξεργασία επιφανειών διαφόρων υλικών και την ανάπτυξη δομών:

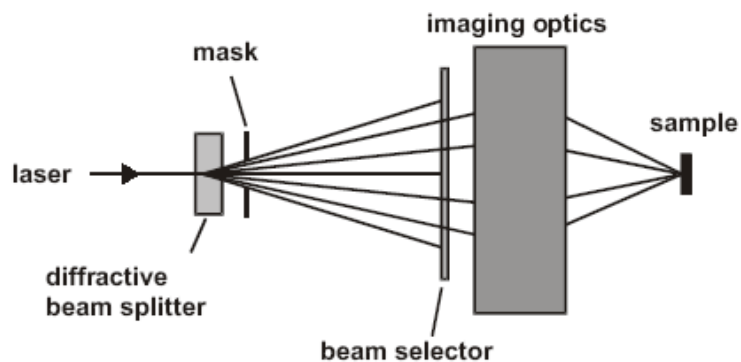
- Έκθεση φωτοευαίσθητης πολυμερούς ρητίνης, διαδικασία εμφάνισης και εγχάραξη (**etching**) του υλικού υποστρώματος
- Απ' ευθείας εγχάραξη του υλικού με αποκόλληση (**ablation**)

Αυτοί είναι δύο άμεσοι τρόποι λιθογραφίας (**direct laser lithography**) των υλικών, με το πρώτο να εφαρμόζεται κυρίως σε υποστρώμα ημιαγωγού (π.χ. πυρίτιο) και τον δεύτερο να εφαρμόζεται και σε μεταλλα (π.χ. χαλκός) και σε ημιαγωγούς (Si). Η μόνη διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθοδολογίες είναι ότι στη πρώτη παρουσιάζεται η εναπόθεση μιας φωτοευαίσθητης πολυμερούς ρητίνης (**photoresist**) στην επιφάνεια του δοκιμίου, ώστε να αποτυπωθεί η δομή που θέλουμε να δημιουργηθεί με τη διαδικασία της εμφάνισης (χημική διαδικασία) και εγχάραξης στη συνέχεια. Την ίδια διαδικασία ακολουθείται και στη τυπική λιθογραφία (**σχήμα 1.2**), με τη διαφορά ότι συνήθως σε αυτή χρησιμοποιείται σαν πηγή φωτός μία λάμπα (π.χ. λάμπα Hg) και μία μάσκα, η οποία έχει κατασκευαστεί από πριν και έχουν σχεδιαστεί πάνω της η μορφή των δομών που θέλουμε να αποτυπωθούν και να αναπτυχθούν στη συνέχεια. Στη

μέθοδο λιθογραφίας που αναφέραμε πιο πάνω, χρησιμοποιείται, εκτός από μία απλή μάσκα που μορφοποιεί το παλμό του laser (π.χ. τετράγωνο, ορθογώνιο παραλληλόγραμμο), και ένα οπτικό φράγμα περίθλασης και μεταφοράς δέσμης (**diffractive and transmission grating**), στο οποίο γίνεται περίθλαση του φωτός και στη συνέχεια συμβολή δύο τάξεων περίθλασης, οι οποίες επιθυμούνται, με έναν αντικειμενικό φακό πάνω στην επιφάνεια του υλικού, ώστε να ενεργοποιηθεί το φωτοπολυμερές υλικό και να γίνει η ανάπτυξη των δομών ή να γίνει απ'ευθείας εγχάραξη με αποκόλληση (ablation) (**σχήμα 1.3**). Το σύστημα μάσκας με τη χρήση ενός οπτικού φράγματος περίθλασης ή διαχωριστή δέσμης περίθλασης (**diffractive beam splitter**) ονομάζεται **diffractive phase mask**.



Σχήμα 1.2 Η διαδικασία λιθογραφίας από τη σχεδίαση της μάσκας μέχρι την έκθεση του δοκιμίου [34]



Σχήμα 1.3 Η αρχή λειτουργίας της λιθογραφίας με τη χρήση diffractive phase mask [3]

Και οι δύο αυτοί τρόποι άμεσης λιθογραφίας βασίζονται στη πολύ καλή εφαρμογή δύο βασικών οπτικών φαινομένων, της περίθλασης και της συμβολής φωτός. Ιδιαίτερα η συμβολή των όρων περίθλασης (**diffraction's orders**) χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για τη δημιουργία μίας καλής δομής.

1.1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER ΚΑΙ PHASE MASK

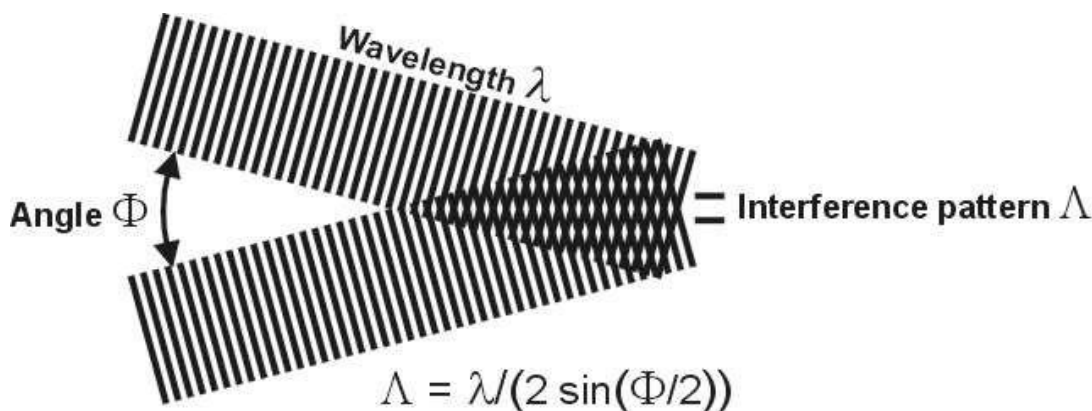
Η τεχνική αυτή βασίζεται στο συνδυασμό της εφαρμογής των φωτοφυσικών και φωτοχημικών διαδικασιών ενός παλμικού laser, αλληλεπιδρώντας με διάφορα υλικά, και τη προβολική μέθοδο της λιθογραφίας. Η διαδικασία προβολής γίνεται μέσω μίας μάσκας, η οποία έχει την ιδιότητα ενός οπτικού φράγματος περίθλασης. Επιλέγοντας τις τάξεις περίθλασης του φωτός, οι οποίες θα συμβάλουν, χρησιμοποιείται κατάλληλα ένας αντικειμενικός φακός συγκεκριμένου αριθμητικού ανοίγματος (**N.A.**) για να επιτευχθεί η επιθυμητή διακριτική ικανότητα και, κατα συνέπεια, οι διαστάσεις των μικρο- ή νανοδομών που πρέπει να επιτευχθούν [11].

Η τεχνική της λιθογραφίας συμβολής (**interference lithography**) (**σχήμα 1.4**) αποτελεί μία μέθοδο προχωρημένης οπτικής λιθογραφίας (advanced optical lithography). Δύο συμμασικές δέσμες ακτινοβολίας από ένα laser συμβάλουν δημιουργώντας περιοδικούς κροσσούς (**fringes**) με απόσταση μεταξύ τους μικρότερη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Βελτιστοποιώντας την ευαισθησία του φωτοπολυμερούς που εκτίθεται στο φως του laser, μπορούν να δημιουργηθούν χαρακτηριστικά δομών που να είναι το 1/10 του μήκους κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας. Με το συνδυασμό της λιθογραφίας συμβολής και τη χρήση μιας phase mask μπορούν να αναπτυχθούν δομές με διαστάσεις 1/4 του μήκους κύματος του φωτός, άρα τα 100 nm είναι εφικτός στόχος. Η τεχνική συμβολής εξυπηρετεί ειδικά τη κατασκευή περιοδικών νανοδομών. Σε αυτή τη περίπτωση, η εισερχόμενη δέσμη φωτός του laser χωρίζεται σε μερικές δέσμες, οι οποίες ξαναενώνονται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Σε προχωρημένες μεθόδους, στις οποίες γίνεται συμβολή πολλαπλών δεσμών, μπορούν να αναπτυχθούν διδιάστατες και τρισδιάστατες δομές, ιδιαίτερα στη δημιουργία φωτονικών κρυστάλλων. Η

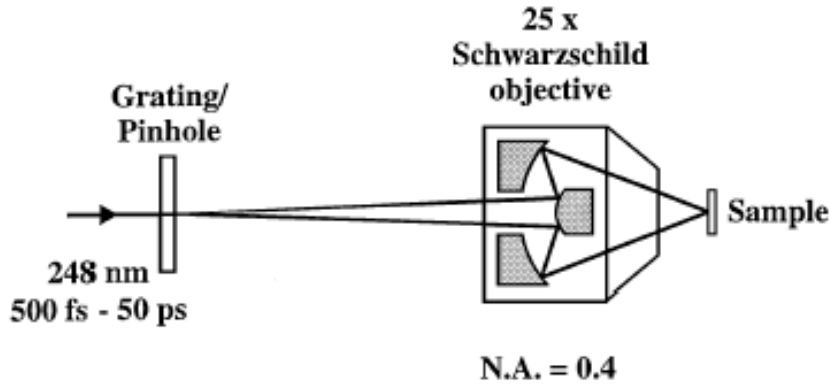
περίοδος και το σχήμα των νανοδομών μπορούν να ελεγχθούν από τις γωνίες διασταύρωσης, τη πολικότητα και τις διαφορές φάσεων των συμβαλλόμενων δεσμών [11, 25].

Η πρώτη δημοσίευση πάνω σε κατασκευή και ανάπτυξη νανοδομών στην επιφάνεια μετάλλων με ένα παλμικό laser (συγκεκριμένα **Ti:Sapphire laser**) ήταν από τους Pronko et.al, δυστυχώς με χαρακτηριστικά πολύ χαμηλής ποιότητας. Αργότερα, παρόμοια αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί και από τους Korte et.al. Η αιτία αυτών των αποτελεσμάτων χαμηλής ποιότητας (χαμηλή ανακατασκευαστικότητα και σχήμα των δομών) είναι η απαίτηση να κρατηθούν οι διαστάσεις των δομών κάτω από το μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας (800 nm). Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας υπεριώδη ακτινοβολία. Με αυτό το τρόπο βελτιώνεται η χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution) τρεις φορές περισσότερο απ' ό τι μ' ένα Ti:Sapphire laser. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν τα excimer lasers (π.χ. KrF με $\lambda = 248$ nm) [11].

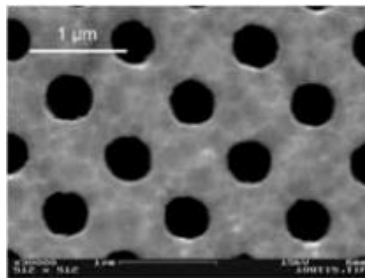
Οι J.Ihlemann et.al. έχουν χρησιμοποιήσει μεθοδολογία εφαρμογής laser με τη χρήση phase mask για να επεξεργαστούν επιφάνειες υλικών και να αναπτύξουν δομές πολύ μικρών διαστάσεων, ακολουθώντας κυρίως τη διαδικασία αποκόλλησης (ablation). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν υπερβραχείς υπεριώδεις παλμούς laser (**ArF- και F₂-laser, Ti-sapphire laser με KrF excimer amplifier (σχήμα 1.8)**), οι οποίοι σε συνδυασμό με κατάλληλο φράγμα περίθλασης (grating-phase mask) και αντικειμενικό φακό (reflective objective lens τύπου Schwarzschild, N.A. = 0.4), δίνουν δομές στην επιφάνεια ενός μετάλλου ή ενός ημιαγωγού (σχήμα 1.5 - 1.7) [1, 2, 3, 8, 10].



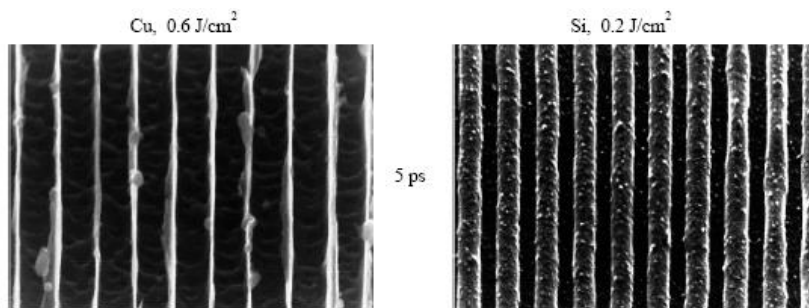
Σχήμα 1.4 Απεικόνιση συμβολής δύο φωτεινών δεσμών για την ανάπτυξη μιας δομής [25]



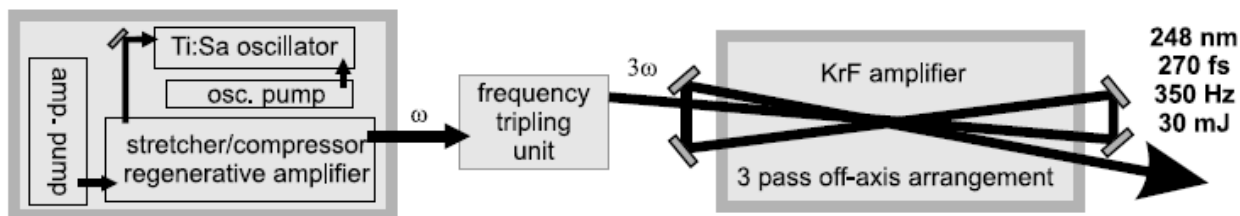
Σχήμα 1.5 Σχηματική απεικόνιση του mask projection των J. Ihlemann et.al. [1, 11]



Σχήμα 1.6 Μικρογραφία SEM οπών σε επίπεδο νανοκλίμακας σε τιτάνιο [11]

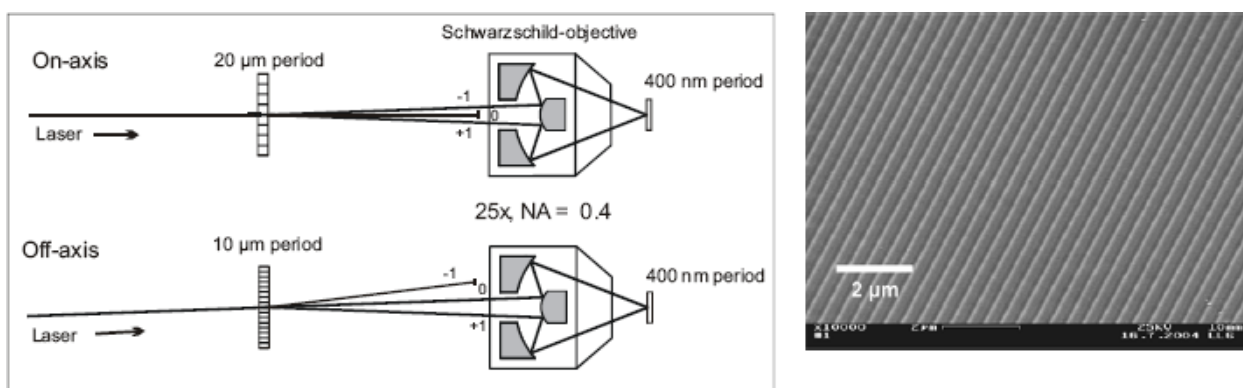


Σχήμα 1.7 Περιοδικές δομές σε χαλκό και πυρίτιο κάνοντας ablation [1]



Σχήμα 1.8 Σχεδιάγραμμα ενός UV femtosecond laser σύστημα [3, 11]

Η χρονική διάρκεια των παλμών στη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι 0.5 – 50 ps (αλλά και σε ns ή fs) και οι τιμές της ενεργειακή πυκνότητας να παρουσιάζουν μεγάλο εύρος ($F = 0.2 - 4 \text{ J/cm}^2$). Τα αποτελέσματα ως προς τις δομές που αναπτύσσονται είναι αρκετά ενδιαφέροντα. Οι περιοδικές δομές που αναπτύσσονται έχουν περίοδο 400 nm (σχήμα 1.7, 1.9) και οι οπές διαμέτρου 500 nm (σχήμα 1.6). Τα οπτικά φράγματα περίθλασης που χρησιμοποιούνται ως phase mask μπορούν να έχουν περίοδο 20 μm ή 10 μm . Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο τρόποι προβολής για την ανάπτυξη της δομής, ανάλογα με το ποιιά τάξη περίθλασης θα μπλοκαριστεί από το οπτικό φράγμα περίθλασης και ανάλογα με το πόσο υψηλή ή χαμηλή τιμή ενεργειακής πυκνότητας θα εφαρμοστεί (αλλά και το πόσο υψηλό contrast επιλέγεται κάθε φορά) (σχήμα 1.9) [1, 2, 3].



Σχήμα 1.9 Δύο διαφορετικές μέθοδοι phase mask projection και μικρογραφία SEM μίας δομής 400 nm του off – axis phase mask projection [2]

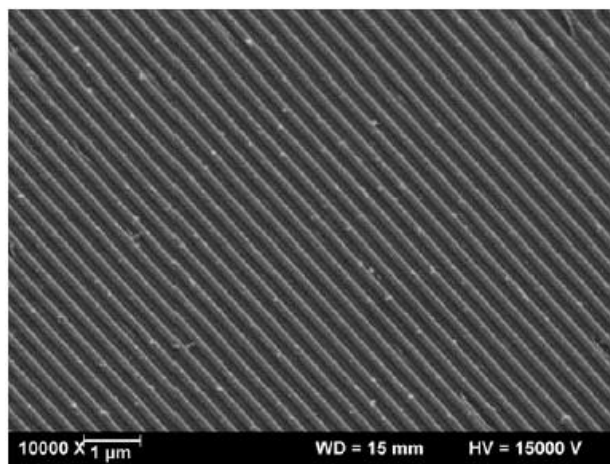
Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής γίνεται και σε άλλα υλικά ως υποστρώματα, όπως διηλεκτρικά ή πολυμερή υλικά. Κυρίως στην υαλώδη ή τηγμένη πυριτία (**fused silica**) γίνεται εφαρμογή και σε UV – διαφανή υλικά για την ανάπτυξη κυρίως οπτικών στοιχείων περίθλασης (π.χ. οπτικά φράγματα περίθλασης με συγκεκριμένη επιθημητή περίοδο).

Οι K. Rubhan et.al. έχουν κατασκευάσει με τη παραπάνω τεχνική δομή grating σε λεπτό μεμβράνη πολυμερούς υλικού PDMS (**σχήμα 1.10**) [6].



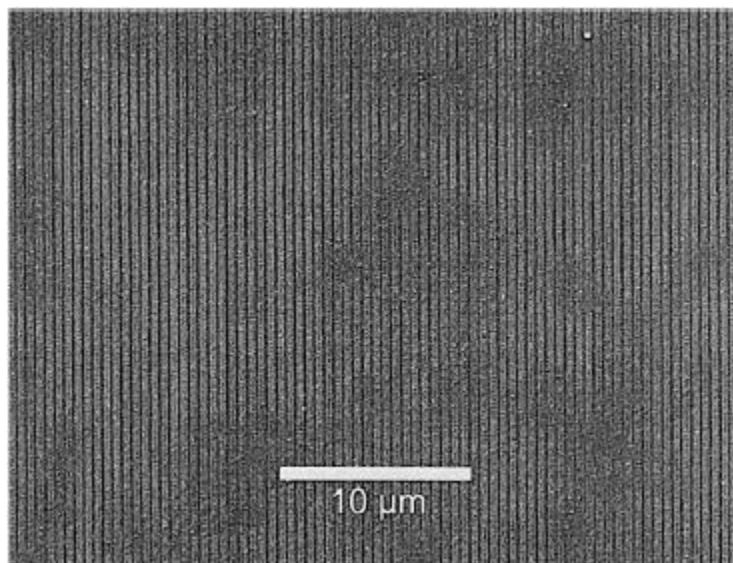
Σχήμα 1.10 Εικόνα μιας δομής grating ($150 \times 150 \mu\text{m}^2$) σε λεπτό μεμβράνη PDMS [6]

Οι J. Bekesi et.al. έχουν αναπτύξει δομή grating πάνω σε μεμβράνη PI (polyimide) και PES (polyethersulfone) με περίοδο 331 nm ακολουθώντας μία μέθοδο ablation και χρησιμοποιώντας ένα συμβολόμετρο αποτελούμενο από οπτικό φράγμα περίθλασης (**σχήμα 1.11**) [12].



Σχήμα 1.11 Δομή grating σε μεμβράνη PI με περίοδο 331 nm [12]

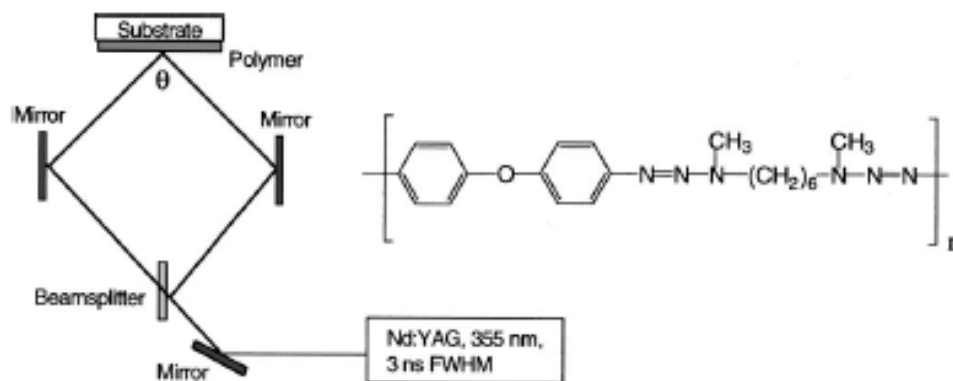
Οι F. Beinhorn et.al. ανέπτυξαν δομές grating περιόδου 500 nm με την εφαρμογή UV – laser ablation σε στρώσεις Ta₂O₅ πάνω σε υπόστρωμα γυαλιού, το οποίο χρησιμοποιείται για τη κατασκευή κυματοδηγών και διηλεκτρικών μασκών και κατόπτρων (σχήμα 1.12) [13].



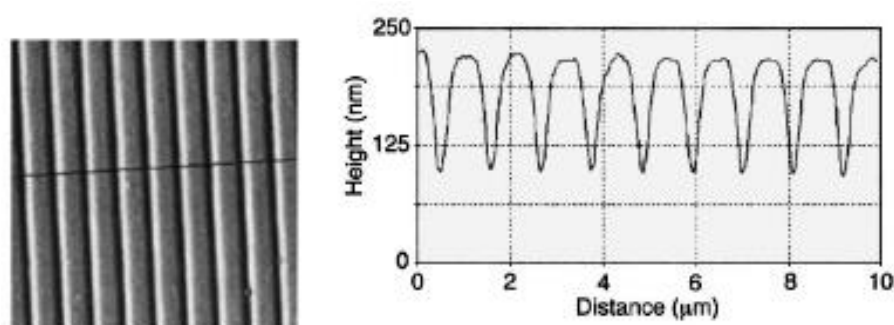
Σχήμα 1.12 Μικρογραφία SEM ενός Ta₂O₅ - grating από ένα παλμό ($\lambda = 248$ nm, 0.5 ps, 100 mJ/cm²) [13]

Τα ίδια αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας ως υπόστρωμα πυρίτιο, μπορούν να παρατηρηθούν χωρίς να γίνει απ'ευθείας εγχάραξη στην επιφάνεια του με αποκόλληση (ablation), αλλά παρεμβάλλοντας ένα ενδιάμεσο στάδιο έκθεσης και ανάπτυξης ενός χημικά ενισχυμένου photoresist (ή γενικά ενός πολυμερούς υλικού) στην επιφάνεια του πυριτίου, το οποίο θα κατευθύνει τη διαδικασία της εγχάραξης (χημικής ή plasma) για την ανάπτυξη των δομών που θέλουμε στην επιφάνεια του υποστρώματος. Βέβαια, χρησιμοποιώντας υψηλές τιμές ενέργειας, άρα και υψηλές τιμές ενεργειακής πυκνότητας (**fluence**), μπορεί να γίνει απ'ευθείας εγχάραξη του πολυμερούς, χωρίς να χρειάζεται η διαδικασία ανάπτυξής του μετά την έκθεση.

Οι T. Lippert et.al. έχουν σχηματίσει οπτικό φράγμα περίθλασης (grating) σε διαστάσεις νανομέτρων (nm) σε πολυμερές χρησιμοποιώντας ακτινοβολία παλμικού laser με τη χρήση οπτικού φράγματος περίθλασης και δημιουργώντας συμβολή μέσω μιας διάταξης που βασίζεται στο συμβολόμετρο Michelson (σχήμα 1.13 – 1.14) [4].

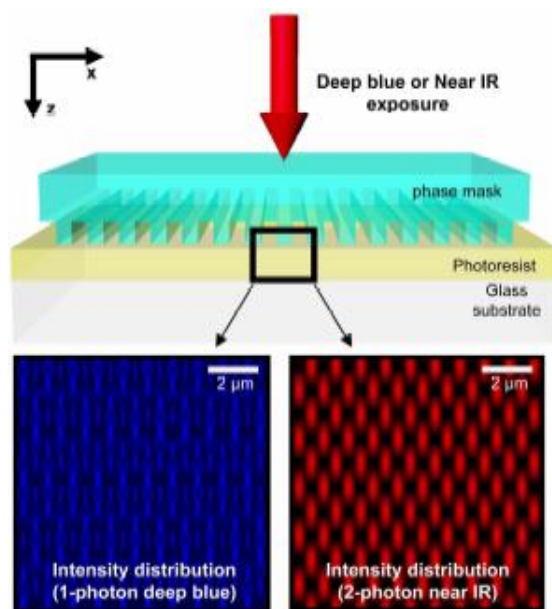


Σχήμα 1.13 Πειραματική διάταξη λιθογραφίας με χρήση phase mask και ο χημικός τύπος του πολυμερούς στην επιφάνεια του υποστρώματος [4]



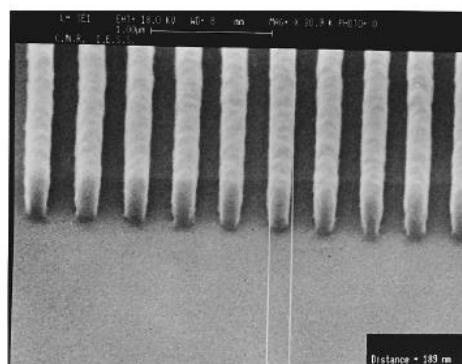
Σχήμα 1.14 AFM εικόνα δομής με περιοδικότητα 1090 nm [4]

Επίσης, οι Seokwoo Jeon et.al. εφάρμοσαν μία παρόμοια τεχνική χρησιμοποιώντας phase masks σε συμφωνία μεταξύ τους, διαφανή φωτοπολυμερή υλικά σε υπόστρωμα γυαλιού και μία φωτεινή ακτινοβολία για την ανάπτυξη σύνθετων, τρισδιάστατων νανοδομών, οι οποίες βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις οπτικές διατάξεις και τη βιοτεχνολογία. Οι νανοδομές που δημιουργούνται από αυτή τη μέθοδο λιθογραφίας έχουν τετραγωνική ή κυκλική διατομή με ύψος 420 nm και 510 nm και περίοδο 710 nm και 1500 – 1570 nm. Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο φωτεινές ακτινοβολίες, οι οποίες είναι 1 – photon DUV (deep blue) και 2 – photon NIR (near IR) (σχήμα 1.15) [21].

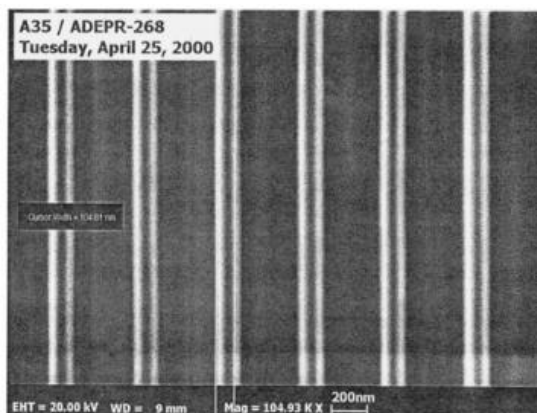


Σχήμα 1.15 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διαδικασίας ανάπτυξης 3D – νανοδομών [21]

Όσον αφορά το πολυμερές υλικό, το οποίο μπορούμε συνήθως να εναποθέσουμε επιφανειακά στο υπόστρωμα, όπως αναφέρεται παραπάνω, είναι φωτοευαίσθητη πολυμερή ρητίνη (photoresist) και αυτό γίνεται για να δημιουργηθεί μία γρήγορη και, ταυτόχρονα, υψηλής διακριτικής ικανότητας μέθοδο λιθογραφίας (**fast and high resolution lithography**) σε σχέση με τη διαδικασία της αποκόλλησης (ablation). Οι P. Argitis et.al. και οι N. Glezos et.al. παρουσιάζουν δύο εποξικές, τύπου Novolac (νεολάκκα) αρνητικού τόνου ρητίνες, οι οποίες είναι ενισχυμένες χημικά και βελτιωμένες για γρήγορη, υψηλής διακριτικής ικανότητας ηλεκτρονική και ακτίνων – X λιθογραφία (**electron – beam and x – ray lithography**). Οι ρητίνες αυτές ονομάζονται Epoxy Resist (**EPR**) και Aqueous base Developable Epoxy Resist (**ADEPR**) (σχήμα 1.16 – 1.17) [26, 27, 28].



Σχήμα 1.16 Ανάπτυξη δομών με τη χρήση EPR πάχους 189 nm [26]



Σχήμα 1.17 Ανάπτυξη δομών με τη χρήση ADEPR πάχους 100 nm [28]

1.2 ΟΠΤΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ

1.2.1 Κυματική Οπτική

Στη συγκεκριμένη μέθοδο λιθογραφίας που εφαρμόστηκε και αναφέρθηκε παραπάνω, συναντώνται δύο βασικά οπτικά φαινόμενα της κυματικής οπτικής:

- **Περίθλαση**
- **Συμβολή**

Η **περίθλαση** δημιουργείται όταν στην πορεία ενός κυματικού μετώπου παρεμβάλεται μια «ασυνέχεια». Αυτή μπορεί να είναι ένα άνοιγμα πάνω σ' ένα εκτεταμένο φράγμα, ή ένα περιορισμένο εμπόδιο. Το κυματικό μέτωπο μπορεί να είναι επίπεδο, σφαιρικό ή κυλινδρικό. Πάνω σε ένα σύστημα παρατήρησης, πίσω από την «ασυνέχεια», θα εμφανιστεί μια εικόνα εναλλαγής περιοχών με διάφορους βαθμούς ενισχυτικής ή αναιρετικής **συμβολής** για την κάθε μία. Όλες οι εικόνες περίθλασης έχουν την ίδια φυσική προέλευση, τη **συμβολή κυμάτων**. Η εικόνα περίθλασης εξαρτάται πολύ έντονα από τις φυσικές διαστάσεις της ασυνέχειας σε σχέση με το μήκος κύματος, από τη γεωμετρία της ασυνέχειας και του προσπίπτοντος μετώπου στην

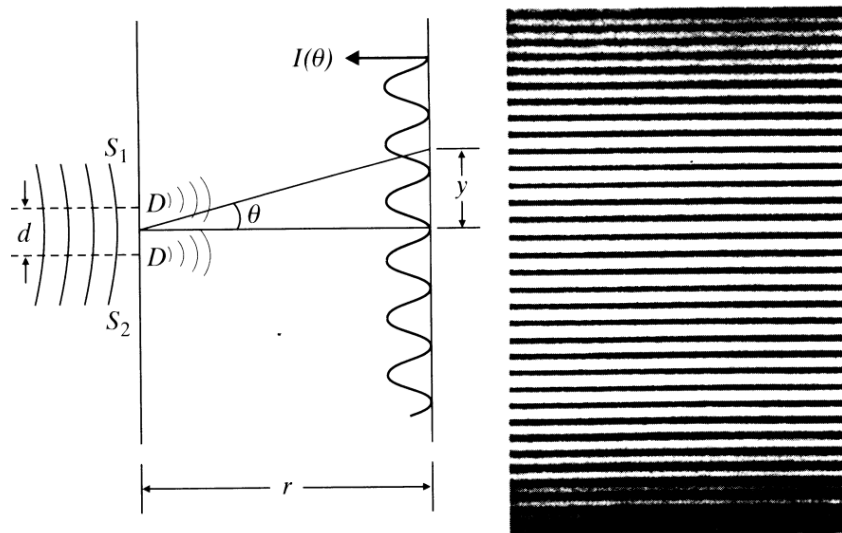
περιοχή της ασυνέχειας και από την απόσταση συστήματος παρατήρησης – ασυνέχειας. Έτσι, έχουμε δύο είδη περίθλασης [34, 48]:

- **Περίθλαση Fresnel ή περίθλαση κοντινού πεδίου**
- **Περίθλαση Fraunhofer ή περίθλαση μακρινού πεδίου**

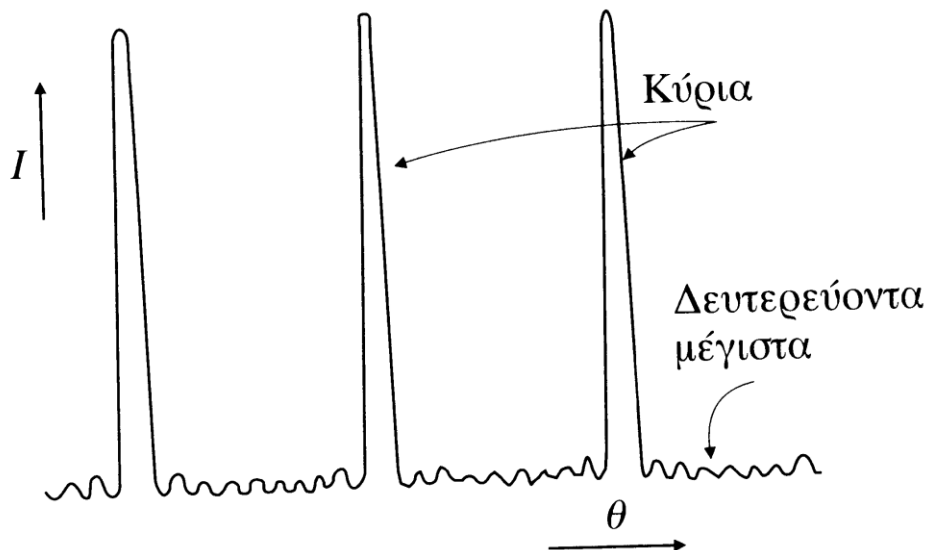
Τονίζεται ότι η περίθλαση Fresnel είναι η εικόνα που προκύπτει όταν η πηγή του κύματος και το σύστημα παρατήρησης βρίσκονται κοντά στην ασυνέχεια. Η αντίθετη περίπτωση είναι η περίθλαση Fraunhofer. Γενικά, έχουμε παραδείγματα περίθλασης από μία σχισμή, από δύο ή περισσότερες παράλληλες σχισμές (για πολύ μεγάλο αριθμό σχισμών αναφέρεται στα οπτικά φράγματα) (σχήμα 1.18 – 1.19). Η γενική συνθήκη περίθλασης στα οπτικά φράγματα είναι η εξής:

$$n\lambda = d(\sin \theta - \sin \theta_i)$$

όπου θ_i η γωνία πρόσπτωσης ως προς τη κάθετο, στην οποία ανήκει ο κροσσός τάξης n . Επίσης $d = 1/N$ είναι η απόσταση μεταξύ των σχισμών, N ο αριθμός σχισμών και λ το μήκος κύματος του φωτός που προσπίπτει [34, 48].



Σχήμα 1.18 Γεωμετρία των ακτίνων και ένταση κροσσών συμβολής, καθώς και φωτογραφία τους από δύο σχισμές απειροστού εύρους σε απόσταση d μεταξύ τους [48]



Σχήμα 1.19 Δείγμα κροσσών οπτικού φράγματος [48]

1.2.2 Βασικά στοιχεία και ιδιότητες

Τα οπτικά φράγματα περίθλασης κατασκευάζονται πάνω από 200 χρόνια, αρχικά για τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της φασματοσκοπίας. Για πολλά χρόνια, η παραγωγή τους παρέμενε κυρίαρχη για τους κατασκευαστές οργάνων υψηλής ακρίβειας. Επειδή η τεχνολογία κατασκευής τους ήταν αρκετά χρονοβόρα και ακριβή, τα κύρια εμπορικά φράγματα αντιγράφηκαν σε υψηλή ποιότητα σε πολυμερή υλικά. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη κατασκευή μόνο φραγμάτων ανάκλασης (**reflection gratings**), όπου το πολυμερές υλικό καλύπτεται μ' ένα μέταλλο, αφού το πολυμερές υλικό είναι χαμηλής οπτικής ποιότητας, ακατάλληλο για διάδοση (**transmission**).

Η τεχνολογία ημιαγωγών, η οποία εμφανίστηκε τις προηγούμενες δεκαετίες και αναπτύχθηκε, προσέφερε τεχνολογίες κατασκευής εφαρμόσιμες για τα φράγματα. Σήμερα είναι δυνατή η παραγωγή φραγμάτων διάδοσης, εγχαραγμένα σε υαλώδης ή τηγμένη πυριτία (**fused silica**), και εφάμιλλα φράγματα ανάκλασης σε όλες τις όψεις [24].

Τα φράγματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μεγάλο πλήθος διαφόρων τρόπων. Για όλους τους τύπους φράγματος, η χαρακτηριστική εξίσωσή τους καθορίζει τις γεωμετρικές

ιδιότητες τους σε σχέση με τη περίθλαση. Οι διάφοροι τύποι των φραγμάτων μεμονωμένα επηρεάζει την περιθλαστική τους αποδοτικότητα.

Οι κύριες κατηγορίες οπτικών φραγμάτων περίθλασης είναι οι εξής [24]:

- **Amplitude gratings**
- **Phase gratings**
- **Reflection gratings**
- **Transmission gratings**

Τα phase gratings χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες [24]:

- **Surface relief gratings**
- **Volume phase gratings**

Τα φράγματα μπορούν να χαρακτούν ή να σχεδιαστούν ολογραφικά. Σήμερα η τεχνολογία χάραξης έχει αντικατασταθεί πλήρως από την ολογραφία, εξ' αιτίας της ικανότητας υψηλής ανάλυσης, της χαμηλότερης διασποράς του φωτός και της υψηλότερης απόδοσης προϊόντος.

Τέλος, υπάρχει ένας ισχυρός διαχωρισμός μεταξύ των φραγμάτων, ο οποίος είναι ο εξής [24]:

- **Master gratings**
- **Replicated gratings**

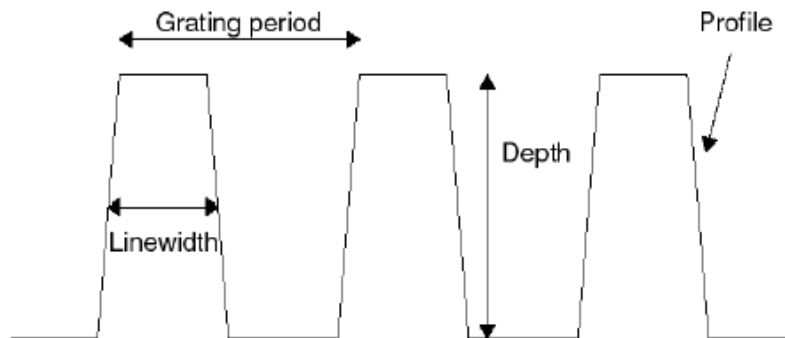
Τα πανομοιότυπα φράγματα παράγονται χρησιμοποιώντας ένα πρωτότυπο φράγμα σαν καλούπι.

Οι φυσικές παράμετροι ενός φράγματος περίθλασης, και ιδιαίτερα ενός **phase grating**, είναι οι εξής (**σχήμα 1.20**) [24]:

- Η περίοδος του φράγματος (**grating period**), η οποία ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στις πολλές, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, χαραγές ή γραμμές του φράγματος. Το αντίστροφο μέγεθος της περιόδου του φράγματος είναι η διακριτική ικανότητα του φράγματος (**grating resolution**), η οποία είναι ο αριθμός των γραμμών του φράγματος ανα χιλιοστό (mm).
- Το βάθος του φράγματος (**depth**), είναι η απόσταση από τη κορυφή των χαραγών του φράγματος στη βάση τους. Στη περίπτωση των φραγμάτων διάδοσης από υαλώδη

πυριτία (**fused silica transmission gratings**), το μέγεθος αυτό καλείται βάθος εγχάραξης (**etch depth**).

- Το μέγεθος **duty cycle** του φράγματος, το οποίο ορίζεται το πλάτος των γραμμών του διαιρεμένο με τη περίοδο του φράγματος.
- Ο λόγος δύο διαστάσεων (**aspect ratio**) του φράγματος ορίζεται ως ο λόγος ανάμεσα στο βάθος και το πλάτος της γραμμής του φράγματος.
- Το προφίλ του φράγματος (**grating profile**) είναι ένας γενικός όρος για το σχήμα των χαραγών του φράγματος.



Σχήμα 1.20 Φυσικές παράμετροι και χαρακτηριστικά μεγέθη ενός φράγματος περίθλασης [24]

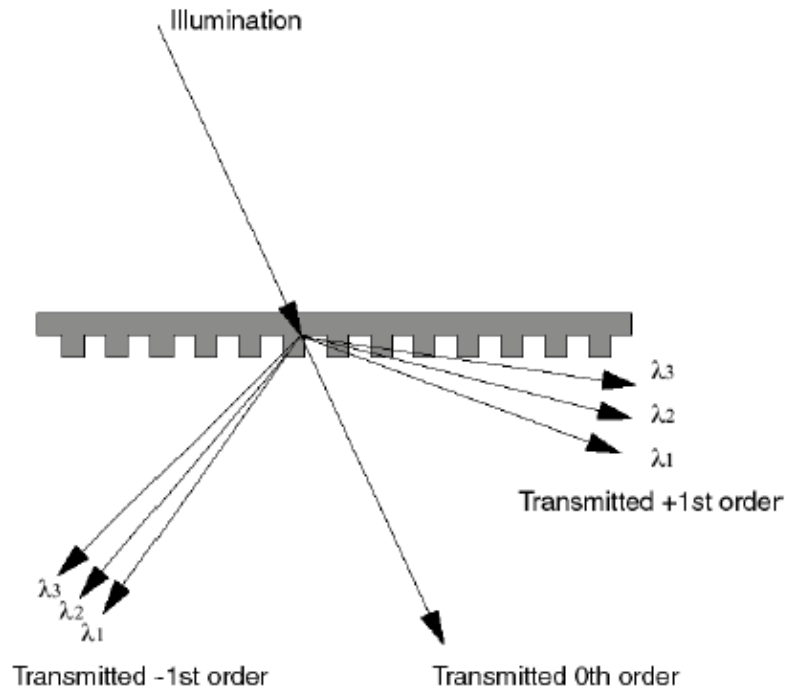
Οι βασικές ιδιότητες, τις οποίες συναντάμε σ' ένα φράγμα περίθλασης είναι οι εξής [24]:

- **Περίθλαση (Diffraction - σχήμα 1.21)**
- **Διαχωρισμός δέσμης (Beam splitting)**
- **Διασπορά (Dispersion)**
- **Απόδοση περίθλασης (Diffraction efficiency)**

Ένα φράγμα μπορεί να χωρίσει (διαθλά) μία προσπίπτουσα δέσμη laser σε πολλές, διακριτές δέσμες. Επίσης ένα φράγμα μπορεί να διαχωρίσει γωνιακά (διασκορπίσει) τα μήκη κύματος μίας μη μονοχρωματικής φωτεινής πηγής (όμοιο με το πρίσμα). Τα χαρακτηριστικά αυτά ελέγχονται από τη βασική εξίσωση του φράγματος:

$$m \cdot \lambda = \Lambda \cdot (\sin \theta_I + \sin \theta_D)$$

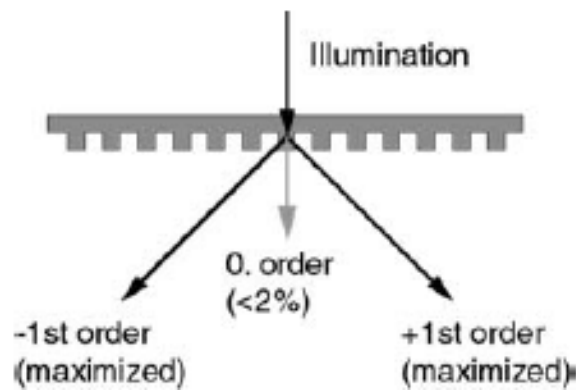
όπου m είναι μία τάξη περίθλασης, λ το μήκος κύματος της φωτεινής δέσμης, Λ η περίοδος του φράγματος, θ_i η γωνία πρόσπτωσης της φωτεινής δέσμης και θ_D η γωνία περίθλασης της φωτεινής δέσμης για τη συγκεκριμένη τάξη περίθλασης [24].



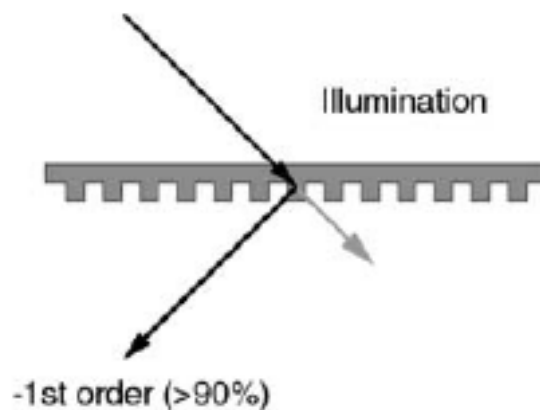
Σχήμα 1.21 Σχηματική περιγραφή της λειτουργίας του φράγματος περίθλασης [24]

Το ποσοστό του φωτός, το οποίο ένα φράγμα οδηγεί σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (ή **τάξη περίθλασης – diffraction order**) ονομάζεται **απόδοση περίθλασης (diffraction efficiency)**. Η απόδοση περίθλασης δεν μπορεί να προβλεφθεί εύκολα. Ενώ οι κατασκευαστές και οι χρήστες των φραγμάτων συνήθως θα αναπτύξουν μία συγκεκριμένη εντύπωση για το συγκεκριμένο μέγεθος βασιζόμενοι σε απλοποιημένα φυσικά μοντέλα, η ακριβής πρόβλεψη της απόδοσης της περίθλασης μπορεί να υπολογιστεί μόνο λύνοντας τις εξισώσεις Maxwell για τη συγκεκριμένη φωτεινή δέσμη, συνδιάζοντας τις δοσμένες οριακές συνθήκες για το φράγμα. Τα φράγματα περίθλασης κατασκευασμένα από υαλώδη ή τιγμένη πυριτία (**fused silica transmission gratings**) μπορούν να βελτιστοποιηθούν για μεγάλο αριθμό συνθηκών και απαιτήσεων απόδοσης περίθλασης. Μερικές σημαντικές πιθανότητες βελτιστοποίησης της απόδοσης περίθλασης σε αυτά τα φράγματα είναι οι εξής [24]:

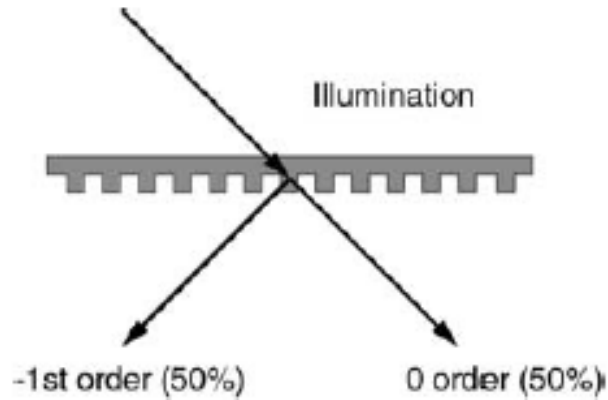
- Ίσες οι +1 και -1 τάξεις περίθλασης με κάθετη προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη (normal incidence illumination – σχήμα 1.22)
- Μέγιστη -1 τάξη περίθλασης με υπο γωνία προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη (off – normal incidence illumination – σχήμα 1.23)
- Ίσες οι 0 και -1 τάξεις περίθλασης με Bragg (Littrow) γωνία πρόσπτωσης (σχήμα 1.23)



Σχήμα 1.22 Σχηματική περιγραφή της περίπτωσης diffraction efficiency with normal incidence illumination [24]



Σχήμα 1.23 Σχηματική περιγραφή της περίπτωσης diffraction efficiency with off – normal incidence illumination [24]



Σχήμα 1.24 Σχηματική περιγραφή της περίπτωσης diffraction efficiency with Bragg (Littrow) angle incidence [24]

1.2.3 Υλικά και τεχνολογία παραγωγής

Ένας άλλος τρόπος διάκρισης μεταξύ των χαρακτηριστικών τύπων φράγματος περίθλασης είναι και η επιλογή του υλικού κατασκευής τους. Μ' αυτό το τρόπο, έχουμε τις εξής κατηγορίες φραγμάτων περίθλασης [24]:

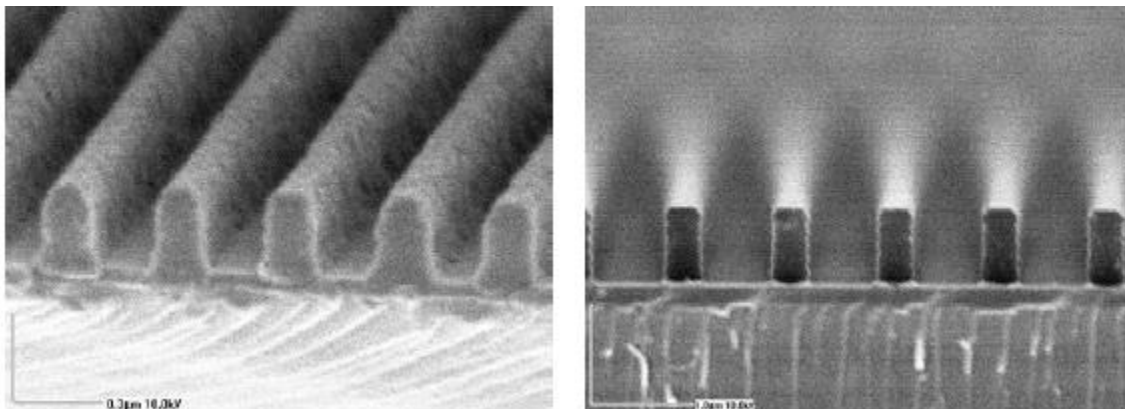
- **Conventional reflection gratings**, τα οποία κατασκευάζονται από ένα υλικό υποστρώματος (συνήθως γυαλί), ένα εποξειδικό πολυμερές (epoxy) ή μία φωτοευαίσθητη ρητίνη (photoresist), στο οποίο δημιουργείται το προφίλ του φράγματος, και τελικά μία μεταλλική επικάλυψη στη κορυφή.
- **Dichromated gelatin (DCG) gratings**, όπου το grating σχηματίζεται σ' ένα DCG υλικό, το οποίο έχει εναποτεθεί σ' ένα υπόστρωμα.
- **Multilayer dielectric (MLD) gratings**, τα οποία εγχарάσσονται πάνω σε υαλώδη πυριτία (fused silica), στη κορυφή μιας ανακλαστικής διηλεκτρικής στοιβάδας.
- **Fused silica transmission gratings**, τα οποία είναι 100% κατασκευασμένα από υαλώδη ή τιγμένη πυριτία, με την απαίτηση μιας επικάλυψης της πίσω πλευράς του με αντιανακλαστικό διηλεκτρικό υλικό.

Η υαλώδης ή τηγμένη πυριτία (fused silica) είναι ένα ιδανικό υλικό για φράγματα για πολλούς λόγους, μερικοί από τους οποίους παρουσιάζονται παρακάτω [24]:

- Η υαλώδης πυριτία έχει ευρύ φάσμα διάδοσης, άρα είναι βολική για μήκη κύματος κάτω από 200 nm μέχρι και πάνω από το μισό του υπερύθρου.
- Κατα μήκος ενός μεγάλου εύρους ζώνης από το υπεριώδες μέχρι το κοντινό υπέρυθρο (**from the UV to NIR**), η απορρόφηση του συγκεκριμένου υλικού είναι ασήμαντη – ίσως είναι το πιο διαφανές υλικό.
- Είναι φυσικά σταθερό υλικό και δεν αντιδράει με το περιβάλλον. Έχει πρακτικά απεριόριστο όριο ζωής.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες επιπέδου 1000 °C, πολύ υψηλότερες από αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα εποξειδικά πολυμερή και οι ζελατίνες.

Οι σημαντικότερες και πιο ξεχωριστές διαδικασίες παραγωγής των φραγμάτων περίθλασης, και συγκεκριμένα των fused silica transmission gratings, είναι τρεις [24]:

- Συμβατική ολογραφία (**conventional holography**)
- **Holographic stepper**
- **Εγχάραξη υαλώδους πυριτίας (Fused silica etching)**



Σχήμα 1.25 SEM εικόνες φραγμάτων περίθλασης 350 nm (αριστερά) και 1000 nm (δεξιά) πάνω σε photoresist [24]

1.2.4 Εφαρμογές

Οι εφαρμογές των φραγμάτων περίθλασης είναι οι εξής [24]:

- **Φασματομετρία (spectrometry)**
- **Laser pulse compression**
- **Telecom gratings**
- **Phase masks / beam – splitters**
- **Achromatic grating interferometer**

Η φασματοσκοπία ήταν μία από τις πρώτες εφαρμογές των φραγμάτων περίθλασης, και παραμένει μία από τις κύριες χρήσεις τους. Τα περισσότερα φασματομέτρα σήμερα βασίζονται στη σχεδίαση ανακλαστικού φράγματος. Η αρχή λειτουργίας ενός φασματομέτρου – φράγματος βασίζεται στη πρόσπτωση φωτεινής δέσμης και περιθλασή της και τα διάφορα μήκη κύματος διασκορπίζονται αφήνοντας το φράγμα περίθλασης (**σχήμα 1.26**).

Για τη σχεδίαση ενός φασματομέτρου, τα φράγματα διάδοσης προσφέρουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων [24]:

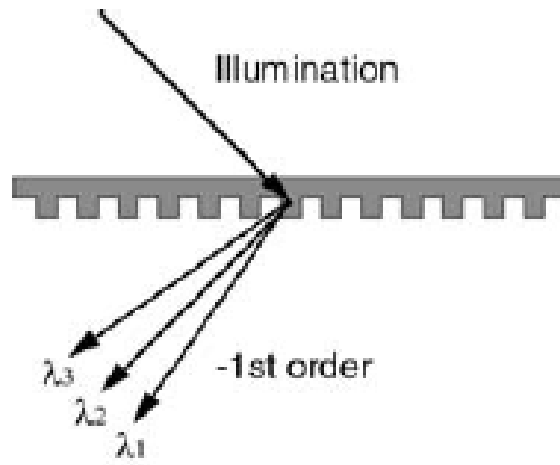
- Το επίπεδο εξόδου του φράγματος (output plane) είναι από την αντίθετη πλευρά του επιπέδου εισόδου της φωτεινής δέσμης, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία σχεδίασης σε σχέση με τα φράγματα ανάκλασης.
- Ένα φράγμα διάδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα ως στοιχείο διασποράς της δέσμης και στοιχείο εμποδίου της δέσμης, επιτρέποντας σύνθετη σχεδίαση.
- Τα οπτικά διάδοσης χρειάζεται λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις στην ακρίβεια της συναρμολόγησης της γωνιακή ευθυγράμμισης. Ένα φράγμα διάδοσης μειώνει το σφάλμα ευθυγράμμισης, σε αντίθεση με την οπτική ανάκλασης, όπου μία απευθυγράμμιση διπλασιάζει το σφάλμα ευθυγράμμισης.
- Τα οπτικά φράγματα διάδοσης από υαλώδη πυριτία μπορούν να δημιουργήσουν υψηλής απόδοσης για υψηλότερη ανάλυση φράγματα περίθλασης από τα ισοδύναμα φράγματα ανάκλασης.

- Σε πολλές περιπτώσεις τα οπτικά φράγματα διάδοσης υαλώδους πυριτίας θα προσφέρουν υψηλότερη, ευρύτερης ζώνης απόδοση σε σχέση με τα συγκρινόμενα φράγματα ανάκλασης, και χωρίς φασματικές ανωμαλίες όπως οι ανωμαλίες Wood, οι οποίες συναντώνται στα φράγματα ανάκλασης με μεταλλική επικάλυψη.
- Τα φράγματα αυτά παράγονται με ολογραφία και RIE εγχάραξη (Reactive ion etching).
- Η τεχνολογία παρασκευής holography stepper προσφέρει τη ποιότητα των πρωτότυπων φραγμάτων, όπως και την επαναληψιμότητά τους, και παράλληλα δυνατότητες μεγάλου όγκου παραγωγής πανομοιότυπων φραγμάτων με τα προτότυπα.

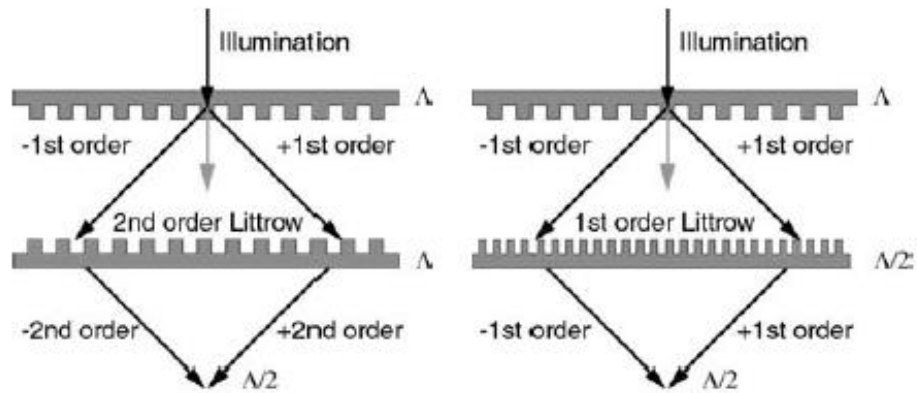
Ένας άλλος τύπος φράγματος, ο οποίος βασίζεται στην ιδιότητα διασποράς των φραγμάτων είναι το **pulse compression grating**. Χρησιμοποιώντας ένα ζευγάρι ίδιων φραγμάτων, ένας παλμός, του οποίου η στιγμιαία συχνότητα εξαρτάται από το χρόνο, διαχωρίζεται στο πρώτο φράγμα. Το δεύτερο φράγμα ξαναεθυγραμμίζει τα μήκη κύματος, τα οποία εξ' αιτίας της διασποράς από το πρώτο φράγμα έχουν ταξιδέψει διαφορετικές αποστάσεις, με το μεγαλύτερο μήκος κύματος να έχει ταξιδέψει περισσότερο και γι' αυτό να έχει καθυστερήσει, ενώ το μικρότερο μήκος κύματος να έχει φτάσει. Αυτή είναι άλλη μία εφαρμογή των φραγμάτων.[24]

Τα φράγματα, όμως, έχουν την ιδιότητα ότι μία διακριτού μήκους κύματος φωτεινή δέσμη θα περιθλάται σε διάφορες διακριτές τάξεις περίθλασης σύμφωνα με τη βασική εξίσωση του φράγματος. Έτσι έχουμε το διαχωρισμό της δέσμης (**beam – splitting**) και τη δημιουργία μίας κατηγορίας εφαρμογών. Ένα πολύ γνωστό παράδειγμα ενός beam – splitting grating είναι η Phase mask, ένα εργαλείο περίθλασης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη κατασκευή των fiber Bragg gratings και των κυματοδηγών - φραγμάτων (**waveguide gratings**) [24].

Μία άλλη εφαρμογή, η οποία σχετίζεται με τη Phase mask, είναι η λειτουργία ενός συμβολόμετρου (**σχήμα 1.27**), με τη χρήση δύο φραγμάτων, για τη δημιουργία μίας δομής μέσω της συμβολής, το οποίο καθορίζεται από ένα πρωτότυπο φράγμα (Phase mask) [24].



Σχήμα 1.26 Αρχή λειτουργίας φασματομέτρου [24]



Σχήμα 1.27 Αρχή λειτουργίας συμβολόμετρου με τη χρήση δύο φραγμάτων περίθλασης [24]

1.3 ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ

1.3.1 Πηγές φωτός

Είναι προφανές ότι η λιθογραφία υψηλής διακριτικής ικανότητας (**high – resolution lithography**) απαιτεί μικρότερα μήκη κύματος φωτονίων. Ελαττώνοντας τις χαρακτηριστικές διαστάσεις στις δομές που θέλουμε να δημιουργήσουμε, απαιτείται η χρήση μικρότερου λ . Τα σύγχρονα συστήματα έκθεσης παράγουν περιορισμένες εικόνες περίθλασης και τα φαινόμενα περίθλασης σχετίζονται αρκετά με το μήκος κύματος της εκτιθέμενης ακτινοβολίας. Επίσης, δημιουργήθηκαν εργαλεία έκθεσης, τα οποία χρησιμοποιούν ένα μόνο μήκος κύματος, φιλτράροντας τις ανεπιθύμητες εκπομπές. Αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι τα 436 nm (g-line) και τα 365 nm (i-line). Στις αρχές της δεκαετίας του '90, χρησιμοποιήθηκε το g-line. Όμως, στη συνέχεια, το i-line κυριάρχησε λόγω της καλύτερης ανάλυσης που παρουσίαζε. Η κυριαρχία του, όμως, μέχρι τη γενιά της τεχνολογίας των 0.35 – μm . Για γενιές κάτω από τα 0.35 – μm , απαιτούνται μικρότερα μήκη κύματος έκθεσης και νέες πηγές φωτός. Οι φωτεινότερες πηγές στο βαθύ υπεριώδες μέρος του φάσματος είναι τα **excimer lasers**. Δύο τέτοια lasers είναι το KrF ($\lambda = 248 \text{ nm}$) και το ArF ($\lambda = 193 \text{ nm}$). Στα excimer lasers, δύο στοιχεία είναι παρόντα, τα οποία δεν αντιδρούν φυσιολογικά στη θεμελιώδη κατάστασή τους (συνήθως είναι ένα ευγενές αέριο και και ένα αλογόνο ως συστατικά). Εάν αυτά τα στοιχεία διεγερθούν, μία χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα. Όταν το διεγερμένο μόριο επιστρέφει στη θεμελιώδη κατάστασή του, ένα φωτόνιο εκπέμπεται στο βαθύ υπεριώδες και το μόριο διασπάται. Το KrF χρησιμοποιήθηκε στη παραγωγή για τις 0.25 – μm και 0.18 – μm γενιές τεχνολογίας και το ArF είναι η πηγή φωτός που χρησιμοποιήθηκε για τις 0.13 – μm και 0.10 – μm τεχνολογικές γενιές. Σήμερα, μία βασική ομάδα πηγών φωτός και εφαρμογής σε συστήματα λιθογραφίας, είναι τα παλμικά lasers, όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω [34].

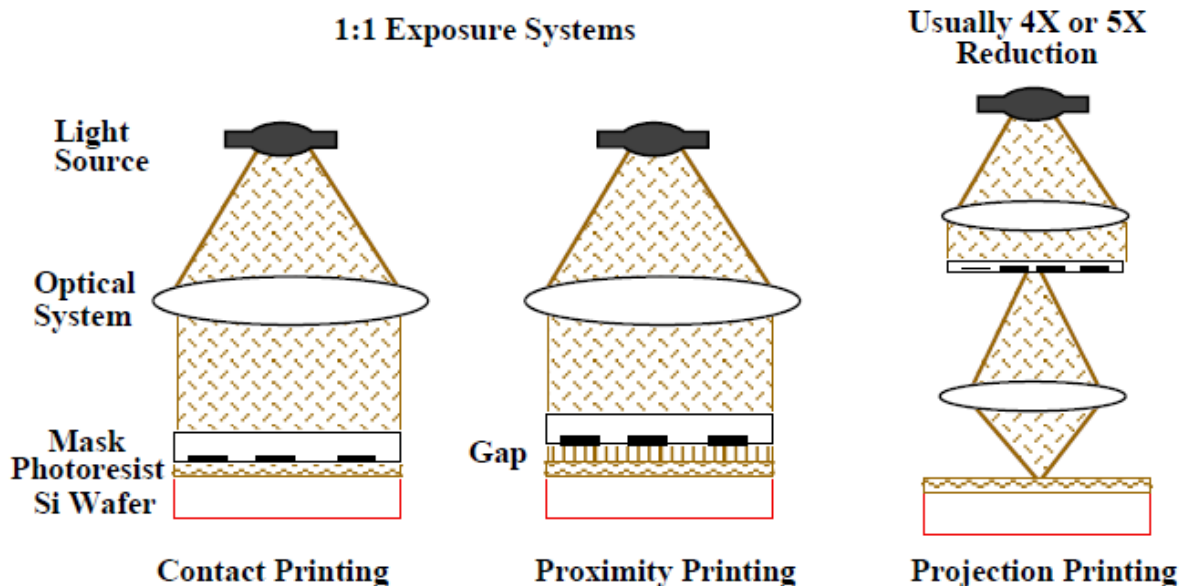
1.3.2 Συστήματα έκθεσης δοκιμίων

Τρεις τύποι συστημάτων έκθεσης έχουν χρησιμοποιηθεί (**σχήμα 1.28**) [30, 34]:

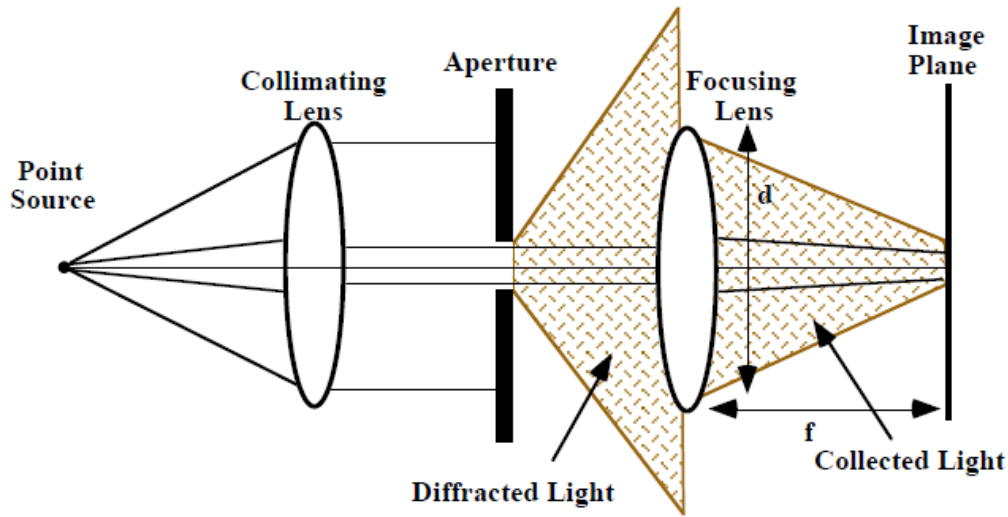
- **Contact printing**, το οποίο είναι ικανό για υψηλή ανάλυση αλλά έχει μη αποδεκτή πυκνότητα ατελειών.

- **Proximity printing**, το οποίο δεν μπορεί εύκολα να σχεδιάσει χαρακτηριστικά κάτω από μερικά μm (εκτός από τα συστήματα ακτίνων x).
- **Projection printing**, το οποίο εξασφαλίζει υψηλή ανάλυση και χαμηλή πυκνότητα ατελειών και είναι το σύστημα που κυριαρχεί σήμερα.

Για να καταλάβουμε και να ποσοτικοποιήσουμε τις δυνατότητες των σύγχρονων συστημάτων έκθεσης δοκιμίων (**wafer exposure systems**), χρειάζεται να ξαναθυμηθούμε μερικές βασικές αρχές της οπτικής. Στις μικρές διαστάσεις, τα φαινόμενα της περίθλασης κυριαρχούν. Έαν έχουμε ένα άνοιγμα (**aperture**) απο το οποίο διέρχεται φωτεινή δέσμη, η οποία είναι της τάξεως του μήκους κύματος της δέσμης, το φως «απλώνεται» αφού περάσει το άνοιγμα. Όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα, τόσο διαχέεται η φωτεινή δέσμη. Έαν θέλουμε να απεικονίσουμε το άνοιγμα πάνω σ'ένα επίπεδο (π.χ. ρητίνη), μπορούμε να συλλέξουμε το φως χρησιμοποιώντας ένα φακό και να εστιάσουμε πάνω στο επίπεδο απεικόνισης. Άλλα η ορισμένη διάμετρος του φακού σημαίνει ότι κάποια πληροφορία χάνεται (**σχήμα 1.29**).



Σχήμα 1.28 Τρεις τύποι συστημάτων έκθεσης δοκιμίων [34]



Σχήμα 1.29 Ποσοτικό παράδειγμα ενός μικρού ανοίγματος (aperture) που απεικονίζεται [34]

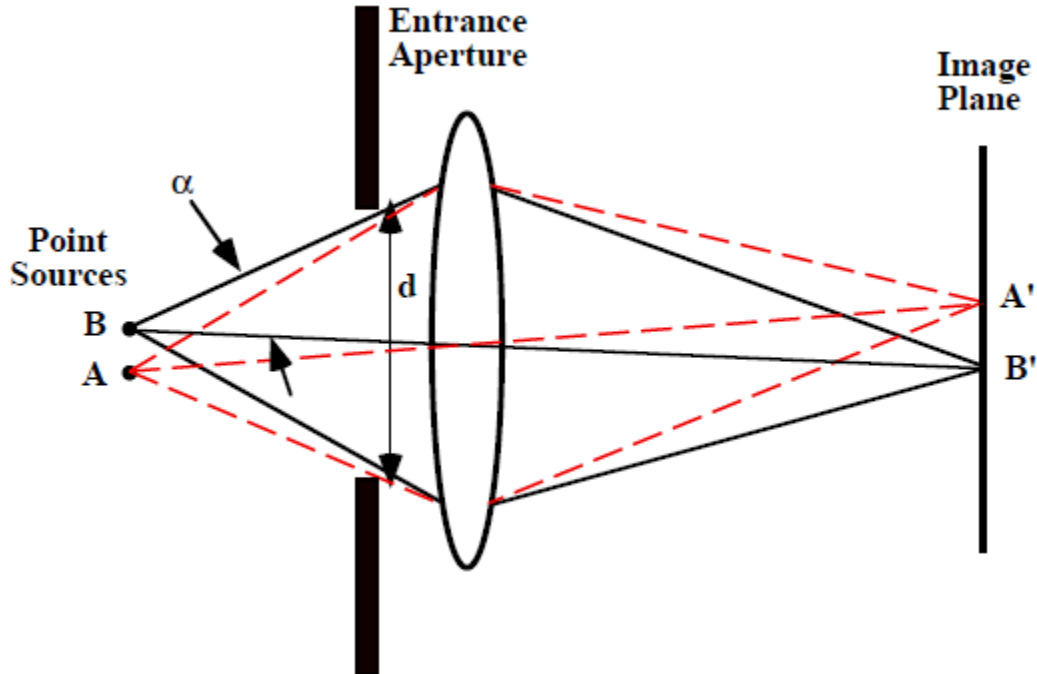
Τα **projection systems**, τα οποία βασίζονται στη περίθλαση Fraunhofer (έχουμε αναφερθεί σ' αυτή στη παράγραφο 1.1.1), είναι τα συστήματα που κυριαρχούν σήμερα. Η απόδοσή τους περιγράφεται συνήθως σε σχέση με τα εξής στοιχεία [30, 34]:

- Διακριτική ικανότητα (resolution)
- Βάθος εστίασης (depth of focus)
- Οπτικό πεδίο (field of view)
- Modulation transfer function
- Ακρίβεια ευθυγράμμισης (alignment accuracy)
- Έξοδος (throughput)

Εαν θεωρήσουμε ένα βασικό οπτικό projection σύστημα (σχήμα 1.30), οι εικόνες που σχηματίζονται από δύο σημειακές πηγές, θα είναι η καθεμία ένας δίσκος Airy. Ο Rayleigh πρότεινε ότι ένα σωστό κριτήριο για τη διακριτική ικανότητα (**resolution**) ήταν ότι τα κεντρικά μέγιστα κάθε σημείου εικόνα βρίσκεται στο πρώτο ελάχιστο του συνεχόμενου σημείου εικόνα. Μ' αυτό το τρόπο, το resolution δίνεται από το τύπο:

$$R = \frac{0.61 \lambda}{n \sin \alpha}$$

όπου $N.A. = n \sin \alpha$ το αριθμητικό άνοιγμα του φακού που χρησιμοποιούμε στο projection σύστημα.



Σχήμα 1.30 Βασικό οπτικό projection σύστημα [34]

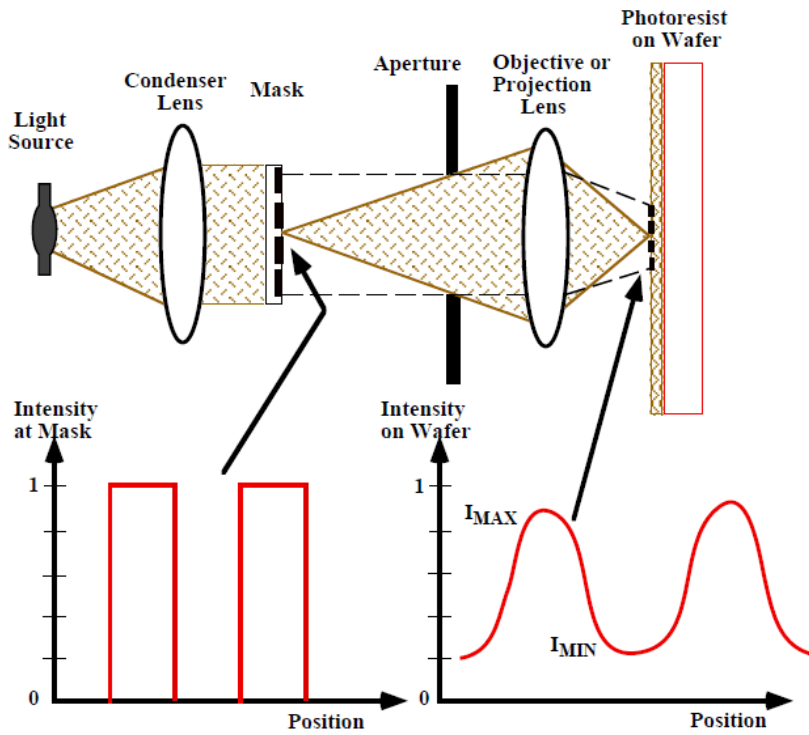
Το αριθμητικό άνοιγμα του φακού εκφράζει την ικανότητα του να συλλέγει φως, το οποίο έχει υποστεί περίθλαση. Προφανώς, το resolution μπορεί να αυξηθεί, μειώνοντας το μήκος κύματος λ της φωτεινής δέσμης ή αυξάνοντας το αριθμητικό άνοιγμα (δηλαδή μεγαλύτερος φακός). Βέβαια, οι υψηλότερου **N.A.** φακοί μειώνουν το βάθος εστίασης, διότι δίνεται από το τύπο:

$$DOF = \pm \frac{\lambda}{2(N.A.)^2}$$

Μία άλλη χρήσιμη αρχή είναι το **MTF** ή **modulation transfer function**, το οποίο είναι χρήσιμο για να μετρηθεί η ποιότητα του aerial image, το οποίο παράγεται στην επιφάνεια της ρητίνης που χρησιμοποιείται για να γίνει η επιθυμητή απεικόνιση μέσω της λιθογραφίας. Το aerial image είναι το σχέδιο της οπτικής ακτινοβολίας, η οποία «χτυπάει» και ενεργοποιεί τη φωτοευαίσθητη πολυμερή ρητίνη (σχήμα 1.31). Το modulation transfer function δίνεται από τον εξής τύπο:

$$MTF = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}}$$

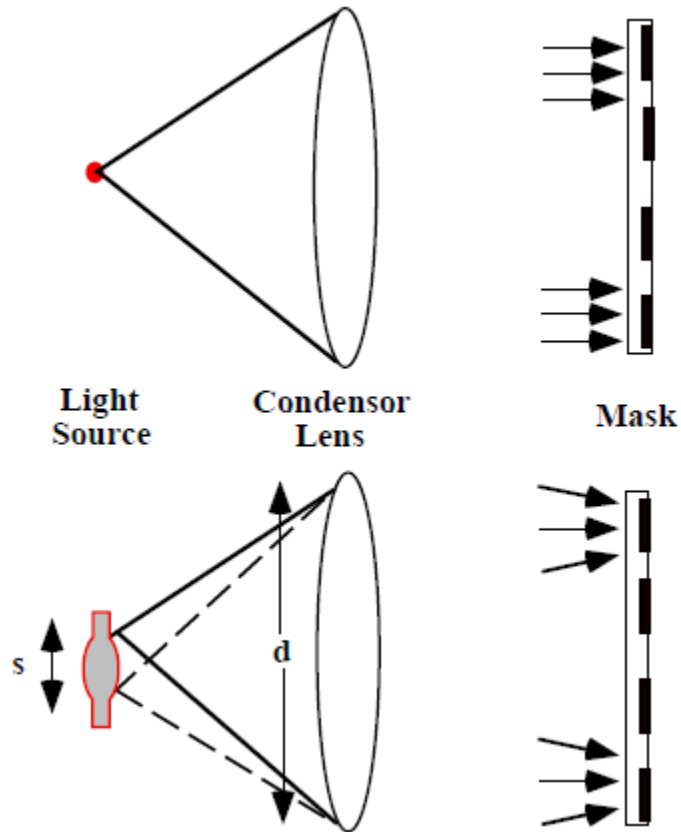
όπου I η ένταση του φωτός.



Σχήμα 1.31 Η αρχή λειτουργίας του MTF [34]

Τέλος, ένα άλλο βασικό στοιχείο αυτής της κατηγορίας συστήματος είναι η χωρική συνοχή της φωτεινής πηγής (**spatial coherence**). Πρακτικά, οι πηγές φωτός δεν είναι σημειακές πηγές. Η φωτεινή δέσμη που «χτυπάει» τη μάσκα δεν θα είναι επίπεδα κύματα. Έτσι, η χωρική συνοχή του συστήματος ορίζεται ως εξής:

$$S = \frac{\text{light source diameter}}{\text{condenser lens diameter}} = \frac{s}{d} = \frac{N.A._{\text{condenser}}}{N.A._{\text{projection optics}}}$$

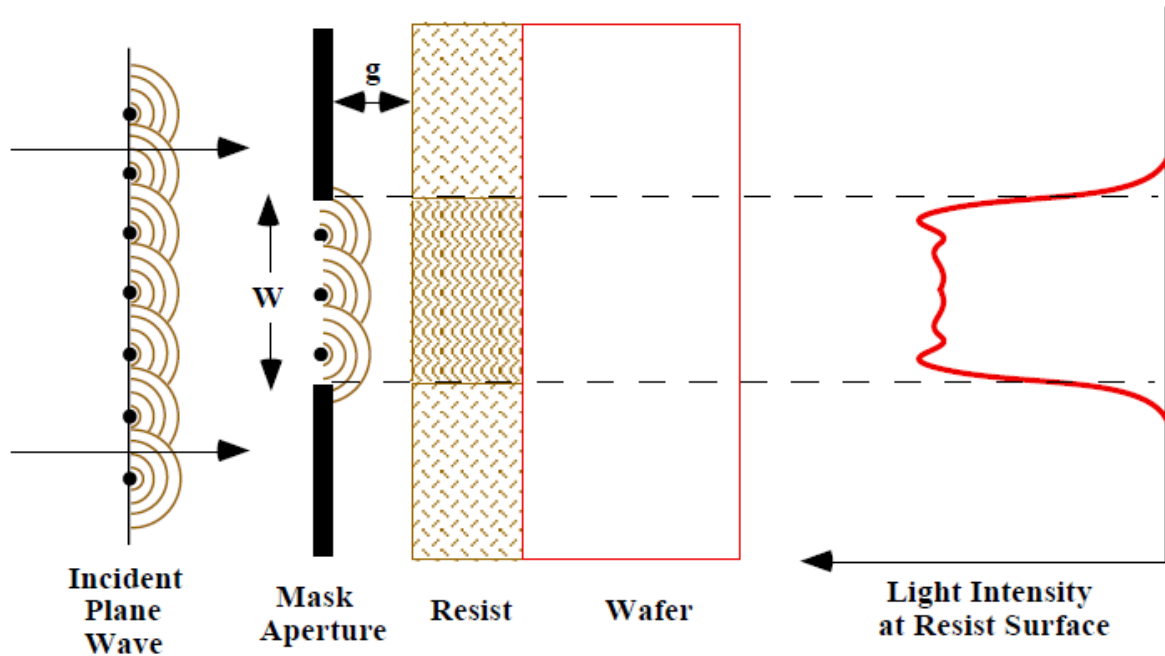


Σχήμα 1.32 Παραδείγματα χωρικής (πάνω) και μερικής (κάτω) συνοχής πηγές φωτός [34]

Όσον αφορά τα συστήματα **contact and proximity**, αυτά λειτουργούν βάσει της περίθλασης **Fresnel**. Σ' αυτή τη περίπτωση, υπάρχει πάντα ένα «χάσμα» ανάμεσα στη μάσκα και τη ρητίνη. Το aerial image μπορεί να κατασκευαστεί απεικονίζοντας σημειακές πηγές σ' ένα άνοιγμα, όπου η κάθε μία ακτινοβολεί σφαιρικά κύματα (σχήμα 1.33). Η περίθλαση **Fresnel** εφαρμόζεται όταν ισχύει η εξής ανισότητα:

$$\lambda < g < \frac{W^2}{\lambda}$$

όπου λ το μήκος κύματος, g η απόσταση μάσκας – ρητίνης και W το μέγεθος του ανοίγματος της μάσκας.



Σχήμα 1.33 Απεικόνιση του contact ή near field συστήματος έκθεσης [34]

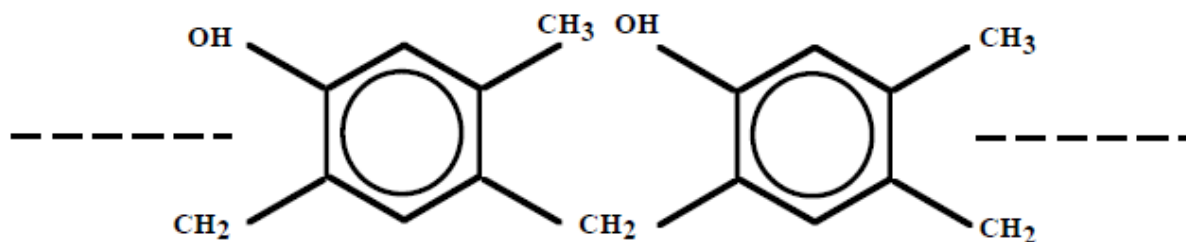
1.3.3 Φωτοπολυμερή υλικά (photoresists)

Οι ρητίνες είναι οργανικά πολυμερή, τα οποία εναποτίθενται στα δισκία (πυριτίου) και ψήνονται, ώστε να παραχθεί ένα λεπτό υμένιο (**film**) περίπου $0.5 - 1 \mu\text{m}$ πάχους. Μία κατηγορία είναι τα **g - line** και **i - line resists**, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη λιθογραφία και αποτελούνται από τα εξής [34]:

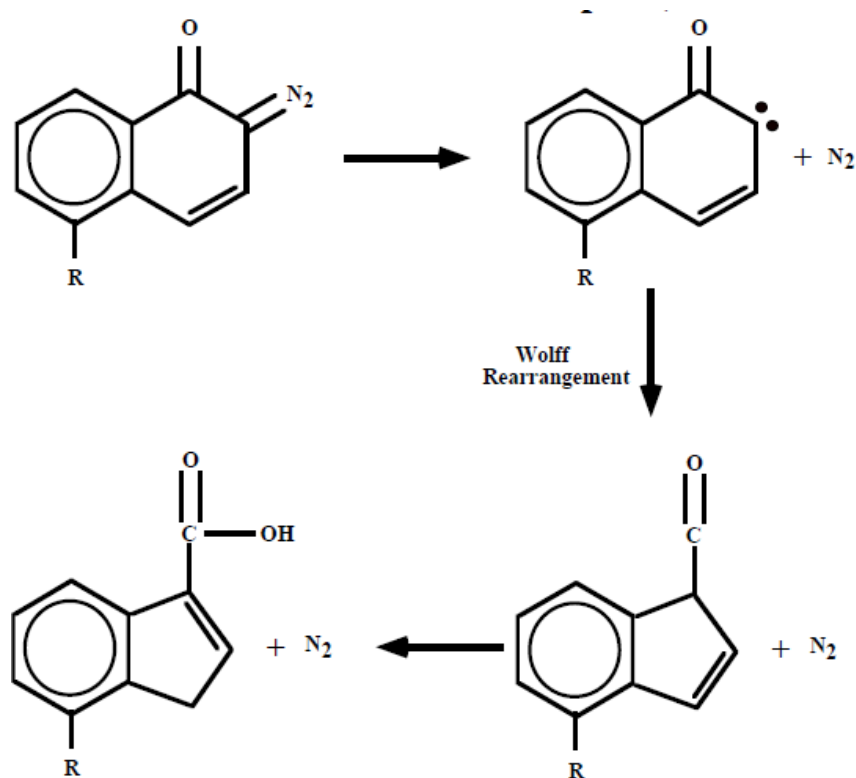
- Αδρανής ρητίνη
- Φωτοευαίσθητοποιητής (PAC)
- Διαλύτης (χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει το ιξώδες)

Τα DNQ υλικά είναι οι πιο συνηθισμένες ρητίνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα γι' αυτές τις δύο κατηγορίες ρητινών. Η βάση αυτών των υλικών είναι η ρητίνη τύπου **novolac**

(νεολάκκα), η οποία αποτελείται από μία μακριά πολυμερική αλυσίδα, αποτελούμενη από υδροκαρβονικούς δακτυλίους με δύο ομάδες μεθυλίου και μία ομάδα υδροξιλίου (OH) συνδεδεμένες πάνω της. Μετά την έκθεση στο φως, ο PAC στα DNQ υλικά υφίσταται μετατροπή σε καρβοξυλικό οξύ, το οποίο είναι διαλυτό στην εμφανιστική ουσία (**developer**).

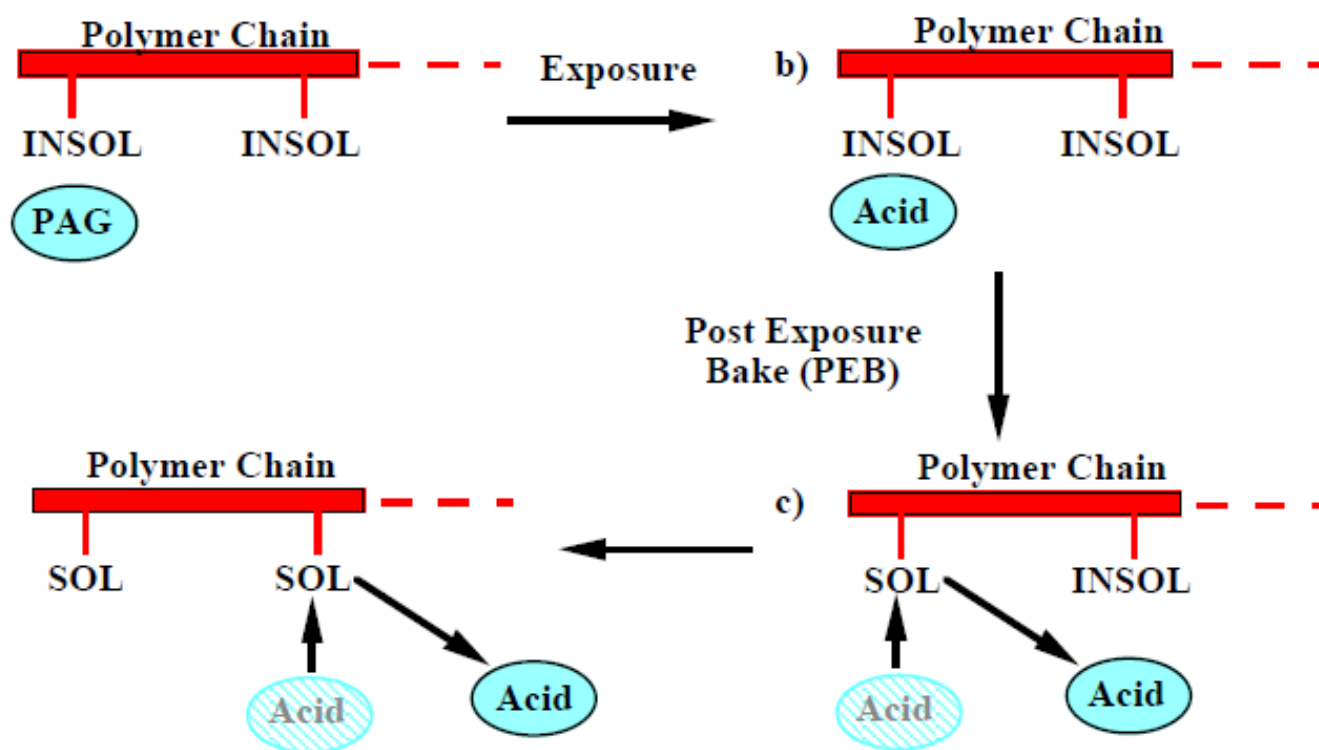


Σχήμα 1.34 Η βασική δομή του novolac [34]



Σχήμα 1.35 Διαδικασία αποσύνθεσης του PAC σύμφωνα με την έκθεση φωτός [34]

Μία άλλη κατηγορία ρητινών είναι οι DUV ρητίνες (**DUV resists**). Οι DUV ρητίνες βασίζονται σε μία καινούργια χημεία, η οποία κάνει χρήση της χημικής ενίσχυσης (**chemical amplification**). Συγκεκριμένα, κατά την έκθεση του χημικά ενισχυμένου υλικού (η DUV ρητίνη), ένας μόριο PAG (**Photo – acid generator**) αντιδράει με τα εισερχόμενα φωτόνια και δημιουργεί ένα οξύ μόριο, το οποίο λειτουργεί ως καταλύτης. Αργότερα, κατά τη διαδικασία του ψησίματος μετά ακριβώς από την έκθεση του δοκιμίου, το μόριο – καταλύτης αντιδράει με ένα «μπλοκαρισμένο» μόριο πάνω στην πολυμερική αλυσίδα, κάνοντάς το διαλυτό στο εμφανιστικό υγρό και το μόριο – καταλύτης ξαναδημιουργείται (**σχήμα 1.36**). Αυτού του είδους οι ρητίνες είναι βελτιωμένες σημαντικά σε σχέση με τις DNQ ρητίνες, εξ' αιτίας της μεγαλύτερης ευαισθησίας (**sensitivity**) που παρουσιάζουν, η οποία οφείλεται στις μικρότερες κβαντικές αποδόσεις που έχουν (**quantum efficiencies**) [34].

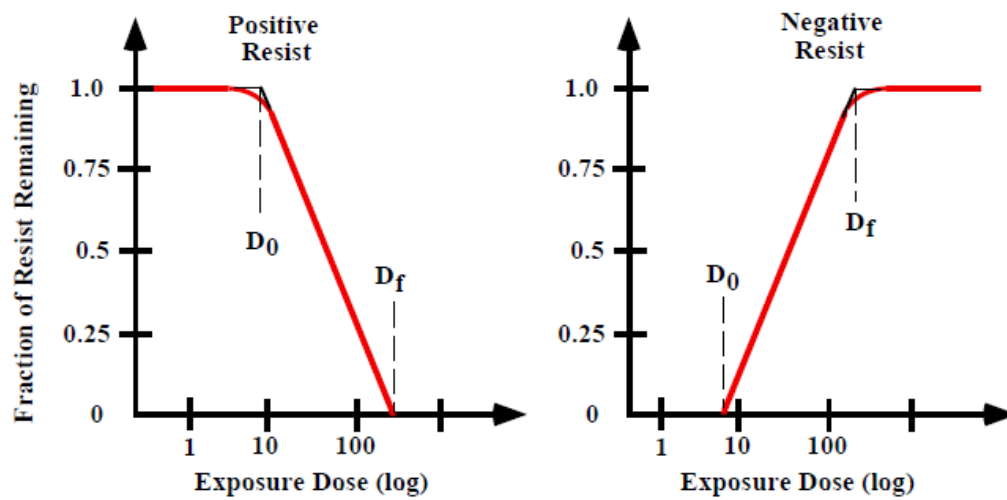


Σχήμα 1.36 Βασική λειτουργία των χημικά ενισχυμένων ρητινών [34]

Δύο βασικές παράμετροι συνήθως περιγράφουν τις βασικές ιδιότητες των ρητινών, το **contrast** και **CMTF (critical modulation transfer function)**. Το contrast ορίζεται ως εξής:

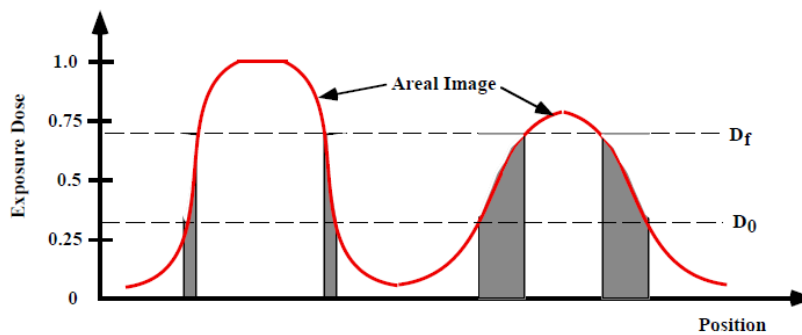
$$\gamma = \frac{1}{\log_{10} \frac{D_f}{D_0}}$$

όπου **D₀** η αρχική δόση, όταν ξεκινάει η έκθεση της ρητίνης να έχει αποτέλεσμα και **D_f** η δόση, στην οποία η έκθεση έχει ολοκληρωθεί (**σχήμα 1.37**) [34].



Σχήμα 1.37 Ιδανικές καμπύλες του contrast για θετικού και αρνητικού τόνου ρητίνη [34]

Το aerial image και το contrast της ρητίνης, σε συνδυασμό, μπορούν να δώσουν τη λανθάνουσα εικόνα που παράγεται (**σχήμα 1.38**).



Σχήμα 1.38 Συνδυασμός του aerial image και του contrast της ρητίνης (οι γκρι περιοχές ορίζουν τη μορφοποίηση της ρητίνης) [34]

Το **CMTF** για τις ρητίνες ορίζεται ως εξής:

$$CMTF_{resist} = \frac{D_f - D_0}{D_f + D_0} = \frac{10^{1/\gamma} - 1}{10^{1/\gamma} + 1}$$

Τυπικές τιμές του **CMTF** για τις g και i – line ρητίνες είναι περίπου 0.4. Για τις χημικά ενισχυμένες DUV ρητίνες είναι 0.1 – 0.2 [34].

Τέλος, υπάρχουν συχνά ένας αριθμός επιπρόσθετων θεμάτων που προκύπτουν κατά την έκθεση της ρητίνης. Η ρητίνη εφαρμόζεται ως υγρό και γι' αυτό τον λόγο «ρέει» για να καλύψει τη τοπογραφία της επιφάνειας που βρίσκεται. Το πάχος της ρητίνης μπορεί να ποικίλει κατά μήκος της επιφάνειας του δισκιδίου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπο- ή υπερέκθεση σε κάποιες περιοχές και, επομένως, σε γραμμές μεταβλητού πάχους. Οι ανακλαστικές επιφάνειες κάτω από τη ρητίνη μπορούν να δημιουργήσουν ανακλάσεις και στατικά κύματα και ν' αλλοιώσουν την ανάλυση (**resolution**). Σε αυτή τη περίπτωση, καλό είναι να γίνεται επικάλυψη αντιανακλαστικού υλικού ή ψήνοντας τη ρητίνη μετά την έκθεση και πριν την ανάπτυξη των δομών (**development**).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια LASER του Τομέα Φυσικής. Συγκεκριμένα, η διεξαγωγή των πειραμάτων της λιθογραφίας έγινε βασιζόμενη σ' ένα σταθμό μικρομηχανικής με προσαρμοσμένο σύστημα μικροσκοπίου, τα οποία προϋπήρχαν για άλλους πειραματικούς σκοπούς.

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει ένα παλμικό laser **Nd:YAG LASER (LITRON)** με διάρκεια παλμού 4 ns. Το σύνολο των πειραμάτων της λιθογραφίας πραγματοποιήθηκε με τη τέταρτη αρμονική ($\lambda = 266 \text{ nm}$) του Nd:YAG LASER. Το laser και ο σταθμός μικρομηχανικής βρίσκονται σε διαφορετικά οπτικά τραπέζια, γι' αυτό το λόγο η δέσμη του laser μεταφέρεται και ευθυγραμμίζεται με τη βοήθεια και τη χρήση δύο κατόπτρων κατάλληλα τοποθετημένων στο οπτικό τραπέζι, όπου βρίσκεται τοποθετημένο το Nd:YAG LASER (**σχήμα 2.1**).

Στο δεύτερο οπτικό τραπέζι, πριν το σταθμό μικρομηχανικής, είναι τοποθετημένος κατά σειρά ένας εξασθεניתής (**attenuator**), ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω σε περιστροφική βάση, ένας αποκεντρωτικός UV φακός ($f = -150 \text{ mm}$) και ένας συγκεντρωτικός UV φακός ($f = -300 \text{ mm}$) σε απόσταση 150 mm μεταξύ τους. Το σύστημα αυτό των δύο φακών λειτουργεί σαν τηλεσκόπιο, μεγενθύνοντας τη διάμετρο της δέσμης του laser κατα δύο φορές. Μ' αυτό το τρόπο εξασφαλίζεται η σχετικά καλή ομοιομορφία του προφίλ της δέσμης του laser σε ένα εμβαδόν της τάξης των μm^2 , το οποίο είναι σχετικό με το άνοιγμα της μάσκας του σταθμού μικρομηχανικής. Το σχήμα και οι διαστάσεις της δέσμης του laser πάνω στο δοκίμιο μπορούν να ρυθμιστούν μέσω ενός μεταβλητού διαφράγματος σε διάφορα σχήματα, έτσι ώστε κάθε φορά να εκτίθεται συγκεκριμένο τμήμα του δοκιμίου, με σκοπό την ανάπτυξη μίας συγκεκριμένης δομής. Ανάμεσα στη μάσκα και το μικρομηχανικό σταθμό, τοποθετείται το οπτικό φράγμα περίθλασης (**phase mask**), το οποίο είναι κατασκευασμένο από υαλώδη ή τηγμένη πυριτία (fused silica) και περιοδικότητα 20 μm (**σχήμα 2.2**).



Σχήμα 2.1 Το Nd:YAG LASER και τα δύο κάτοπτρα που μεταφέρουν τη δέσμη του laser στο δεύτερο οπτικό τραπέζι



Σχήμα 2.2 Ο μικρομηχανικός σταθμός

Ο σταθμός μικρομηχανικής αποτελείται από μία κάθετη ράβδο στήριξης οπτικών και μικρομετρικών στηριγμάτων, δύο πλατφόρμες εφοδιασμένες με μοτέρ, τα οποία παρέχουν δυνατότητα κίνησης x-y, ελεγχόμενης με PC (ακρίβεια κίνησης 1 μm) και μία βάση στήριξης των δοκιμίων. Η εστίαση της δέσμης του laser πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός **15X (OFR, N.A. = 0.35)** αντικειμενικού φακού (**objective lens**). Το σύστημα αντικειμενικού φακού – προσοφθάλμιου φακού ($f = 100 \text{ mm}$) και κάμερας (UNIBRAIN) δίνει τη δυνατότητα της άμεσης παρακολούθησης (on – line) της πειραματικής διαδικασίας (**σχήμα 2.2**).

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος μικρομηχανικός σταθμός – LASER βασίζεται στην ικανότητα του συστήματος να εστιάζει τη δέσμη του laser σε μικρές περιοχές πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το μέγεθος της περιοχής εστίασης, η μικρότερη δυνατή απόσταση διαχωρισμού δύο σημείων (λόγω φαινομένων περίθλασης), το βάθος πεδίου, και η σχετική ένταση της δέσμης είναι παράμετροι, οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στη περίπτωση στη περίπτωση χρήσης διατάξεων μικροσκοπίας για διάφορες εφαρμογές και κατεργασίες με LASER. Η θεωρητική μικρότερη δυνατή απόσταση διάκρισης δύο σημείων δίνεται από το κριτήριο Rayleigh [48]:

$$d = \frac{0.61 \cdot \lambda}{N.A.}$$

όπου d η απόσταση των διακριθέντων σημείων, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και $N.A.$ το αριθμητικό άνοιγμα του φακού (του αντικειμενικού φακού – objective lens). Για να έχουμε σε γκαουσιανή κατανομή δέσμης το ελάχιστο μέγεθος εστίασης, το οποίο παρατηρείται, δίνεται από τη σχέση (σχήμα 2.4) [48]:

$$2 \cdot W_0 = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot N.A.}$$

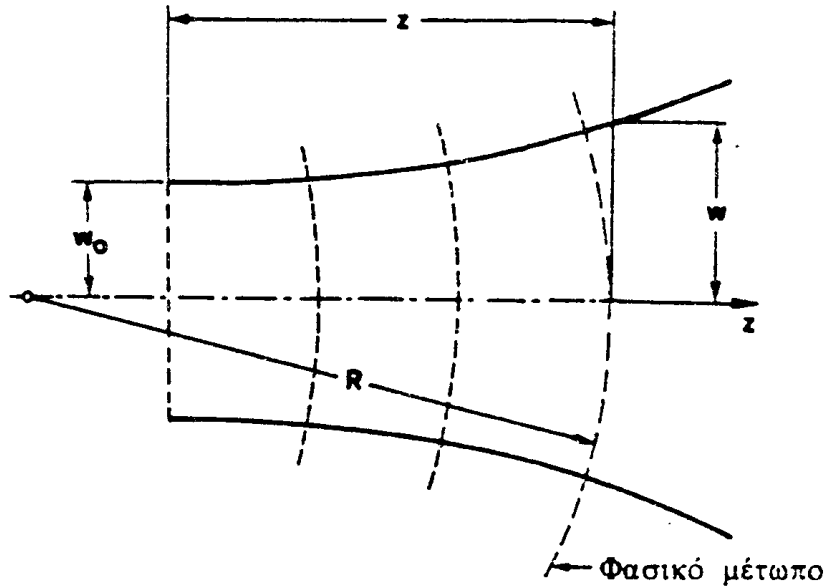
Παρατηρώντας το παραπάνω τύπο, διαπιστώνουμε ότι ένας τρόπος για να αυξήσουμε τη διακριτική ικανότητα του συστήματος είναι να μειώσουμε το μήκος κύματος ή να αυξήσουμε το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού. Γενικά, η περιγραφή της διάδοσης μίας Gaussian δέσμης γίνεται με τις εξής εκφράσεις [48]:

$$W^2 = W_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2} \right)^2 \right]$$

$$R = z \left[1 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

όπου το W_0 είναι το μέγεθος του spot της μέσης της δέσμης και η z συντεταγμένη μετρείται κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης με την αρχή της στη μέση. Συγκεκριμένα, η πρώτη

έκφραση έχει σχέση με το μέγεθος του spot της δέσμης W και η δεύτερη με την ακτίνα καμπυλότητας R της ισοφασικής επιφάνειας (σχήμα 2.3).

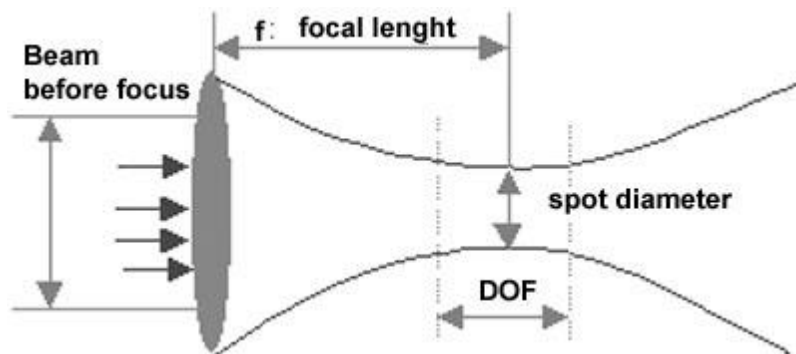


Σχήμα 2.3 Διάδοση μιας Gaussian δέσμης [48]

Επίσης, το βάθος πεδίου (**depth of focus**) δίνεται από τη παρακάτω εξίσωση (σχήμα 2.4):

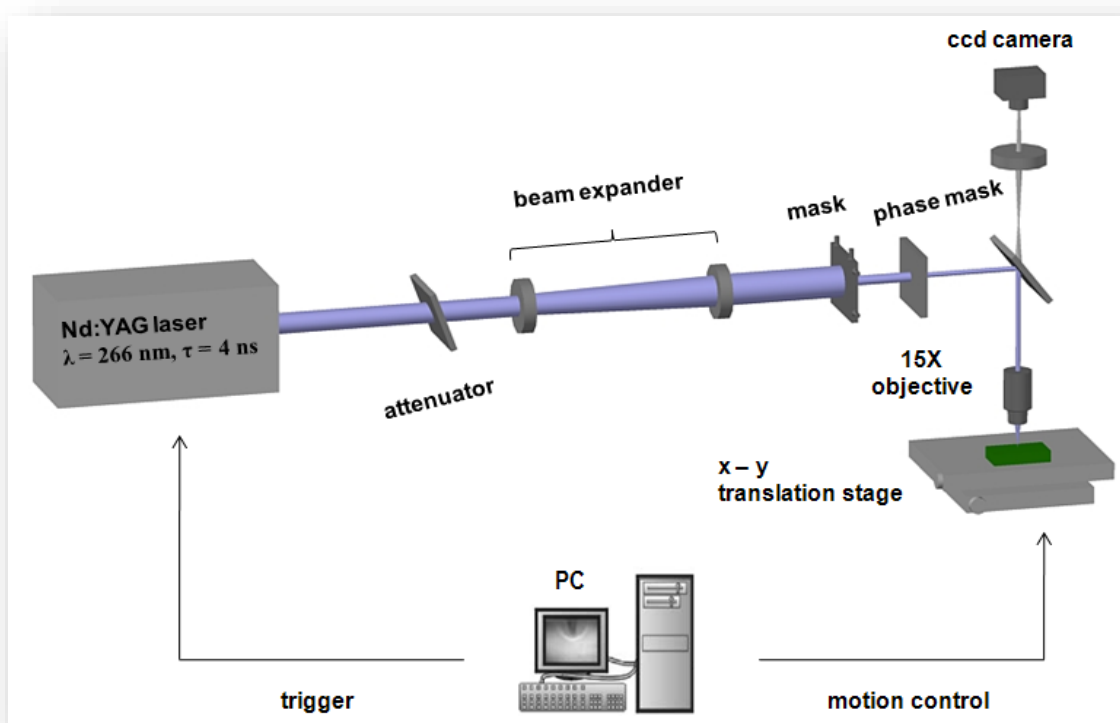
$$DOF = 2 \pi (w_0)^2 / \lambda$$

Ο αντικειμενικός φακός, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα λιθογραφίας είχε αριθμητικό άνοιγμα $N.A. = 0.35$. Μ' αυτό το τρόπο, το θεωρητικά ελάχιστο μέγεθος spot που μπορεί να επιτευχθεί στο σύστημα είναι 484 nm.



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση των μεγεθών w_0 και DOF

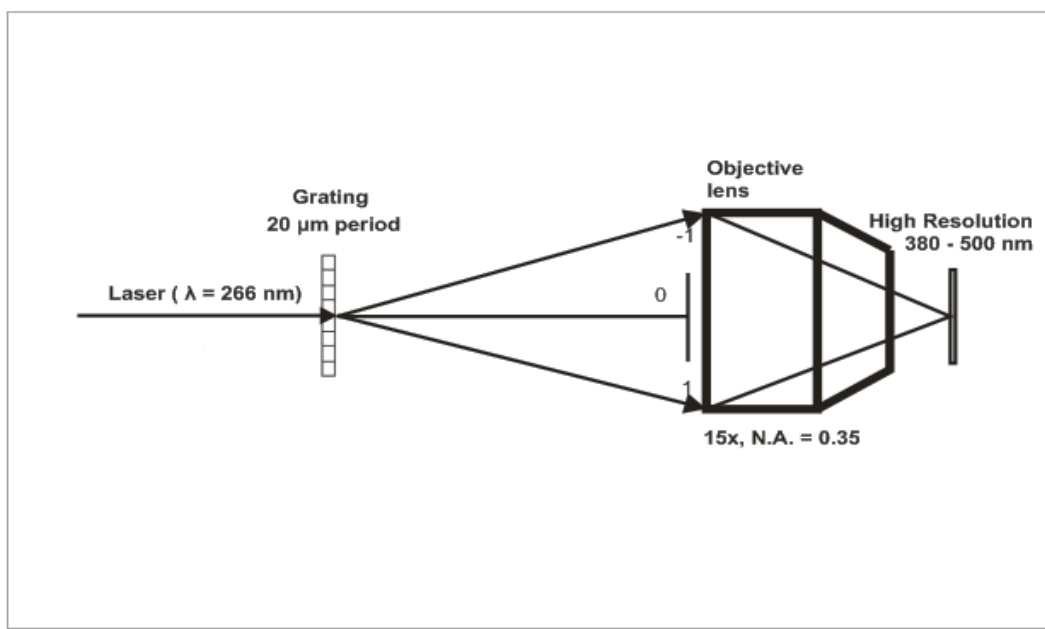
Η δέσμη του LASER οδηγείται πάνω στο δοκίμιο υποστρώματος πυριτίου με επικάλυψη στρώματος ρητίνης και το ακτινοβολεί με διάφορες τιμές ενέργειας με σκοπό να ενεργοποιηθεί η φωτοευαίσθητη πολυμερή ρητίνη. Στη συνέχεια, η επανάληψη της διαδικασίας έκθεσης της ρητίνης σε διαφορετικές θέσεις στόχου – δοκιμίου, πραγματοποιείται με έλεγχο μέσω του υπολογιστή του οδηγού των βηματικών κινητήρων και η διαδικασία ανάπτυξης (development) μέσω χημικής διεργασίας της ρητίνης, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροσυστοιχιών δομών. Οι μικροσυστοιχίες των δομών που δημιουργούμε έχουν μία σταθερή απόσταση μεταξύ τους κατα την οριζόντια και τη κάθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματική διάταξης με την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα λιθογραφίας

Στο **σχήμα 2.5** απεικονίζεται σχηματικά η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα λιθογραφίας. Η δέσμη του laser περνάει πρώτα από ένα σύστημα ελεγχόμενης εξασθένησης (**attenuator**), μετά από ένα σύστημα φακών, το οποίο διπλασιάζει τη διάμετρο της και καταλήγει να περνάει από τη μάσκα. Το σχήμα της μάσκας περνάει μέσα από το οπτικό φράγμα περίθλασης (grating – phase mask), πραγματοποιείται η περίθλαση της δέσμης και στη συνέχεια συμβάλουμε, μέσω του αντικειμενικού φακού 15X, τις δύο από τις τρεις τάξεις

περίθλασης (\pm **first orders beam**) και εμφανίζεται το σχήμα της μάσκας μαζί με το σχήμα του φράγματος περίθλασης. Η απόσταση ανάμεσα στη phase mask και τον αντικειμενικό φακό παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια όλης της σειράς των πειραμάτων και είναι ίση με **19.1 cm**.



Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της phase mask και του αντικειμενικού φακού

Στο **σχήμα 2.6**, απεικονίζεται η διαδικασία λειτουργίας του φράγματος περίθλασης, ο διαχωρισμός της δέσμης του laser στις τρεις τάξεις περίθλασης και το μπλοκάρισμα και η συμβολή που γίνεται για την έκθεση των υποστρωμάτων πυριτίου, τα οποία είναι στηριγμένα πάνω σε μία βάση με τη χρήση ρητίνης. Τέλος, έχουμε την απεικόνιση του αντικειμενικού φακού, μαζί με τα χαρακτηριστικά του μεγέθι και το ρόλο του στη συμβολή των δύο τάξεων περίθλασης πάνω στην επιφάνεια της φωτοευαίσθητης πολυμερούς ρητίνης. Το theoretical resolution, το οποίο αναφέρεται στο σχήμα, δίνεται από το τύπο [2]:

$$\text{Resolution} = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{N.A.}}$$

όπου λ το μήκος κύματος της δέσμης του laser και N.A. το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού (**objective lens**).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΘΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ Si

Η διαδικασίες διαμόρφωσης και έκθεσης των δοκιμίων είναι τα δύο βασικά στάδια όλης της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας την οπτική πειραματική διάταξη, την οποία περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο (**κεφάλαιο 2**). Η διαδικασία της διαμόρφωσης των δοκιμίων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα λιθογραφίας, αρχικά έγινε στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος» και ύστερα στα εργαστήρια LASER του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. Η διαδικασία έκθεσης των δοκιμίων, και εν συνεχεία εμφάνισης των δομών στην επιφάνειά τους, πραγματοποιήθηκε επίσης στα εργαστήρια LASER του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π (ως προς την έκθεσή τους) και στο καθαρό χώρο (**clean room**), ο οποίος βρίσκεται επίσης στο παραπάνω Τομέα. Μία γενική αναφορά σχετικά με τις συνθήκες του καθαρού χώρου γίνεται παρακάτω στο κεφάλαιο αυτό.

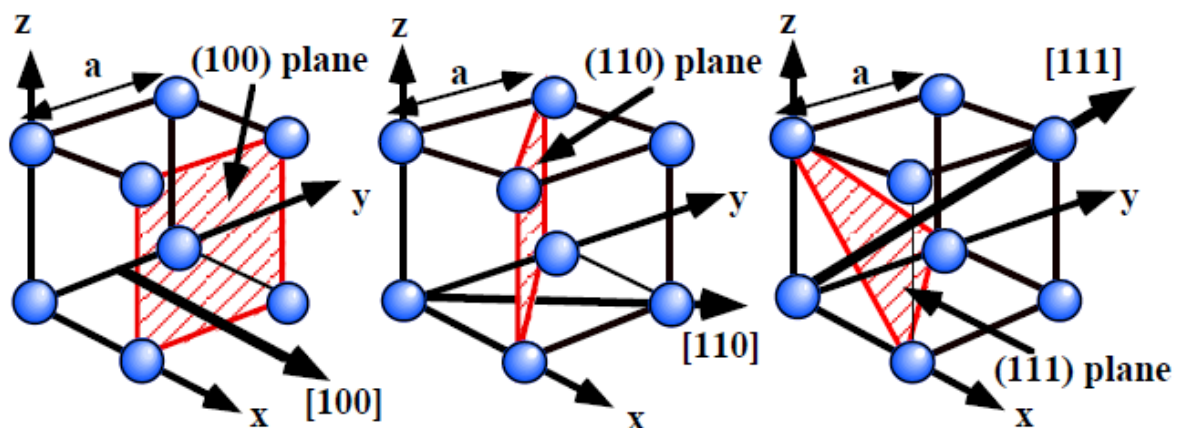
Ο καθορισμός των συγκεκριμένων συνθηκών πρέπει να είναι ακριβής και λεπτομερής. Αυτό γίνεται λόγω της μείζονος σημασίας τους για τη διεξαγωγή του πειράματος και των επιθημητών αποτελεσμάτων, τα οποία θέλουμε να πετύχουμε ή να προσεγγίσουμε, όσο το δυνατόν περισσότερο. Οι συνθήκες διαμόρφωσης επικεντρώνονται κυρίως στη διαδικασία **εναπόθεσης (επικάλυψης)** της φωτοευαίσθητης πολυμερούς ρητίνης (**photoresist**) στην επιφάνεια υποστρώματος πυριτίου. Οι συνθήκες έκθεσης των δοκιμίων και εμφάνισης των δομών ομαδοποιούνται και αποτελούν μαζί μία κατηγορία. Και σ' αυτή τη περίπτωση, οι πειραματικές συνθήκες που περιγράφουν τις δύο διαδικασίες, έχουν σχέση με το υλικό επικάλυψης των δισκιδίων πυριτίου (**silicon wafers**). Δηλαδή, αυτό που παίζει μεγάλο ρόλο εδώ είναι οι ιδιότητες, τις οποίες παρουσιάζει η πολυμερής ρητίνη σε σχέση με τις συνθήκες αυτές. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη σημασία για την εμφάνιση των δομών (εαν θα πετύχει ή όχι), τη μορφή τους και τη παρατήρησή τους (απεικόνιση και χαρακτηρισμός δομών). Γι' αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ρητινών, ώστε να υπάρξει δυνατότητα επιλογής για καλύτερα αποτελέσματα και μεγαλύτερη πειραματική αξιοπιστία.

3.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ

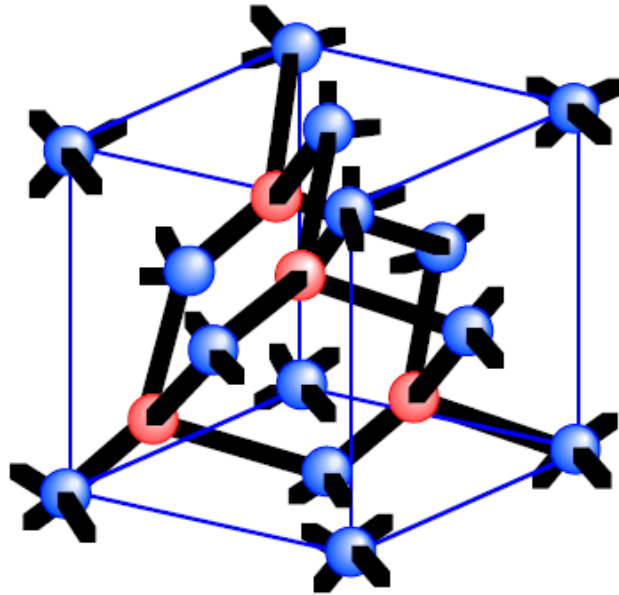
Για τη διαμόρφωση των τελικών δοκιμίων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα λιθογραφίας, ακολουθήσαμε τα εξής στάδια [49]:

- Επιλογή δισκιδίων πυριτίου
- Καθαρισμός δισκιδίων πυριτίου
- Επιλογή τύπων φωτοευαίσθητων πολυμερών ρητινών (photoresist)
- Επικάλυψη επιφάνειας δισκιδίων πυριτίου με έναν συγκεκριμένο τύπο ρητίνης
- Κοπή και διαχωρισμός του δισκιδίου πυριτίου σε μικρότερα δοκίμια για τη διεξαγωγή των πειραμάτων λιθογραφίας

Το πυρίτιο είναι το κυρίαρχο υλικό σε χρήση για εφαρμογές, οι οποίες έχουν σχέση με τη τεχνολογία μικροσυστημάτων, μικροηλεκτρονικής (MEMS – μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα, ολοκληρωμένα κυκλώματα) και νανοτεχνολογία. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του επιτρέπουν αυτό το μεγάλο εύρος εφαρμογών. Τα δισκίδια πυριτίου, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, είχαν κρυσταλλογραφική διεύθυνση $\langle 100 \rangle$ (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Οι τρεις κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις του πυριτίου [34]



Σχήμα 3.2 Η βασική δομή του πυριτίου [34]

Τα δισκίδια πυριτίου, αφού επιλεγτούν, καθαρίζονται για τη καλύτερη δυνατή εφαρμογή τους στις παραπάνω τεχνολογίες που αναφέρθηκαν. Η διαδικασία καθαρισμού των δισκιδίων πυριτίου μας βοηθάει να έχουμε μία επιφάνεια χωρίς ρύπους, οι οποίοι είναι τα σωματίδια, τα μέταλλα και οι οργανικές ουσίες. Όσο μικραίνουν οι διαστάσεις στη μικρο- και νανοτεχνολογία, οι απαιτήσεις «καθαριότητας» αυξάνονται και εξελίσσονται. Εκτός από τους ρύπους, ο καθαρισμός των δισκιδίων πυριτίου έχει ως στόχο τη μείωση ή την απομάκρυνση της μικροτραχύτητας της επιφάνειάς τους (**microroughness**) και του αυτογενούς οξειδίου του πυριτίου στην επιφάνεια του (**native oxide**). Τέλος, υπάρχουν δύο τεχνολογίες καθαρισμού [49]:

- Τεχνολογία υγρού καθαρισμού
- Τεχνολογία ξηρού καθαρισμού

Ο υγρός καθαρισμός είναι η βασικότερη τεχνολογία που εφαρμόζεται, άλλα εξ' αιτίας κάποιων προβλημάτων που εμφανίστηκαν κατά τη χρήση του, αναπτύχθηκε και η τεχνολογία του ξηρού καθαρισμού [49].

Τα σημαντικότερα βήματα είναι η επιλογή των photoresists, τα οποία θα εναποτεθούν στην επιφάνεια των δισκιδίων πυριτίου και η διαδικασία επικάλυψης των δισκιδίων από τις ρητίνες.

Κατά την επιλογή των φωτοευαίσθητων πολυμερών ρητινών, λήφθηκαν υποψιν δύο βασικά κριτήρια, τα οποία έχουν άμεση σχέση με το αποτέλεσμα και τη χρονική διάρκεια που χρειάζεται η τεχνολογία της λιθογραφίας για να το δώσει. Αυτά είναι τα εξής:

- Η υψηλή ανάλυση στις δομές, οι οποίες θα αναπτυχθούν (**high resolution**)
- Γρήγορη, υψηλής ταχύτητας μέθοδος λιθογραφίας (**high-speed, fast lithography**)

Γι' αυτούς του δύο βασικούς λόγους, επιλέχθηκαν οι εξής ρητίνες [26, 27, 28, 31]:

- **EPR (Epoxy Resist)**
- **ADEPR (Aqueous base Development Epoxy Resist)**

Και οι δύο αυτές ρητίνες ανήκουν στη κατηγορία των χημικά ενισχυμένων ρητινών (**chemical amplified resists**), οι οποίες αναπτύχθηκαν λόγω των απαιτήσεων των πηγών φωτός, οι οποίες άρχισαν να χρησιμοποιούνται στη λιθογραφία τη τελευταία δεκαετία (**deep ultraviolet (UV) sources**) και οι οποίες έχουν τη δυνατότητα της γρήγορης και υψηλής ανάλυσης λιθογραφία. Και τα δύο αυτά είδη photoresist είναι τύπου novolac (νεολάκκα) (**σχήμα 3.6**), εποξικά (**epoxy**) (**σχήμα 3.7**) και είναι αρνητικού τόνου (**negative resist**).

Η διαφορά τους βρίσκεται στη χημική σύστασή τους, η οποία καθορίζει και κάποιες μικρές διαφορές τους στις βασικές ιδιότητες τους ως photoresist, οι οποίες είναι οι εξής:

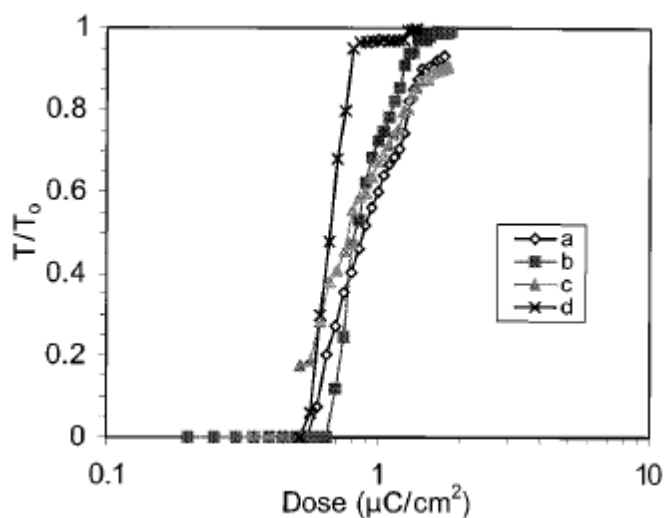
- **Ευαισθησία (sensitivity)**
- **Contrast**
- **Διακριτική Ικανότητα (resolution)**

Εμφανίζοντας διαφορά σ' αυτές τις ιδιότητες, σημαίνει ότι υπάρχει και διαφορά και στις συνθήκες διαδικασίας επικάλυψης των δισκιδίων πυριτίου, έκθεσης των δοκιμίων και εμφάνισης των δομών.

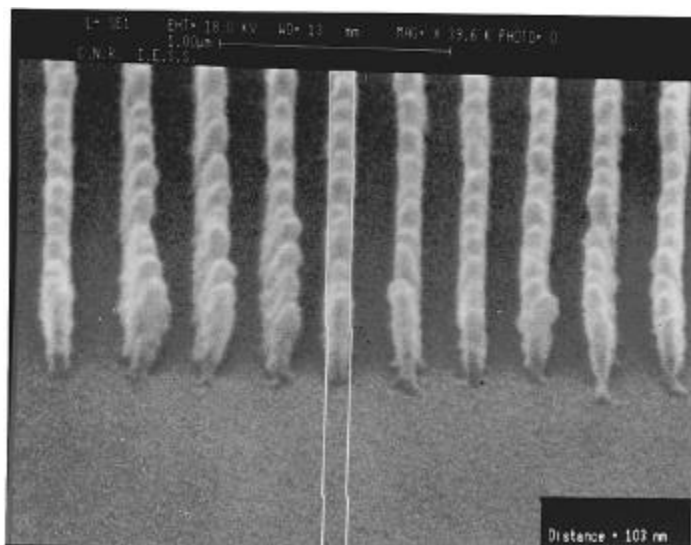
Το φωτοπολυμερές EPR έχει ως βασικό πολυμερές υλικό το **Epikote 164**, μία εποξική κρεσόλη/νεολάκκα (**cresol novolac**) **glycidyl ether**, ενώ ο φωτοπαραγωγός οξέος (δηλαδή ο φωτοευαισθητοποιητής – PAG (Photoacid generator)) είναι το άλας τριφαινυλοσουλφόνιο (**triphenyl-sulphonium salt**). Για την παρασκευή της EPR γίνεται διάλυση της εποξικής νεολάκκας σε **PGMEA (propylene glycol methyl ether acetate)** [26].

Η ευαισθησία της ρητίνης είναι πολύ μεγάλη ($0.9 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ στα 40 keV) (**σχήμα 3.3**) και μπορεί να δώσει δομές στη περιοχή των 100 nm. Έχει οργανικό εμφανιστή (PGMEA) και οι δομές (**σχήμα 3.4**), τις οποίες δίνει χαρακτηρίζονται από διόγκωση (**swelling**) και τραχύτητα

(roughness), ενώ παράλληλα είναι δύσκολη η αφαίρεση του (stripping), η οποία γίνεται με πλάσμα οξυγόνου [31].



Σχήμα 3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες ευαισθησίας της EPR (έκθεση με ενέργεια 40 keV) για διαφορετικές πειραματικές συνθήκες [26]



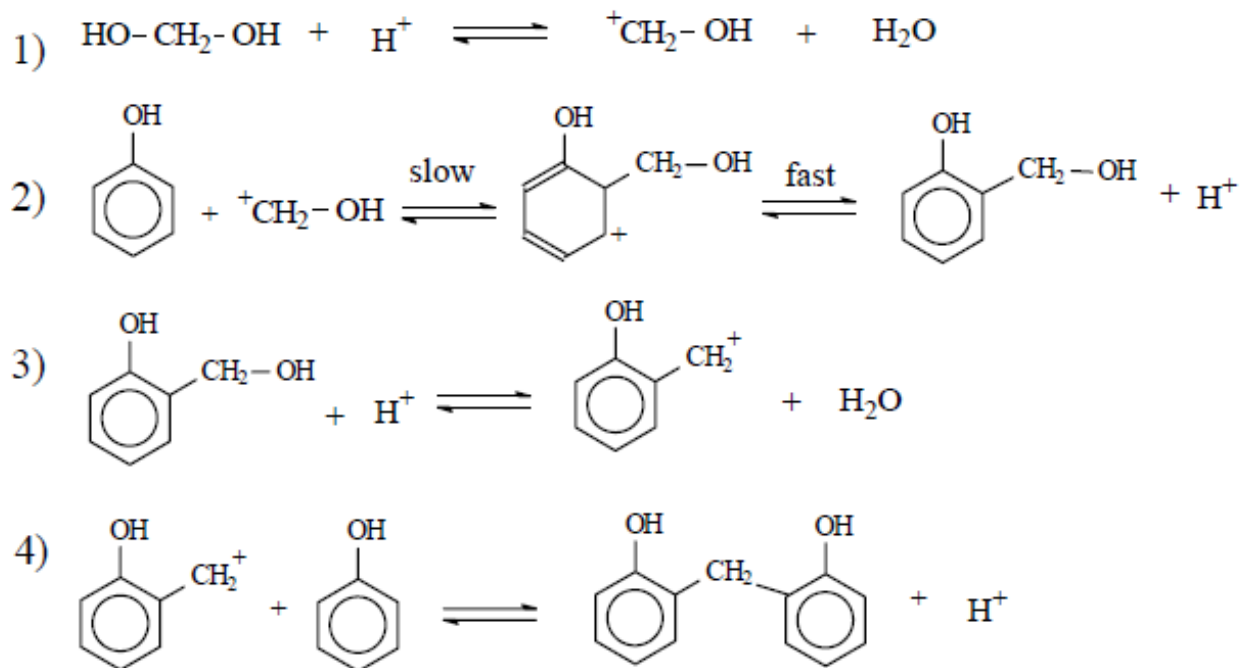
Σχήμα 3.4 Φωτογραφία SEM δομών με τη χρήση της EPR με αναλογία διαστάσεων 100 nm [26]

Το φωτοπολυμερές ADEPR είναι μεταγενέστερο του EPR, είναι και αυτό αρνητικού τόνου, αποτελείται από δύο πολυμερή και τον φωτοπαραγωγό οξέως. Το ένα πολυμερές είναι η εποξική νεολάκκα **Polyhydroxy sterene (PHS)**, η οποία μπορεί να είναι μερικώς υδρογονωμένη (**Partially Hydrogenated Polyhydroxy Sterene – PHPS**). Το δεύτερο πολυμερές είναι όμοιο με αυτό της EPR, είναι δηλαδή πάλι μία εποξική νεολάκκα (σχήμα 3.5 – 3.6) [27, 28].

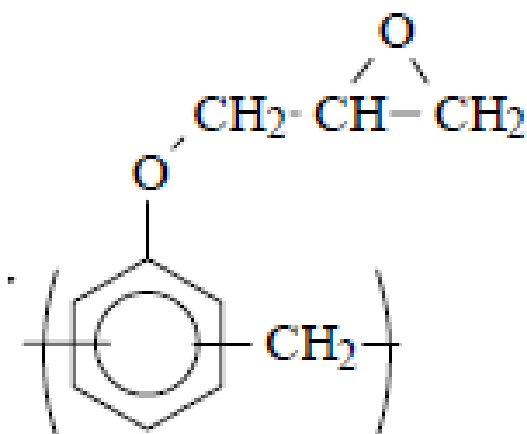
Η ρητίνη αυτή υλοποιήθηκε με στόχο τις δομές υψηλής διακριτικής ικανότητας (**high resolution**), όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, έχει την ιδιότητα να εμφανίζεται από υδατικούς εμφανιστές, κάτι το οποίο προτιμά η βιομηχανία έναντι οργανικών εμφανιστών, και να αφαιρείται σχετικά εύκολα με ακετόνη (**acetone**) σε λουτρό υπερήχων. Μπορεί να βρει εφαρμογές στη λιθογραφία ακτίνων X (X-ray lithography) και στη λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης (e-beam lithography), όπως επίσης και στη DUV λιθογραφία, στην οποία ανήκει και τα πειράματα που διεξήχθησαν. Βέβαια, εκεί που είναι ιδιαίτερα σημαντική είναι στη λιθογραφία ηλεκτρονική δέσμης, όπου η μικρή ευαισθησία μειώνει κατα πολύ το χρόνο των εκθέσεων με άμεσο θετικό αντίκτυπο στο κόστος, το οποίο ελαττώνεται σημαντικά. Η ADEPR αναπτύχθηκε με σκοπό να αντιμετωπίσει τη διόγκωση και την τραχύτητα, παράγοντες περιοριστικούς στις δομές υψηλής διακριτικής ικανότητας, τα οποία εμφανίζονται με τη χρήση των προγενέστερων εποξικών συστημάτων, όπως η EPR [26, 27, 28, 31].

Μπορεί αποδεδειγμένα να δώσει δομές < **70 nm**, έχει ευαισθησία 4 – 8 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ στα 50 keV και γενικά παράγει αποτελέσματα με μειωμένη τραχύτητα, χωρίς διόγκωση (**σχήμα 3.8**) [28].

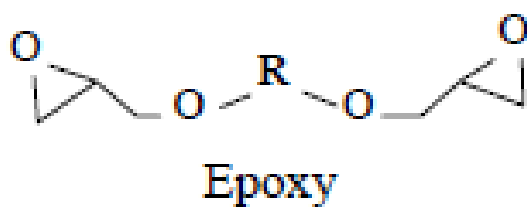
Ως χημικά ενισχυμένο φωτοπολυμερές, απαιτούνται οι διαδικασίες των PAB (**postapply bake**) και PEB (**postexposure bake**), με βέλτιστες παρατηρούμενες συνθήκες $T_{\text{PAB}} = T_{\text{PEB}} = 120\text{ }^\circ\text{C}$ για χρόνο $t_{\text{PEB}} = t_{\text{PAB}} = 2\text{ min}$. Ο εμφανιστής (**developer**) της ADEPR μπορεί να είναι κάποιος από τους TMAH 0.26, AZ326MIF ή AZ327MIF, με χρόνο εμφάνισης περίπου 90 sec [27, 28].



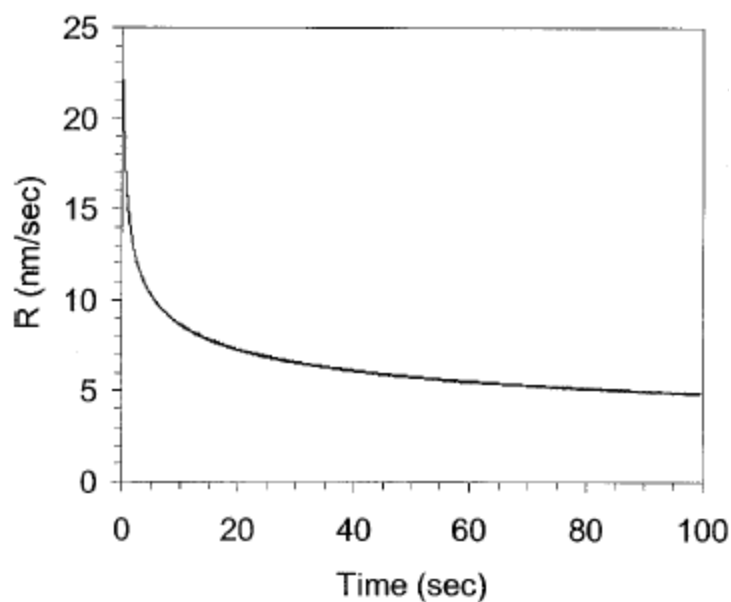
Σχήμα 3.5 Μηχανισμός σύνθεσης νεόλακκας [32]



Σχήμα 3.6 Χημικός τύπος εποξικής νεόλακκας [32]



Σχήμα 3.7 Χημικός τύπος του epoxy [32]



Σχήμα 3.8 Γραφική παράσταση του ρυθμού αποσύνθεσης της ADEPR συναρτήσει του χρόνου ανάπτυξης των δομών (time development) [28]

Τα φωτοπολυμερή, τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία δωματίου και εφαρμόζονται στην επιφάνεια των δισκιδίων πυριτίου τοποθετώντας τη ρητίνη σε υγρή μορφή πάνω στην επιφάνειά τους και περιστρέφοντάς τα με ταχύτητα μερικά χιλιάδες RPM (Revolutions Per Minutes), η οποία είναι μονάδα συχνότητας και εκφράζει τον αριθμό των πλήρως συμπληρωμένων περιστροφών σε ένα λεπτό γύρω από ένα καθορισμένο άξονα (σχήμα 3.10). Η περιστροφή των δισκιδίων πυριτίου για την ομοιόμορφη και σωστή επικάλυψή τους από το υγρό φωτοπολυμερές γίνεται σε ειδικές διατάξεις, οι οποίες ονομάζονται σπίνορες (spinners ή spin coaters) (σχήμα 3.9).

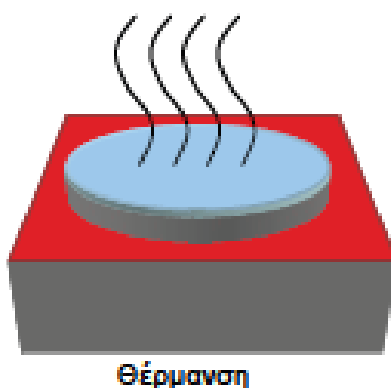


Σχήμα 3.9 Φωτογραφία ενός spin coater



Σχήμα 3.10 Διαδικασία εφαρμογής και επίστρωσης του φωτοπολυμερούς

Η ταχύτητα περιστροφής (spin speed) και το ιξώδες (viscosity) της ρητίνης καθορίζουν το τελικό πάχος της ρητίνης πάνω στην επιφάνεια του δισκιδίου (resist thickness), το οποίο είναι συνήθως από 0.6 μm έως 1 μm . Το ιξώδες της ρητίνης ελέγχεται από έναν διαλύτη, ο οποίος είναι σχετικός χημικά με τη ρητίνη. Όταν πλέον η ρητίνη έχει περιστραφεί πάνω στο δισκίδιο, ακολουθεί ένα στάδιο ψησίματος/θέρμανσης (**prebake** ή **postapply bake (PAB)**) (σχήμα 3.11), το οποίο χρησιμοποιείται για να εξαφανιστεί ο διαλύτης που είχε μείνει από τη προηγούμενη διαδικασία.



Σχήμα 3.11 Διαδικασία θέρμανσης του δισκιδίου με την επικάλυψη ρητίνης

Κατα τη διαδικασία των πειραμάτων που διεξήχθησαν, τα δισκίδια πυριτίου επικαλύφθηκαν με τους δύο τύπους ρητίνης που αναφέρθηκαν πιο πάνω, οι οποίες ήταν σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία δωματίου. Τα δισκίδια τοποθετήθηκαν σε σπινόρες (spinners, spin coaters) και με περιστροφική ταχύτητα **4000 rpm** έγινε η επικάλυψή τους. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος». Παρασκευάστηκαν τρεις ομάδες δισκιδίων, και στη συνέχεια δοκίμια, τα οποία είχαν διαφορετικό πάχος ρητίνης στην επιφάνεια των δισκιδίων, καθώς και φωτοπολυμερή με διαφορετική συγκέντρωση, ποσοστό επι της εκατό κατά βάρος (**concentration % per weight**) του φωτοπαραγωγού οξέως ή φωτοευαισθητοποιητή (**PAG**). Τα δοκίμια (**samples**) δημιουργήθηκαν με κοπή των δισκιδίων πυριτίου στο καθαρό χώρο (clean room) (σχήμα 3.12) του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. Η κοπή των δισκιδίων έγινε με τη χρήση λαβίδας και ειδικού κόπτη με μύτη από γραφίτη κατά μήκος της κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης του πυριτίου, ώστε να γίνει εύκολα η κοπή. Μ' αυτό το τρόπο, δημιουργήθηκε ένας μεγάλος αριθμός δοκιμίων σε κάθε ομάδα, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μεγάλου αριθμού πειραμάτων λιθογραφίες σε διαφορετικές συνθήκες

και για λόγους επαναληψιμότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων, η οποία είναι σημαντικός παράγοντας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αυτών.



Σχήμα 3.12 Καθαρός χώρος του Τομέα Φυσικής της Σχολής Ε.Μ.Φ.Ε. του Ε.Μ.Π.

Η πρώτη ομάδα δοκιμίων είχε επικάλυψη και απο τις δύο ρητίνες, δηλαδή και από την EPR και την ADEPR, με συγκέντρωση 8 % p.w. και 16 % p.w. του φωτοπαραγωγού οξέως (PAG) αντίστοιχα. Το πάχος της ρητίνης στην επιφάνεια πυριτίου σ' αυτά τα δοκίμια μετρήθηκε περίπου **500 nm**. Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων είχε και αυτή επικάλυψη από τις δύο ρητίνες, με συγκέντρωση 5 % p.w. και 5 % p.w. του φωτοευαισθητοποιητή τους. Το πάχος της ρητίνης στην επιφάνεια αυτών των δοκιμίων μετρήθηκε περίπου **250 nm**. Τέλος, η τρίτη ομάδα δοκιμίων είχε επικάλυψη μόνο από το ένα φωτοπολυμερές και συγκεκριμένα απο την ADEPR, εξ' αιτίας των μέχρι τότε πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία υπαγόρευαν ως καταλληλότερη επιλογή τη συγκεκριμένη ρητίνη. Η συγκέντρωση του φωτοπαραγωγού οξέως ήταν και πάλι 16 % p.w. Το πάχος της ρητίνης μετρήθηκε περίπου **80 – 100 nm**.

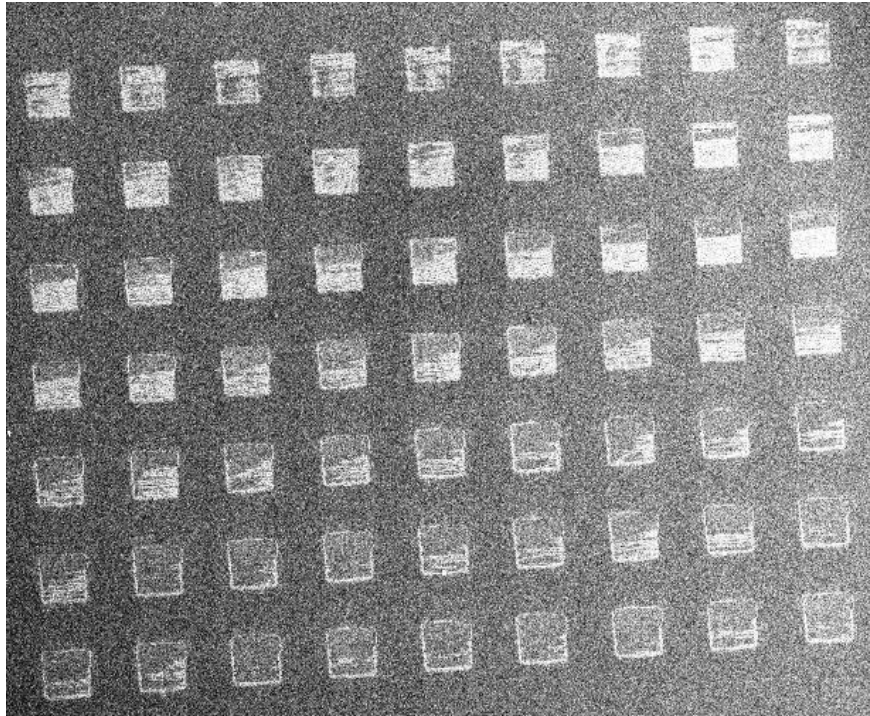
Μετά τη διαδικασία της επικάλυψης των δισκιδίων πυριτίου, ακολουθεί διαδικασία θέρμανσης (ψησίματος) πάνω σε μεταλλικές πλάκες θέρμανσης (**hot plates**) με σταθερή θερμοκρασία (**σχήμα 3.11**). Η διαδικασία PAB είναι σημαντική για τις ιδιότητες των ρητινών για τη μετέπειτα έκθεσή τους στα πειράματα λιθογραφίας. Οι θερμοκρασίες που συνήθως

εφαρμόζονται είναι σε ένα εύρος **90 – 130 °C** και για τους δύο τύπους ρητίνης. Στα συγκεκριμένα πειράματα, το PAB έγινε και στις τρεις ομάδες δοκιμίων σε θερμοκρασία **110 °C** για χρονική διάρκεια **5 min**. Ο κύριος στόχος είναι η απομάκρυνση του διαλύτη, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, και η επίτευξη ομοιόμορφου υμενίου (**film**). Γι' αυτό η θερμοκρασία που επιλέχθηκε είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υμενίου.

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Si ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΔΟΜΩΝ

Η διαδικασία έκθεσης των δοκιμίων υποστρώματος πυριτίου ξεκινάει με την τοποθέτηση ενός δοκιμίου στην ειδική βάση του μικρομηχανικού σταθμού, όπου έχει στερεωθεί σωστά με τη χρήση ρητίνης στη βάση του υποστρώματος. Ύστερα από συγκεκριμένη προετοιμασία της διάταξης LASER (ενεργοποίηση laser, ρύθμιση ενέργειας, ενεργοποίηση ζεύξης H/Y με το laser, παλμική συχνότητα), των οπτικών στοιχείων (τοποθέτηση phase mask, ρύθμιση φακών, αντικειμενικού φακού για τη σωστή συμβολή των κροσσών περίθλασης της phase mask), της μάσκας (ρύθμιση του spot size) και της ccd κάμερας (για να έχουμε on – line εικόνα της ρύθμισης της συμβολής στην επίστρωση της ρητίνης άλλα και της όλης πειραματικής διαδικασίας), αρχίζει η διαδικασία έκθεσης των δοκιμίων Si. Ο αρχικός στόχος είναι να δημιουργηθούν μικροσυστοιχίες (**microarrays**) δομών, στις οποίες έχουμε οριζόντιες και κάθετες γραμμές από spots συγκεκριμένων διαστάσεων, οι οποίες ρυθμίζονται από το τη μάσκα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το σχήμα και η διαστάσεις του spot ρυθμίζονται από τα χειροκίνητα διαφράγματα της μάσκας, οπότε χρειάζεται ένα προπαρασκευαστικό στάδιο πριν την έναρξη του πειράματος λιθογραφίας, όπου χρησιμοποιείται ένα δοκιμαστικό δοκίμιο υποστρώματος πυριτίου με επικάλυψη ρητίνης, ώστε να επιτευχθεί η σωστή συμβολή των κροσσών περίθλασης του οπτικού φράγματος (grating, phase mask), το σωστό σχήμα, το οποίο μπορεί να είναι τετράγωνο ή ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και οι διαστάσεις που επιθυμούνται. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων λιθογραφίας, όπου στη πρώτη σειρά το spot size δεν παραμένει το ίδιο για όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν. Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, το spot size παρέμεινε σταθερό (**100 x 100 μm**), ώστε ο υπολογισμός της ενεργειακής πυκνότητας (**energy density ή fluence**) να είναι αξιόπιστος και σωστός και να εξασφαλιστεί η πειραματική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μέσω της επαναληψιμότητάς τους. Οι μικροσυστοιχίες έχουν διάσταση **1 x 10 (μία οριζόντια σειρά – 10 spot)** και η απόσταση των

μικροσυστοιχιών μεταξύ τους (κάθεται και οριζόντια) είναι **200 μm** (σχήμα 3.13). Κάθε spot αντιστοιχεί σ' ένα παλμό του laser.

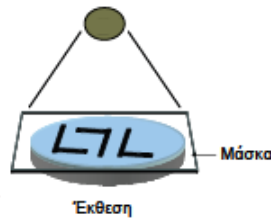


Σχήμα 3.13 Φωτογραφία SEM μικροσυστοιχίας δομών σε δοκίμιο ADEPR 16% / Si

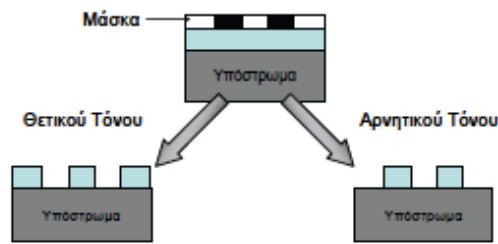
Η ενέργεια λειτουργίας του laser σε όλα τα πειράματα λιθογραφίας παρέμενε σταθερή στα 830 Volts. Μετά απ' όλη αυτή τη προετοιμασία, ξεκινάει η διαδικασία της έκθεσης των δοκιμίων φωτοπολυμερούς / πυριτίου. Κατα τη διαδικασία της έκθεσης, στις εκτεθειμένες περιοχές παράγεται οξύ (στις περιοχές που συμβάλουν σωστά οι ± 1 τάξεις περίθλασης του φωτεινού παλμού). Αφού ολοκληρωθεί η έκθεση, ακολουθεί το στάδιο της διαδικασίας θέρμανσης PEB (postexposure bake) μεταφέροντας τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στο καθαρό χώρο (clean room), ώστε να γίνει αμέσως μετά η διαδικασία της εμφάνισης. Η θέρμανση PEB έγινε σε ειδικό φούρνο ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας, ο οποίος βρίσκεται στο καθαρό χώρο του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π.

Κατα τη διαδικασία θέρμανσης PEB, το οξύ διαχέεται στο υμένιο του φωτοπολυμερούς στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου και καταλύει αντιδράσεις διάσπασης σταυροδεσμών (αρνητικού τόνου λιθογραφία) (σχήμα 3.16). Η αρχική θερμοκρασία της PEB ήταν **110 °C** για χρονικό διάστημα **5 min**. Για τη ρητίνη EPR είναι οι ιδανικές συνθήκες θέρμανσης PEB.

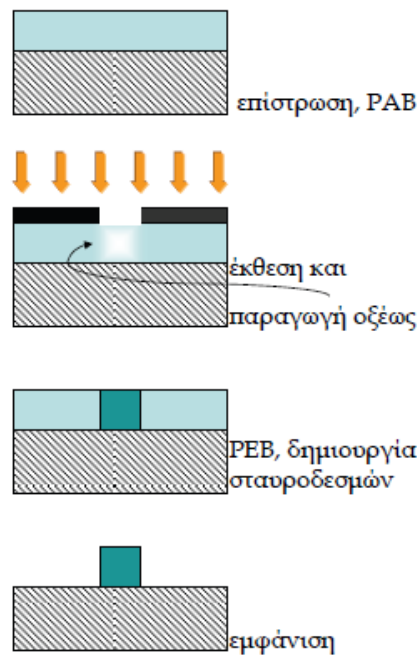
Αντίθετα, η ρητίνη ADEPR παρουσιάζει πρόβλημα αντοχής για συγκεκριμένους χρόνους ανάπτυξης (time development). Έτσι, η θέρμανση PEB πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία **110 °C** για χρονικό διάστημα **10 min** και σε θερμοκρασία **120 °C** για χρονικό διάστημα **5 min**. Για τη ρητίνη EPR εφαρμόστηκε θέρμανση PEB σε θερμοκρασία **90 °C** για χρονικό διάστημα **5 min** χωρίς επιθυμητό αποτέλεσμα στη διαδικασία εμφάνισης των δομών.



Σχήμα 3.14 Έκθεση φωτοπολυμερούς μέσω μάσκας



Σχήμα 3.15 Διαχωρισμός λιθογραφίας θετικού και αρνητικού τόνου [31]



Σχήμα 3.16 Βήματα λιθογραφίας αρνητικού τόνου [31]

Μετά τη διαδικασία έκθεσης των δοκιμίων EPR, ADEPR / Si και τη θέρμανση PEB, ακολουθεί η εμφάνιση, κατά την οποία το δείγμα βυθίζεται στο υγρό διάλυμα του εμφανιστή και υλοποιείται το επιθυμητό σχέδιο. Σε αυτή τη διαδικασία σημαντικό ρόλο παίζει ο χρόνος ανάπτυξης ή εμφάνισης των δομών στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου. Βέβαια, όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, ο εμφανιστής (**developer**) της ρητίνης EPR είναι διαφορετικός από τον εμφανιστή της ρητίνης ADEPR, οι οποίοι είναι το **PGMEA** (Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate) και **TMAH0.26** (Shipley LDD W26). Οι εμφανιστές αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα λιθογραφίας και εφαρμόστηκαν διάφοροι χρόνοι εμφάνισης (**time development**), ώστε να προσδιοριστεί ο βέλτιστος χρόνος ανάπτυξης των δομών. Οι χρόνοι εμφάνισης διαφέρουν για τις δύο ρητίνες και εξαρτώνται και από τη διαδικασία θέρμανσης PEB και από τις φυσικές ιδιότητες των ίδιων των ρητινών. Στη πρώτη σειρά πειραμάτων λιθογραφίας, για τη ρητίνη EPR, ο χρόνος εμφάνισης είναι $t_d = 1 - 15 \text{ sec}$. Για τη ρητίνη ADEPR, ο χρόνος εμφάνισης είναι $t_d = 1 - 5 \text{ sec}$ και 12 sec . Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων λιθογραφίας, όπου πλέον χρησιμοποιούμε μόνο τη ρητίνη ADEPR, ο χρόνος εμφάνισης είναι $t_d = 12 - 26 \text{ sec}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

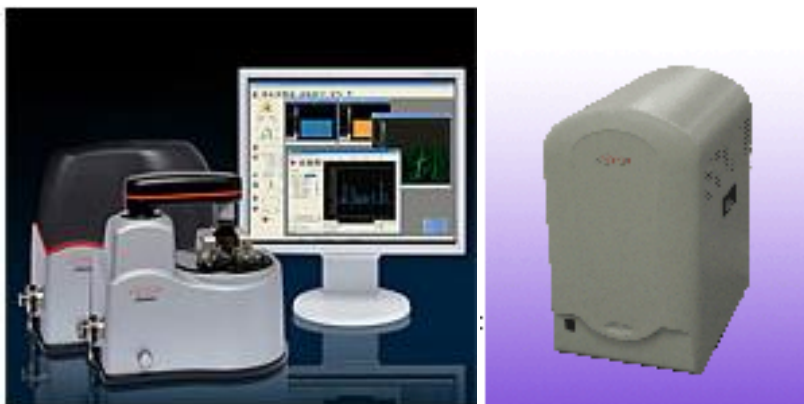
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα από τις μεθόδους χαρακτηρισμού μικρο- και νανοδομών, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει απεικόνιση των δομών στα δοκίμια EPR, ADEPR / Si και να μετρηθούν οι διαστάσεις τους. Η μία διάσταση είναι η περίοδος (**period**), διότι στην ουσία έχουμε την απεικόνιση των γραμμών (**lines**) του οπτικού φράγματος περίθλασης πάνω στο φωτοπολυμερές που επικαλύπτει την επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου. Το οπτικό φράγμα έχει μία συγκεκριμένη περιοδικότητα των γραμμών του (χαραγές), άρα και η συμβολή των ± 1 τάξεων περίθλασης πάνω στην επιφάνεια του φωτοπολυμερούς, μετά τη διαδικασία εμφάνισης των δομών, θα δώσει μία περιοδική δομή γραμμών. Η άλλη διάσταση είναι το ύψος (**height**) των γραμμών (δομών) ή αλλιώς το βάθος στο οποίο έχει αφαιρεθεί η πολυμερής ρητίνη μετά τη διαδικασία της εμφάνισης.

Από τη κατηγορία μεθόδων χαρακτηρισμού μικρο- και νανοδομών, δύο κύριες μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν και είναι οι εξής:

- **Οπτική μικροσκοπία**
- **Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)**
- **Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων – Σαρωτική Μικροσκοπία Ανίχνευσης (AFM – SPM)**

Αρχικά, οι δομές παρατηρήθηκαν με τη βοήθεια ενός οπτικού μικροσκοπίου στο καθαρό χώρο (clean room), αμέσως μετά τη διαδικασία εμφάνισης. Στη συνέχεια, για την εξέταση της επιφάνειας του υμενίου ρητίνης, Η πρώτη σειρά δοκιμών (EPR 8%, ADEPR 16% / Si και EPR 5%, ADEPR 5% / Si) εξετάστηκε στη διάταξη AFM/SPM **diInnova SPM** της εταιρίας **Veeco** (**σχήμα 4.1**) στο εργαστήριο που υπάρχει στο Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4.1 Φωτογραφίες της διάταξης diInnova SPM και του controller της Veeco

Η δεύτερη σειρά δοκιμών (ADEPR 16% / Si) εξετάστηκε σε διάταξη ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), **JEOL6380LV** (σχήμα 4.2) στο Τομέα Γεωλογικών Επιστημών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4.2 Φωτογραφία της διάταξης ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM)

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΓΡΑΦΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

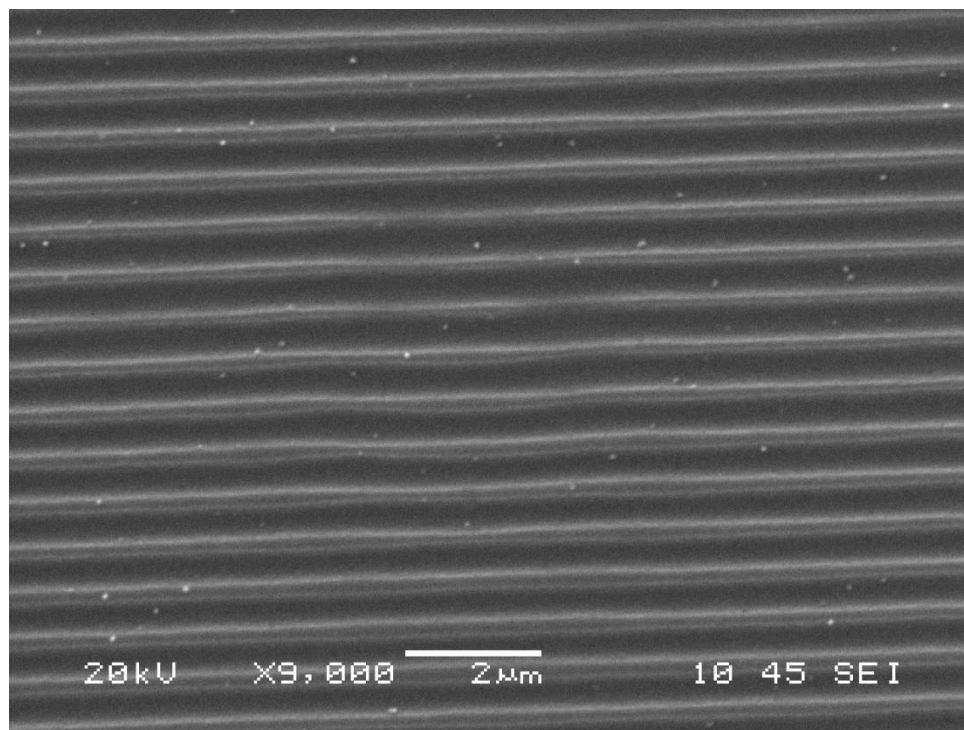
Πριν η επιφάνεια των δοκιμών εξεταστεί στο SEM, χρειάζεται να γίνει επικάλυψή της με χρυσό (Au), ώστε να γίνει αγωγήμη. Αυτό γίνεται διότι το φωτοπολυμερές, το οποίο έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου, δεν είναι αγωγίμο υλικό. Το πάχος της επικάλυψης με χρυσό (Au) είναι 4 – 5 nm. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν με την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) είναι **ADEPR 16% / Si** (δεύτερη σειρά δοκιμών), τα οποία έχουν δημιουργηθεί, εκτεθεί και επεξεργαστεί σε συγκεκριμένες συνθήκες:

PAB	t _{PAB}	Spot Size	PEB	t _{PEB}
110 °C	5 min	100 x 100 μm	110 ή 120 °C	5 ή 10 min

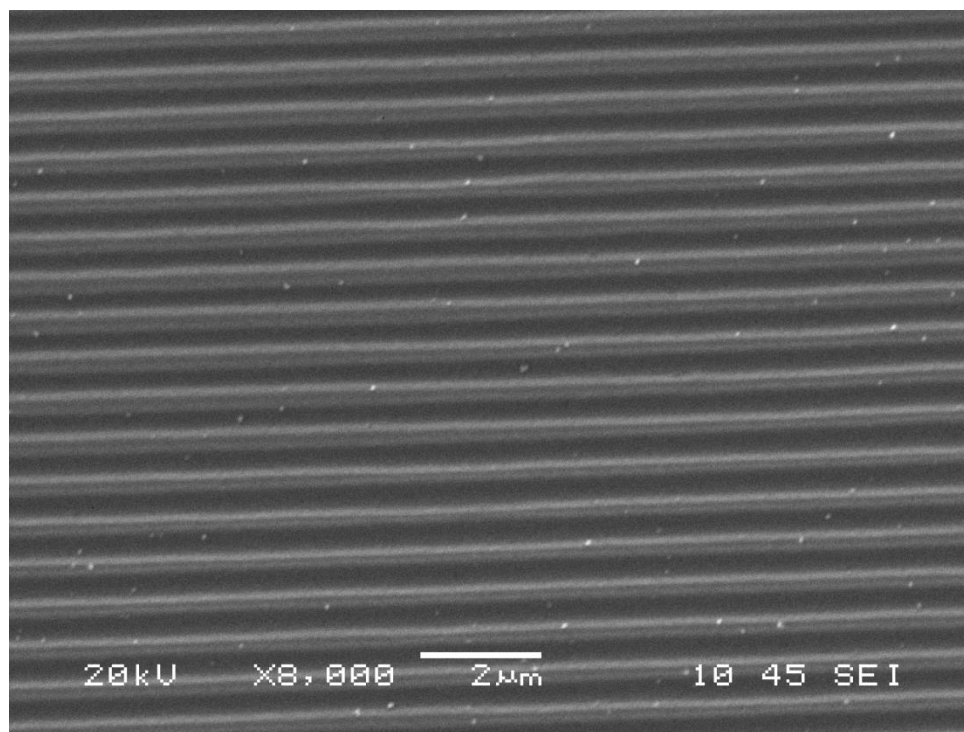
Ο χρόνος ανάπτυξης (εμφάνισης) των δομών είναι $t_D = 12 - 26 \text{ sec}$ και το εύρος των τιμών ενέργειας είναι $E = 2.45 - 74.1 \text{ μJ}$. Διαιρώντας τις τιμές ενέργειας με το μέγεθος της επιφάνειας, το οποίο δίνουν οι διαστάσεις του spot size ($100 \times 100 = 10000 \text{ μm}^2 = 10^{-4} \text{ cm}^2$), υπολογίζονται οι τιμές της **ενεργειακής πυκνότητας (energy density ή fluence)**. Δηλαδή $F = \frac{E}{A}$, όπου E η ενέργεια σε μJ και A η επιφάνεια του spot σε cm^2 . Η ενεργειακή πυκνότητα μπορεί να εκφραστεί με μονάδα μέτρησης τα μJ/cm^2 , αλλά και τα J/cm^2 . Άρα οι τιμές της ενεργειακής πυκνότητας υπολογίστηκαν $F = 0.0245 - 0.741 \text{ J/cm}^2$.

Στο SEM επιχειρήθηκε η λήψη εικόνων με μεγεθύνσεις από **X33** μέχρι **X15000**, με σκοπό να εξεταστεί η επιφάνεια του φωτοπολυμερούς στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου, να παρατηρηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι δομές που αναπτύχθηκαν και να μετρηθεί κυρίως η περιοδικότητα των δομών αυτών, και όχι το ύψος τους. Επίσης, παρατηρήθηκε η σχέση της περιόδου των δομών με την ενεργειακή πυκνότητα σε κάθε περίπτωση. Ακολουθούν γραφικές παραστάσεις, οι οποίες αποδεικνύουν αυτή τη σχέση των δύο μεγεθών (**σχήματα 4.9 – 4.11**).

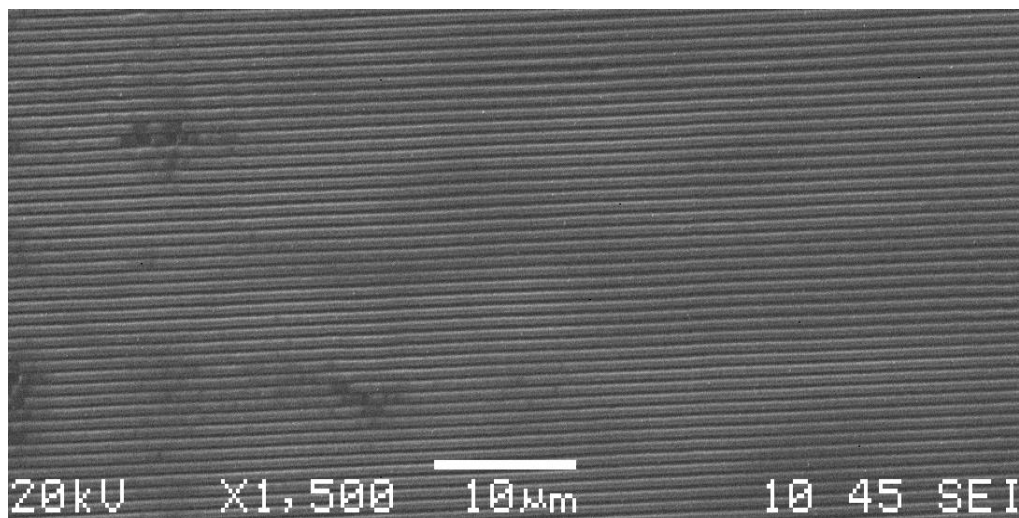
Εξ' αιτίας των ευκρινών εικόνων, τις οποίες λάβαμε σε όλες σχεδόν τις μεγεθύνσεις που χρησιμοποιήθηκαν, επιβεβαιώνεται η καλή ποιότητα επικάλυψης χρυσού (Au) στα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία του SEM.



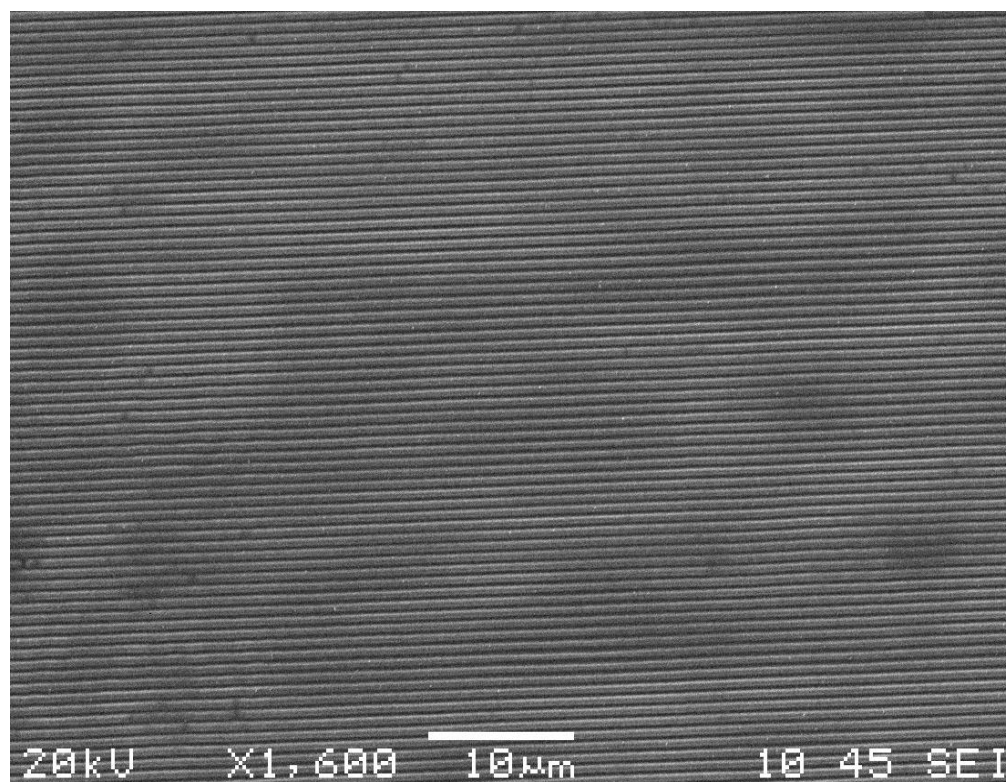
Σχήμα 4.3 Μικρογραφία SEM με δομές περιόδου 668 nm ($F = 0.044 \text{ J/cm}^2$, $t_D = 16 \text{ sec}$)



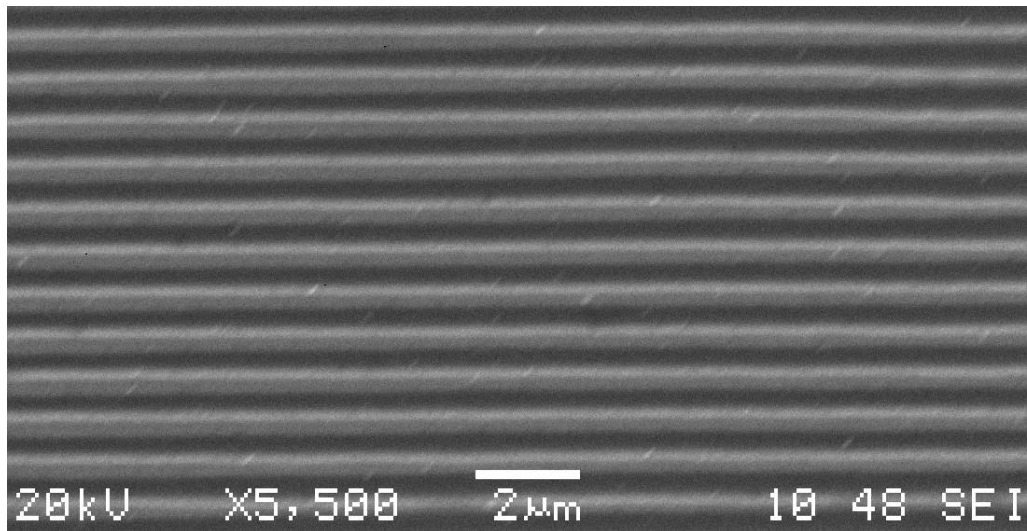
Σχήμα 4.4 Μικρογραφία SEM με δομές περιόδου 658 nm ($F = 0.052 \text{ J/cm}^2$, $t_D = 16 \text{ sec}$)



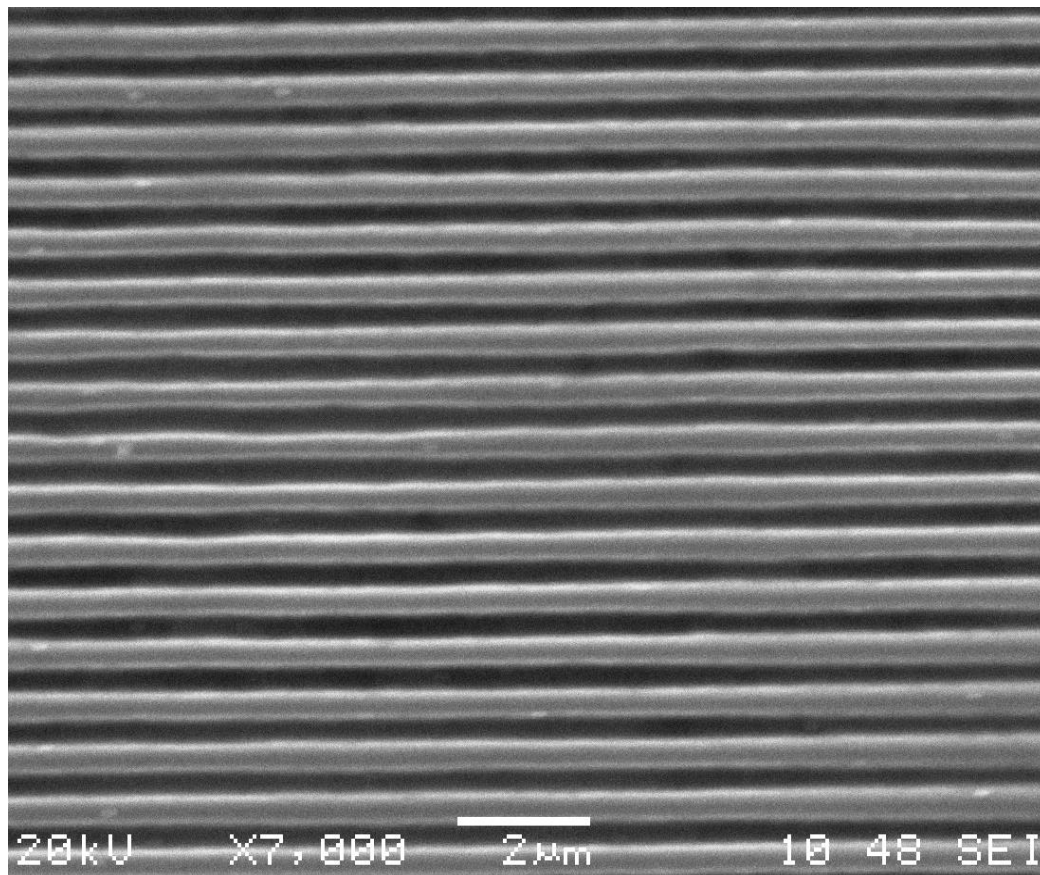
Σχήμα 4.5 Μικρογραφία SEM με δομές περιόδου 658 nm ($F = 0.098 \text{ J/cm}^2$, $t_D = 16 \text{ sec}$)



Σχήμα 4.6 Μικρογραφία SEM με δομές περιόδου 658 nm ($F = 0.114 \text{ J/cm}^2$, $t_D = 16 \text{ sec}$)

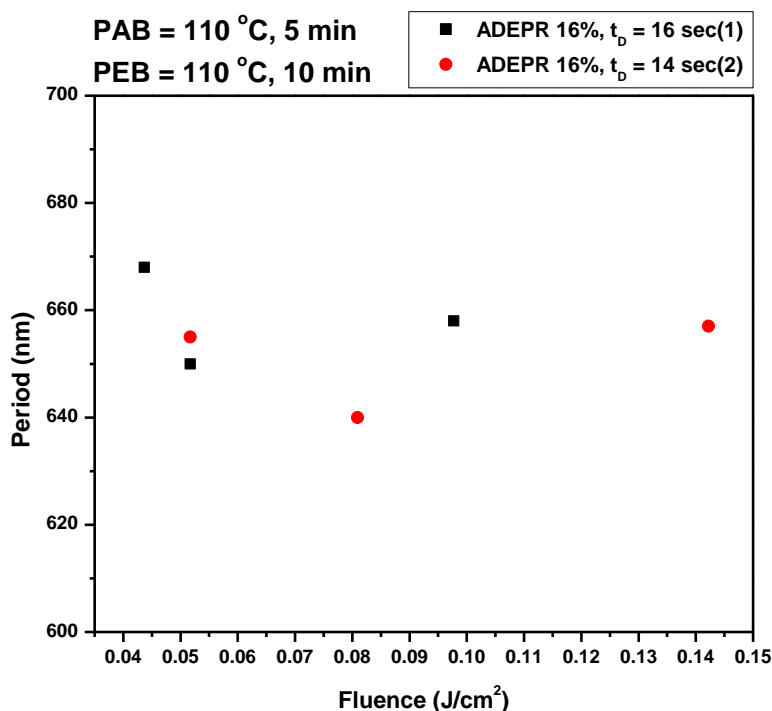


Σχήμα 4.7 Μικρογραφία SEM με δομές περιόδου 655 nm ($F = 0.052 \text{ J/cm}^2$, $t_D = 14 \text{ sec}$)



Σχήμα 4.8 Μικρογραφία SEM με δομές περιόδου 657 nm ($F = 0.142 \text{ J/cm}^2$, $t_D = 14 \text{ sec}$)

Παρατηρώντας τις παραπάνω μικρογραφίες SEM (σχήματα 4.3 – 4.8), διαπιστώνεται ότι για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών ενεργειακών πυκνοτήτων, η περίοδος των δομών που εμφανίζονται στην επιφάνεια των δοκιμίων ADEPR 16% / Si παραμένει σχεδόν σταθερή σε σχέση με τις τιμές της ενεργειακής πυκνότητας, δηλαδή υπάρχει μία σχετική ανεξαρτησία. Επίσης, παρατηρήται ότι τη τιμή της περιόδου των δομών αυτών την επηρεάζει και ο χρόνος εμφάνισής τους.



Σχήμα 4.9 Η περίοδος των δομών ως συνάρτηση της ενεργειακής πυκνότητας και του χρόνου ανάπτυξης

Γενικά, το εύρος των ενεργειακών πυκνοτήτων, στο οποίο παρατηρήθηκαν οι παραπάνω δομές είναι από **0.04 – 0.18 J/cm²**, όπου οι δομές δεν παρουσιάζουν προβλήματα σχήματος και περιοδικότητας. Πέρα από τις δύο αυτές οριακές τιμές, έχουμε αλλοίωση των δομών. Συγκεκριμένα, για **F < 0.04 J/cm²** δεν έχουμε παρατηρήσιμες δομές (δεν έχει ενεργοποιηθεί σωστά το φωτοπολυμερές, ώστε να αναπτυχθούν σωστά οι δομές) και για **F > 0.18 J/cm²** το φωτοπολυμερές λιώνει ή αφαιρείται ολοκληρωτικά από την επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου.

Στο σχήμα 4.9, φαίνεται η σχέση μεταξύ περιόδου και ενεργειακής πυκνότητας, καθώς και ρόλος που παίζει ο χρόνος ανάπτυξης των δομών. Η εξάρτηση της περιόδου από την ενεργειακή πυκνότητα δεν αλλάζει για δύο διαφορετικούς χρόνους εμφάνισης, άλλα έχουμε διαφορετικές τιμές περιόδου σε συγκεκριμένες τιμές ενεργειακής πυκνότητας. Διαπιστώνεται ότι μετά από μία συγκεκριμένη τιμή ενεργειακής πυκνότητας ($F = 0.10 \text{ J/cm}^2$) παρουσιάζεται σταθεροποίηση της τιμής της περιόδου για όλες τις τιμές ενεργειακής πυκνότητας και για χρόνους εμφάνισης.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ / ΣΑΡΩΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ (AFM / SPM)

Με τη χρήση του AFM / SPM, εξετάστηκαν στα δοκίμια η επιφάνεια του φωτοπολυμερούς για απεικόνιση των δομών που αναπτύχθηκαν και για μέτρηση της περιοδικότητάς τους (όπως στη περίπτωση του SEM) και για το ύψος των δομών (βάθος της περιοδικής δομής σε σχέση με πάχος εναπόθεσης του φωτοπολυμερούς). Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη πειραματική διαδικασία είναι **EPR 8% / Si**, **ADEPR 16% / Si**, **EPR 5% / Si** και **ADEPR 5% / Si** (πρώτη σειρά δοκιμίων), τα οποία έχουν διαμορφωθεί, εκτεθεί και επεξεργαστεί σε συγκεκριμένες συνθήκες:

PAB	t _{PAB}	Spot Size	PEB	t _{PEB}
110 °C	5 min	100 x 120 μm 120 x 150 μm 140 x 150 μm 100 x 110 μm	90 ή 110 ή 115 – 117 °C	5 ή 10 min

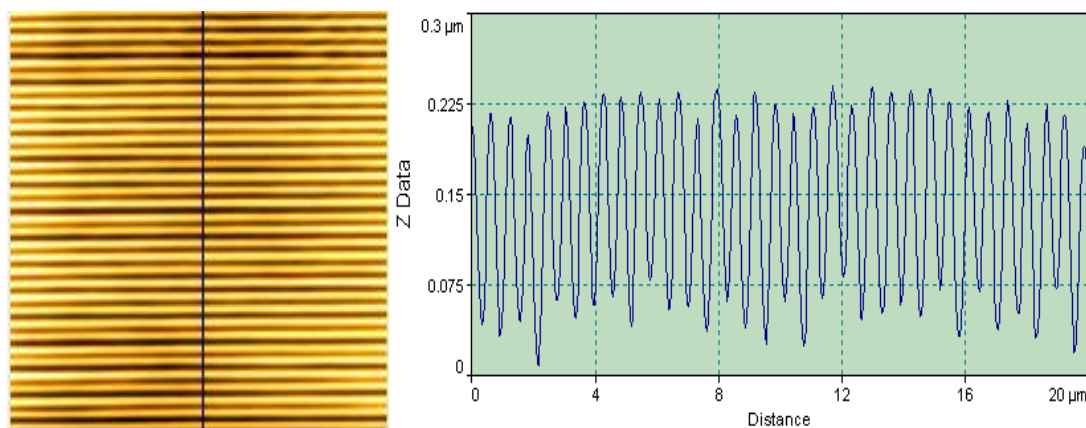
Ο χρόνος ανάπτυξης (εμφάνισης) των δομών είναι $t_D = 1 - 5 \text{ sec}$ ή 12 sec και το εύρος των τιμών ενέργειας είναι $E = 0.64 - 26.79 \text{ μJ}$. Αντίστοιχα, η ενεργειακή πυκνότητα έχει τιμές $F = 0.004 - 0.36 \text{ J/cm}^2$. Τα δοκίμια, στα οποία παρατηρήθηκαν σωστές δομές ήταν τα ADEPR 16% / Si και τα EPR 5% / Si. Οι άλλες ομάδες παρουσίασαν διάφορα προβλήματα, όπως αλλοιωμένες δομές ή πλήρη αποκόλληση της ρητίνης από την επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου, καθώς

και έντονη ανομοιομορφία στη περιοδικότητα των δομών. Αυτό είναι ένα γενικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά τη διαδικασία των πειραμάτων, το οποίο οφείλεται στη μη ορθή συμβολή των ± 1 τάξεων του οπτικού φράγματος περίθλασης (**phase mask**), δηλαδή στη μη πλήρη ταύτιση των δύο αυτών τάξεων. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε και στα δοκίμια που εξεράστηκαν στο SEM. Το λιώσιμο (κάψιμο) ή πλήρης αποκόλληση του φωτοπολυμερούς οφείλεται κυρίως σε μεγάλες δόσεις ενέργειας, τις οποίες δέχεται κατά την έκθεσή του, στην αναποτελεσματική παρεμπόδιση της μηδενικής τάξεως περίθλασης (**zero order diffraction blocked**) από το οπτικό φράγμα περίθλασης που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα λιθογραφίας και, τέλος, στην απόκλιση στο χρόνο εμφάνισης και ανάπτυξης των δομών (για παραπάνω χρόνο εμφάνισης παρουσιάζεται πλήρη αφαίρεση του φωτοπολυμερούς από την επιφάνεια του δοκιμίου).

Με τη συγκεκριμένη διάταξη AFM/SPM μπορούν να εφαρμοστούν δύο μέθοδοι τεχνικής τοπογραφίας AFM:

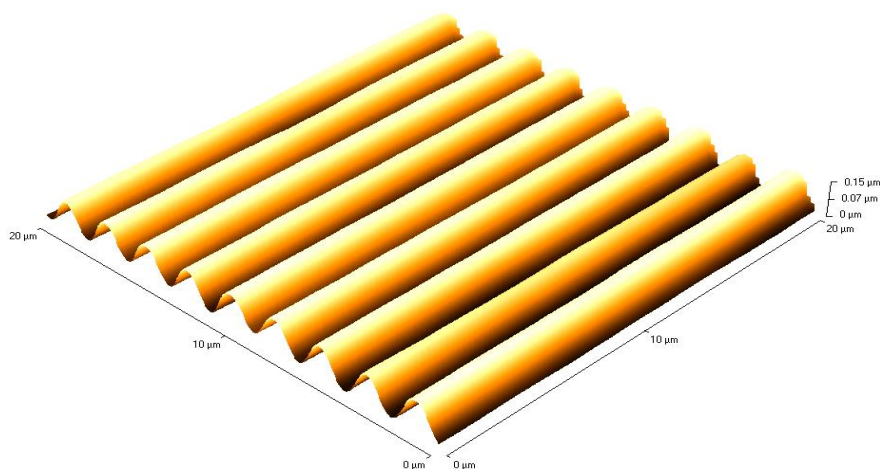
- **Η μέθοδος επαφής (contact mode)**, κατά την οποία η ακίδα είναι σε επαφή με το δείγμα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.
- **Η μέθοδος Tapping AFM**, όπου η τοπογραφία της επιφάνειας επιτυγχάνεται προκαλώντας ελαφριές δονήσεις στην ακίδα κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε υλικά με μαλακές επιφάνειες.

Επειδή η επιφάνεια των δοκιμίων μας είναι σκληρή, εφόσον το φωτοπολυμερές μετά την έκθεση και τη διαδικασία PEB γίνεται σκληρότερο και ανθεκτικότερο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επαφής (contact mode).

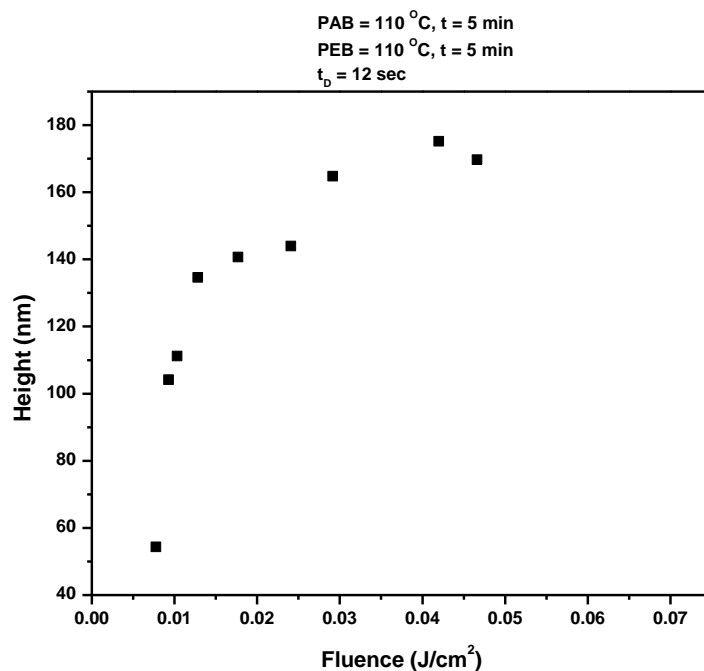


Σχήμα 4.10 Φωτογραφία AFM/SPM με δομές περιόδου 558 nm και ύψους 140 nm και X – Z γράφημα

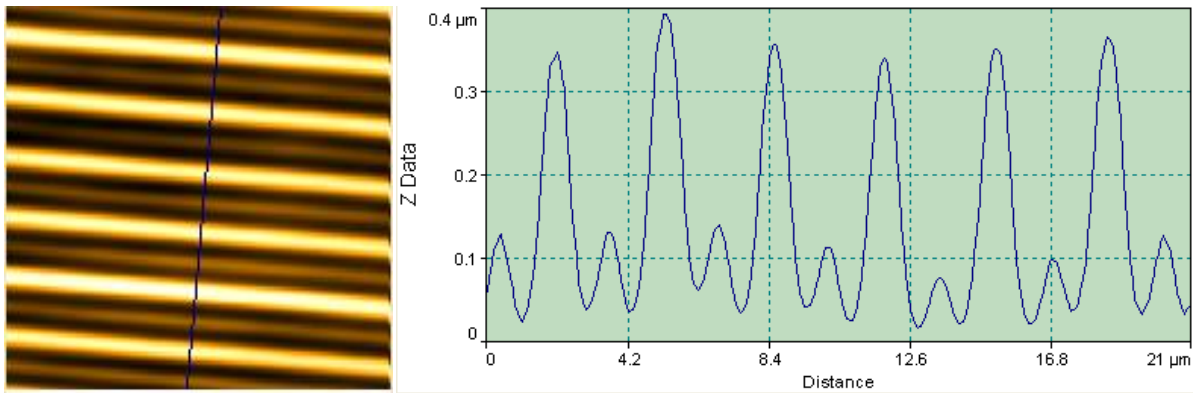
Στο **σχήμα 4.10** παρουσιάζεται φωτογραφία AFM/SPM, η οποία πάρθηκε με τη βοήθεια της συγκεκριμένης διάταξης. Το δοκίμιο είναι ADEPR 16% / Si με ενεργειακή πυκνότητα $F = 0.039 \text{ J/cm}^2$ και χρόνο εμφάνισης $t_0 = 12 \text{ sec}$. Η ανάλυση της συγκεκριμένης φωτογραφίας και η δημιουργία του γραφήματος X – Z για την κάθετη απεικόνιση των δομών γίνονται με τη βοήθεια του λογισμικού **SpmLabAnalysis V7.00**. Επίσης, μπορεί να ληφθεί με τη βοήθεια του λογισμικού αυτού και τρισδιάστατη απεικόνιση της δομής που εξετάζεται (**σχήμα 4.11**).



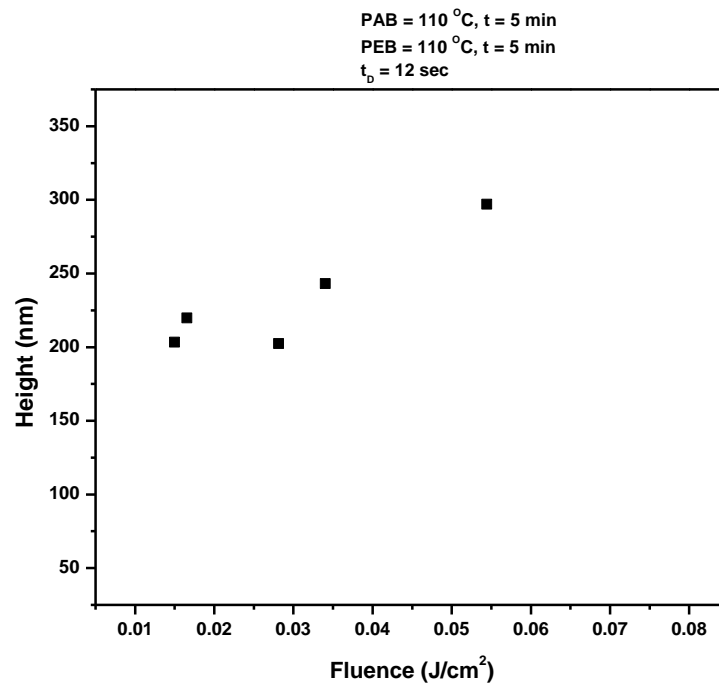
Σχήμα 4.11 Τρισδιάστατη απεικόνιση του σχήματος 5.10



Σχήμα 4.12 Το ύψος των δομών ως συνάρτηση της ενεργειακής πυκνότητας

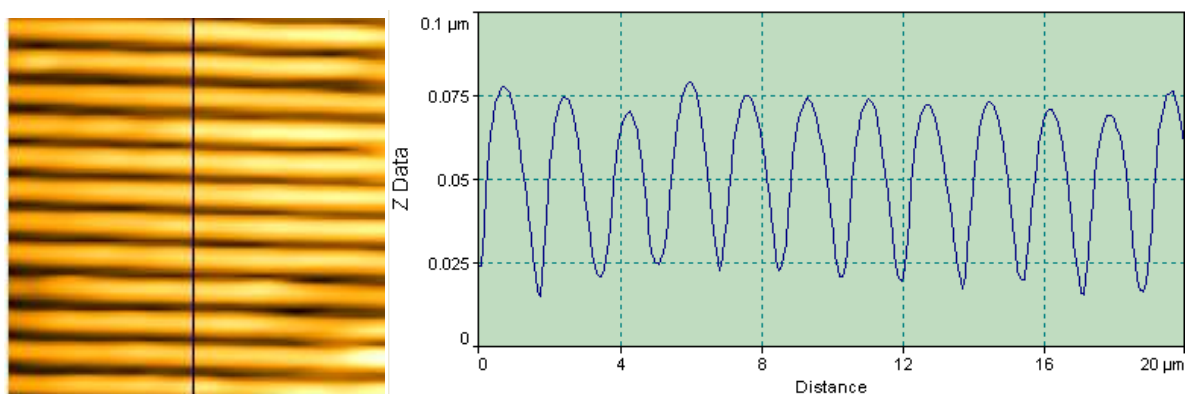


Σχήμα 4.13 Φωτογραφία AFM/SPM με δομές περιόδου 1225 nm και ύψους 396 nm και X – Z γράφημα



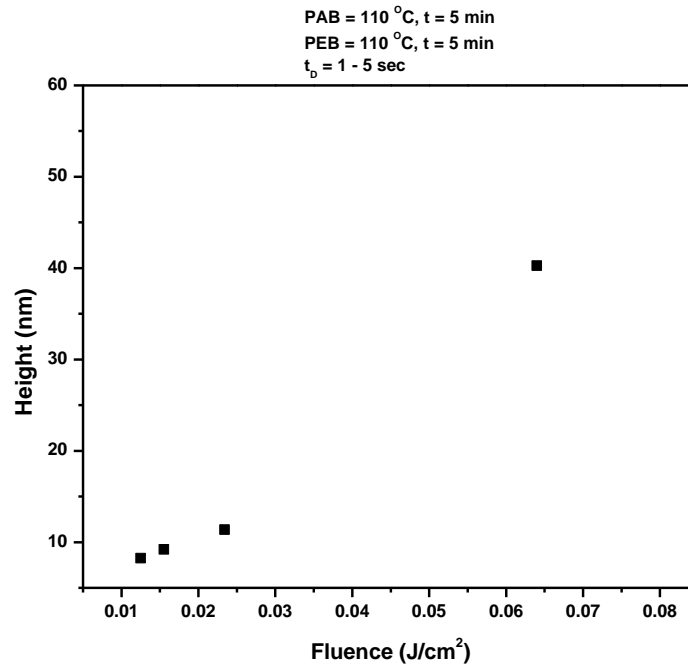
Σχήμα 4.14 Το ύψος των δομών σε συνάρτηση με την ενεργειακή πυκνότητα στις ίδιες πειραματικές συνθήκες και διαφορετικό spot size

Στα δοκίμια ADEPR 16% / Si που εξετάστηκαν στο AFM/SPM, παρατηρείται μία εξάρτηση του ύψους από την ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή όσο αυξάνεται η τιμή της ενεργειακής πυκνότητας (δόσης), αυξάνεται και το βάθος που φτάνει η ανάπτυξη των δομών σε σχέση με το πάχος επικάλυψης της ρητίνης. Κατα συνέπεια, σίγουρα υπάρχει εξάρτηση του ύψους των δομών και από το spot size (όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις του spot, τόσο μεγαλύτερα είναι τα ύψη που παρατηρούνται – **σχήμα 4.12, 4.14**). Και στο **σχήμα 4.13**, το δοκίμιο είναι ADEPR 16% / Si με τις ίδιες συνθήκες διαμόρφωσης, έκθεσης και εμφάνισης άλλα με διαφορετικό spot size (100 x 120 μm και 120 x 150 μm) σε σχέση με το δοκίμιο του **σχήματος 4.10**. Η ενεργειακή πυκνότητα έχει τιμή $F = 0.1 \text{ J/cm}^2$ και ο χρόνος εμφάνισης $t_b = 12 \text{ sec}$.

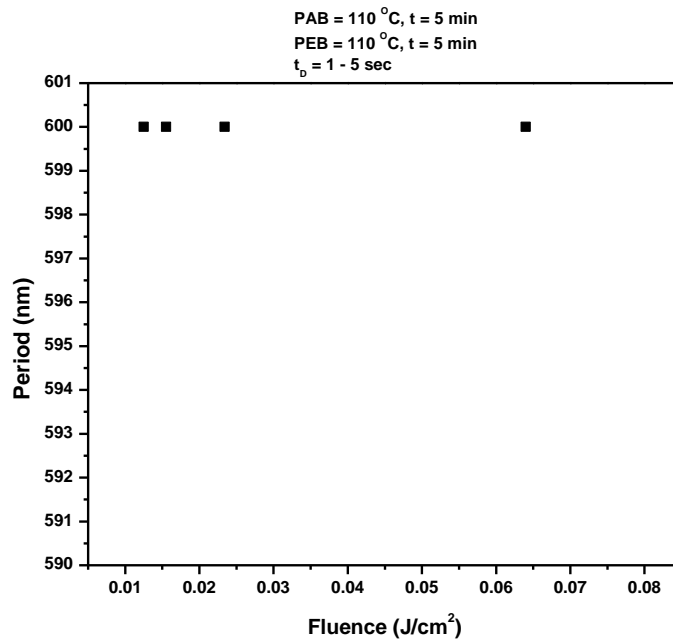


Σχήμα 4.15 Φωτογραφία AFM/SPM με δομές περιόδου 600 nm και ύψους 75 nm και X – Z γράφημα

Στο **σχήμα 4.15** παρουσιάζεται φωτογραφία AFM/SPM και γράφημα X – Z για δοκίμιο EPR 5% / Si. Και εδώ παρατηρείται εξάρτηση του ύψους από τη δόση έκθεσης (ενεργειακή πυκνότητα) και ανεξαρτησία της περιόδου από το ίδιο μέγεθος (όπως παρατηρήθηκε και στα δοκίμια APEPR 16% / Si). Στις γραφικές παραστάσεις των **σχημάτων 4.16 και 4.17** φαίνονται τα παραπάνω αποτελέσματα. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι $F = 0.069 \text{ J/cm}^2$ και ο χρόνος εμφάνισης $t_b = 1 - 5 \text{ sec}$ για το δοκίμιο του **σχήματος 4.15**.



Σχήμα 4.16 Το ύψος των δομών σε συνάρτηση με την ενεργειακή πυκνότητα



Σχήμα 4.17 Η περίοδος των δομών σε συνάρτηση με την ενεργειακή πυκνότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας όσα παρατηρήθηκαν, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τεχνικές χαρακτηρισμού των δοκιμίων και τη μελέτη των δομών που αναπτύχθηκαν στην επιφάνεια τους απέδωσαν σε μεγάλο βαθμό τη συσχέτιση μεταξύ του τρόπου διαμόρφωσης, της έκθεσης και των τελικών ιδιοτήτων τους μετά τη διαδικασία εμφάνισής τους. Οι ιδιότητες που προσδιορίστηκαν εξαρτώνται από τις αντίστοιχες των αρχικών υλικών, από τον τρόπο έκθεσης των δοκιμίων και ανάπτυξης των δομών, δηλαδή από τις συγκεκριμένες συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν. Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, καθώς και τις αναφορές αντίστοιχων διαδικασιών στη βιβλιογραφία, και εξετάζοντας τις πειραματικές μεθόδους συνολικά είναι δυνατόν να εξαχθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η λιθογραφία με τη χρήση παλμικού laser και ενός οπτικού φράγματος περίθλασης (**phase mask**) είναι πράγματι μία γρήγορη και υψηλής διακριτικής ικανότητας και ανάλυσης διαδικασία λιθογραφίας.
- Τα δύο φωτοπολυμερή χημικής ενίσχυσης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή αυτής της διαδικασίας λιθογραφίας, παρουσιάζουν όντως ικανοποιητικές ιδιότητες και αποτελέσματα σε επίπεδο λιθογραφίας υψηλής διακριτικής ικανότητας.
- Το ύψος και η περιόδικότητα των δομών εξαρτώνται από τη δόση (ενεργειακή πυκνότητα) και τις πειραματικές συνθήκες διαμόρφωσης, έκθεσης και εμφάνισής τους.
- Το ύψος κυρίως εξαρτάται από τη δόση (ενεργειακή πυκνότητα) και το spot size [προσεγγιστικά υπάρχει μία γραμμική εξάρτηση σε σχέση με την ενεργειακή πυκνότητα **F** (**Fluence**)].
- Η περίοδος είναι ανεξάρτητη από την ενεργειακή πυκνότητα άλλα εξαρτάται κυρίως από το χρόνο ανάπτυξης των δομών (**td**).
- Πειραματικά, η μικρότερη περίοδος που παρατηρήθηκε είναι 558 nm και το μέγιστο ύψος 396 nm.

- Η τιμή της περιόδου των δομών λογικά μπορεί να μειωθεί κι άλλο, αφού η θεωρητική διακριτική ικανότητα υπολογίζεται 380 – 500 nm, βάσει των οπτικών στοιχείων και τη διάταξη laser που διαθέτει η οπτική διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των συγκεκριμένων πειραμάτων λιθογραφίας.
- Η επιπλέον μείωση της διακριτικής ικανότητας και της περιόδου μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας άμεση διαδικασία λιθογραφίας (ablation's method). Οι J. Ihlemann et.al. έχουν καταφέρει να δημιουργήσουν δομές περιόδου 400 nm με τη χρήση αυτής της μεθόδου. Η μόνη διαφορά με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στη συγκεκριμένη εργασία είναι ότι δε χρειάζεται η διαδικασία επικάλυψης της επιφάνειας των υποστρωμάτων πυριτίου με τη φωτοευαίσθητη πολυμερή ρητίνη.
- Περαιτέρω πειραματική εργασία, η οποία μπορεί να προταθεί και να γίνει, είναι η διαδικασία εγχάραξης (χημικής, φυσικής, ιοντικής ή πλάσμα) του πυριτίου για τη δημιουργία μικρο- ή νάνοκαναλιών. Επίσης, μπορεί να εξεταστεί η τραχύτητα των δομών αυτών με τη χρήση του AFM και να γίνει προσπάθεια για τη μείωσή της (π.χ. μέσω ακτινοβολίας με laser). Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά υποστρώματος εκτός από το πυρίτιο, όπως οξείδιο του πυριτίου, κάποιο πολυμερές υλικο (π.χ. PDMS, PMMA) ή κάποιο άλλο ανόργανο (π.χ. LiNbO₃ ή μέταλλο όπως Cu).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

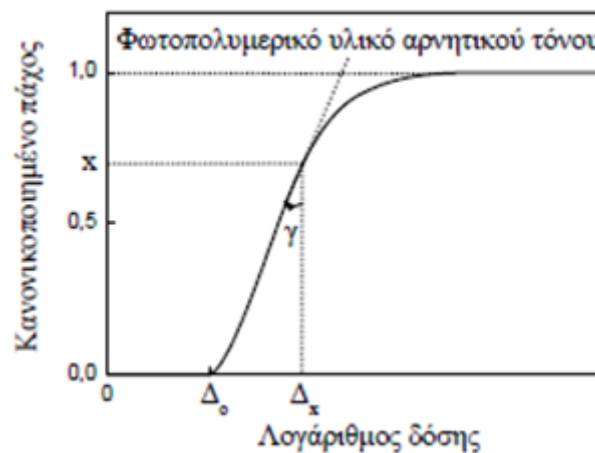
ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟ- ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ

Γενικά, ο χαρακτηρισμός λιθογραφικών υλικών, όπως είναι τα φωτοπολυμερή χημικής ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στα συγκεκριμένα πειράματα λιθογραφίας, έχουν δύο βασικές κατηγορίες χαρακτηρισμού τους [29]:

- **Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός**
- **Λιθογραφικός χαρακτηρισμός**

Η πρώτη κατηγορία χαρακτηρισμού έχει σχέση κυρίως με τη φυσικοχημική σύσταση των φωτοπολυμερικών υλικών, κάτι το οποίο δεν έχει σχέση με το σκοπό του συγκεκριμένου πειράματος λιθογραφίας. Η δεύτερη κατηγορία χαρακτηρισμού έχει άμεση σχέση με τις μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για να χαρακτηριστούν μικροδομές και κυρίως νανοδομές (< 500 nm). Οι μέθοδοι αυτοί είναι οι εξής [29]:

- **SEM, οπτική μικροσκοπία (Προφίλ, διαστάσεις δομών)**
- **AFM (Επιφάνεια υμενίων)**
- **DRM (Ρυθμός εμφάνισης, συμβολομετρία laser)**
- **Ελλειψομετρία, προφίλομετρία (Πάχη)**
- **Καμπύλες αντίθεσης (αντίθεση) (σχήμα 1)**



Σχήμα 1 Καμπύλη αντίθεσης φωτοπολυμερικού υλικού αρνητικού τόνου [29]

Μετά από τη διαδικασία έκθεσης και εμφάνισης των δοκιμίων EPR, ADEPR / Si, η παρατήρηση των δομών γίνεται με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου της LEICA για τη διαπίστωση της σωστής εμφάνισης των δομών στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου. Μετά από τη διαπίστωση αυτή, οι μικρο- και νανοδομές χαρακτηρίζονταν με τη χρήση δύο από τις παραπάνω μεθόδους. Η πρώτη σειρά δοκιμίων, όπου έγινε χρήση και των δύο ρητινών, χαρακτηρίστηκε με τη χρήση μικροσκοπίας ατομικών δυνάμεων (AFM). Η δεύτερη σειρά δοκιμίων, στα οποία έχουμε επικάλυψη της επιφάνειας Si μόνο με το φωτοπολυμερές ADEPR, χαρακτηρίστηκαν με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM).

Π.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY – SEM)

Στο **σχήμα 2** φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, SEM (Scanning Electron Microscopy). Η στήλη παραγωγής και εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων λειτουργεί σε κενό ($<10^{-3}$ Pa). Η πηγή ηλεκτρονίων που λειτουργεί σε μία περιοχή τάσεων από 0 – 30 kV, δημιουργεί δέσμη ηλεκτρονίων (πρωτογενή ηλεκτρόνια), η οποία διερχόμενη μέσω μίας σειράς μαγνητικών φακών, επιταγχύνεται, συγκεντρώνεται και εστιάζεται

πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το υπό εξέταση δοκίμιο σαρώνεται από την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων και τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του δοκιμίου ηλεκτρόνια συλλέγονται και ενισχύονται έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα οπτικό σήμα [35].

Το είδος της εκπεμπόμενης από την επιφάνεια του δοκιμίου ακτινοβολίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων του υλικού και μπορεί να είναι [35]:

Ηλεκτρόνια Auger

Είναι τα ηλεκτρόνια, τα οποία προέρχονται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των υποστοιβάδων των επιφανειακών ατόμων (σε βάθος έως 1 nm). Το φάσμα που προκύπτει είναι κατάλληλο για στοιχειακές χημικές αναλύσεις της επιφάνειας του υλικού.

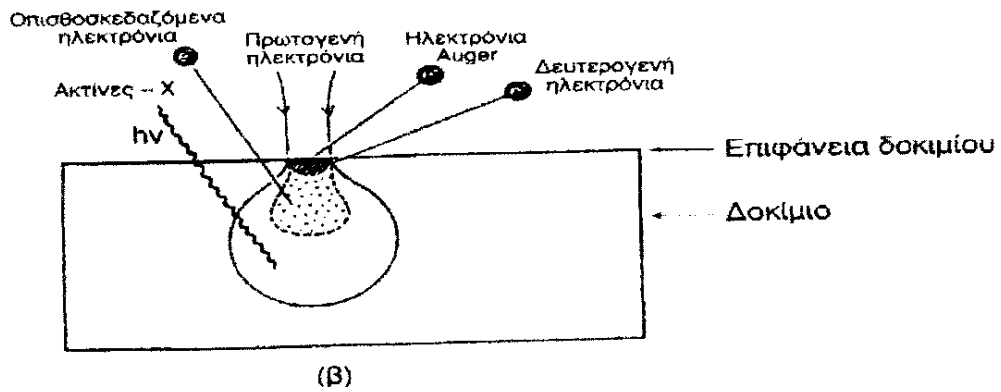
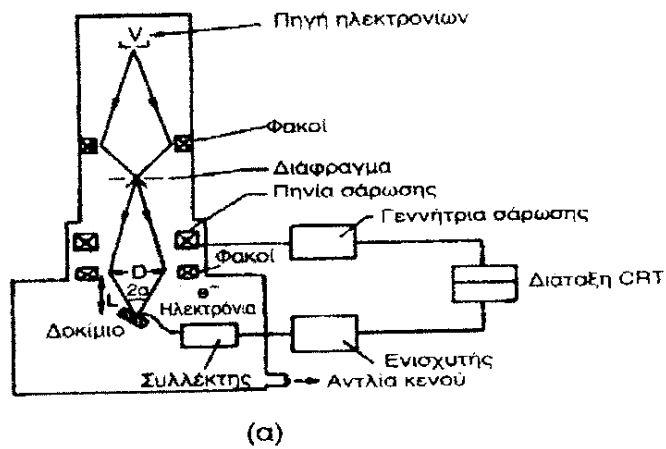
Δευτερογενή ηλεκτρόνια

Είναι τα ηλεκτρόνια, τα οποία προέρχονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων (βάθους έως 10 nm). Έχουν ενέργεια 50 eV και προέρχονται από την αμέσως επόμενη βαθμίδα της επιφάνειας. Η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και τις ανωμαλίες της επιφάνειας. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τη δέσμη των δευτερογενών ηλεκτρονίων αφορούν κυρίως την τοπογραφία της επιφάνειας (**σχήμα 3.α**).

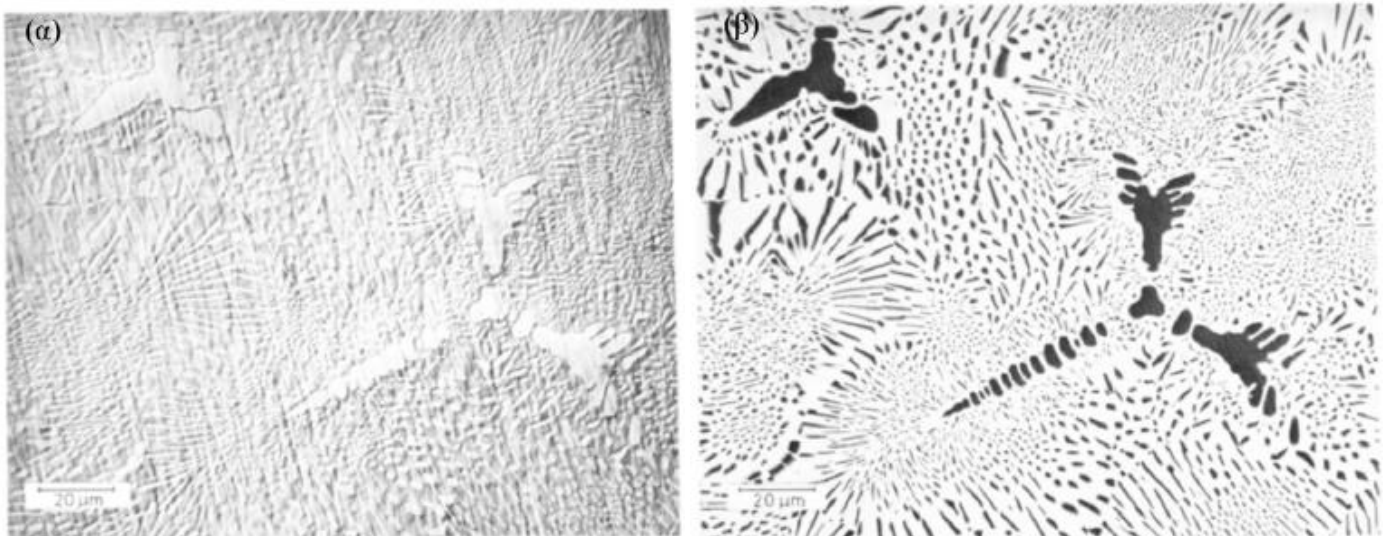
Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια

Είναι τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τις ελαστικές συγκρούσεις μεταξύ των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων των επιφανειακών στρωμάτων (βάθους έως 100 nm). Η ενέργεια τους κυμαίνεται από 5 – 50 keV και η ένταση του παραγόμενου σήματος εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό (**Z**) των στοιχείων της επιφάνειας και από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό, ενώ η αντίθεση που δημιουργείται είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που επιτυγχάνεται με τη χρήση των δευτερογενών ηλεκτρονίων. Οι πληροφορίες που συλλέγονται

από τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, αφορούν τη χημική σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της αναλυόμενης επιφάνειας (σχήμα 3.β).



Σχήμα 2 α) Διάγραμμα του SEM, β) Αλληλεπίδραση δέσμης ηλεκτρονίων-ύλης



Σχήμα 3 Εικόνα α) δευτερογενών και β) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων [35]

Ακτίνες-X

Οι ακτίνες X παράγονται από το επιφανειακό στρώμα του δοκιμίου μέχρι βάθους 1 nm και εξαρτώνται από το είδος των ατόμων της επιφάνειας. Η ανάλυση των εκπεμπόμενων ακτίνων X οδηγεί σε χημική ανάλυση της επιφάνειας, γνωστή και ως μικροανάλυση ακτίνων X, η οποία γίνεται συνήθως παράλληλα με την παρατήρηση στο SEM.

Το βάθος πεδίου και η διακριτική ικανότητα-μεγέθυνση του SEM, είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του οπτικού-μεταλλογραφικού μικροσκοπίου. Έτσι, σε μία μεγέθυνση X200, το αντίστοιχο βάθος πεδίου του SEM είναι 100 μm, ενώ του οπτικού 0,7 μm. Μεγεθύνσεις της τάξης X10000-30000 είναι στις δυνατότητες ενός συνηθισμένου SEM και συνήθως αυτές που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές κυμαίνονται από X1000-5000. Λόγω του μεγάλου βάθους πεδίου, η προετοιμασία των δοκιμίων προς εξέταση στο SEM είναι η ελάχιστη δυνατή. Δοκίμια ύστερα από θραύση, κοπή ή λείανση και χημική προσβολή είναι δυνατόν να παρατηρηθούν στο SEM. Η λείανση ακολουθείται συχνά από έντονη χημική προσβολή για την αύξηση του ανάγλυφου της επιφάνειας και κατά συνέπεια και της έντασης του σήματος που προέρχεται από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια. Μη αγώγιμα υλικά όπως τα πολυμερή επικαλύπτονται με λεπτά επιστρώματα Au, Cu ή γραφίτη για την επίτευξη αγωγιμότητας στην επιφάνεια [35].

Π.2 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ (ATOMIC FORCE MICROSCOPY – AFM)

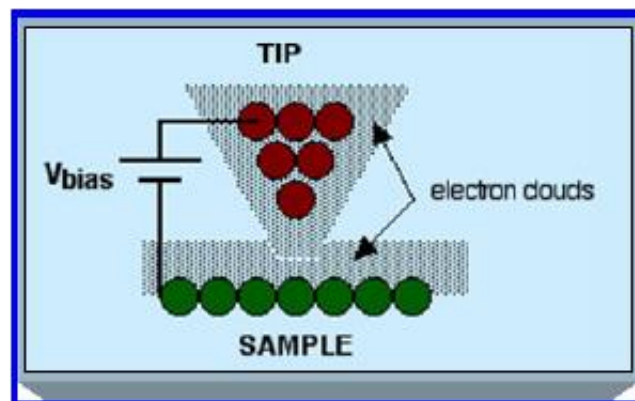
Σαρωτική Μικροσκοπία Ανίχνευσης (Scanning Probe Microscopy – SPM) - Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας (Scanning Tunneling Microscopy – STM)

Με την Σαρωτική Μικροσκοπία Ανίχνευσης και τη Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας μπορεί να μελετηθεί η μορφολογία υλικού ή διατάξεων σε μακροσκοπική, μικροσκοπική ή ατομική κλίμακα. Τα μικροσκόπια σάρωσης (σχήμα 4) μέσω του φαινομένου σήραγγας, βασίζονται στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας. Αν δύο άτομα βρεθούν κοντά το ένα στο άλλο, τότε είναι πιθανόν το ένα ηλεκτρόνιο του A να βρεθεί σύμφωνα με τις αρχές της κβαντομηχανικής, στο

άλλο άτομο B. Στο όργανο αυτό, υπάρχει μια ακίδα από βολφράμιο, που βρίσκεται εξαιρετικά κοντά στο δείγμα, για να μπορούν τα ηλεκτρόνια να "ρέουν" από την ακίδα προς το δείγμα αλλά και αντίστροφα.

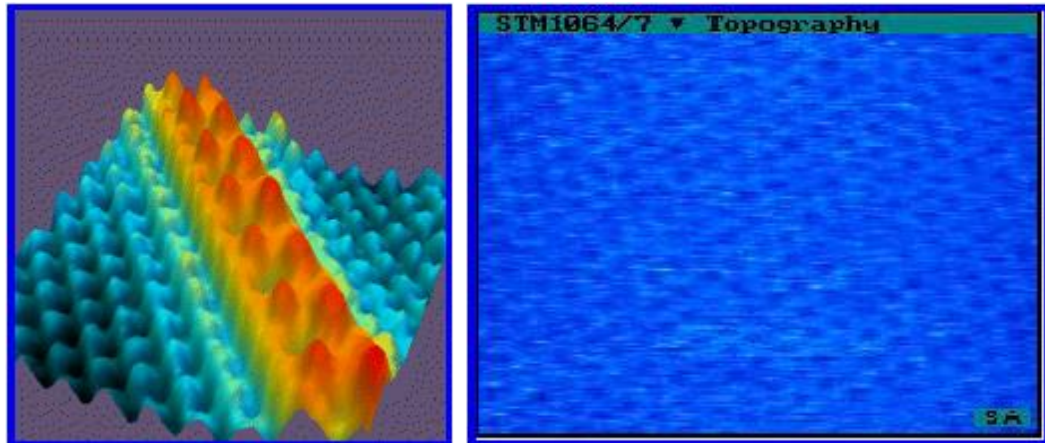
Όταν η ακίδα, με υψηλό θετικό δυναμικό, βρεθεί πάνω από το υλικό που εξετάζεται, τότε το ενεργειακό φράγμα που χωρίζει τα ηλεκτρόνια του υλικού από την ακίδα γίνεται κβαντομηχανικά προσπελάσιμο και κάνει την εμφάνισή του ένα ασθενές ηλεκτρικό ρεύμα.

Αντίθετα, όταν η ακίδα βρίσκεται πάνω από μια εσοχή της επιφάνειας, το ενεργειακό φράγμα γίνεται απαγορευτικά μεγάλο και το ηλεκτρικό ρεύμα μειώνεται δραστικά ή σταματάει τελείως. Οι διακυμάνσεις αυτού του ρεύματος "ψυχρής εκπομπής" καταγράφουν με εκπληκτική ακρίβεια τις ανωμαλίες της παρατηρούμενης επιφάνειας. Με υψηλής ποιότητας ακίδα είναι δυνατό να δούμε όχι πλέον τις κοινές ανωμαλίες μιας επιφάνειας αλλά τις "ανωμαλίες" που προέρχονται από την ατομική υφή της.



Σχήμα 4 Αναπαράσταση του μικροσκοπίου σάρωσης

Η ακρίβεια της εικόνας είναι ιδιαίτερα μεγάλη, αν σκεφθούμε ότι η ακίδα αποτελείται από 1 έως 2 άτομα. Η οριζόντια ανάλυση είναι $\sim 2 \text{ \AA}$ και η κάθετη ανάλυση $\sim 0.18 \text{ \AA}$. Έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει μεμονωμένα άτομα, δηλαδή να έχουμε τη μέγιστη δυνατή λεπτομέρεια στην ατομική δομή της επιφάνειας του υπό εξέταση υλικού. Οι ενοχλητικές δονήσεις από το περιβάλλον απομονώνονται με την τοποθέτηση του μικροσκοπίου επάνω σε έναν μόνιμο μαγνήτη στην επιφάνεια υπεραγωγικού μολύβδου. Η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές στη μικροηλεκτρονική ημιαγωγών, στη χημεία, για τη μελέτη των αντιδράσεων επιφάνειας και το ρόλο της κατάλυσης, στη σταθεροποίηση οργανικών μορίων σε μια επιφάνεια και στη μελέτη δομών τους. Επίσης χρησιμοποιείται στην μελέτη του DNA [36].



Σχήμα 5 Εικόνα i) SPM 7 x 7 nm απλής αλυσίδας ατόμων Cs πάνω σε επιφάνεια GaAs ii) STM Au (111) 100 x 100 Å [36]

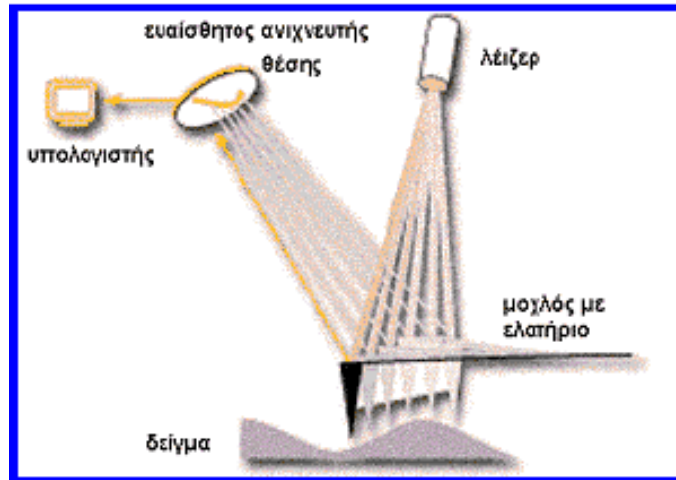
Με τη μέθοδο Σαρωτικής Μικροσκοπίας Σήραγγας (Scanning Tunneling Microscopy, STM), διάφορες άλλες μέθοδοι SPM (Scanning Probe Microscopy) έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη ιδιοτήτων δειγμάτων με την ελάχιστη δυνατή (σε ειδικές περιπτώσεις ατομική) διακριτική ικανότητα [46]. Οι διαστάσεις φτάνουν σε μεγέθη, όπου η ηλεκτρική μεταφορά ακολουθεί διαφορετικούς νόμους και κυρίως είναι τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια και διεπιφάνεια.

Οι μέθοδοι SPM (π.χ. STM και SFM) εφαρμόστηκαν επιτυχώς για την τροποποίηση επιφανειών με διακριτική ικανότητα που μπορεί να φτάσει στην τάξη των ατομικών διαστάσεων. Στην περιοχή ανίχνευσης, π.χ. στο άκρο της ακίδας, μπορεί να εφαρμοσθούν ακραίες συνθήκες. Για παράδειγμα, είναι πιθανά ηλεκτρικά πεδία μέχρι και 109 V/m και πυκνότητες ηλεκτρικών ρευμάτων που ξεπερνούν τα 107 A/cm². Το πλήθος των ηλεκτρονίων ανάμεσα σε αγώγιμες ακίδες και επιφάνειες μπορεί να θεωρηθεί σαν η στενότερη δέσμη ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας. Η τεχνική SFM επιτρέπει τον έλεγχο των τοπικών δυνάμεων με πολύ μεγάλη ακρίβεια συνεπώς και το χειρισμό μεμονωμένων ατόμων.

Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων (Atomic Force Microscopy – AFM)

Το μικροσκόπιο ατομικών δυνάμεων (Atomic Force Microscope-AFM) αναπτύχθηκε από τους Binnig et al. το 1985 για τη μελέτη επιφανειών σε ατομική κλίμακα. Το AFM στηρίζεται σε μια τεχνική σάρωσης για να παράγει τρισδιάστατες εικόνες των επιφανειών πολύ υψηλής ανάλυσης. Μετρά πολύ μικρές δυνάμεις (<1 nN) μεταξύ της επιφάνειας της ακίδας του AFM

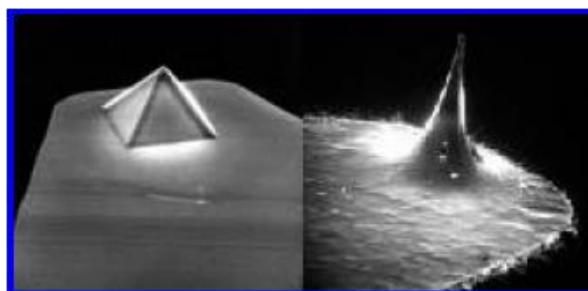
που βρίσκεται τοποθετημένη σε ένα εύκαμπτο βραχίονα (cantilever) και της μελετούμενης επιφάνειας δείγματος (σχήμα 6).



Σχήμα 6 Αρχή λειτουργίας του AFM

Αυτές οι μικρές δυνάμεις καθορίζονται με τη μέτρηση της κίνησης ενός πολύ εύκαμπτου βραχίονα με εξαιρετικά-μικρή μάζα, με διάφορες τεχνικές μέτρησης, όπως οπτική εκτροπή και φαινόμενο σύραγγας. Η εκτροπή μπορεί να μετρηθεί για 0.02 nm, έτσι για έναν βραχίονα με σταθερά ελατηρίου 10Nm^{-1} , μπορεί να ανιχνευθεί δύναμη 0.2 nN.

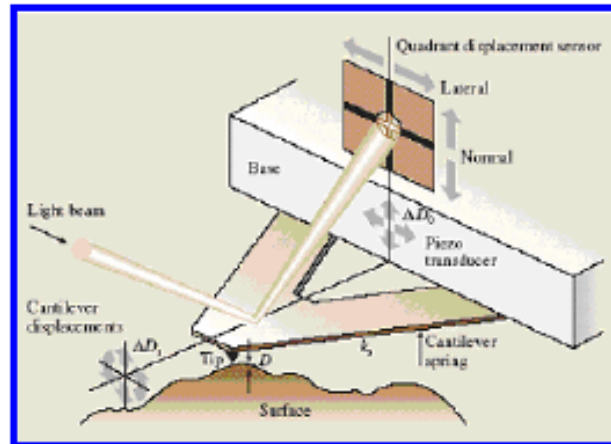
Στη διαδικασία μέτρησης με AFM, το δείγμα μελετάται με τέτοιο τρόπο ώστε οποιαδήποτε μετακίνηση του βραχίονα να μην προκαλεί δονήσεις. Για υψηλή ανάλυση, οι άκρες των ακίδων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο αιχμηρές, γι'αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται ακίδων με ακτίνα καμπυλότητας του άκρου τους 10–100nm (Σχήμα 7).



Σχήμα 7 Εικόνες SEM ακίδων AFM [36]

Η τραχύτητα επιφάνειας, συμπεριλαμβανομένης απεικόνισης ατομικής κλίμακας, η θραύση, φθορά και η λίπανση των ορίων στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο στερεών είναι μεγέθη που επίσης

μελετώνται με AFM. Το ατομικό μικροσκόπιο μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις της τριβής (Lateral Force Microscopy-LFM), καταγράφοντας τη ροπή στρέψης του βραχίονα καθώς σαρώνεται το δείγμα κάθετα στον μεγάλο άξονα του βραχίονα (σχήμα 8) [42, 43, 44, 47].



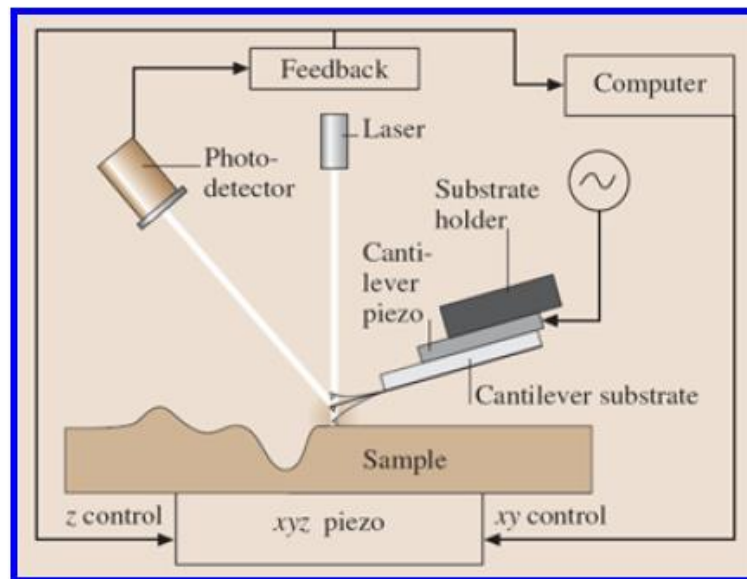
Σχήμα 8 Αναπαράσταση μιας ακίδας ατομικού μικροσκοπίου (AFM) που υποστηρίζεται από έναν τριγωνικό βραχίονα

Αν και η τοπογραφία μιας επιφάνειας είναι η κύρια εφαρμογή για συστήματα AFM, παρέχεται επίσης η δυνατότητα για εφαρμογή των ακόλουθων τεχνικών:

- STM (Scanning Tunneling Microscopy), με την οποία είναι δυνατή η μελέτη της τοπογραφίας μιας επιφάνειας χρησιμοποιώντας το φαινόμενο σήραγγας που δημιουργείται μεταξύ της ακίδας και του προς μελέτη δείγματος.
- Η μέθοδος επαφής (contact mode) AFM (σχήμα 8), κατά την οποία η ακίδα είναι σε επαφή με το δείγμα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.
- Η μέθοδος Tapping AFM (σχήμα 9), όπου η τοπογραφία της επιφάνειας επιτυγχάνεται προκαλώντας ελαφριές δονήσεις στην ακίδα κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε υλικά με μαλακές επιφάνειες.

- Μέθοδος μη-επαφής (non-contact) AFM, όπου η ακίδα μετρά την τοπογραφία του δείγματος ανιχνεύοντας ελκτικές δυνάμεις Van der Waals μεταξύ επιφάνειας δείγματος και ακίδας.
- Μέθοδος Lift Mode, όπου γίνεται συνδυασμός της τοπογραφίας και μέτρησης μαγνητικών ή ηλεκτρικών δυνάμεων έτσι ώστε να γίνεται η μέτρηση αυτών των δυνάμεων σε συγκεκριμένη απόσταση από την επιφάνεια του δείγματος.
- Μέθοδος Απεικόνισης Φάσεων (Phase Imaging), με την οποία μπορεί να χαρτογραφηθεί η σύνθεση της επιφάνειας σύμφωνα με τις τοπικές μηχανικές και δομικές διαφοροποιήσεις του δείγματος.
- Μικροσκοπία πλευρικής δύναμης (LFM) με την οποία μπορούν να καταγραφούν οι δυνάμεις τριβής μεταξύ της ακίδας και επιφάνειας δειγμάτων.
- Μικροσκοπία μαγνητικών δυνάμεων (MFM) με την οποία μπορεί να χαρτογραφηθεί η κλίση και η κατανομή των μαγνητικών πεδίων πάνω στην επιφάνεια δειγμάτων χρησιμοποιώντας Lift Mode.
- Μέθοδος διαμόρφωσης δύναμης με την οποία μπορεί να χαρτογραφηθεί η σχετική ακαμψία της επιφάνειας.
- Μικροσκοπία ηλεκτρικής δύναμης (EFM), όπου μπορεί να χαρτογραφηθεί η κλίση και η κατανομή ηλεκτρικών πεδίων επάνω στην επιφάνεια δειγμάτων χρησιμοποιώντας Lift Mode.
- Ηλεκτροχημικό SPM για in-situ καταγραφή τοπογραφικών αλλαγών που προκαλούνται από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.
- Μικροσκοπία ανίχνευσης ηλεκτροχημικού δυναμικού (SECPM) για την in-situ απεικόνιση ή χαρτογράφηση δυναμικού της επιφάνειας ηλεκτροδίων με τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της ποτενσιομετρικής ακίδας και του δείγματος.

- Μικροσκοπία θερμικής ανίχνευσης κατά την οποία γίνεται καταγραφή της κατανομής θερμότητας στην επιφάνεια του δείγματος (SThM).
- Μέθοδος Tunneling AFM, όπου είναι δυνατό να γίνεται αξιολόγηση της ποιότητας λεπτών υμενίων (π.χ. ανίχνευση ρωγμών, επιφανειακών ατελειών κλπ σε υμένια).
- Μέθοδος TRmode για τον τρισδιάστατο χαρακτηρισμό της επιφάνειας του δείγματος.



Σχήμα 9 Απεικόνιση της διαδικασίας tapping

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. P. Simon, J. Ihlemann, Applied Physics A **63**, 505 – 508 (1996).
2. J. Ihlemann, Malte Schulz-Ruhtenberg and Thomas Fricke-Begemann, Journal of Physics: Conference Series **59**, 206 – 209 (2007).
3. J. Ihlemann, J. H. Klein-Wiele, J. Bekesi and P. Simon, Journal of Physics: Conference Series **59**, 449 – 452 (2007).
4. T. Lippert, T. Gerber, and A. Wokaun, D.J. Funk, H. Fukumura and M. Goto, Applied Physics Letters, Volume 75, Number 7 (1999).
5. G. Kopitkovas, T. Lippert, C. David, A. Wokaun, J. Gobrecht, Science Direct, Elsevier, Thin Solid Films 453 – 454 (2004) 31 – 35.
6. K. Rubahn, J. Ihlemann, G. Jakopic, A.C. Simonsen, H.-G. Rubahn, Applied Physics A **79**, 1715 – 1719 (2004).
7. S.R. John, S.C. Langford, J.T. Dickinson, Applied Physics A, Material Science & Processing.
8. J. Ihlemann, S. Müller, S. Puschmann, D. Schäfer, M. Wei, J. Li, P.R. Herman, Applied Physics A **76**, 751 – 753 (2003).
9. D. Schäfer, J. Ihlemann, G. Marowsky, P.R. Herman, Applied Physics A 72, 377 – 379 (2001).
10. Jürgen Ihlemann, Micro patterning of fused silica by laser ablation mediated by solid coating absorption, Applied Physics A, Materials Science & Processing.
11. J.-H. Klein – Wiele, J. Bekesi, J. Ihlemann, P. Simon, Nano-structuring with Femtosecond Excimer Laser Pulses.
12. J. Bekesi, J. Meinertz, J. Ihlemann, P. Simon, Fabrication of large-area grating structures through laser ablation, Applied Physics A, Materials Science & Processing.
13. F. Beinhorn, J. Ihlemann, K. Luther, J. Troe, Applied Physics A **79**, 869 – 873 (2004).
14. J. Li, J. Dou, P.R. Herman, T. Fricke-Begemann, J. Ihlemann and G. Marowsky, Journal of Physics: Conference Series 59, 691 – 695 (2007).
15. Malte Schulz – Ruhtenberg, Jürgen Ihlemann, Jörg Heber, Science Direct, Elsevier, Applied Surface Science 248 (2005) 190 – 195.
16. J. Ihlemann, D. Schäfer, Elsevier, Applied Surface Science 197 – 198 (2002) 856 – 861.
17. J. Ihlemann, K. Rubahn, Elsevier, Applied Surface Science 154 – 155 (2000) 587 – 592.
18. F. Beinhorn, J. Ihlemann, P. Simon, G. Marowsky, B. Maisenhölder, J. Edlinger, D. Neuschäfer, D. Anselmetti, Elsevier, Applied Surface Science 138 – 139 (1999) 107 – 110.
19. M. Behdani, S. H. Keshmiri, S. Soria, M. A. Bader, J. Ihlemann, G. Marowsky, Th. Rasing, Applied Physics Letters, Volume 82, Number 16 (2003).
20. Yu. Kaganovskii, I. Antonov, D. Ianetz, M. Rosenbluh, J. Ihlemann, S. Mueller, G. Marowsky, A. A. Lipovskii, Applied Physics Letters, Volume 83, Number 3 (2003).

21. Seokwoo Jeon, Viktor Malyarchuk, John A. Rogers, Gary P. Wiederrecht, OPTICS EXPRESS, Volume 14, Number 6 (2006).
22. S. Lee, V. Kudryashov, P. Lee, M. Liu and T. L. Tan, SPIE, 3899. pp. 247 – 256.
23. B. Smith, Solid Immersion and Evanescent Wave Lithography at Numerical Apertures > 1.60, Rochester Institute of Technology, Center for Nanolithography Research.
24. Kristian Buchwald, Ibsen photonics, White paper: Fused Silica Transmission Gratings (2007).
25. G.J. Mankey, Lecture 14, Advanced Optical Lithography, The University of Alabama.
26. P. Argitis, I. Raptis, C. J. Aidinis, N. Glezos, M. Baciocchi, J. Everett, M. Hatzakis, JVST B 13(6), 3030 (1995).
27. P. Argitis, N. Glezos, M. Vasilopoulou, I. Raptis, M. Hatzakis, J. Everett, G. Meneghini, A. Palumbo, M. Ardito, P. Hudek and I. Kostic, Microelectronic Engineering 53 (2000) 453 – 456.
28. N. Glezos, P. Argitis, D. Velessiotis, I. Raptis, M. Hatzakis, P. Hudek and I. Kostic, JVST B 18(6) (2000).
29. Αντώνιος Μ. Δούβας, Πολυμερή για κατασκευή μικρο- και νανοδομών, Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».
30. Introduction to Microlithography, Willson C. G., , 2nd ed., ch. 3, p. 78 ACS Professional Reference Book, American Chemical Society, Washington DC, (1994).
31. Chemical amplification in the design of dry developing resist materials, Ito H., Willson C. G., Polym. Eng. Sci., 23, 1021 (1982).
32. Sheng Lin – Gibson, Cresol Novolac/Epoxy Networks: Synthesis, Properties, And Processability, Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University (2001).
33. Dieter Bäuerle, Laser Processing and Chemistry, 3rd Edition, Springer.
34. J. Plummer, Micheal D. Deal, Peter B. Griffin, Silicon VLSI Technology, Fundamentals, Practice and Modeling, Prentice Hall Electronics and VLSI Series – Charles Sodini, Series Editor.
35. Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM, RF Egerton Springer, New York (2005).
36. www.physics.4u.gr
37. C. Schonberger, N. Kramer, Microelectronic Engineering 32 (1996) 203-217.
38. J.A. Dagata, J. Schneir, H.H. Harary, C.J. Evans, M.T. Posteck and J. Bennet, Appl. Phys. Lett. 56 (1990) 2001.
39. H. Sugimura, N. Kitamura and H. Masuhara, Jpn, J. Appl. Phys. 33 (1994) 1143.
40. C.Z. Cai et al. Mater. Phys. Mech. 41 (2001) 111-115.
41. J. Urban et al. Microelectronic Engineering 27 (1995) 113-116.
42. G. Meyer, N. M. Amer: Simultaneous measurement of lateral and normal forces with an optical-beam-deflection atomic force microscope, Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 2089–2091.
43. C. M. Mate, G.M. McClelland, R. Erlandsson, S. Chiang: Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 1942–1945.
44. R. W. Carpick, M. Salmeron: Scratching the surface: Fundamental investigations of tribology with atomic force microscopy, Chem. Rev. 97 (1997) 1163–1194.

45. O. I. Vinogradova, H.-J. Butt, G. E. Yakubov, F. Feuillebois: Dynamic effects on force measurements. I. Viscous drag on the atomic force microscope cantilever, *Rev. Sci. Instrum.* 72 (2001) 2330–2339.
46. E. Oesterschulze, *Surf. Coat. Technol.* 97 (1997) 694-706.
47. E. Meyer, R. M. Overney, K. Dransfeld, T. Gyalog: *Nanoscience: Friction and Rheology on the Nanometer Scale* (World Scientific, Singapore 1998).
48. Ευάγγελος Αναστασάκης, Σύγχρονη Πειραματική Οπτική, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
49. Ελισάβετ Τσώη, Καθαροί χώροι και Τεχνολογία καθαρισμού δισκιδίων πυριτίου, Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στα ερευνητικά εργαστήρια του Τομέα Φυσικής του Ε.Μ.Π στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Μικροσυστήματα & Νανοδιατάξεις». Την τριμελή επιτροπή αποτέλεσαν η Δρ. Ι. Ζεργιώτη Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. (επιβλέπουσα), ο Δρ. Δ. Τσουκαλάς Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. και ο Δρ. Ι. Ράπτης Ερευνητής του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» τους οποίους και ευχαριστώ για τις χρήσιμες συμβουλές τους.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τη Δρ. Ι. Ζεργιώτη για την επιστημονική συνεργασία μας και τη χρήσιμη καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, καθώς επίσης και τον κ. Χρήστο Μπουτόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. για την συνεργασία που είχαμε κατά την περίοδο που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα λιθογραφίας, τις πολύτιμες παρατηρήσεις του και τις πολύ ενδιαφέρουσες συζητήσεις μας πάνω σε ζητήματα πειραματικής οπτικής και άλλων επιστημονικών θεμάτων.

Τέλος ευχαριστώ τον Δρ. Ηλία Χατζηθεοδωρίδη Λέκτορα Ε.Μ.Π. για την πρόσβαση στον εξοπλισμό του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, καθώς και τις χρήσιμες παρατηρήσεις του σε ζητήματα λιθογραφίας.