



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**

# **Προσομοίωση της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΤΣΙΚΡΙΚΑΣ Α. ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2009**



Η διδακτορική διατριβή αυτή εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος κατά το χρονικό διάστημα από Δεκεμβρίου 2005 έως το Δεκέμβριου 2008. Η τριμελής συμβουλευτική επιτροπή απαρτιζόταν από τους Ι. Ράπτη, Ερευνητή (επιβλέποντα), Δ. Τσουκαλά, Καθηγητή και Π. Πίσση, Καθηγητή. Συνεπιβλέπων στην διατριβή ήταν ο Γ. Πάτσης, συνεργαζόμενος ερευνητής στο Δημόκριτο.

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη λογισμικού για την προσομοίωση της διαδικασίας έκθεσης με δέσμη ηλεκτρονίων. Στόχος της είναι η πρόβλεψη του ακριβούς σχήματος των εγγραφόμενων δομών, της κρίσιμης διάστασης, της τραχύτητας καθώς και η αυτοματοποιημένη διεξαγωγή μετρήσεων σε εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας.

Οφείλονται ευχαριστίες στα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής κ. Δ. Τσουκαλά, κ. Π. Πίσση και ιδιαιτέρως στον επιβλέποντά μου, ερευνητή του Δημόκριτου Ι. Ράπτη για την ευκαιρία που μου έδωσε να πραγματοποιήσω τη διατριβή αυτή, τη συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Οι γνώσεις του σε θέματα λιθογραφίας και προσομοιώσεων και η εργαστηριακή του εμπειρία υπήρξαν για μένα πολύτιμες.

Ευχαριστώ επίσης τον συνεπιβλέποντα στη διατριβή μου Γ. Πάτση, συνεργαζόμενο ερευνητή στο Δημόκριτο, για τη σημαντική βοήθειά του σε ζητήματα προσομοιώσεων. Από τα μαθήματά του στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα ως την ολοκλήρωση της διατριβής μου με εισήγαγε και με κατεύθυνε στα θέματα ανάπτυξης αλγορίθμων και προσομοιώσεων.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου στο μεταπτυχιακό της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικής για την ενθάρρυνση, ώστε να ξεκινήσω τη διατριβή αυτή.

Τους ερευνητές και το προσωπικό του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής στο Δημόκριτο για τη θερμή υποδοχή και τις γνώσεις που μοιράστηκαν μαζί μου απλόχερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους βοήθησαν στη διεξαγωγή των πειραμάτων για τις ανάγκες της διατριβής μου. Τον Etienne Quensel του LITEN/CEA (Grenoble, France) για την κατασκευή των υποστρωμάτων, την Annamaria Geradino για τις εκθέσεις με δέσμη ηλεκτρονίων στο CNR-IFN (Rome, Italy), τον Ε. Λιναράκη, τεχνικό του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής του Δημόκριτου και τον Β. Δρακόπουλο, τεχνικό του ΙΤΕ/ΕΙΧΗΜΥΘ στην Πάτρα για τη λήψη των φωτογραφιών με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Τεχνολογίες και υλικά Λιθογραφίας.....	13
1.1	Εισαγωγή.....	13
1.2	Τεχνολογίες Λιθογραφίας.....	14
1.2.1	Οπτική λιθογραφία .....	15
1.2.2	Λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης .....	19
1.2.3	ΕΥV λιθογραφία.....	20
1.2.4	Λιθογραφία Νανοαποτυπώματος .....	21
1.3	Η εξέλιξη των τεχνολογιών λιθογραφίας .....	22
1.4	Το μέλλον των τεχνολογιών λιθογραφίας .....	23
1.5	Φωτοευαίσθητα λιθογραφικά υλικά.....	25
1.5.1	Συμβατικά υλικά λιθογραφίας .....	27
1.5.2	Υλικά Μηχανισμού Χημικής Ενίσχυσης .....	28
2	Τεχνολογία κατασκευής масκών.....	31
2.1	Εισαγωγή.....	31
2.2	Υποστρώματα Μασκών .....	32
2.2.1	Μάσκα χρωμίου σε γυαλί.....	32
2.2.2	Μάσκες για Λιθογραφία ακραίου υπεριώδους φωτός.....	33
2.3	Συστήματα κατασκευής масκών .....	36
2.3.1	Συστήματα Laser .....	37
2.3.2	Συστήματα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων.....	38
2.3.3	Συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων .....	46
2.4	Λιθογραφικά υλικά για την κατασκευή масκών.....	49
2.4.1	Υλικά Μηχανισμού Διάσπασης Κύριας Αλυσίδας για Έκθεση σε Δέσμη Ηλεκτρονίων ....	49
2.4.2	Υλικά Μηχανισμού Χημικής Ενίσχυσης για Έκθεση σε Δέσμη Ηλεκτρονίων .....	51
2.4.3	Μοριακά Ακτινοευαίσθητα Υλικά για Έκθεση σε Δέσμη Ηλεκτρονίων.....	51
2.5	Διαδικασία κατασκευής μάσκας.....	53
2.5.1	Προετοιμασία δεδομένων .....	54
2.5.2	Front End Of Line .....	55
2.5.3	Back End Of Line.....	55
2.5.4	Τύποι μορφοποίησης αρχείων δεδομένων σχεδίου .....	56
2.5.5	Οπτικά φαινόμενα γειτνίασης.....	58
2.5.6	Φαινόμενα γειτνίασης δέσμης ηλεκτρονίων .....	58
2.5.7	Χρόνος προετοιμασίας των δεδομένων .....	60

2.6	Γιατί χρειάζεται η προσομοίωση .....	61
3	Εισαγωγή στην Προσομοίωση της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης .....	63
3.1	Εισαγωγή.....	63
3.2	Προδιαγραφές προσομοιωτή .....	63
3.3	Γενική παρουσίαση του προσομοιωτή.....	65
3.4	Προϊόντα που διατίθενται στο εμπόριο .....	67
3.5	Χαρακτηριστικά του προσομοιωτή .....	68
3.6	Προσομοίωση σημειακής δέσμης .....	68
3.7	Συνέλιξη με την πραγματική δέσμη.....	69
3.8	Συνέλιξη με το εγγραφόμενο σχέδιο .....	71
4	Προσομοίωση έκθεσης με σημειακή δέσμη ηλεκτρονίων με τεχνικές Monte Carlo .....	73
4.1	Εισαγωγή.....	73
4.2	Φυσικά μοντέλα.....	73
4.2.1	Υπολογισμός του μήκους ελεύθερης διαδρομής.....	77
4.2.2	Υπολογισμός απώλειας ενέργειας.....	78
4.2.3	Υπολογισμός γωνιών σκέδασης.....	79
4.2.4	Αποθήκευση της εναποτιθέμενης ενέργειας .....	81
4.2.5	Μέθοδος προγραμματισμού .....	82
4.2.6	Υπολογισμός του συντελεστή οπισθοσκέδασης .....	82
4.3	Τυπικά αποτελέσματα .....	82
4.4	Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία... 85	
5	Συνέλιξη σημειακής δέσμης με την πραγματική και το εγγραφόμενο σχέδιο .....	89
5.1	Εισαγωγή.....	89
5.2	Συνέλιξη με το προφίλ της δέσμης.....	89
5.2.1	Στατιστική αναπαράσταση της πραγματικής δέσμης .....	91
5.2.2	Αξιολόγηση των δυο μεθόδων .....	94
5.3	Συνέλιξη της ενεργειακής εναπόθεσης με το αρχικό σχέδιο .....	94
6	Προσομοίωση της εμφάνισης του λιθογραφικού υμενίου.....	101
6.1	Μοντέλο εμφάνισης με τη χρήση τιμής κατωφλίου .....	101
6.2	Στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της θερμικής κατεργασίας και εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού .....	103
7	Αναζήτηση σχημάτων σε εικόνες SEM και μετρολογία.....	105
7.1	Εισαγωγή.....	105
7.2	Αλγόριθμος αναζήτησης σχήματος σε εικόνα SEM.....	105
7.3	Τυπικά αποτελέσματα και σύγκριση με layout, simulation .....	107

7.4	Τμήμα Μετρολογίας .....	109
8	Αποτελέσματα .....	113
8.1	Πειραματική επαλήθευση της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης που προκύπτει από την προσομοίωση. ....	113
8.2	Μέτρηση τραχύτητας σε πειραματικά αποτελέσματα και σύγκρισή τους με αυτά της προσομοίωσης. Εφαρμογή του αλγορίθμου αναζήτησης σχήματος.....	118
8.3	Μελέτη της διακύμανσης πλάτους γραμμής σε σχέση με την κρίσιμη διάσταση.....	127
8.4	Μελέτη των φαινομένων γεινίασης.....	128
8.5	Συγκριτική μελέτη τριών διαφορετικών προφίλ δέσμης .....	131
8.6	Μελέτη της ενεργειακής εναπόθεσης σε συνάρτηση με το βάθος .....	136
8.7	Συνολικά συμπεράσματα και προοπτικές .....	143





## **Εισαγωγή**

Η διατριβή εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής του Εθνικού Κέντρου Ερευνών “Δημόκριτος” στα πλαίσια του Προγράμματος Ενίσχυσης του Ερευνητικού Δυναμικού (ΠΕΝΕΔ - 2003). Ως στόχος τέθηκε ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου λογισμικού για την προσομοίωση όλων των σταδίων κατασκευής και ελέγχου νανοδομών με λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης.

Η διδακτορική διατριβή διαρθρώνεται σε οκτώ κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνολογίες λιθογραφίας που εφαρμόζονται σήμερα τόσο στη βιομηχανία όσο και στην έρευνα με σκοπό την κατανόηση της διαδικασίας άμεσης εγγραφής με ηλεκτρονική δέσμη και την ανάδειξη του ρόλου της στη βιομηχανία των ημιαγωγών. Από την παρουσίαση των προβλέψεων του Διεθνούς Χάρτη Τεχνολογίας των Ημιαγωγών (ITRS) προκύπτουν οι στόχοι που τίθενται για το μέλλον της λιθογραφίας, καθώς και η αναμενόμενη συνεισφορά των προσομοιώσεων στην εξέλιξη της τεχνολογίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται τα είδη και οι μέθοδοι κατασκευής μασκών. Οι μάσκες είναι το απαραίτητο εργαλείο για τις περισσότερες από τις τεχνικές λιθογραφίας και κάθε πρόδοδος στην κατασκευή τους σηματοδοτεί ένα μεγάλο βήμα στην εξέλιξη της λιθογραφίας. Η παρουσίαση αυτή ανάδεικνύει το ρόλο της ηλεκτρονικής λιθογραφίας στην κατασκευή τους.

Στα δύο πρώτα κεφάλαια, παράλληλα με την παρουσίαση των τεχνικών λιθογραφίας, επιχειρείται αναφορά και στα λιθογραφικά υλικά. Πρόκειται για πολυμερικά υλικά των οποίων η διαλυτότητα μεταβάλλεται με την πρόσπτωση ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίων. Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ακτινοευαίσθητα λιθογραφικά υλικά, και στο δεύτερο κεφάλαιο τα υλικά που χρησιμοποιούνται ειδικά στη λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων. Το λιθογραφικό αποτέλεσμα εξαρτάται τόσο από το σύστημα δέσμης ηλεκτρονίων όσο και από το είδος του λιθογραφικού υλικού. Η γνώση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα είναι απαραίτητη για τη *μοντελοποίηση* της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης.

Αναφέρονται συνοπτικά τα συστήματα μορφοποίησης αρχείων CIF και GDSII ενώ στο παράρτημα παρουσιάζονται πλήρως αυτά τα συστήματα. Σε CIF ή GDSII αρχεία αποθηκεύονται τα δεδομένα του σχεδίου που πρόκειται να εγγραφεί. Παράγονται από την πλειοψηφία των λογισμικών αυτοματοποιημένης σχεδίασης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που πωλούνται στο εμπόριο. Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων είναι απαραίτητο να μπορεί το λογισμικό να διαβάξει αρχεία αυτής της μορφής ώστε να εξάγονται τα δεδομένα σχεδίασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο εκτίθεται λεπτομερειακά η μέθοδος προσέγγισης του προβλήματος προσομοίωσης που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή. Το πρόβλημα αναλύθηκε σε υποπροβλήματα για το καθένα από τα οποία αναπτύχθηκε αντίστοιχος κώδικας. Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται σε αδρές γραμμές τα τμήματα του προσομοιωτή, η σύνδεσή τους και η έξοδος του προσομοιωτή, τα μεγέθη δηλαδή που μπορούν να μετρηθούν. Το καθένα από τα τμήματα του λογισμικού αναλύονται στα κεφάλαια 4 έως 7.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται αρχικά ο αλγόριθμος μοντελοποίησης της τροχιάς των ηλεκτρονίων κατά την κίνησή τους μέσα σε στερεό και ακολούθως ο τρόπος υπολογισμού της ενέργειας που εναποθέτουν τα ηλεκτρόνια στο λιθογραφικό υλικό κατά την έκθεση με δέσμη ηλεκτρονίων. Με αυτό το τμήμα αλγορίθμου υπολογίζεται η ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό από σημειακή μονοενεργειακή δέσμη ηλεκτρονίων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται τα τμήματα υπολογισμού της ενεργειακής εναπόθεσης από πραγματική δέσμη και υπολογισμού της ολικής ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό. Η πραγματική δέσμη ηλεκτρονίων δεν είναι σημειακή, αλλά τα ηλεκτρόνια κατά την έκθεση κατανέμονται γύρω από το σημείο εστίασής της. Για τον υπολογισμό της ενεργειακής εναπόθεσης είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η κατανομή των ηλεκτρονίων, το προφίλ δηλαδή της δέσμης. Από την ενεργειακή εναπόθεση της πραγματικής δέσμης και τα δεδομένα του σχεδίου που πρόκειται να εγγραφεί, υπολογίζεται η συνολική ενέργεια στο λιθογραφικό υλικό μετά την εγγραφή.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται η προσομοίωση της εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού. Για το λογισμικό της παρούσας διατριβής, το αποτέλεσμα, μετά την εμφάνιση, προκύπτει από την ενεργειακή εναπόθεση, με την χρήση μιας τιμής κατωφλίου για την ενέργεια. Στο ίδιο κεφάλαιο συνοπτικά απιδίδεται ο αλγόριθμος πλήρους προσομοίωσης των διαδικασιών θέρμανσης μετά την έκθεση, διάχυσης του φωτοευαισθητοποιητή και διάλυσης του πολυμερούς.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται τα τμήματα αλγορίθμου «αναζήτηση σχημάτων» και «μετρολογία». Η αναζήτηση σχημάτων είναι ένας αλγόριθμος αναζήτησης ενός τμήματος του αρχικού σχεδίου σε μια εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Για την υλοποίησή του χρησιμοποιούνται μέθοδοι επεξεργασίας εικόνας οι οποίες παρουσιάζονται διεξοδικά. Ο αλγόριθμος μετρολογίας υλοποιεί την αυτόματη μέτρηση της κρίσιμης διάστασης, της πλευρικής τραχύτητας και της διακύμανσης πλάτους γραμμής, αφενός στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αφετέρου σε πειραματικές εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Στο όγδοο κεφάλαιο εκτίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των πειραμάτων που διεξήχθησαν για τον έλεγχο του λογισμικού. Συγκρίνεται α) η ενεργειακή εναπόθεση που προκύπτει από την προσομοίωση με τα πειραματικά δεδομένα και β) η τραχύτητα σε πειραματικά αποτελέσματα με αυτήν της προσομοίωσης. Επίσης, προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την μελέτη της εξάρτησης της διακύμανσης πλάτους γραμμής από την κρίσιμη διάσταση και μελέτης των φαινομένων γειτνίασης. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται πορίσματα και προοπτικές που ανοίγονται για το μέλλον στη θεωρία και την εφαρμογή.

## Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά

1. *Electron-beam lithography simulation for the fabrication of EUV masks*, Patsis G P, Tsikrikas N, Raptis I and Glezos N *Microelectronic Engineering* 83 1148-51, 2006
2. *Pattern matching, simulation, and metrology of complex layouts fabricated by electron beam lithography*, Tsikrikas N, Drygiannakis D, Patsis G P, Raptis I, Gerardino A, Stavroulakis S and Voyiatzis E, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 25 2307-11, 2007
3. *Stochastic simulation of material and process effects on the patterning of complex layouts*, Tsikrikas N, Drygiannakis D, Patsis G P, Raptis I, Stavroulakis S and Voyiatzis E *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers* 46 6191-7, 2007
4. *Electron beam lithography simulation for the patterning of extreme ultraviolet masks*, Tsikrikas N, Patsis G P, Raptis I, Gerardino A and Quesnel E, *Japanese Journal of Applied Physics* 47 4909-12, 2008
5. *Stochastic simulation studies of molecular resists for the 32 nm technology node*, Drygiannakis D, Patsis G P, Tsikrikas N, Kokkoris G, Boudouvis A, Raptis I, Gogolides E and Argitis P, *Microelectronic Engineering* 85 949-54, 2008
6. *Realization and simulation of high aspect ratio micro/nano structures by proton beam writing*, E.Valamontes, M.Chatzychristidi, N.Tsikrikas, D.Goustouridis, I.Raptis, C. Potiriadis, J.A.vanKan, F.Watt, *Jpn. J. Appl. Phys.* 47 8600, 2008

## Συμμετοχές σε συνέδρια

1. *Combined metrology and simulation of imprinted photopolymer lines/spaces. Extraction of line-edge roughness descriptors*, G. P. Patsis, N. Tsikrikas, V. Constantoudis, and E. Gogolides, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nanomanufacturing (ISNM), Limassol, Cyprus, 11/2005.
2. *Effects of model polymer chain architectures on the self-affine characteristics of dissolving photopolymer films. Stochastic simulations*, G. P. Patsis, N. Tsikrikas, and E. Gogolides, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nanomanufacturing (ISNM), Limassol, Cyprus, 11/2005.
3. *Electron Beam lithography simulation on EUV mask blank*, N.Tsikrikas, G.P.Patsis, I.Raptis, N.Glezos, *Electron Beam Technologies Varna, Bulgaria*, 06/2006
4. *High Resolution Patterning and Simulation on Mo/Si Multilayer for EUV Masks*, N. Tsikrikas, G. P. Patsis, I. Raptis, A. Gerardino, *European Mask and Lithography Conference (EMLC)*, Dresden, Germany, 01/2008.
5. *Simulation of E-Beam Edge Acuity Effect on the Resolution and LER of Chemically Amplified Resists*, N. Tsikrikas, D. Drygiannakis, E. Valamontes, I. Raptis, G.P. Patsis, *Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC)*, Fukuoka, Japan, 10/2008.
6. *Stochastic simulation of material and process effects on the patterning of complex layouts*, Tsikrikas N, Drygiannakis D, Patsis G P, Kokkoris G, Raptis I and Gogolides E. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 6518 (part 2), art. no. 651836bv, 2007

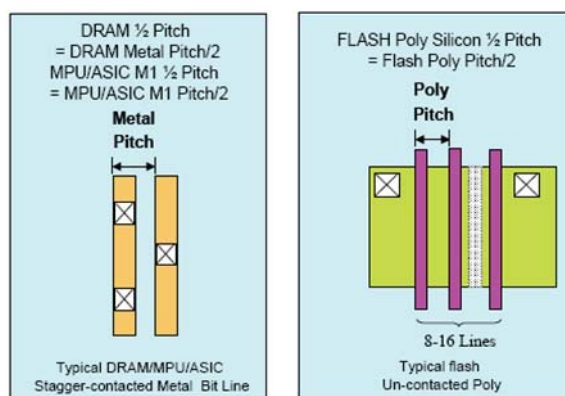


# 1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ

## 1.1 Εισαγωγή

Η έρευνα ανάπτυξης νέων μεθοδολογιών λιθογραφίας και νέων λιθογραφικών υλικών επιχειρείται με κύριο αξίωμα την ικανότητα τους να παράγουν μικρότερη κρίσιμη διάσταση, δηλαδή καλύτερη διακριτική ικανότητα με παράλληλη τήρηση χαμηλής πλευρικής τραχύτητας των λαμβανόμενων δομών με προκαθορισμένες προδιαγραφές από το Διεθνή Χάρτη Τεχνολογίας των Ημιαγωγών (ITRS - International Technology Roadmap for Semiconductors). Ο Διεθνής Χάρτης Τεχνολογίας των Ημιαγωγών (ITRS 2008) αποτιμά τις κύριες τεχνολογικές απαιτήσεις και καθοδηγεί την έρευνα θέτοντας τους στόχους της τεχνολογίας των ημιαγωγών. Την ευθύνη για τον γενικό συντονισμό και τη σύνταξη του χάρτη έχει αναλάβει Διεθνής Επιτροπή (International Roadmap Committee-IRC) απαρτιζόμενη από μέλη τις χώρες-χορηγούς (Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρωπαϊκή Ένωση, Ιαπωνία, Κορέα, Ταϊβάν).

Στις εκδόσεις του ITRS έχει υιοθετηθεί ο όρος «**τεχνολογικός κόμβος**» (**technology node**) ως ένας δείκτης προόδου της βιομηχανίας στην κλίμακα ολοκλήρωσης των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ορίστηκε ως το **ημι-διάστημα** (**half-pitch**) μεταξύ δύο γραμμών μετάλλου (Εικόνα 1.1). Ιστορικά, οι Δυναμικές Μνήμες Τυχαίας Προσπέλασης (Dynamic Random Access Memories, DRAM) είχαν το μικρότερο διάστημα γραμμών μετάλλου και καθόρισαν τους τεχνολογικούς κόμβους. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η τάση αποσύνδεσης της έννοιας τεχνολογικού κόμβου από τις μνήμες *DRAM*, αφού κυκλοφορούν ποικίλα προϊόντα που τα ίδια αποτελούν οδηγό της τεχνολογίας σε ορισμένα χαρακτηριστικά.



Εικόνα 1.1 Ορισμός του διαστήματος (Pitch) μεταξύ δύο γραμμών (πηγή: ITRS)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά οι τεχνολογίες λιθογραφίας που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, ο ρόλος των λιθογραφικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτές καθώς και οι προβλέψεις και τα standards του ITRS για το μέλλον της λιθογραφίας. Βασική από τις τεχνολογίες λιθογραφίας είναι και η λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης στη μελέτη της οποίας στοχεύει η παρούσα διατριβή.

## 1.2 Τεχνολογίες Λιθογραφίας

Η λιθογραφία, όπως ορίζεται η δημιουργία αντιγράφου ενός προτύπου σχήματος σε μια επιφάνεια - συνήθως δισκίο πυριτίου, αποτελεί κρίσιμη τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής. Βασικός παράγοντας αξιολόγησης μιας λιθογραφικής τεχνολογίας είναι η κρίσιμη διάσταση των δομών που σχηματίζονται, η μικρότερη δηλαδή διάσταση των δομών. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται οι όροι μικρολιθογραφία και νανολιθογραφία. Ο όρος μικρολιθογραφία αναφέρεται σε σχηματισμό δομών κρίσιμης διάστασης μικρότερης των 10 μικρομέτρων και ο όρος νανολιθογραφία σε σχηματισμό δομών κρίσιμης διάστασης μικρότερης των 100 νανομέτρων. Οι λιθογραφικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι όπως εκτίθενται κατωτέρω (Madou 2002):

- Οπτική λιθογραφία
- Λιθογραφία ακραίου υπεριώδους (EUV) και ακτινών-X (X-Ray)
- Λιθογραφία φορτισμένων σωματιδίων (Λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης (EBL), λιθογραφία δέσμης ιόντων (IPL), λιθογραφία δέσμης πρωτονίων (PBL))
- Μη συμβατική λιθογραφία (Scanning Probe Lithography, Soft Lithography, 3D Lithography methods, Nanoimprint lithography, Interference lithography)

Η οπτική λιθογραφία (φωτολιθογραφία) εφαρμόζεται εκτενώς στη βιομηχανία των ημιαγωγών για κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (integrated circuits) αλλά και στην κατασκευή μικροηλεκτρομηχανικών διατάξεων (Microelectromechanical systems, MEMS). Χρησιμοποιεί κατά κανόνα φωτομάσκα η οποία φέρει το σχέδιο που πρόκειται να εγγραφεί. Κύρια τεχνική για την αύξηση της διακριτικής ικανότητας της φωτολιθογραφίας είναι η υγρή λιθογραφία (Immersion lithography) όπου ανάμεσα στο τελικό φακό και στο δείγμα υπάρχει υγρό κατάλληλου δείκτη διάθλασης.

Οι EUV και X-Ray έχουν επεκτείνει την οπτική λιθογραφία σε πολύ μικρότερα μήκη κύματος με στόχο την μείωση της κρίσιμης διάστασης. Στην X-Ray λιθογραφία γίνεται χρήση μάσκας διαπερατής από την ακτινοβολία ενώ στην EUV γίνεται χρήση ανακλαστικής μάσκας για προβολή του σχεδίου στο δισκίο.

Η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική στην υλοποίηση πολύ μικρών δομών που φτάνουν ως μερικά μόνο νανόμετρα. Εμφανίζει το μειονέκτημα ότι είναι πολύ πιο αργή μέθοδος από την οπτική λιθογραφία. Εμπορικά, είναι αξιοποιήσιμη στην κατασκευή των φωτομασκών. Ως λιθογραφική μέθοδος ανήκει στην γενικότερη κατηγορία λιθογραφίας χωρίς μάσκα (Maskless lithography). Στις μεθόδους αυτές δεν χρησιμοποιείται μάσκα για τη δημιουργία του τελικού σχήματος στο υλικό. Το σχέδιο που πρόκειται να εγγραφεί υπάρχει σε ψηφιακή μορφή σε ένα υπολογιστή ο οποίος ελέγχει τη δέσμη ηλεκτρονίων καθώς αυτή σαρώνει μια επιφάνεια καλυμμένη με ένα υμένιο ευαίσθητο στη δέσμη ηλεκτρονίων.

Άλλες, πολλά υποσχόμενες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία, είναι η nanoimprint lithography, interference lithography και scanning probe lithography. Ορισμένες από αυτές τις μεθόδους έχουν τύχη ερευνητικών εφαρμογών ή εμπορικών εφαρμογών μικρής κλίμακας.

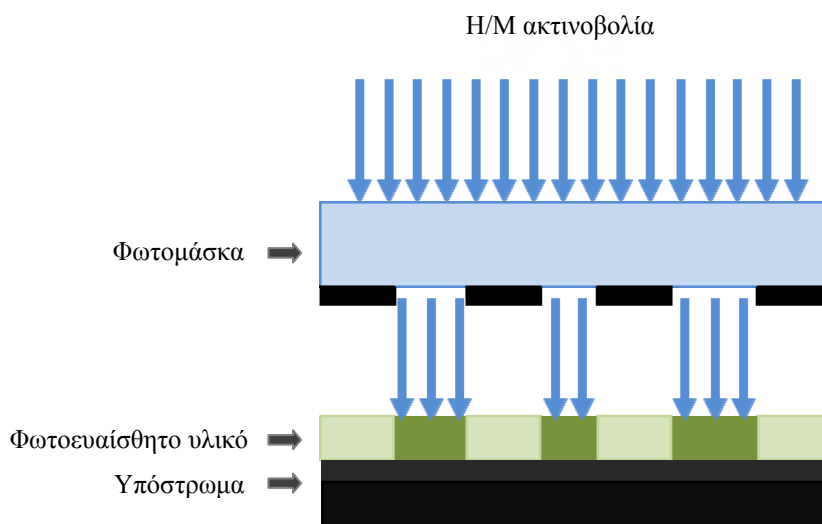
Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος Νέας γενιάς λιθογραφία (Next-Generation Lithography, NGL). Ο όρος αποδόθηκε σε λιθογραφικές τεχνικές υποψήφιες να αντικαταστήσουν την οπτική

λιθογραφία. Τέτοιες είναι η λιθογραφία ακραίου υπεριώδους, η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων, εστιασμένης δέσμης ιόντων και η λιθογραφία νανοαποτυπώματος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα εκτεθούν αναλυτικότερα οι κυριότερες μέθοδοι λιθογραφίας. Στόχος είναι να γίνουν κατανοητές οι βασικές αρχές, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και κυρίως ο ρόλος της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης, είτε ως τεχνική κατασκευής μασκών είτε ως αυτόνομη μέθοδος λιθογραφίας.

### 1.2.1 Οπτική λιθογραφία

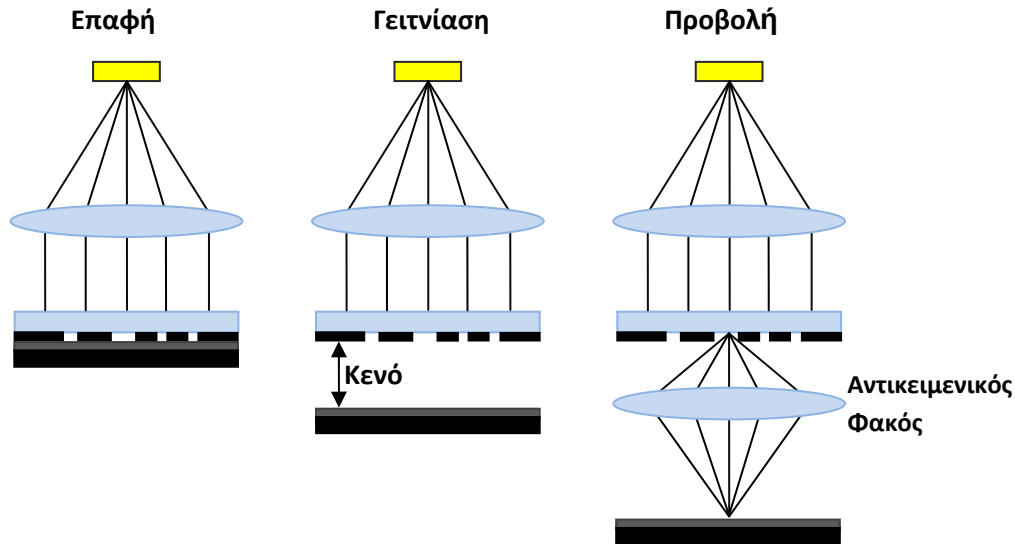
Η οπτική λιθογραφία (ή φωτολιθογραφία) είναι μια από τις μεθόδους λιθογραφίας τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι η χρήση φωτός (H/M ακτινοβολία) και μάσκας διαπερατής σε επιλεγμένες περιοχές από το φως (Εικόνα 1.2). Λόγω της ιδιότητάς τους να είναι διαπερατές από το φως και για τη διάκρισή τους από μάσκες ανακλαστικές που χρησιμοποιούνται σε άλλες μεθόδους, οι μάσκες της οπτικής λιθογραφίας ονομάζονται και φωτομάσκες. Η ακτινοβολία που χρησιμοποιείται είναι στο υπεριώδες (360-460nm, UV) ή στο βαθύ υπεριώδες (248, 193, 157nm, DUV). Το φως περνά μέσα από τις διαφανείς περιοχές της μάσκας εκθέτοντας μια επιφάνεια καλυμμένη από φωτοευαίσθητο υμένιο μεταβάλλοντας τη διαλυτότητα των εκτεθειμένων περιοχών.



Εικόνα 1.2 Οπτική λιθογραφία

Στη συνέχεια κατάλληλος διαλύτης απομακρύνει τις εκτεθειμένες ή ανέκθετες στο φως περιοχές (θετικού ή αρνητικού τόνου λιθογραφία αντίστοιχα) μεταφέροντας με τον τρόπο αυτό τα γεωμετρικά σχήματα που φέρει η μάσκα στο υμένιο. Η ακολουθούσα διαδικασία εγχάραξης μεταφέρει αυτό το γεωμετρικό σχεδιασμό στο υπόστρωμα. Η λειτουργική αξία του φωτοευαίσθητου υμενίου βρίσκεται στην αντίσταση του στην εγχάραξη. Έτσι, οι περιοχές του υποστρώματος που παραμένουν καλυμμένες από το υμένιο προστατεύονται ενώ εγχάρασσονται μόνο οι ακάλυπτες περιοχές. Η ιδιότητα των φωτοευαίσθητων υμενίων να αντιστέκονται στην εγχάραξη τους δίνει και το όνομα resists (αντιστάτες) που χρησιμοποιείται στη διεθνή βιβλιογραφία. Επειδή στις περισσότερες των περιπτώσεων το φωτοευαίσθητο υλικό είναι πολυμερές, στην ελληνική βιβλιογραφία απαντάται και με το όνομα φωτοπολυμερές. Συνοπτικά, τα βήματα ενός κύκλου σχηματοποίησης (patterning) είναι: Έκθεση, Εμφάνιση, Εγχάραξη. Για την κατασκευή ενός σύνθετου ολοκληρωμένου κυκλώματος, ένας λιθογραφικός κύκλος επαναλαμβάνεται, ανάλογα με την πολυπλοκότητα της τελικής διάταξης, έως και 50 φορές.

Για την έκθεση του φωτοευαίσθητου αντιστάτη έχουν αναπτυχθεί τρεις μέθοδοι: α) με αντιγραφή μέσω φυσικής επαφής της μάσκας με το φωτοευαίσθητο υμένιο (contact mode photolithography), β) με εκτύπωση γειννίασης (proximity printing) και γ) Προβολή της δομής της μάσκας, συνήθως με μία μείωση των δομών, (τέσσερις φορές ως επί το πλείστον) στο φωτοπολυμερές μέσω ενός οπτικού συστήματος (projection mode photolithography) (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3 Οι τρεις τύποι οπτικής λιθογραφίας

Οι μικρότερες διατάξεις που μπορούν να αναπαραχθούν με φυσική επαφή της μάσκας με το φωτοευαίσθητο υμένιο ορίζονται κυρίως από την περίθλαση του φωτός καθώς αυτό περνάει από το κενό που χωρίζει την μάσκα από το φωτοευαίσθητο υμένιο. Παρόλο που χρησιμοποιούνται σύγχρονα συστήματα εφαρμογής κενού μεταξύ της μάσκας και του υμενίου, η απόστασή τους δεν μπορεί να μειωθεί περισσότερο από 1μm για μεγάλες επιφάνειες. Η διακριτική ικανότητα της μεθόδου αυτής, λοιπόν, είναι συνήθως 0.5-0.8μm για έκθεση στο υπεριώδες. Άλλο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η καταστροφή των μικρών δομών της μάσκας λόγω της μηχανικής επαφής, όπως επίσης και η ελαφρά μετακίνηση της μάσκας κατά την δημιουργία του κενού η οποία δεν επιτρέπει την ακριβή ευθυγράμμιση.

Κατά την εκτύπωση με γειννίαση, το διάκενο μεταξύ της μάσκας και του φωτοευαίσθητου υμενίου είναι περίπου 10-25μm και έτσι αποφεύγονται τα προβλήματα που δημιουργούνται με την φυσική επαφή της μάσκας με αυτό. Η διακριτική ικανότητα, αυτών των συστημάτων είναι χειρότερη από την αντίστοιχη των συστημάτων φυσικής επαφής (περίπου 2-4μm για έκθεση στο υπεριώδες).

Η εγγραφή με προβολή της μάσκας χρησιμοποιεί οπτικό σύστημα εστίασης μεταξύ της μάσκας και του υμενίου για σμίκρυνση της εικόνας κατά τέσσερις ή πέντε φορές. Τα συστήματα αυτά προβάλλουν τη μάσκα σε μια μικρή περιοχή του δισκίου πυριτίου κάθε φορά. Διακρίνονται σε συστήματα βηματικής έκθεσης (stepper) και σάρωσης (scanner) (Xia, Rogers et al. 1999). Στα πρώτα, το φως, είτε υφίσταται ανάκλαση στους φακούς, είτε διάθλαση ή λαμβάνει χώρα συνδυασμός και των δύο φαινομένων. Η μάσκα είναι ακίνητη και προβάλλεται στο δισκίο, στη συνέχεια το δισκίο μετακινείται ώστε τελικά να εκτεθούν βήμα-βήμα όλες οι περιοχές του. Στα συστήματα σάρωσης η φωτεινή δέσμη έχει το σχήμα παραλληλογράμμου και είναι ακίνητη. Η μάσκα και το δισκίο κινούνται με λόγο ταχυτήτων ανάλογο της σμίκρυνσης που επιζητείται και η εικόνα της μάσκας σαρώνεται από τη δέσμη. Με αυτή την τεχνική, οι δομές της μάσκας είναι μεγαλύτερες από αυτές του υμενίου, η

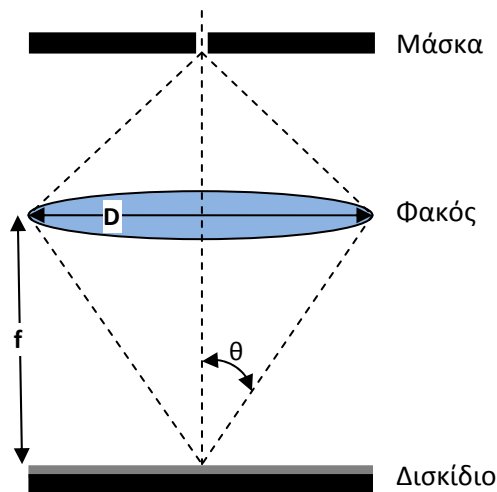


μάσκα δεν έρχεται σε επαφή με το υμένιο και η ευθυγράμμιση μάσκας-υμενίου γίνεται με μεγάλη ακρίβεια.

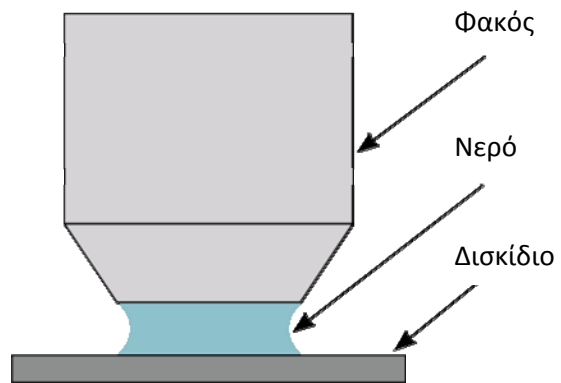
Η θεωρητική διακριτική ικανότητα ενός οπτικού συστήματος περιορίζεται από τον νόμο του Rayleigh (Wallraff and Hinsberg 1999):

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

όπου  $\lambda$ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας έκθεσης,  $k_1$ : μία παράμετρος που εξαρτάται από τη διαδικασία αποτύπωσης και τις ιδιότητες των υλικών που τυχόν χρησιμοποιούνται σε αυτήν, με τιμές μεταξύ 0.4-1, NA: το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού, το οποίο είναι το ημίτονο της γωνίας  $\theta$  που σχηματίζεται από την εστιακή απόσταση  $f$  του φακού και την ευθεία που ενώνει το άκρο του με το άκρο της εστιακής απόστασης (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4 Η γεωμετρία του συστήματος προβολής



Εικόνα 1.5 Υγρή Λιθογραφία

Το αριθμητικό άνοιγμα δίδεται από τη σχέση  $NA = n \cdot \sin\theta$ , όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου. Η διαρκής βελτίωση των οπτικών συστημάτων έχει σταδιακά αυξήσει το NA το οποίο αναμένεται να λάβει μέγιστη τιμή όχι μεγαλύτερη από 0.816

Το βάθος της εστίασης (DOF) δίνεται από την εξίσωση (Wallraff and Hinsberg 1999):

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad (1.2)$$

όπου  $k_2$ : μία παράμετρος που εξαρτάται από την διαδικασία με τιμές μεταξύ 0.5-1.0. Μεγάλες τιμές του DOF μεταφράζονται σε μεγάλη ανοχή της διαδικασίας στην απόκλιση της επιφάνειας του υποστρώματος από το επίπεδο, δηλαδή δεν υπάρχει μεγάλη διαστρέβλωση της εικόνας της μάσκας στο επίπεδο του υποστρώματος. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι, επομένως, η βελτιστοποίηση της διακριτικής ικανότητας διατηρώντας το DOF σε υψηλές τιμές.

Η μεγιστοποίηση της διακριτικής ικανότητας γίνεται με τρεις τρόπους: ο πρώτος είναι η μείωση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας έκθεσης, ο δεύτερος η αύξηση του αριθμητικού ανοίγματος

του οργάνου και ο τρίτος η μείωση του συντελεστή  $k_1$ , δηλαδή βελτιστοποίηση της διαδικασίας αποτύπωσης. Είναι φανερό, όμως, ότι μία αύξηση του  $NA$  μειώνει πολύ το  $DOF$  μιας και ο όρος εμφανίζεται εις το τετράγωνο αυτής της σχέσης. Η βελτιστοποίησης της διακριτικής ικανότητας μέσω της μείωσης του μήκους κύματος έκθεσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το  $DOF$ , όμως η αλλαγή αυτή ακολουθείται από μία σειρά προϋποθέσεων. Είναι απαραίτητη η σύνθεση κατάλληλων φωτοευαίσθητων υλικών, η δημιουργία κατάλληλων πηγών ακτινοβολίας και κατάλληλων υλικών για τα οπτικά μέρη του οργάνου, πράγμα ιδιαίτερα δύσκολο για τα μικρά μήκη κύματος.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την αύξηση του  $DOF$  και του  $R$  μέσω μίας μείωσης του  $k_1$  και/ή μίας αύξησης του  $k_2$ . Τέτοιες μέθοδοι είναι η μετατόπιση της φάσης μέσω μάσκας (phase-shifting masks), ο φωτισμός εκτός του άξονα (off-axis illumination), η διόρθωση των οπτικών φαινομένων γειτνίασης (optical proximity correction) και η χρήση κατάλληλων υλικών αποτύπωσης όπως οι χημικώς ενισχυόμενοι φωτοευαίσθητοι αντιστάτες (chemically amplified photoresists). Με συνδυασμό των τεχνικών της μετατόπισης της φάσης μέσω μάσκας και της διόρθωσης της οπτικής συγγένειας έχει επιτευχθεί δομή 100nm με ακτινοβολία μήκους κύματος 248nm.

Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για την αύξηση της λιθογραφικής ανάλυσης των οπτικών συστημάτων προβολής. Οι τεχνικές αυτές απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία με το όνομα RET (resolution enhancement techniques). Μια από αυτές είναι η υγρή λιθογραφία προβολής (Εικόνα 1.5). Είναι σχετικά νέα τεχνική, εισήχθη αρχικά το 1987 από το B. Lin, και ήδη τα τελευταία χρόνια (μετά το 2000) έχει αναγνωρισθεί η δυναμική της για βελτίωση της ανάλυσης και του  $DOF$  (Lin 1987). Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω αύξηση της ανάλυσης στα 193 nm, και αποτέλεσε το βασικό ανταγωνιστή της λιθογραφίας των 157 nm αλλά πλέον ανταγωνίζεται και τη λιθογραφία των 13 nm για τους τεχνολογικούς κόμβους των 45 και 32 nm.

Η υγρή λιθογραφία (immersion lithography) επιτρέπει το σχεδιασμό φακών πολύ υψηλού  $NA$  ( $>1$ ) με την παρεμβολή ενός υγρού υψηλού δείκτη διάθλασης  $n$  ( $n_{\text{νερό}} = 1.44$ ,  $n_{\text{λάδι}} = 1.516$  στα 193nm), μεταξύ του τελευταίου φακού του οπτικού συστήματος και του φωτοευαίσθητου υλικού. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής είναι ότι με τη χρήση του υγρού αυξάνει το ενεργό  $NA$ , ενώ με διατήρηση της υπάρχουσας τεχνολογίας οπτικών συστημάτων βελτιώνεται το συγκρινόμενο με τα αντίστοιχα “ξηρά” συστήματα της ίδιας διακριτικής ικανότητας. Αντίστοιχα, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας έκθεσης μειώνεται από το δείκτη διάθλασης του υγρού εμβάπτισης και έτσι βελτιώνεται σημαντικά η διακριτική ικανότητα, η οποία δίνεται πλέον από τον τύπο:

$$R = k * \frac{\lambda}{n' \sin\theta} \quad (1.3)$$

όπου  $n'$  είναι ο δείκτης διάθλασης του υγρού ( $> n_{\text{αέρα}} = 1$ ). Έτσι για λιθογραφία στα 193 nm και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται νερό, η δυνατότητα ανάλυσης είναι:  $193/1.44=134$  nm. Για την περαιτέρω εξέλιξη της λιθογραφίας εμβάπτισης ( $NA > 1.5$ ), απαιτείται η καινοτόμος ανάπτυξη υλικών με μεγάλο δείκτη διάθλασης. Ειδικότερα τόσο τα υγρά εμβάπτισης όσο και τα υλικά των φακών πρέπει να έχουν δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από 1.65 ενώ επιπλέον απαιτούνται φωτοευαίσθητα υλικά με ακόμα υψηλότερο δείκτη διάθλασης ( $>1.8$ ). Όλα τα υλικά πρέπει επιπλέον να έχουν κατάλληλη απορρόφηση στο αντίστοιχο μήκος κύματος έκθεσης.

### 1.2.2 Λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης

Η λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης είναι μια μέθοδος δημιουργίας δομών σε υμένιο με τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων. Η δέσμη σαρώνει μια επιφάνεια καλυμμένη από το λιθογραφικό υμένιο (Εικόνα 1.6). Το υμένιο αυτό έχει τις ιδιότητες των λιθογραφικών υλικών της οπτικής λιθογραφίας, είναι δηλαδή ευαίσθητο στη δέσμη ηλεκτρονίων και ανθίσταται στην εγχάραξη του υποστρώματος. Η έκθεση μεταβάλλει τη διαλυτότητά του επιτρέποντας την επιλεκτική απομάκρυνσή είτε των εκτεθειμένων περιοχών (θετικού τόνου λιθογραφία) είτε των ανέκθετων περιοχών (αρνητικού τόνου λιθογραφία). Οι δομές που δημιουργούνται στο λιθογραφικό υμένιο μεταφέρονται με τεχνικές εγχάραξης στο υπόστρωμα.

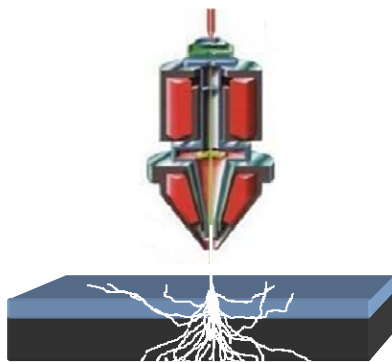
Η δημιουργία του σχήματος στο λιθογραφικό υλικό γίνεται με καθοδήγηση της δέσμης από υπολογιστή στον οποίο υπάρχει το σχέδιο που πρόκειται να εγγραφεί. Είναι μία από τις μεθόδους λιθογραφίας χωρίς μάσκα (Maskless lithography, ML). Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η υψηλή ανάλυση αφού δεν υπάρχει το όριο του μήκους κύματος της οπτικής λιθογραφίας. Η δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να εστιαστεί σε διάμετρο μερικών nm και να κατευθυνθεί με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών ή ηλεκτροστατικών φακών. Αυτό είναι και το μεγάλο πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών αφού μπορούν να γράψουν σχέδια στο λιθογραφικό υμένιο με μεγάλη ανάλυση. Το μειονέκτημα είναι ο μεγάλος χρόνος εγγραφής.

Εργαλεία που χρησιμοποιούν εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία των ημιαγωγών για πολλά χρόνια. Ο ρόλος τους φαίνεται στην Εικόνα 1.7. Το αρχικό σχέδιο του ολοκληρωμένου κυκλώματος δημιουργείται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού σχεδίασης (computer aided design system, CAD). Τα δεδομένα που προκύπτουν υφίστανται επεξεργασία και μορφοποιούνται ώστε να μπορούν να διαβαστούν από το σύστημα λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης. Στη συνέχεια, το σύστημα εγγραφής γράφει το τελικό σχέδιο.

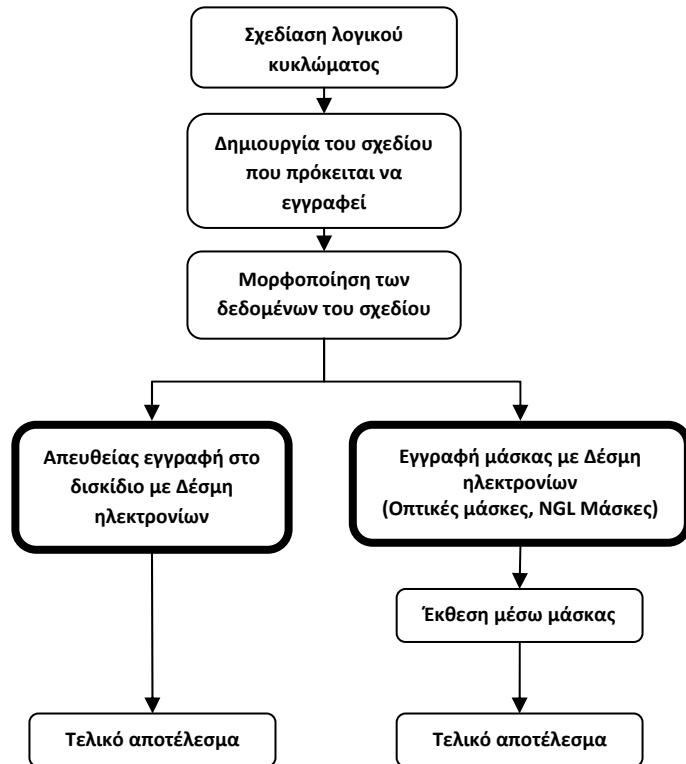
Ένα σύστημα εγγραφής ηλεκτρονικής δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δυο τρόπους:

- Εγγραφή μάσκας λιθογραφίας
- Κατευθείαν εγγραφή στο ημιαγωγικό υπόστρωμα

Στην οπτική λιθογραφία με προβολή όπου το σχέδιο που φέρει η μάσκα σμικρύνεται 4 έως και 10 φορές οι απαιτήσεις για μικρές δομές στη μάσκα δεν είναι τόσο μεγάλες όσο στην απευθείας εγγραφή και στην λιθογραφία νανοαποτυπώματος που είναι τεχνολογίες 1X. Στη λιθογραφία NGL αντί της κλασικής φωτομάσκας γυαλιού χρησιμοποιούνται άλλου τύπου μάσκες, λεπτές μεμβράνες ή ανακλαστικές μάσκες με σύνθετα υποστρώματα. Στις παραπάνω περιπτώσεις απαιτούνται μάσκες πολύ υψηλής ακρίβειας. Τα συστήματα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων είναι ο μόνος δρόμος για την κατασκευή μασκών τόσο υψηλών απαιτήσεων.



Εικόνα 1.6 Εγγραφή με δέσμη ηλεκτρονίων

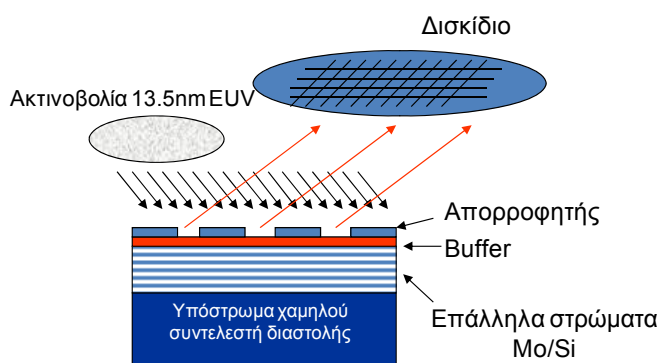


Εικόνα 1.7 Ο ρόλος της λιθογραφίας δέσμης ηλεκτρονίων

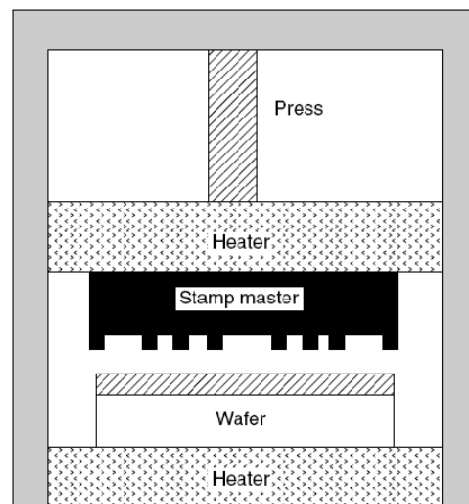
### 1.2.3 EUV λιθογραφία

Η λιθογραφία ακραίου υπεριώδους (Extreme Ultra Violet) ανήκει στην κατηγορία λιθογραφία νέας γενιάς. Για την έκθεση του φωτοευαίσθητου λιθογραφικού υλικού χρησιμοποιείται ακτινοβολία μήκους κύματος 13.5 nm (Kim, Chang et al. 2006).

Επειδή όλα τα υλικά απορροφούν σε αυτό το μήκος κύματος, η έκθεση γίνεται σε κενό και όλα τα οπτικά μέρη είναι ανακλαστικά. Η μάσκα είναι και αυτή ανακλαστική αποτελούμενη από μια πολυστρωματική στρώση Mo/Si η οποία ανακλά την EUV ακτινοβολία λόγω ενισχυτικής συμβολής από τα επιμέρους στρώματα (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8 Ανακλαστική EUV μάσκα



Εικόνα 1.9 Σύστημα λιθογραφίας νανοαποτυπώματος (Franssila 2004)

Η ανάκλαση είναι μερική και κάθε ένα από τα υποστρώματα απορροφά περίπου το 30% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Χωρίς χρήση μάσκας, η EUV ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λιθογραφία συμβολής (Interference lithography) για δημιουργία περιοδικών δομών μόνο (Solak, David et al. 2003).

Λόγω της μεγάλης απορροφητικότητας των οπτικών (96% περίπου της ακτινοβολίας της πηγής (Chen 2003)) οι πηγές πρέπει να είναι πολύ ισχυρές. Αυτό σε συνδυασμό με την μικρή αντοχή των πηγών (Komori, Soumagne et al. 2004) αποτελεί ένα από τα αρνητικά χαρακτηριστικά της EUV λιθογραφίας. Η ταχύτητα παραγωγής περιορίζεται σημαντικά λόγω της ανάγκης υψηλού κενού σε συνδυασμό με την ισχύ της πηγής. Έτσι η ταχύτητα παραγωγής από την είσοδο ως την έξοδο των δισκιδίων στο σύστημα εγγραφής περιορίζεται σε μερικά δισκίδια την ώρα (Brunton, Cashmore et al. 2004). Η έκθεση εκτός άξονα (σε γωνία περίπου 6 μοιρών L. Peters, στην πολυστρωματική μάσκα δημιουργεί φαινόμενα σκιάς τα οποία παραμορφώνουν το εγγραφόμενο σχήμα (Sugawara, Chiba et al. 2003).

Τα φωτόνια των 13nm με την είσοδό τους στο φωτοευαίσθητο υλικό δημιουργούν με ιονισμούς δευτερογενή ηλεκτρόνια ενέργειας μερικών δεκάδων eV (Henke, Smith et al. 1977). Μετά από μήκος ελεύθερης διαδρομής μερικών δεκάδων νανομέτρων προκαλούν τις επιθυμητές χημικές αντιδράσεις. Η μεγάλη αυτή ελεύθερη διαδρομή οφείλεται στον μεγάλο ελεύθερο όγκο των πολυμερών. (Shimizu and Sato 1996) και αποτελεί τον κύριο παράγοντα μείωσης της διακριτικής ικανότητας της μεθόδου (Ekinici, Solak et al. 2007). Εντονότερο είναι το φαινόμενο σε χημικώς ενισχυόμενα πολυμερή στα οποία τα δευτερογενή ηλεκτρόνια πρέπει να μειώσουν πολύ την ενέργειά τους πριν αρχίσουν οι χημικές αντιδράσεις φωτοενίσχυσης (Kozawa, Nagahara et al. 1997; Kozawa, Saeki et al. 2004). Το πάχος του φωτοευαίσθητου υμενίου πρέπει να είναι πολύ μικρό λόγω της μεγάλης απορρόφησης της EUV ακτινοβολίας και της εμπροσθοσκέδασης των δευτερογενών ηλεκτρονίων (Solak, David et al. 2003) αλλά και του προβλήματος κατάρρευσης πυκνών δομών μεγάλου ύψους και μικρής κρίσιμης διάστασης.

#### 1.2.4 Λιθογραφία Νανοαποτυπώματος

Η λιθογραφία νανοαποτυπώματος (Nanoimprint lithography) επινοήθηκε από τον Stephen Chou. (Chou, Krauss et al. 1996). Η λιθογραφία νανοαποτυπώματος χρησιμοποιείται για την αποτύπωση

μιας ανάγλυφης επιφάνειας από ένα σκληρό πρότυπο (π.χ. νικέλιο ή οξειδίο του πυριτίου) σε ένα θερμοπλαστικό πολυμερές (π.χ. PMMA, πολυκαρβονύλια) το οποίο έχει μαλακώσει μέσω θέρμανσης (Rotting, Ropke et al. 2002) και φυσικά είναι τεχνολογία 1X. (Εικόνα 1.9)

Ένα τυπικό παράδειγμα αυτής της μεθόδου είναι η παραγωγή ανατύπων ολογραμμάτων και η κατασκευή CD. Αυτή η τεχνική γίνεται σε δύο βήματα: την αποτύπωση και την μεταφορά της δομής (Xia, Rogers et al. 1999). Στο βήμα της αποτύπωσης χρησιμοποιείται η μήτρα με τις νανοδομές για την παραμόρφωση, μέσω μηχανικής πίεσης, ενός λεπτού φωτοπολυμερικού υμενίου ή ενός ενεργού υλικού το οποίο εναποτέθηκε στην επιφάνεια (Chou, Krauss et al. 1996). Στο βήμα της μεταφοράς της δομής γίνεται ανισοτροπική εγχάραξη των υπολειμμάτων του φωτοπολυμερικού υμενίου στην περιοχή της συμπίεσης και την μεταφορά της δομής σε ολόκληρο το φωτοπολυμερές. Το φωτοπολυμερές θερμαίνεται πάνω από το  $T_g$  κατά την διάρκεια της νανοαποτύπωσης και στην συνέχεια ψύχεται κάτω από το  $T_g$  για να διαχωριστεί από την μήτρα (Mirkin and Rogers 2001).

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ανεξαρτησία από την ακτινοβολία οπότε και δεν περιορίζεται από την διάθλαση του φωτός, από την σκέδαση ή από την αλληλεπίδραση του φωτός με το φωτοπολυμερικό υμένιο. Επίσης, δεν εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό του υποστρώματος. Είναι κυρίως μία φυσική διαδικασία παρά μία χημική διαδικασία. Η ίδια μήτρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές (>30). Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι για πολύ μικρές κολώνες (< 45nm) μερικές δομές καταστρέφονται κατά την απομάκρυνση της μήτρας (Chou, Krauss et al. 1997). Επίσης επειδή είναι λιθογραφία 1X απαιτείται μάσκα με δομές ίσης διάστασης με αυτές που θα αποτυπωθούν γεγονός που ανεβάζει δραματικά το κόστος των μασκών σε αντίθεση με την οπτική λιθογραφία που λόγω της σμίκρυνσης οι απαιτήσεις για τις μάσκες είναι σαφώς χαμηλότερες. Η διακριτική ικανότητα της μεθόδου εξαρτάται από την μηχανική αντοχή της μήτρας και του πολυμερούς.

Οι εφαρμογές αυτής της μεθόδου είναι πολλές. Μερικές από αυτές είναι η κατασκευή ηλεκτρονικών, μαγνητικών και βιολογικών νανοκατασκευών όπως π.χ.: νανοτρανζίστορ πυριτίου, φωτοανιχνευτές υψηλής ταχύτητας, μαγνητικές νανοδομές, οργανικά υλικά φωτοεκπομπής κ.α.

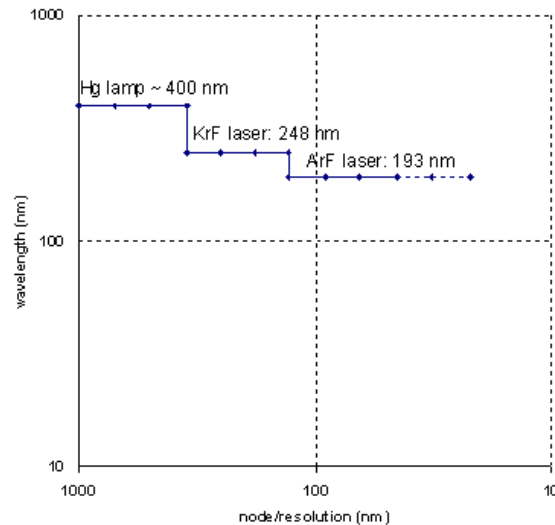
### 1.3 Η εξέλιξη των τεχνολογιών λιθογραφίας

Στην Εικόνα 1.10 παριστάνεται η εξέλιξη του χρησιμοποιούμενου μήκους κύματος της οπτικής λιθογραφίας. Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνεται συγκριτικά η κρίσιμη διάσταση που έχει επιτευχθεί ή αναμένεται να επιτευχθεί στο μέλλον. Για την εξέλιξη των διαφόρων τεχνολογιών λιθογραφίας μπορούμε να παρατηρήσουμε σε γενικές γραμμές τα εξής:

Η λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης ήταν δημοφιλέστερη στη δεκαετία του 70 αλλά τις δεκαετίες 80 και 90 η λιθογραφία ακτινών X φάνηκε να κερδίζει έδαφος στη βιομηχανία. Από τα μέσα της δεκαετίας του 90 έως της δεκαετίας του 2000 η EUV λιθογραφία αποτέλεσε την υπόσχεση για το μέλλον χωρίς να μπορέσει να εισαχθεί στη μαζική παραγωγή λόγω των τεχνικών δυσκολιών της. Τελευταία κερδίζει έδαφος η λιθογραφία νανοαποτυπώματος λόγω της ευκολίας και του χαμηλού κόστους αλλά για ειδικές εφαρμογές, όπως LED, σκληροί δίσκοι και μικρορευστά.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η εφαρμογή ή όχι μιας τεχνικής στη μαζική παραγωγή δεν εξαρτάται μόνο από τις δυνατότητές της αλλά από την ευκολία εφαρμογής της νέας τεχνολογίας σε συνδυασμό με το κόστος προσαρμογής σε αυτή και τέλος την ταχύτητα παραγωγής. Η περιορισμένη χρήση της λιθογραφίας δέσμης ηλεκτρονίων και αυτής του νανοαποτυπώματος οφείλεται στο χαμηλό ρυθμό

παραγωγής που μπορούν να δώσουν, ενώ η μη εξάπλωση έως σήμερα της EUV και X-ray λιθογραφίας οφείλεται στο υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τέτοιων εργαλείων.



Εικόνα 1.10 Γραφική απεικόνιση του μήκους κύματος σε συνάρτηση με την κρίσιμη διάσταση (Semiconductor\_International 2008)

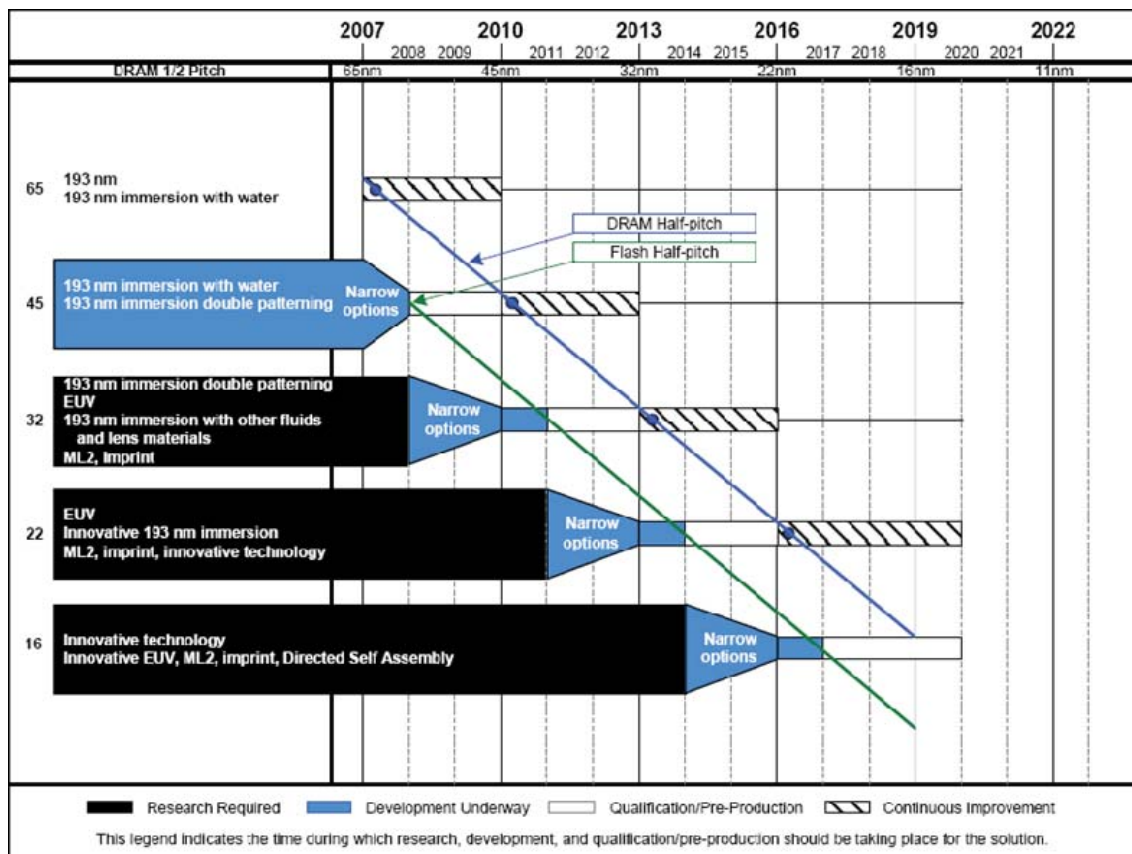
Η φωτολιθογραφία με τις μεθόδους αύξησης της διακριτικής ικανότητας που έχουν εφαρμοστεί αποτελεί πάντα έναν ικανό αντίπαλο αυτών των NGL τεχνικών, δεδομένου ότι η βιομηχανία είναι ήδη προσαρμοσμένη σε αυτή. Για το λόγο αυτό, η βιομηχανία έχει εστιάσει τις προσπάθειές της σε τεχνικές double patterning technology (DPT) σαν ένα τρόπο να παρακάμψει το φραγμό της θεωρητικής διακριτικής ικανότητας του Rayleigh (παράγραφος 1.2.1).

Η IBM έχει προτείνει ως λύση την τεχνική DPT ώστε να κατασκευάσει δομές κρίσιμης διάστασης 32 nm χρησιμοποιώντας εργαλεία της γενιάς των 45nm (Lai, Burns et al. 2008) με στόχο την επέκτασή τους και για κρίσιμη διάσταση 22 nm και ήδη υπάρχει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα σε αυτή την κατεύθυνση τόσο από ερευνητικούς φορείς αλλά κυρίως από εταιρείες

## 1.4 Το μέλλον των τεχνολογιών λιθογραφίας

Σύμφωνα με το ITRS 2008, η οπτική λιθογραφία μήκους κύματος 193 nm είναι η βασική τεχνολογία για DRAM 45 nm half pitch. Η υλοποίηση δομών κρίσιμης διάστασης 32nm γίνεται με 193i-DE (193nm immersion double exposure). Οι τεχνολογίες EUV, ML2 και imprint αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στη μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κρίσιμης διάστασης 22nm half pitch. Η υγρή λιθογραφία θα είναι σε θέση να επεκτείνει τις δυνατότητες της οπτικής λιθογραφίας στα 32 nm half pitch αν στο μεταξύ αναπτυχθούν φακοί και υγρά μεγαλύτερου δείκτη διάθλασης.

Η έρευνα προσανατολίζεται επίσης στο σπάσιμο ενός σχεδίου σε δύο μάσκες, κάθε μία από τις οποίες έχει ελάχιστο half pitch το διπλάσιο από αυτό που πρόκειται να εκτυπωθεί στο δισκίδιο. Αυτή η διπλής μάσκας τεχνική έκθεσης (DPT) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ώστε να επεκτείνει την υγρή λιθογραφία 193 nm πέρα από το όριο των DRAM 32 nm half pitch αν αναπτυχθούν λιθογραφικά υλικά κατάλληλα για διπλή έκθεση και ικανοποιητικό mask alignment. Θα πρέπει να αναπτυχθεί επίσης λογισμικό για τον κατάλληλο διαχωρισμό του σχεδίου σε δύο μάσκες αλλά και η χρήση των δύο μασκών θα πρέπει να είναι οικονομικότερη από τις εναλλακτικές τεχνολογίες.



Εικόνα 1.11 Τεχνολογία που αναμένεται να εφαρμοστεί σε κάθε τεχνολογικό κόμβο (πηγή ITRS 2007)

Από τις πιθανές εναλλακτικές της οπτικής λιθογραφίας τεχνολογίες είναι οι EUV, maskless και imprint λιθογραφία. Η EUV λιθογραφία φαίνεται να είναι η πιο πιθανή για 22 nm half pitch. Η maskless λιθογραφία έχει εφαρμοστεί στην ανάπτυξη πρωτότυπων διατάξεων (π.χ. νέες αρχιτεκτονικές τρανζίστορ) και για μικρή παραγωγή ειδικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (application specific integrated circuit, ASIC) αλλά η χρήση της ενδέχεται να επεκταθεί. Οι τεχνολογίες κατευθείαν εγγραφής χωρίς τη χρήση μάσκας είναι δυνατό να δώσουν στο μέλλον μεγαλύτερη παραγωγή με μειωμένο κόστος και χρόνο παραγωγής.

Η λιθογραφία χωρίς τη χρήση μάσκας για εφαρμογές πέραν της πρωτοτυποποίησης βρίσκονται για την ώρα σε ερευνητικό στάδιο και θα χρειαστεί να ξεπεραστούν πολλά εμπόδια ώστε να εφαρμοστεί στη βιομηχανία των ημιαγωγών. Η λιθογραφία νανοαποτυπώματος είναι λύση χαμηλού κόστους αλλά πρέπει να λυθούν πολλά προβλήματα συμπεριλαμβανομένων των δυσκολιών που σχετίζονται με τα IX templates, ατέλειες, template lifetime, και overlay.

Δεν είναι ξεκάθαρο αν κάποια από τις υπάρχουσες τεχνολογίες είναι κατάλληλη για DRAM 16 nm half pitch και κάτω. Υπάρχει ανάγκη για καινοτόμες τεχνολογίες στην περιοχή αυτή. Μια εφικτή λύση φαίνεται να είναι η κατευθυνόμενη αυτό-οργάνωση (directed self-assembly) όπου η μοριακή δομή του υλικού που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση καθορίζει το μέγεθος και τη μορφή των σχηματιζόμενων μορφών.



## 1.5 Φωτοευαίσθητα λιθογραφικά υλικά

Τα φωτοευαίσθητα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στη λιθογραφία είναι πολυμερή, ολιγομερή και μοριακά. Η βασική ιδιότητά τους είναι να μεταβάλλουν τη διαλυτότητά τους σε κάποιο διαλύτη (οργανικό ή ανόργανο) όταν εκτίθενται σε ακτινοβολία μεταβάλλοντας τις φυσικές ή χημικές τους ιδιότητες. Ως προς τη μεταβολή της διαλυτότητάς τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Θετικού τόνου υλικά, των οποίων η διαλυτότητα αυξάνει μετά την έκθεσή τους, και αρνητικού τόνου υλικά, των οποίων η διαλυτότητα ελαττώνεται. Ως προς τους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την έκθεσή τους τα υλικά διακρίνονται στα συμβατικά λιθογραφικά υλικά και στα υλικά μηχανισμού χημικής ενίσχυσης. Οι βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό λιθογραφικών υλικών είναι:

- Σχηματισμός ομοιόμορφων υμενίων με μηχανική επίστρωση (spin-coating)
- Απορρόφηση ακτινοβολίας ομοιόμορφα σε όλο το πάχος υμενίου ώστε η ακτινοβολία να μην απορροφάται μόνο από το επιφανειακό στρώμα
- Φωτοχημική αλλαγή διαλυτότητας με γρήγορη απόκριση στην ακτινοβολία (μεγάλη ευαισθησία)
- Μεγάλο εύρος δόσης
- Αντίσταση στην εγχάραξη με πλάσμα
- Δυνατότητα υψηλής ανάλυσης (διακριτικής ικανότητας)
- Μεγάλη ανοχή στις αλλαγές της διεργασίας (process latitude)
- Κατάλληλες θερμικές ιδιότητες (θερμική σταθερότητα του υμενίου και μεγάλη σχετικά Tg)
- Ικανοποιητική πρόσφυση στο υπόστρωμα
- Μεγάλη τιμή αντίθεσης

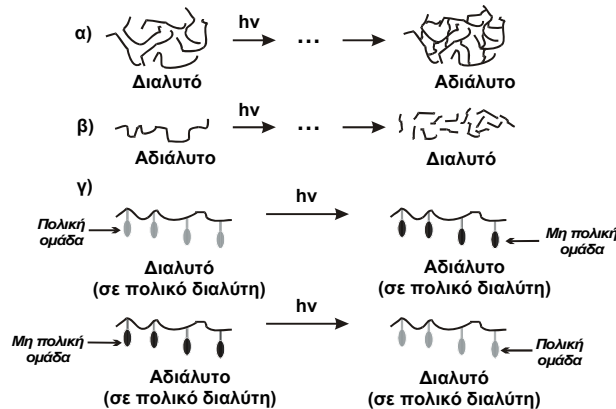
Επιπλέον, για τα υλικά μηχανισμού χημικής ενίσχυσης, τη λιθογραφική απόδοση καθορίζουν η διάχυση του οξέος στο υμένιο και το μήκος διάχυσης. Στην περίπτωση ανάλυσης δομών κρίσιμης διάστασης της τάξης των <math>< 50 \text{ nm}</math> η διάχυση είναι κρίσιμη διότι επηρεάζει την πλευρική τραχύτητα. Τέλος η διάχυση πρέπει να αντιμετωπιστεί σε συνδυασμό με τη μορφολογία ενός υμενίου δηλαδή την πιθανότητα να υπάρχει σε αυτό αυτοοργάνωση ή μικροφασικός διαχωρισμός. Η ύπαρξη τέτοιων φαινομένων καθιστά τη διάχυση ανομοιόμορφη και συνεπώς προκαλείται ανομοιογένεια στην περαιτέρω συμπεριφορά του υλικού στο στάδιο της εμφάνισης κατά το οποίο, η υπολανθάνουσα εικόνα μετατρέπεται σε πραγματική ανάγλυφη δομή.

Η αλλαγή της διαλυτότητας μπορεί να γίνει με έναν από τους παρακάτω τρόπους (Εικόνα 1.12, (Αργεΐτης 2002)) ανάλογα με τον τόνο (θητική – αρνητική) της ρητίνης:

- Δημιουργία σταυροδεσμών,
- Διάσπαση της βασικής αλυσίδας του πολυμερούς,

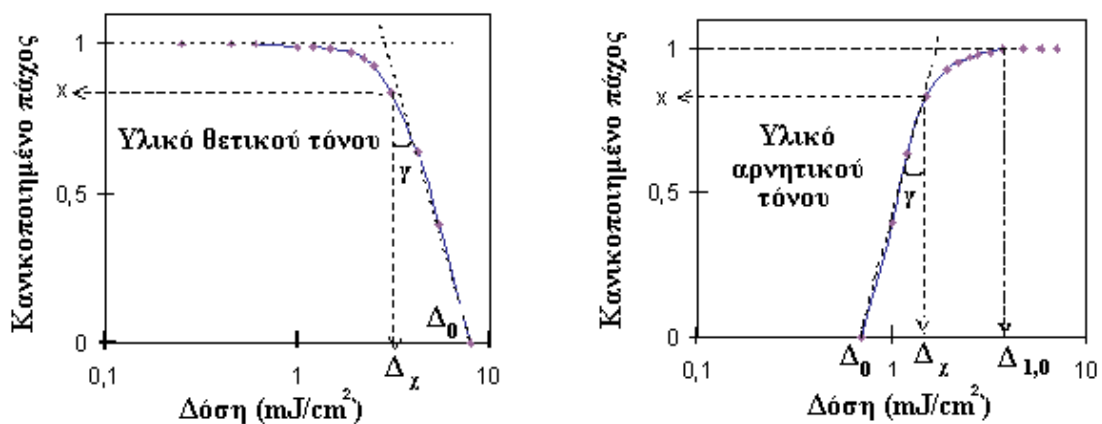
- Αλλαγή της υδροφιλικότητας μιας πλευρικής ομάδας του πολυμερούς (από πολική σε μη πολική, ή το αντίστροφο)

Η δημιουργία σταυροδεσμών, δηλαδή η ένωση των πολυμερικών αλυσίδων είτε μέσω διασταυρωτών ή με απευθείας ένωση ομάδων του πολυμερούς, οδηγεί σε απεικόνιση αρνητικού τόνου. Η διάσπαση των αλυσίδων του πολυμερούς γίνεται είτε λόγω της επίδρασης της ακτινοβολίας στο ίδιο το πολυμερές είτε μέσω της επίδρασης ουσιών που παράγονται από τους φωτοευαισθητοποιητές και οδηγούν σε απεικόνιση θετικού τόνου. Η αλλαγή της υδροφιλικότητας μιας πλευρικής ομάδας μπορεί να οδηγήσει τόσο σε θετικού τόνου όσο και σε αρνητικού τόνου απεικόνιση, αναλόγως του εμφανιστή που θα χρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 1.12 Μηχανισμοί αλλαγής διαλυτότητας φωτοπολυμερικών υλικών λιθογραφίας. α) Δημιουργία σταυροδεσμών, β) Διάσπαση αλυσίδων του πολυμερούς, γ) Αλλαγή της υδροφιλικότητας της πλευρικής ομάδας. (Αργεΐτης 2002)

Η λιθογραφική συμπεριφορά των υλικών τόσο θετικού όσο και αρνητικού τόνου απεικόνισης χαρακτηρίζεται από τις καμπύλες ευαισθησίας ή αντίθεσης (Εικόνα 1.13). Οι καμπύλες αυτές δίνουν το κανονικοποιημένο πάχος του υμενίου για διάφορες δόσεις έκθεσης, δηλ. το πάχος του υμενίου μετά την εμφάνιση διαιρεμένο με το αρχικό του πάχος, συναρτήσει της δόσης έκθεσης, η οποία απεικονίζεται σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 1.13 Καμπύλες αντίθεσης λιθογραφικών υλικών (α) θετικού τόνου και (β) αρνητικού τόνου. (Αργεΐτης 2002)

Από τις καμπύλες αντίθεσης προκύπτουν οι δόσεις που χαρακτηρίζουν την ευαισθησία των υλικών. Για υλικά θετικού τόνου, λιθογραφική ευαισθησία  $\Delta_0$  είναι η δόση που απαιτείται για την πλήρη διάλυσή τους και λιθογραφική ευαισθησία  $\Delta_x$  η δόση που απαιτείται για τη διαλυτοποίηση ενός ποσοστού  $x$  του πολυμερικού υμενίου (π.χ. 50-60%). Αντίστοιχα, για υλικά αρνητικού τόνου,

κρίσιμες τιμές είναι η δόση που απαιτείται για την πλήρη αδιαλυτοποίηση των υλικών αυτών ( $\Delta_{1.0}$ ) και η δόση από την οποία αρχίζει η αδιαλυτοποίησή τους ( $\Delta_0$ ).  $\Delta_x$  είναι η δόση για μερική αδιαλυτοποίηση κατά ένα ποσοστό  $x$ , π.χ. 70-90% του υμενίου ( $\Delta_{0.7}$ - $\Delta_{0.9}$ ). Υπάρχει περίπτωση να ληφθούν τιμές κανονικοποιημένου πάχους μεγαλύτερες της μονάδας λόγω φαινομένων διόγκωσης, εγκλωβισμού δηλαδή στο υμένιο μορίων διαλύτη κατά την εμφάνιση ή αύξησης του ελεύθερου όγκου.

Από τις καμπύλες ευαισθησίας των φωτοευαίσθητων υλικών λαμβάνεται επίσης η τιμή της αντίθεσης ( $\gamma$ ), η οποία χαρακτηρίζει τη διακριτική ικανότητα των υλικών. Η αντίθεση είναι η κλίση της καμπύλης ευαισθησίας, η οποία υπολογίζεται από τις σχέσεις (1.4) για τα πολυμερικά υλικά θετικού και αρνητικού τόνου, αντίστοιχα.

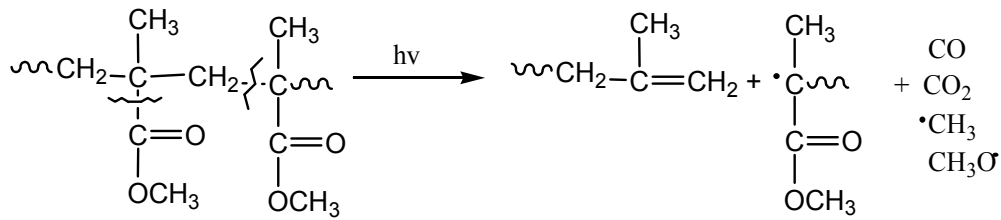
$$\gamma = \begin{cases} \frac{x}{\log\left(\frac{\Delta_0}{\Delta_x}\right)}, & \text{θετικού τόνου υλικά} \\ \frac{x}{\log\left(\frac{\Delta_x}{\Delta_0}\right)}, & \text{αρνητικού τόνου υλικά} \end{cases} \quad (1.4)$$

Στη λιθογραφία προτιμούνται τα πολυμερικά υλικά με μεγάλη αντίθεση γιατί αυξάνοντας την αντίθεση των υλικών μειώνεται η επίδραση των φαινομένων περίθλασης του φωτός και έτσι αυξάνεται η διακριτική τους ικανότητα. Περιοχές στις άκρες της δομής οι οποίες πρέπει να εκτεθούν, λαμβάνουν μικρότερη δόση από την επιθυμητή, ενώ περιοχές οι οποίες δεν πρέπει να εκτεθούν, λαμβάνουν σημαντική δόση ακτινοβολίας. Δημιουργούνται δηλαδή περιοχές στις οποίες, π.χ. σε ένα υλικό θετικού τόνου, μέρος του υλικού θα παραμείνει αδιάλυτο (ενώ δεν θα έπρεπε), ή περιοχές στις οποίες θα ελαττωθεί το πάχος τους (ενώ θα έπρεπε να παραμείνει ανέπαφο), με αποτέλεσμα να μην μεταφέρεται κατά την εγχάραξη πιστά το σχήμα στο υπόστρωμα. Το πρόβλημα αυτό, που εντοπίζεται στα όρια μεταξύ των εκτεθειμένων και μη εκτεθειμένων περιοχών, καθίσταται εντονότερο όσο μικραίνουν οι δομές που πρόκειται να κατασκευασθούν.

### 1.5.1 Συμβατικά υλικά λιθογραφίας

Συμβατικά λιθογραφικά υλικά είναι τα φωτοευαίσθητα υλικά στα οποία δεν απαιτείται χημική ενίσχυση. Είναι τα πρώτα που εισήχθησαν στη λιθογραφία και χρησιμοποιούνται συνήθως για έκθεση σε μήκη κύματος από 350-450nm. Το κλασικότερο υλικό για λιθογραφία θετικού τόνου σε αυτή τη περιοχή του φάσματος είναι η νεολάκα- διαζωναφθοκινόνης (novolac-DiazonaphthoQuinoNe, DNQ). Το αρχικά αδιάλυτο σε βάση συστατικό της DNQ αναστέλλει τη διάλυση της νεολάκας και με έκθεση μετατρέπεται σε διαλυτό συστατικό που επιταχύνει τη διάλυση της πολυμερικής μήτρας. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί έναν τρόπο αλλαγής πολικότητας (διαλυτότητας) σε θετικού τόνου υλικά.

Το πλέον αντιπροσωπευτικό υλικό θετικού τόνου με αλλαγή διαλυτότητας μέσω διάσπασης της κύριας αλυσίδας του πολυμερούς είναι ο πολυ(μεθακρυλικός-μεθυλεστέρας) (Εικόνα 1.14). Το συγκεκριμένο υλικό απαρτίζεται από ένα και μόνο συστατικό, δηλαδή το πολυμερές αυτό έχει και το ρόλο του φωτοευαίσθητοποιητή. Κατά την έκθεση στο βαθύ υπεριώδες, το καρβονύλιο του πολυμερούς απορροφά την ακτινοβολία και καταρχύν διασπάται ο α δεσμός C-C ως προς το καρβονύλιο. Το υλικό αυτό προσφέρει μεγάλη διακριτική ικανότητα, όμως παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία (μεγάλοι χρόνοι έκθεσης) και περιορισμένη αντοχή στην εγχάραξη με πλάσμα.



Εικόνα 1.14 Φωτοδιάσπαση της κύριας αλυσίδας του PMMA (ομολυτική σχάση δεσμών). (Αργεΐτης 2002)

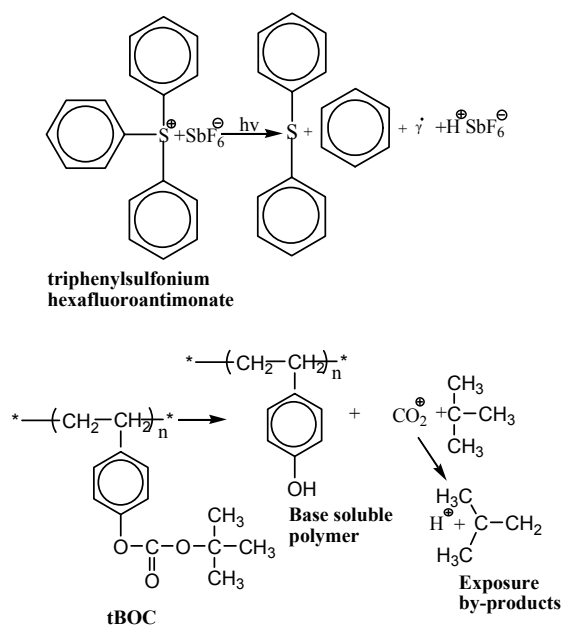
Χαρακτηριστικά υλικά αρνητικού τόνου στα οποία δημιουργούνται σταυροδεσμοί είναι υλικά τα οποία βασίζονται στη φωτοχημεία των αζιδίων (Moreau 1988)-

Το κυριότερο μειονέκτημα των συμβατικών ρητινών αρνητικού τόνου είναι η διόγκωση των δομών που παρουσιάζεται λόγω του εμφανιστή (οργανικός διαλύτης) ο οποίος παρόλο που δεν διαλύει τις εκτεθειμένες περιοχές, εισέρχεται σε κάποιο βαθμό σε αυτές. Το πρόβλημα της διόγκωσης συνήθως αντιμετωπίζεται σε νεότερα υλικά με τη χρήση υδατικών εμφανιστών (διαλύματα βάσης) ή και με την αύξηση της πυκνότητας των σταυροδεσμών.

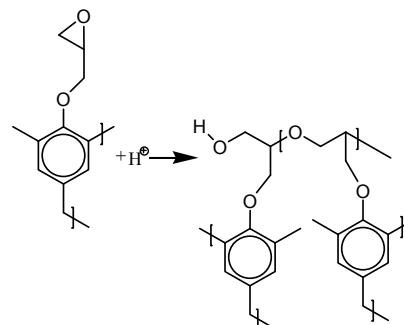
### 1.5.2 Υλικά Μηχανισμού Χημικής Ενίσχυσης

Τα υλικά μηχανισμού χημικής ενίσχυσης πρωτοεμφανίστηκαν το 1982 από τους Ito και Willson. (Ito and Willson 1983). Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για λιθογραφία σε μήκη κύματος μικρότερα από 350nm. Η εισαγωγή τους ήταν ιδιαίτερα σημαντική μιας και η κβαντική απόδοση των περισσότερων συμβατικών φωτοπολυμερών είναι αρκετά χαμηλότερη από 1.0 ενώ είναι επιθυμητή η χρήση μικρών χρόνων έκθεσης. Επίσης, συχνά τα νέα λιθογραφικά συστήματα έχουν πηγές μικρής ισχύος. Αυτά τα υλικά περιέχουν μία φωτοχημική ουσία η οποία παρουσία υπεριώδους φωτός παράγει συνήθως ένα ισχυρό οξύ, το οποίο στη συνέχεια καταλύει ή εκκινεί αντιδράσεις που οδηγούν σε αλλαγή της διαλυτότητας του πολυμερούς. Τα υλικά μηχανισμού χημικής ενίσχυσης συνήθως βασίζονται στις ακόλουθες αντιδράσεις:

- Δημιουργία σταυροδεσμών μέσω κατιονικού πολυμερισμού μιας πλευρικής ομάδας για αρνητική λιθογραφία
- Οξεοκαταλύομενη αποπροστασία μιας πλευρικής ομάδας ώστε να γίνει αλλαγή της διαλυτότητας τόσο για θετική όσο και για αρνητική λιθογραφία
- Οξεοκαταλύομενη διάσπαση της βασικής αλυσίδας για θετική λιθογραφία



Εικόνα 1.15 Χημεία θετικού τόνου με οξεοκαταλυόμενη αντίδραση αποπροστασίας του υδροξυλίου του πολυμερούς tBOC. (Ito and Willson 1983)



Εικόνα 1.16 Χημεία αρνητικού τόνου με οξεοκαταλυόμενη αντίδραση κατιοντικού πολυμερισμού μεταξύ των εποξειδικών δακτυλίων του μερικά εποξειδωμένου πολυμερούς κρεσόλης-φορμαλδεΐδης. (Ito and Willson 1983)

Οι φωτοευαισθητοποιητές (photoacid generator, PAG) είναι βασικό στοιχείο της σύστασης των χημικών ενισχυμένων πολυμερικών υλικών. Οι φωτοευαισθητοποιητές που κυρίως χρησιμοποιούνται στα υλικά μηχανισμού χημικής ενίσχυσης παράγουν φωτοχημικά ισχυρό οξύ κατά την έκθεση το οποίο μπορεί να καταλύσει μία σειρά από οργανικές αντιδράσεις κατά το στάδιο της θέρμανσης μετά την έκθεση (post exposure bake, PEB). Η πιο αντιπροσωπευτική κατηγορία τέτοιων φωτοευαισθητοποιητών είναι τα άλατα σουλφονίου και ιωδονίου, και ειδικότερα τα άλατα διαρυλοϊωδονίου και τα άλατα τριαρυλοσουλφονίου. Τα τελευταία έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε οξεοκαταλυόμενες αντιδράσεις αλλαγής της διαλυτότητας χημικώς ενισχυμένων υλικών, όπως στη δημιουργία σταυροδεσμών εποξειδικών πολυμερών, στον αποπολυμερισμό πολυφθαλικών αλδευδών, στην αποπροστασία προστατευμένων πλευρικών υδροξυλομάδων πολυμερών, κ.α. (Everett, Schmidt et al. 1997).

Το πρώτο υλικό μηχανισμού χημικής ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε στην Μικροηλεκτρονική απαρτιζόταν από δύο συστατικά: πολυ(4-t-βουτοξυκαρβονυλοξυστυρένιο), tBOC, και εξαφθοροαντιμονικό τριφαινυλοσουλφόνιο στο ρόλο του φωτοευαισθητοποιητή. Κατά την έκθεση δημιουργείται οξύ το οποίο με την θέρμανση διαχέεται και μετατρέπει τις tBOC ομάδες σε πολικές φαινολικές ομάδες. Οι εκτεθειμένες περιοχές απομακρύνονταν χρησιμοποιώντας έναν πολικό διαλύτη (υδατικό διάλυμα βάσης) ή παραμένουν χρησιμοποιώντας ένα μη πολικό διαλύτη. Ως αρνητικού τόνου φωτοπολυμερές βασίζεται στην αλλαγή της υδροφιλικότητας της πλευρικής ομάδας και όχι στην δημιουργία σταυροδεσμών. Χρησιμοποιώντας το φωτοπολυμερές αυτό η IBM πρώτα κατασκεύασε κυκλώματα μνήμης dynamic random access memory (DRAM) 1Mb.

Η δημιουργία σταυροδεσμών μέσω πλευρικών ομάδων, π.χ. εποξειδικών ομάδων, ή μέσω διασταυρωτών μελαμίνης, δίνει αρνητικού τόνου φωτοπολυμερικά υλικά υψηλής απόδοσης τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως για κατασκευή παχιών ρητινών υψηλού λόγου ύψους προς πλάτος αλλά και ως υλικά αρνητικής λιθογραφίας στο υπεριώδες και σε έκθεση με ηλεκτρονική δέσμη.

Παράδειγμα αυτής της κατηγορίας υλικών είναι το αρωματικό πολυμερές κρεσόλης-φορμαλδεΐδης (νεολάκα), το οποίο είναι μερικά εποξειδωμένο στο φαινολικό υδροξύλιο και έχει ως φωτοευαισθητοποιητή ένα άλας τριαρυλοσουλφονίου. Η χημεία αλλαγής διαλυτότητας βασίζεται στην οξεοεκκινώμενη δημιουργία σταυροδεσμών μεταξύ των εποξειδικών δακτυλίων (Εικόνα 1.16).

Με τα εποξειδικά υλικά επιτυγχάνεται καλή πρόσφυση, μείωση της συρρίκνωσης του υμενίου και της διόγκωσης κατά την εμφάνιση με διαλύτες, εξαιρετική θερμική σταθερότητα και καλή ευαισθησία. Γενικά, τα εποξειδικά πολυμερή, αλειφατικά ή αρωματικά λειτουργούν ως βασικά υλικά σε αρνητικού τόνου συστήματα. Τα αλειφατικά υλικά μειονεκτούν λόγω της μη επαρκούς θερμικής τους σταθερότητας. Επιπλέον τα αρωματικά παρουσιάζουν ισχυρή αντίσταση στην εγχάραξη με πλάσμα λόγω των αρωματικών δακτυλίων του πολυμερούς. Γενικότερα η αντίσταση στην εγχάραξη αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα και μείωση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο.

Μία άλλη κατηγορία συστημάτων αρνητικού τόνου είναι υλικά τα οποία αποτελούνται κυρίως από ένα πολυμερές με δραστικά κέντρα για αντιδράσεις διασταύρωσης, φωτοευαισθητοποιητή για παραγωγή οξέος και από έναν παράγοντα διασταύρωσης που ενεργοποιείται με οξύ (π.χ. παράγωγα μελαμίνης και βενζυλικής αλκοόλης). Το οξύ καταλύει την αντίδραση ανάμεσα στο πολυμερές και τον παράγοντα διασταύρωσης σχηματίζοντας πολυμερικό δίκτυο το οποίο είναι σε σημαντικό βαθμό αδιάλυτο συγκρινόμενο με το πολυμερές που δεν έχει αντιδράσει. Στο στάδιο της θέρμανσης μετά την έκθεση η αντίδραση συμπύκνωσης ολοκληρώνεται αυξάνοντας την απόδοση του πολυμερικού δικτύου. Με τον τρόπο αυτό αυξάνει η ευαισθησία και βελτιώνεται η αντίθεση της απεικόνισης. Το στάδιο της θέρμανσης είναι επίσης απαραίτητο λόγω του ότι η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης συμπύκνωσης είναι αρκετά μεγάλη.

## 2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΑΣΚΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται θέματα τεχνολογίας μασκών που χρησιμοποιούνται στη λιθογραφία. Γίνεται παρουσίαση των διαφόρων τύπων υποστρωμάτων, των συστημάτων εγγραφής μασκών με τη χρήση Laser και τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων και των κατάλληλων λιθογραφικών υλικών για εγγραφή με δέσμη ηλεκτρονίων. Επίσης, γίνεται αναφορά στα στάδια κατασκευής της μάσκας και τους τρόπους μορφοποίησης των αρχείων που περιέχουν το σχέδιο που πρόκειται να εγγραφεί. Για την προσομοίωση της εγγραφής μιας μάσκας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, εκτός από τα υλικά και τα εργαλεία εγγραφής, και τα φαινόμενα γεινίασης (proximity effect) για τα οποία γίνεται σύντομη αναφορά. Τα οπτικά φαινόμενα γεινίασης (optical proximity effect) που λαμβάνουν χώρα κατά την έκθεση με ακτινοβολία λαμβάνονται υπόψη για τις κατάλληλες τροποποιήσεις του σχεδίου που θα φέρει η μάσκα. Τα φαινόμενα γεινίασης κατά την εγγραφή με δέσμη ηλεκτρονίων πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το στάδιο εγγραφής της μάσκας ώστε με τις κατάλληλες διορθώσεις να προκύψει το επιθυμητό σχήμα.

Οι μάσκες αποτελούν απαραίτητο στοιχείο στις περισσότερες λιθογραφικές τεχνικές και κάθε πρόδος στην τεχνολογία κατασκευής τους είναι ένα μεγάλο βήμα εξέλιξης της λιθογραφίας αφού καθορίζουν την κρίσιμη διάσταση των δομών που σχηματίζονται στο δισκίδιο πυριτίου. Ένα από τα βασικά εργαλεία κατασκευής τους είναι η δέσμη ηλεκτρονίων η οποία φαίνεται να είναι σύμφωνα με το ITRS η μοναδική λύση για τις μελλοντικές μάσκες πολύ μικρής κρίσιμης διάστασης. Η κατανόηση της τεχνικής αυτής, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα, τα είδη των υποστρωμάτων και των λιθογραφικών υλικών αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για την προσομοίωση της διαδικασίας.

Μάσκα είναι ένα εργαλείο μεταφοράς προτύπων σχημάτων. Αποτελείται από ένα υμένιο φέρων το πρότυπο σχήμα και ένα υπόστρωμα. Μεμβράνη καλύπτει το υμένιο για την προστασία της μάσκας (Εικόνα 2.1). Το πρότυπο σχήμα του υμενίου μεταφέρεται σε κατάλληλο υποδοχέα για την κατασκευή μιας ηλεκτρονικής, ηλεκτρομηχανικής ή μηχανικής συσκευής.



Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση μάσκας

Το υπόστρωμα της μάσκας σε πολλές περιπτώσεις είναι διαφανές στο μέσο μεταφοράς του σχήματος (συνήθως φως) ενώ η σχηματοποιημένη επιφάνεια πάνω σε αυτό είναι λιγότερο διαφανής ή αδιαφανής. Η μεταφερόμενη εικόνα ενδέχεται να περνάει μέσα από φακούς σμίκρυνσης ή 1:1 αποτύπωσης. Οι τυπικές μάσκες τα τελευταία 25-30 χρόνια αποτελούνται από ένα λεπτό υμένιο

χρωμίου 80-100 nm πάνω σε υπόστρωμα γυαλιού ή άμορφη πυριτία (fused silica - SiO<sub>2</sub>). Το χρώμιο είναι αδιαφανές στο προσπίπτον μήκος κύματος (365, 248 ή 193 nm) ενώ η άμορφη πυριτία διαφανής. Μια τέτοια μάσκα αναφέρεται ως χρώμιο σε γυαλί μάσκα ή δυαδικής έντασης μάσκα (Binary Intensity Mask).

Η εγχάραξη του υμενίου χρωμίου για τη δημιουργία δομών επιτυγχάνεται με λιθογραφική τεχνική. Οι μάσκες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών ή σε βιομηχανίες που έχουν υιοθετήσει τις μεθόδους κατασκευής των ημιαγωγών έλκουν την καταγωγή τους από την παραδοσιακή λιθογραφική μέθοδο εκτύπωσης.

Η μάσκα μπορεί να μεταφέρει το σχήμα με πολλούς τρόπους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακτινοβολία ευρέως φάσματος ή μονοχρωματική. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι διαφανές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία ή ανακλαστικό. Το υμένιο που φέρει το σχήμα μπορεί να είναι τελείως απορροφητικό ή μερικώς διαπερατό σε μάσκες διαπερατές ή τελείως απορροφητικό για ανακλαστικές μάσκες. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις το σχηματοποιημένο υμένιο και το υπόστρωμα μιας μάσκας μπορεί να μεταβάλλουν τη φάση της ακτινοβολίας.

## 2.2 Υποστρώματα Μασκών

### 2.2.1 Μάσκα χρωμίου σε γυαλί

Μια άγραφη μάσκα χρωμίου σε γυαλί είναι ένα δισκίδιο γυαλιού το οποίο επικαλύπτεται από ένα υμένιο με βασικό συστατικό το χρώμιο (Rizvi 2005). Οι διαστάσεις του υποστρώματος έχουν υποστεί πολλές μεταβολές με την εξέλιξη της λιθογραφίας. Τα πρώτα χρόνια της βιομηχανίας των ημιαγωγών το υπόστρωμα της μάσκας είχε διαστάσεις 2x2 ίντσες. Από τότε άρχισε να αυξάνεται ενώ σήμερα το καθιερωμένο μέγεθος είναι 6x6 ίντσες. Το πάχος αυξήθηκε επίσης από 0.060 ίντσες σε 0.25 ίντσες σήμερα (mask plate 6025). Μεταξύ των λόγων αυτής της αύξησης είναι η αύξηση του μεγέθους του τσιπ και η αύξηση του βήματος των συστημάτων έκθεσης. Μεγαλύτερης διάστασης υποστρώματα των 9x9 ιντσών έχουν επίσης κατασκευαστεί αλλά η χρήση τους παραμένει περιορισμένη λόγω των δυσκολιών και του αυξημένου κόστους που απαιτεί η τροποποίηση πολλών άλλων σχετιζόμενων συσκευών.

Στην ιστορία της λιθογραφικής μεθόδου η σύσταση του υποστρώματος έχει υποστεί πολλές τροποποιήσεις. Τα πρώτα χρόνια της λιθογραφίας το καθιερωμένο υλικό ήταν το soda lime το οποίο αντικαταστάθηκε στη συνέχεια από το καλύτερης ποιότητας λόγω λιγότερων ατελειών white crown. Αργότερα, όταν η θερμική διαστολή του γυαλιού κατά τη διαδικασία έκθεσης έγινε κρίσιμη, το white crown αντικαταστάθηκε από boro-silicate γυαλί που παρουσιάζει μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής. Βελτίωση προήλθε με τη χρήση της υαλώδους πυριτίας (quartz) της οποίας ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι ακόμα μικρότερος. Επιπλέον, η υαλώδης πυριτία παρουσιάζει μεγαλύτερη διαπερατότητα σε ακτινοβολία 365 nm (υπεριώδης ακτινοβολία). Όταν η βιομηχανία προχώρησε από τα 365 nm στα 248 nm μετά στα 193 nm η διαπερατότητα σε αυτά τα μήκη κύματος έγινε καθοριστικής σημασίας. Προτάθηκε επίσης από τη Schott Lithotec, ένα κατασκευαστή υποστρωμάτων μασκών, ένα πολλά υποσχόμενο υπόστρωμα βαθέως υπεριώδους ακτινοβολίας (DUV), γνωστό ως Zerodur® με προδιαγραφές μηδενικής θερμικής διαστολής.

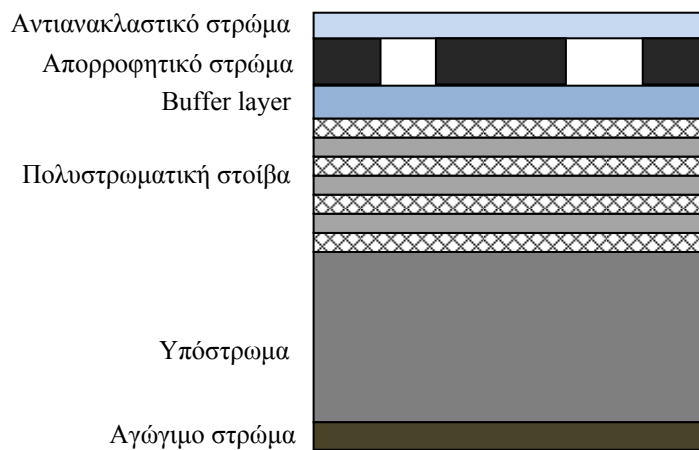
Το απορροφητικό στρώμα πάνω από το γυαλί είναι μια ένωση του χρωμίου που αποτελείται από χρώμιο (Cr), άζωτο (N<sub>2</sub>), οξυγόνο (O<sub>2</sub>) και πιθανόν άλλα στοιχεία. Η σύνθεση του υμενίου χρωμίου



αλλάζει από τη βάση προς την κορυφή. Η βάση βοηθά στην πρόσφυση του υμενίου του χρωμίου με το γυαλί ενώ το ανώτερο στρώμα δρα σαν μη ανακλαστική επιφάνεια κατά τη διαδικασία έκθεσης. Το πάνω και κάτω στρώμα του υμενίου αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού αδιαφανούς υμενίου. Τυπικό πάχος είναι τα 100 nm με οπτική πυκνότητα 3.0, το οποίο ισοδυναμεί με διάδοση 0.1% (ή λιγότερο). Έχει χρησιμοποιηθεί επίσης και υμένιο χρωμίου μικρότερου πάχους (59-73 nm). Υμένιο Molybdenum Silicide ( $\text{MoSiO}_x\text{N}_y$ ) χρησιμοποιήθηκε αρχικά μεταξύ του γυαλιού και του χρωμίου για να αυξήσει την πρόσφυση του χρωμίου πάνω στην άμορφη πυριτία. Αργότερα απέκτησε βασικό ρόλο στις μάσκες μεταβολής φάσης. Κρίσιμοι παράμετροι σε μια μάσκα είναι η ομοιογένεια του υποστρώματος - γυαλιού σε ότι αφορά τον δείκτη διάθλασης, και η ομοιογένεια του χρωμίου και όλων των υμενίων που χρησιμοποιούνται για αλλαγές φάσης διότι επηρεάζουν την ομοιομορφία της κρίσιμης διάστασης αλλά και την ακρίβεια στην τοποθέτηση του ειδώλου. Η καμπύλωση του υποστρώματος είναι μια επίσης σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της έκθεσης, λόγω θερμικής διαστολής, και οδηγεί σε σφάλματα τοποθέτησης ειδώλου και ομοιομορφίας κρίσιμης διάστασης.

## 2.2.2 Μάσκες για Λιθογραφία ακραίου υπεριώδους φωτός

Η λιθογραφία ακραίου υπεριώδους (Extreme Ultra Violet Lithography, EUVL) κατεβάζει το όριο της οπτικής λιθογραφίας στα 32 nm και κάτω με τη χρήση μικρών μηκών κύματος έκθεσης στο εύρος των 11 έως 14 nm. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ της συμβατικής λιθογραφίας και της EUVL είναι η μεγάλη απορρόφηση που εμφανίζουν όλα τα υλικά σε αυτά τα μήκη κύματος. Αποτέλεσμα είναι η ανάγκη για περιβάλλον κενού στη διαδρομή του προσπίπτοντος ακραίου υπεριώδους φωτός, ανακλαστικό υπόστρωμα για τη μάσκα, και ανακλαστικά οπτικά για τα εργαλεία λιθογραφίας.



Εικόνα 2.2 Τυπική δομή EUV μάσκας

Η ανακλαστική μάσκα ακραίου υπεριώδους αποτελείται από ένα στιλβωμένο υπόστρωμα πολύ μικρής θερμικής διαστολής, επικάλυψη με πολυστρωματική στοιβία που δίνει ανακλαστική συμβολή, buffer layer (δεν είναι πάντα απαραίτητο), απορροφητικό στρώμα, αντι-ανακλαστικό στρώμα και ένα αγώγιμο στρώμα στο πίσω μέρος της μάσκας (Εικόνα 2.2).

Η πολυστρωματική στοιβία που τοποθετείται πάνω από το υπόστρωμα της μάσκας είναι απαραίτητη για την ανακλαστικότητα της μάσκας στο ακραίο υπεριώδες. Σχηματίζεται με εναλλασσόμενη εναπόθεση στρωμάτων από δύο υλικά με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Τυπικά, τα δύο υλικά έχουν μεγάλο και μικρό ατομικό αριθμό ώστε να υπάρχει η μέγιστη διαφορά

ηλεκτρονικής πυκνότητας. Επιπροσθέτως, τα δύο αυτά υλικά πρέπει να παρουσιάζουν μικρή απορρόφηση στο ακραίο υπεριώδες. Δύο τέτοια ευρέως αποδεκτά υλικά είναι το πυρίτιο (Si) και ο μόλυβδος (Mo). Η επιλογή αυτή έγινε λόγω της μεγάλης αντίθεσης των δεικτών διάθλασής τους. Το πυρίτιο έχει μικρή απορρόφηση και λειτουργεί σαν «κενό διάστημα». Ο μόλυβδος εμφανίζει μεγαλύτερη απορρόφηση και λειτουργεί σαν στρώμα σκέδασης. Το πάχος των στρωμάτων μολύβδου και πυριτίου επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η απορρόφηση και να μεγιστοποιείται η σκέδαση. Η περίοδος των στρωμάτων, που αντιστοιχεί σε διαδοχικά μέγιστα σκέδασης, ικανοποιεί τον τροποποιημένο νόμο Bragg:

$$m\lambda = 2d \cos \theta \sqrt{1 - \frac{2\delta}{1 - \cos^2 \theta}} \quad (2.1)$$

Όπου  $m$  ακέραιος,  $d$  η περίοδος των ζευγών,  $\lambda$  το μήκος κύματος αιώτατης υπεριώδους ακτινοβολίας,  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης και  $\delta$  είναι ο (σταθμικός μέσος) σταθμισμένος  $\delta n$ . Ο  $\delta n$  ορίζεται σαν:

$$\delta n = 1 - n \quad (2.2)$$

όπου  $n$  το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης.

Μια πολυστρωματική στοίβα Mo/Si για μάσκες ακραίου υπεριώδους στα 13.4 nm τυπικά αποτελείται από 81 λεπτά υμένα, 40 ζεύγη Mo/Si συν ένα καλυπτικό στρώμα. Το πάχος του στρώματος ζεύγους Mo/Si είναι 6.9 nm με πάχος Mo περίπου 2.8 nm και πάχος Si 4.1 nm περίπου. Η ανακλαστικότητα μιας τέτοιας πολυστρωματικής στοίβας φτάνει στο μέγιστο στα 40 με 50 ζεύγη στρωμάτων περίπου.

Το στρώμα επικάλυψης που έχει στόχο την προστασία της μάσκας πρέπει να είναι ένα υλικό διαφανές στο ακραίο υπεριώδες. Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το πυρίτιο και το Ρουθίνιο (Ru). Το πυρίτιο έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης διαφάνειας σε αυτά τα μήκη κύματος αλλά οξειδώνεται εύκολα ενώ το Ρουθίνιο δεν οξειδώνεται αλλά έχει μικρότερη διαφάνεια. Λόγω της απορροφητικότητας του Ρουθινίου, σε περίπτωση χρήσης του, είναι αρκετό ένα υμένιο πάχους μικρότερου των 2.5 nm.

Το στρώμα buffer χρησιμοποιείται ως προστατευτικό του απορροφητικού στρώματος κατά τη διαδικασία της εγχάραξης χωρίς να είναι πάντα απαραίτητο. Μεταξύ των υλικών που έχουν δοκιμαστεί είναι τα: διοξείδιο του πυριτίου SiO<sub>2</sub>, οξυνιτρίδιο του πυριτίου SiON, άνθρακας C, χρώμιο Cr, ρουθίνιο Ru.

Η απορροφητική στοίβα αποτελείται συνήθως από ένα απορροφητικό στρώμα και ένα αντιανακλαστικό στρώμα. Το *Απορροφητικό στρώμα* αποτελείται από μέταλλο το οποίο απορροφά ισχυρά στο ακραίο υπεριώδες κατά τη διαδικασία της έκθεσης. Το *Αντί-ανακλαστικό στρώμα* απορροφά την ανακλώμενη ακτινοβολία από την πάνω επιφάνεια του απορροφητικού στρώματος κατά τον έλεγχο σφαλμάτων της μάσκας, συνήθως με βαθύ υπεριώδες φως (150 με 200 nm). Αν ο έλεγχος γίνεται με δέσμη ηλεκτρονίων δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη αντιανακλαστικού στρώματος.

Τόσο το απορροφητικό στρώμα όσο και η πολυστρωματική στοίβα απορροφούν ισχυρά στο ακραίο υπεριώδες. Το απορροφητικό στρώμα απορροφά το 100% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ενώ η πολυστρωματική στοίβα απορροφά περίπου το 30%. Η απορροφόμενη ακτινοβολία

μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της μάσκας, τη διαστολή της και άρα την παραμόρφωσή της και την εμφάνιση σφαλμάτων τοποθέτησης ειδώλου στο δισκίδιο εκτύπωσης. Το μέγεθος της παραμόρφωσης εξαρτάται από το συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού του υποστρώματος. Οι προϋποθέσεις για μια τέτοια μάσκα είναι: πολύ μικρή θερμική διαστολή, πλήρως στιλβωμένη επιφάνεια υποστρώματος με μηδενικές ατέλειες μεγαλύτερες των 50 nm, τραχύτητα επιφάνειας υποστρώματος μικρότερη των 0.15 nm rms, επίπεδη επιφάνεια υποστρώματος τέτοια ώστε η απόσταση κοιλάδας κορυφής να είναι μικρότερη των 30 nm, ανακλαστικό πολυστρωματική στοιβα με πυκνότητα ατελειών μικρότερη των 0,003/cm<sup>2</sup> για μεγέθη ατελειών 30 nm. Τέλος, επειδή όλα τα υλικά είναι απορροφητικά στο EUV, δεν είναι δυνατό να τοποθετηθεί προστατευτική μεμβράνη. Το γεγονός αυτό καθιστά τη μάσκα πολύ ευαίσθητη κατά τη μεταφορά αλλά και κατά τη διάρκεια της έκθεσης.

Έχουν καθιερωθεί πρότυπα για χαρακτηριστικά των масκών ακραίου υπεριώδους όπως το υλικό του υποστρώματος και η μορφή του, η πολυστρωματική στοιβα, το στρώμα buffer, και το απορροφητικό στρώμα. Τα πρότυπα SEMI P37-1102 για τα υποστρώματα και SEMI P38-1103 για το απορροφητικό στρώμα και η πολυστρωματική στοιβα καθιερώθηκαν τα έτη 2001 και 2002 αντίστοιχα. (SEMI 2007)

Οι διαστάσεις μιας μάσκας ακραίου υπεριώδους σύμφωνα με το πρότυπο SEMI P37-1102 είναι ίδιες με αυτές της καθιερωμένης οπτικής μάσκας, πλακίδιο 6x6 ιντσών πάχους 0.25 ιντσών. Ο λόγος είναι η δυνατότητα χρήσης της υπάρχουσας τεχνολογίας των οπτικών масκών με μικρές μόνο αλλαγές και προσθήκες για να ικανοποιηθούν οι ιδιαίτερες απαιτήσεις της λιθογραφίας ακραίου υπεριώδους. Αυτές αφορούν στο σύστημα σχεδίασης με δέσμη ηλεκτρονίων, στο σύστημα ελέγχου σύμπτωσης σχημάτων, και στο σύστημα μέτρησης καμπυλότητας της επιφάνειας. Εργαλεία που προστέθηκαν είναι αυτό της εναπόθεσης της πολυστρωματικής στοιβας, ελέγχου ατελειών του υποστρώματος και της πολυστρωματικής στοιβας, επιδιόρθωσης ατελειών με δέσμη ηλεκτρονίων, κλπ.

Δυο υλικά διαθέσιμα στο εμπόριο που είναι σε συμφωνία με τα καθιερωμένα πρότυπα είναι τα ULE και Zerodur. Το ULE είναι γυαλί άμορφης πυριτίας (SiO<sub>2</sub>) περιέχων περίπου 7,5 mol% TiO<sub>2</sub>. Τα άτομα του τιτανίου αντικαθιστούν άτομα του πυριτίου σχηματίζοντας έτσι ένα στερεό διάλυμα περισσότερο παρά μια διαχωρισμένη φάση αν η συγκέντρωση του TiO<sub>2</sub> διατηρείται κάτω από τα ~10%. Ένα τέτοιο ULE υλικό έχει συντελεστή θερμικής διαστολής που κυμαίνεται στην περιοχή ±10ppb/°C.

Το Zerodur είναι ένα υλικό δύο φάσεων συνδυάζοντας κατά 75% την κρυσταλλική φάση και κατά 25% την υαλώδη φάση. Η θερμική διαστολή είναι αρνητική για την κρυσταλλική φάση και θετική για την υαλώδη φάση. Με κατάλληλη προσαρμογή η συνολική θερμική διαστολή μπορεί να είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Τα διαθέσιμα Zerodur υλικά έχουν μέσο συντελεστή θερμικής διαστολής στο εύρος των ±15ppb/°C και ολική χωρική μεταβολή 12ppb/°C περίπου.

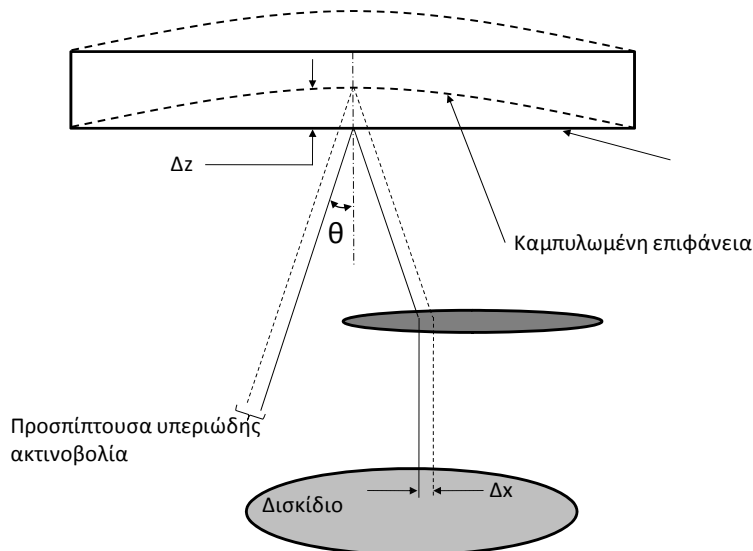
Η καμπύλωση της επιφάνειας του υποστρώματος οδηγεί σε παραμόρφωση του προβαλλόμενου σχήματος πάνω στο δισκίδιο εκτύπωσης (Εικόνα 2.3).

Όταν ακτινοβολία ακραίου υπεριώδους προσπίπτει στην ανακλαστική μάσκα με γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  η μετατόπιση  $\Delta x$  του ειδώλου εξαιτίας της καμπύλωσης  $\Delta z$  όπως προκύπτει από τη γεωμετρική οπτική είναι:

$$\Delta x = \frac{\Delta z * \tan \theta}{M} \quad (2.3)$$

όπου Μ είναι ο λόγος σμίκρυνσης. Για σμίκρυνση 4x με γωνία πρόσπτωσης 5° προκύπτει

$$\Delta x = 0,023\Delta z \quad (2.4)$$



Εικόνα 2.3 Παραμόρφωση σχήματος λόγω καμπύλωσης της επιφάνειας της μάσκας

Η τραχύτητα της επιφάνειας χωρίζεται συνήθως σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη χωρική συχνότητά της σε τραχύτητα υψηλής και τραχύτητα μέσης χωρικής συχνότητας. Υψηλής συχνότητας τραχύτητα προκαλεί εκτροπή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε τόσο μεγάλες γωνίες ώστε να βγαίνει έξω από τα όρια του οπτικού συστήματος εκτύπωσης. Τραχύτητα μέσης συχνότητας προκαλεί και πάλι εκτροπή της ακτινοβολίας αλλά μέσα στα όρια του οπτικού συστήματος. Αναφέρεται συνήθως σαν σφάλμα κλίσης της επιφάνειας. Σφάλματα κλίσης μεγάλης περιόδου συνδυασμένα με ανεστίαση προκαλούν σφάλματα τοποθέτησης ειδώλου στο δισκίδιο εκτύπωσης. Σφάλματα κλίσης κοντά στο όριο ευκρίνειας συμβάλουν στην πλευρική τραχύτητα των εκτυπώμενων σχημάτων. Σύμφωνα με το πρότυπο SEMI P37-1102 το σφάλμα κλίσης πρέπει να είναι μικρότερο του 1.0 mrad και η τραχύτητα υψηλής συχνότητας να είναι μικρότερη των 0.15 nm rms (SEMI 2007).

## 2.3 Συστήματα κατασκευής μασκών

Στα πρώτα χρόνια της βιομηχανίας των ημιαγωγών, οι οπτικές μάσκες σχεδιάζονταν στο χέρι σε μεγέθυνση και αφού σμικρύνονταν στο επιθυμητό μέγεθος μεταφέρονταν το σχέδιο σε επιστρωμένα με φωτογραφικό γαλάκτωμα γυάλινα πλακίδια. Αργότερα, η σχεδίαση άρχισε να γίνεται στον υπολογιστή, το σχέδιο κόβονταν σε αδιαφανές πολυμερές με λεπίδα οδηγούμενη από τον υπολογιστή. Και πάλι ακολουθούσε σμίκρυνση και μεταφορά σε πλακίδιο γυαλιού με φωτογραφικό γαλάκτωμα. Στην πορεία των χρόνων η γυάλινη μάσκα με το φωτογραφικό γαλάκτωμα αναπαράγονταν σε γυαλί με επίστρωση χρωμίου. Η μάσκα αυτή ήταν πολύ πιο ανθεκτική για εκτύπωση εξ επαφής.

Το επόμενο βήμα ήταν να παραχθούν μάσκες γυαλιού με επίστρωση χρωμίου, χωρίς τη μεσολάβηση του σταδίου κατασκευής μάσκας γυαλιού με φωτογραφικό γαλάκτωμα. Η εγγραφή της μάσκας γίνονταν αρχικά με οπτική δέσμη και αργότερα με δέσμη ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση της οπτικής δέσμης το φως παράγονταν από λάμπα υδραργύρου. Το μέγεθος και το σχήμα της δέσμης καθορίζονταν από μηχανικά διαφράγματα ελεγχόμενα από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η εξέλιξη της εγγραφής με οπτική δέσμη ήταν η αντικατάστασή της από δέσμη λέιζερ. Η δέσμη λέιζερ δίνει μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας και καλύτερο έλεγχο των εγγραφόμενων σχημάτων σε σύγκριση με τα μηχανικά διαφράγματα. Στα τέλη της δεκαετίας του '70 εισήχθησαν τα συστήματα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων (MEBES® systems - Manufacturing Electron Beam Exposure System). Σε αυτά τα συστήματα, εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων βομβαρδίζει κατάλληλο λιθογραφικό υλικό στις επιθυμητές περιοχές δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τα επιθυμητά σχήματα. Για δεκαετίες, τα μοναδικά χαρακτηριστικά της δέσμης ηλεκτρονίων (έλεγχος από ηλεκτρονικό υπολογιστή εύκολα προγραμματιζόμενο, μεγάλη ακρίβεια, μεγάλος ρυθμός παραγωγής) ανέδειξαν τα συστήματα αυτά σε κύρια εργαλεία για την κατασκευή μασκών.

Η εξέλιξη στην κατασκευή μασκών οδηγείται από τις ανάγκες της βιομηχανίας μικροηλεκτρονικών. Η απαιτήσις είναι πάντα προς την κατεύθυνση των μικρότερων και πιο πυκνών δομών αλλά και την μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής.

### 2.3.1 Συστήματα Laser

Στα μέσα της δεκαετίας του '80 εισήχθησαν τα συστήματα εγγραφής με δέσμη λέιζερ. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο. Μπορεί να αποτελούνται από μία ή πολλές δέσμες λέιζερ ενώ λειτουργούν με μηχανισμό γραμμικής σάρωσης για την εγγραφή του σχήματος στη μάσκα. Μοιάζουν λοιπόν πολύ με τα συστήματα γραμμικής σάρωσης δέσμης ηλεκτρονίων με τις διαφορές ότι δεν απαιτούνται συνθήκες κενού για τη λειτουργία τους, δεν απαιτούνται διορθώσεις λόγω φαινομένων γειννίας και δεν απαιτείται γείωση του υποστρώματος. Η γείωση απαιτείται στα συστήματα δέσμης ηλεκτρονίων για αποφυγή φόρτισης του υποστρώματος.

Τα συστήματα εγγραφής με λέιζερ χρησιμοποιούν τα ίδια φωτοευαίσθητα υλικά που χρησιμοποιούνται για παραγωγή δισκιδίων και τα οποία δίνουν υψηλή ανάλυση και υψηλή αντίθεση. Γενικά, τα λέιζερ συστήματα εγγραφής έχουν υψηλότερη απόδοση, καλύτερη αξιοπιστία και μικρότερο κόστος για τον αγοραστή ενώ τα συστήματα δέσμης ηλεκτρονίων έχουν πολύ καλύτερη ανάλυση. Επίσης τα συστήματα λέιζερ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατασκευή μεγαλύτερων μασκών.

Στα συστήματα εγγραφής με δέσμη λέιζερ η βάση στήριξης της μάσκας κινείται με σταθερή ταχύτητα και η δέσμη σαρώνει σε διεύθυνση κάθετη στην κίνηση της βάσης. Η σάρωση μιας γραμμής επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου πολυγωνικού καθρέπτη ή ενός οπτικοακουστικού ανακλαστήρα ο οποίος μετατρέπει την γωνιακή εκτροπή σε χωρική μετατόπιση γράφοντας έτσι μία ρίγα. Υπάρχουν και παραδείγματα συστημάτων με πολλές δέσμες με σύστημα ανεξάρτητης διακοπής της καθεμιάς.

Τυπικός χρόνος εγγραφής μιας μάσκας είναι 2 ώρες. Οι πηγές λέιζερ στις νέες γενιές συστημάτων αντικαθίστανται βαθμιαία από πηγές μικρότερου μήκους κύματος για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες μεγαλύτερης ανάλυσης. Για παράδειγμα, ένα λέιζερ ιόντων Αργού υπεριώδους με μήκος κύματος 363,8 nm χρησιμοποιήθηκε στο ALTA 3500 το οποίο δίνει γκαουσιανή κηλίδα με FWHM 270 nm (Buck, Buxbaum et al. 1998). Στο σύστημα ALTA 4000 ένα λέιζερ ιόντων αργού δίνει δέσμη στο

βαθύ υπεριώδες (257nm). Το τελικό μέγεθος κηλίδας είναι περίπου 50% μικρότερο. Αυτό είναι αρκετό ώστε να μπορούν να γραφούν δομές μικρότερες των 250 nm (Bohan, Hamaker et al. 2002).

Μια νέα προσέγγιση για μεγαλύτερη απόδοση αναπτύχθηκε από την Micronic Laser Systems με το όνομα Matrix exposure. Μια σειρά μικροανακλαστήρων είναι υπεύθυνη για τη διαμόρφωση της δέσμης. Κάθε ανακλαστήρας μπορεί να στρέφεται ανεξάρτητα διαμορφώνοντας τη δέσμη σύμφωνα με τα δεδομένα του σχεδίου προς εγγραφή. Το σκεδαζόμενο φως μπλοκάρεται από ένα διάφραγμα. Μια σειρά μικροανακλαστήρων είναι κατάλληλη για ταυτόχρονη διαμόρφωση ενός εκατομμυρίου δεσμών. Το βαθύ υπεριώδες φως του λέιζερ ανακλάται από το σύστημα των μικροκαθρεπτών και εστιάζεται στη μάσκα μέσα από φακούς υψηλού αριθμητικού διαφράγματος. Το σύστημα χρησιμοποιεί παλμικό λέιζερ. Στο χρόνο μεταξύ των παλμών το σύστημα φορτώνεται με νέα δεδομένα. Ταυτόχρονα η βάση στήριξης της μάσκας κινείται συνεχώς. (Rai-Choudhury 1997; Rizvi 2005)

### 2.3.2 Συστήματα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων

Για τις πρώτες εγγραφές (1965) χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης για εγγραφή σχεδίων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. (Baba, Denda et al. 1969). Η πρώτη γενιά συστημάτων εγγραφής δέσμης ηλεκτρονίων εμφανίστηκε στη δεκαετία του '70 βασισμένη στην ιδέα αυτή. Το σχήμα της δέσμης ήταν μια γκαουσιανή δέσμη και η βάση κινούνταν βηματικά. Ήταν η αυγή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης όπου η μικρότερη χαρακτηριστική διάσταση ήταν μερικά μικρόμετρα. Στη δεκαετία του '80, η μικρότερη χαρακτηριστική διάσταση ήταν 1 μm. Για να αυξηθεί η ταχύτητα εγγραφής η κίνηση της βάσης μετατράπηκε από βηματική σε συνεχή. Επίσης η γκαουσιανή δέσμη αντικαταστάθηκε από δέσμη μεταβλητού σχήματος (Goto, Soma et al. 1978). Στη δεκαετία του '90 με τη μικρότερη χαρακτηριστική διάσταση να φτάνει τα 350nm χρησιμοποιήθηκαν πιο σύνθετες τεχνικές όπως συστήματα ομαδικής έκθεσης (cell projection), block exposure, character projection (Nakayama, Okazaki et al. 1990; Hattori, Yoshikawa et al. 1993). Από το 2000 εισήχθησαν τα συστήματα πολλών δεσμών ηλεκτρονίων (Chang, Thomson et al. 1996; Yasuda, Arai et al. 1996; Muraki and Gotoh 2000).

Νέες τεχνικές (3<sup>rd</sup> order imaging) σε συστήματα πολλαπλών δεσμών υπόσχονται αύξηση του ρεύματος της δέσμης ηλεκτρονίων χωρίς την ανεπιθύμητη θόλωση της δέσμης (beam blurring) και την επίτευξη δέσμης επιθυμητού σχήματος, τετραγώνου ή παραλληλογράμμου (Kotsugi, Fuse et al. 2008). Έτσι μπορεί να μειωθεί ο χρόνος εγγραφής ο οποίος αποτελεί εμπόδιο στη ευρεία χρήση δέσμης ηλεκτρονίων για απευθείας εγγραφή (Electron Beam Direct Writing, EBDW)

Ένα σχηματικό διάγραμμα συστήματος εγγραφής παριστάνεται στην Εικόνα 2.4(α). Αποτελείται συνήθως από τέσσερα υποσυστήματα (Rizvi 2005):

- Στήλη δέσμης ηλεκτρονίων (EBL στήλη)

Η EBL στήλη παράγει εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων η οποία εκτρέπεται στο υπόστρωμα. Αποτελείται από μια πηγή ηλεκτρονίων, οπτικά διαμόρφωσης της δέσμης και ένα σύνολο φακών εστίασης και εκτροπών. Η στήλη είναι υψηλού κενού από  $10^{-6}$  έως  $10^{-8}$  Pa.

*Πηγή ηλεκτρονίων:* Ηλεκτρονική ακτινοβολία παράγεται με 2 τρόπους: Αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής (θερμιονικό φαινόμενο) και εφαρμογή ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Τρεις κύριες

παράμετροι για την πηγή είναι το μέγεθός της, η φωτεινότητά της ( $\text{Amperes/sterad}\cdot\text{cm}^2$ ) και η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (eV).

*Φακοί εστίασης:* Οι ηλεκτρικοί φακοί αν και λειτουργούν παρόμοια με τους οπτικούς φακούς μπορούν μόνο να συγκλίνουν. Η κακή ποιότητά τους περιορίζει τη γωνία μεγέθους και το αριθμητικό άνοιγμα. Υπάρχουν 2 τύποι παρεκκλίσεων: Σφαιρικές (οφείλονται στην θέση) και χρωματικές (οφείλονται στην ενέργεια). Και οι δύο ελαχιστοποιούνται με τη μείωση της γωνίας σύγκλισης (Τσουκαλάς 2005).

*Blanker:* Πρόκειται για ένα σύστημα δυο πλακιδίων στα οποία εφαρμόζεται τάση από ένα ενισχυτή πολύ μικρού χρόνου απόκρισης. Το πεδίο που δημιουργείται είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης την οποία και εκτρέπει ώστε να διακόψει την έκθεση του φωτοευαίσθητου υμενίου (Grivet, Bernard et al. 1965).

*Stigmator:* ένα σύστημα φακών για την απόλειαση του αστιγματισμού της δέσμης.

- Μηχανικό σύστημα

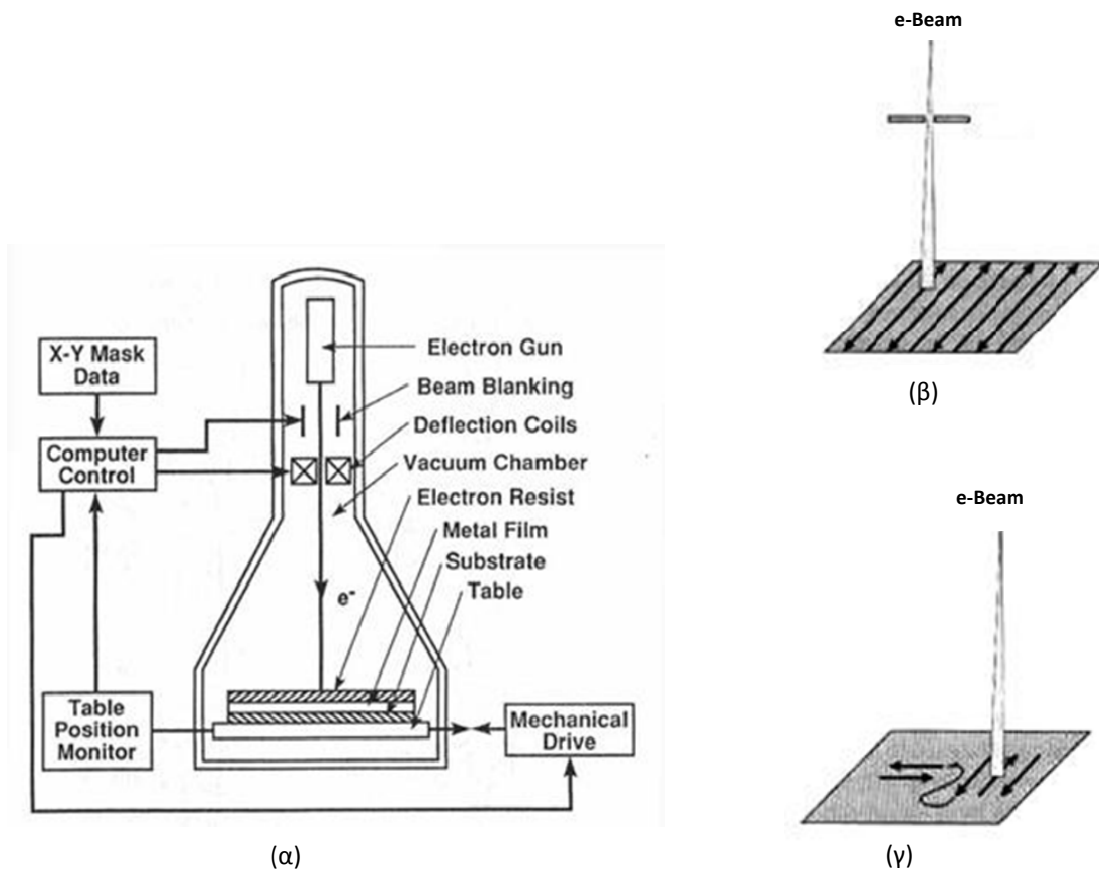
Το μηχανικό σύστημα αποτελείται από μια βάση στήριξης της μάσκας. Η βάση εκτελεί κίνηση δυο αξόνων στο επίπεδο  $x-y$ . Η κίνηση γίνεται σε κενό, υπό τον έλεγχο συμβολόμετρου λέιζερ για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης της. Το όλο σύστημα στήριξης πρέπει να είναι ανθεκτικό στις παραμορφώσεις. Η θερμοκρασία της βάσης διατηρείται σταθερή ώστε να περιοριστούν κατά το δυνατόν οι μεταβολές θερμοκρασίας της μάσκας και να γίνεται με ακρίβεια ο προσδιορισμός της θέσης.

- Ηλεκτρονικά ελέγχου

Ένας σταθμός εργασίας ελέγχει όλο το σύστημα συμπεριλαμβανομένου του μηχανικού συστήματος. Οδηγεί τους εκτροπείς στην EBL στήλης και προσδιορίζει τη θέση της δέσμης αναφορικά με την μάσκα κατά τη συνεχή κίνηση της βάσης στήριξης. Για μεγαλύτερη ταχύτητα υποστηρίζεται παράλληλη επεξεργασία ώστε να γίνεται ταυτόχρονη διαχείριση του μεγάλου όγκου δεδομένων προς εγγραφή και των δεδομένων για διόρθωση σφαλμάτων γειννίασης.

- Λογισμικό

Το λογισμικό αναλαμβάνει την προετοιμασία των δεδομένων, τον έλεγχο της έκθεσης και την γενική παρακολούθηση του συστήματος. Τα δεδομένα πρέπει να μετατραπούν κατάλληλα από ιεραρχημένα δεδομένα σχεδίασης σε δεδομένα έκθεσης. Ο έλεγχος του χρόνου ρίψης είναι καθοριστικής σημασίας και μεταβάλλεται ανάλογα με την πυκνότητα των σχεδίων στην περιοχή εγγραφής. Ο έλεγχος αυτός γίνεται από ειδικό λογισμικό διόρθωσης των σφαλμάτων γειννίασης.



Εικόνα 2.4 (α) Σχηματικό διάγραμμα συστήματος εγγραφής με ηλεκτρονική δέσμη (β) γραμμική σάρωση δέσμης ηλεκτρονίων (γ) διανυσματική σάρωση δέσμης ηλεκτρονίων

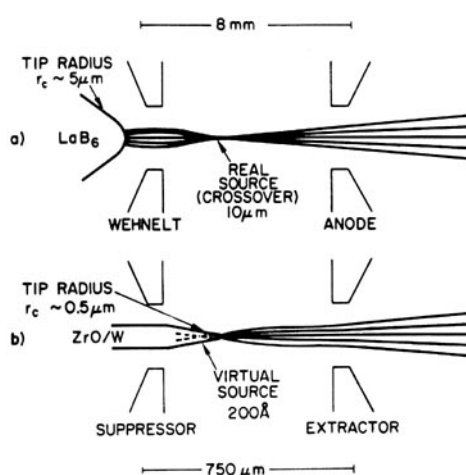
Κάθε σύστημα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων είναι εφοδιασμένο με ένα σύστημα εκτροπής της δέσμης μεγάλης ακρίβειας. Η επιφάνεια που μπορεί να σαρώσει με τον τρόπο αυτό είναι γενικά μικρότερη από μερικά τετραγωνικά χιλιοστά λόγω περιορισμών από το σύστημα φακών. Για το λόγο αυτό, η σάρωση της συνολικής επιφάνειας εγγραφής πραγματοποιείται με συνδυασμό εκτροπής της δέσμης και κίνησης της βάσης.

Έχουν εφαρμοστεί δυο τρόποι κίνησης της βάσης: ο βηματικός (step-and-repeat mode) και ο συνεχής (continuous movement mode) τρόπος (Rai-Choudhury 1997). Κατά τον βηματικό τρόπο η βάση μετατοπίζεται κατά μια απόσταση αφού προσδιοριστούν με ακρίβεια οι συντεταγμένες της. Εκεί σταματά και γίνεται η σάρωση ενός πεδίου καθώς το σύστημα εκτροπής μετακινεί τη δέσμη. Η σάρωση διακόπτεται όσο χρόνο διαρκεί η κίνηση της βάσης για να συνεχιστεί και πάλι όταν η βάση θα έχει τοποθετηθεί στη νέα της θέση. Όσο μεγαλύτερο είναι το πεδίο σάρωσης με εκτροπή της δέσμης τόσο μικρότερος είναι και ο χρόνος εγγραφής αφού απαιτούνται λιγότερα βήματα της βάσης, άρα και λιγότερος νεκρός χρόνος. Η συνεχής κίνηση της βάσης απαλλάσσει από το νεκρό χρόνο αφού κατά τη συνεχή κίνηση της σε μια διεύθυνση η δέσμη συνεχίζει να σαρώνει. Το πεδίο σάρωσης με εκτροπή της δέσμης μπορεί να είναι πολύ μικρότερο πράγμα που κάνει πολύ απλούστερη την διάταξη στην EBL στήλη. Εδώ είναι πιο σύνθετος ο συγχρονισμός συστήματος σάρωσης με το μηχανικό σύστημα κίνησης της βάσης.

Το σύστημα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει με δυο τρόπους: (α) γραμμική σάρωση (raster scanning mode) (β) διανυσματική σάρωση (vector scanning mode).



Κατά τον γραμμικό τρόπο (Εικόνα 2.4β) η δέσμη εκτρέπεται από το σύστημα εκτροπής σαρώνοντας όλο το πεδίο. Η δέσμη διακόπτεται σε περιοχές που δεν υπάρχουν σχήματα για εγγραφή. Ο χρόνος εγγραφής ενός σχεδίου δεν εξαρτάται από την πυκνότητα ή την πολυπλοκότητα των σχημάτων αφού όλη η μάσκα σαρώνεται ομοιόμορφα. Ο χρόνος έκθεσης είναι σταθερός και είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί μεγάλο εύρος δόσης. Αυτός ο τρόπος σάρωσης συνδυάζεται συνήθως με συνεχή κίνηση της βάσης στην οποία είναι τοποθετημένο το δείγμα. Ο σχεδιασμός των φακών του συστήματος είναι σχετικά απλός λόγω του μικρού μεγέθους του πεδίου σάρωσης με εκτροπή της δέσμης. Καθώς σαρώνει μια γραμμή η δέσμη, η βάση κινείται σε κάθετη διεύθυνση από τη γραμμή σάρωσης ώστε να σαρώσει την επόμενη γραμμή. Αυτές οι γραμμές ή ταινίες σάρωσης πρέπει να είναι στοιχισμένες με μεγάλη ακρίβεια γι' αυτό και η κίνηση της βάσης πρέπει να ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια.



Εικόνα 2.5 Δομή των ηλεκτροδίων και οι αντίστοιχες διαστάσεις. (α) πηγή LaB<sub>6</sub> (β) πηγή ZrO/W

Στον διανυσματικό τρόπο (Εικόνα 2.4γ), η δέσμη εκτρέπεται ώστε να σαρώνει μόνο τη περιοχή στην οποία υπάρχει κάποιο σχέδιο για εγγραφή. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος δόσεων διότι ο χρόνος έκθεσης κάθε εικονοστοιχείου μπορεί να είναι διαφορετικός, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό στη διόρθωση σφαλμάτων λόγω φαινομένων γειτνίασης. Έχει επίσης το πλεονέκτημα του μικρότερου χρόνου εγγραφής εφόσον δεν είναι απαραίτητο να σαρώσει τις περιοχές όπου δεν υπάρχουν σχήματα προς εγγραφή. Το μέγεθος του πεδίου σάρωσης με εκτροπή της δέσμης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο, για να παραμείνει μικρός ο χρόνος εγγραφής. Ο σχεδιασμός των φακών του συστήματος έχει συνθετότερη σχεδίαση για να περιορισθεί η παραμόρφωση της δέσμης λόγω μεγάλης εκτροπής της.

Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά. Επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα και την ποιότητα εγγραφής του συστήματος αφού η ευαισθησία του φωτοπολυμερούς και η πυκνότητα του ρεύματος ηλεκτρονίων εξαρτάται από αυτή. Σχετίζεται επίσης με την διακριτική ικανότητα, την ακρίβεια στην κρίσιμη διάσταση, την ακρίβεια τοποθέτησης των σχημάτων λόγω φαινομένων Coulomb και φαινομένων γειτνίασης που εμφανίζει η δέσμη.

Η απωστική δύναμη Coulomb μεταξύ των ηλεκτρονίων περιορίζει την οξύτητα των άκρων της δέσμης και οδηγεί στην θόλωση της δέσμης. Αυτή η θόλωση που δημιουργείται είναι ανάλογη του

$IL/V^{3/2}$  όπου  $I$  είναι το ρεύμα των ηλεκτρονίων,  $L$  το οπτικό μήκος της διαδρομής και  $V$  η τάση επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων (Crewe 1978). Μεγαλύτερο ρεύμα δίνει μεγαλύτερη ταχύτητα εγγραφής αλλά μειώνει την ανάλυση της δέσμης. Σε ένα σύστημα εγγραφής μεταβλητού σχήματος δέσμης το ρεύμα μεταβάλλεται από ρίψη σε ρίψη κατά την εγγραφή του σχεδίου γι' αυτό και η ανάλυση της δέσμης μπορεί να είναι διαφορετική σε κάθε ρίψη. Η δέσμη θα πρέπει να εστιάζεται εκ νέου σε κάθε ρίψη πράγμα που αυξάνει την πολυπλοκότητα κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος. Τα συστήματα παράλληλης έκθεσης είναι εύκολο να επανεστιάσουν καθώς ο χρόνος εστίασης είναι αμελητέος σε σχέση με το χρόνο εγγραφής μιας ομάδας σχημάτων.

Μικρότερες τιμές της τάσης προσφέρουν μεγαλύτερη ταχύτητα εγγραφής διότι η ευαισθησία του φωτοπολυμερούς είναι σε γενικές γραμμές αντίστροφα ανάλογη της τάσης  $V$ . Από την άλλη, η πυκνότητα ρεύματος είναι ανάλογη της τάσης  $V$ . Προκύπτει τελικά ότι η θόλωση της δέσμης που προκαλείται από το φαινόμενο Coulomb μειώνεται ανάλογα με το  $1/V^{1/2}$  για τον ίδιο χρόνο έκθεσης. Χημικώς ενισχυόμενα φωτοπολυμερή, πολύ μεγάλης ευαισθησίας έχουν χρησιμοποιηθεί επιτρέποντας τη χρήση μεγαλύτερης ενέργειας χωρίς να μειώνεται ο χρόνος εγγραφής. Όσο μεγαλύτερη η τάση τόσο εντονότερα γίνονται και τα φαινόμενα γειννίασης που εμφανίζει η δέσμη ηλεκτρονίων. Τα φαινόμενα αυτά θα εξετασθούν εκτενέστερα στην παράγραφο 2.5.6.

Η δέσμη σε κάποια συστήματα είναι εστιασμένη σε μια μικρή κηλίδα ενώ σε άλλα είναι πιο πλατιά, μεταβλητού σχήματος. Η πρώτη καλείται συνήθως σημειακή και η κατανομή της έντασης είναι γκαουσιανή. Η ταχύτητα εγγραφής ενός τέτοιου συστήματος είναι μικρή αλλά η διακριτική του ικανότητα πολύ μεγαλύτερη. Στη δεύτερη περίπτωση μια παραλληλόγραμμη δέσμη δημιουργείται από δύο τετραγωνικά διαφράγματα. Το ρεύμα των ηλεκτρονίων προσπίπτει στο πρώτο τετραγωνικό διάφραγμα. Η εικόνα του πρώτου διαφράγματος εστιάζεται σε ένα δεύτερο διάφραγμα από δύο φακούς προβολής. Οι εκτροπείς διαμόρφωσης του σχήματος μεταβάλλουν την επικάλυψη των δύο διαφραγμάτων. Η εικόνα που προκύπτει σμικρύνεται κατά  $1/25$  έως  $1/100$  από δύο φακούς σμίκρυνσης και έναν αντικειμενικό φακό και στη συνέχεια εστιάζεται στο υπόστρωμα. Στην περίπτωση της σημειακής δέσμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο τρόποι σάρωσης. Αντίθετα, για εγγραφή με δέσμη μεταβλητού σχήματος μόνο ο διανυσματικός τρόπος χρησιμοποιείται.

Συγκρινόμενο με το ρεύμα ηλεκτρονίων ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης το οποίο είναι της τάξης των  $10^{-10}$  A, το σύστημα εγγραφής απαιτεί ρεύμα της τάξης των  $10^{-6}$  A για να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός χρόνος εγγραφής. Η ανάλυση ή η θόλωση της δέσμης (beam blur) ενός συστήματος εγγραφής μπορεί να είναι περίπου το ένα τρίτο της μικρότερης διάστασης σχήματος. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα εγγραφής με ηλεκτρονική δέσμη για τον τεχνολογικό κόμβο των 90 nm η μέγιστη επιτρεπόμενη θόλωση δέσμης είναι 30-40 nm.

Το κατασκευαστικό πρόβλημα σε ένα τέτοιο σύστημα είναι πως θα επιτευχθεί μεγαλύτερο ρεύμα ηλεκτρονίων διατηρώντας χαμηλή τη θόλωση της δέσμης. Βελτιώσεις για την αύξηση της ταχύτητας μπορούν να γίνουν (α) στο κανόνι ηλεκτρονίων (β) στο σύστημα σχηματοποίησης της δέσμης (γ) στο σύστημα των αντικειμενικών φακών και (δ) στην τεχνολογία εκτροπής της δέσμης.

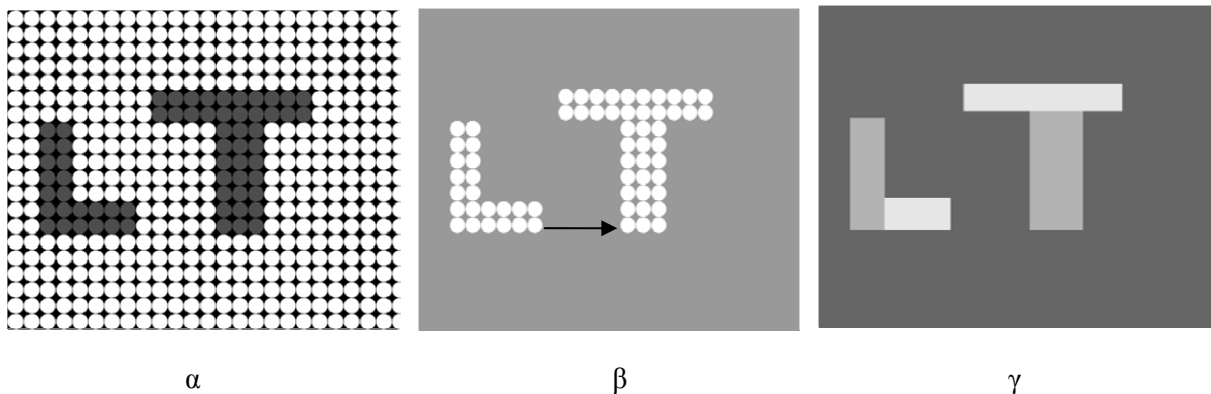
Υπάρχουν δύο τύποι πηγών ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούνται στη λιθογραφία. Θερμιονικής εκπομπής και εκπομπής πεδίου. Οι κυριότερες διαφορές τους βρίσκονται στη λειτουργία τους, τις συνθήκες κενού και τη θερμοκρασία. Η κάθοδος εκπομπής πεδίου αποτελείται από μια ακίδα βολφραμίου με επίχρισμα  $Zr/O$  το οποίο μειώνει το ύψος του φραγμού Schottky και δουλεύει περίπου στους 1800 K. Το κενό πρέπει να είναι μικρότερο των  $10^{-7}$  Pa. Αντίθετα, η θερμιονική κάθοδος  $LaB_6$

λειτουργεί σε κενό μικρότερο των  $10^{-5}$  Pa. Το ζητούμενο σε ένα τέτοιο σύστημα είναι να επιτευχθεί μικρό μέγεθος κηλίδας και μεγάλο ρεύμα ηλεκτρονίων. Η διάμετρος εξαρτάται από το μέγεθος του ειδώλου της πηγής, τη σφαιρική εκτροπή των φακών, τη χρωματική εκτροπή και τα φαινόμενα περίθλασης. Στην περίπτωση συστημάτων θερμικής εκπομπής το μέγεθος της ειδώλου στο σημείο σύγκλισης και η σφαιρική εκτροπή είναι οι καθοριστικοί παράγοντες της διαμέτρου της δέσμης. Το ρεύμα ηλεκτρονίων αυτών των συστημάτων είναι το γινόμενο  $B \cdot \alpha^2 \cdot S$  όπου B η φωτεινότητα,  $\alpha$  η ημίσεια γωνία στο υπόστρωμα και S το εμβαδό του ειδώλου στο σημείο σύγκλισης. Στην περίπτωση συστημάτων εκπομπής πεδίου, το μέγεθος της πηγής είναι πολύ μικρό.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάμετρο της πηγής είναι η σφαιρική εκτροπή και η περίθλαση. Το ρεύμα των ηλεκτρονίων δίνεται από το γινόμενο των  $\pi \cdot \alpha_E^2 \cdot \frac{dI}{d\Omega}$  όπου  $\alpha_E$  είναι η ημίσεια γωνία εκπομπής από την πηγή και  $dI/d\Omega$  το γωνιακό ρεύμα εκπομπής. Η μικρότερη διάμετρος κηλίδας καθορίζεται από τα φαινόμενα περίθλασης ( $1,2\lambda/\alpha$ ) και είναι στα 5 nm. Γενικά, τα συστήματα εκπομπής πεδίου μπορούν να πετύχουν μικρές διαμέτρους με μεγαλύτερα ρεύματα σε σύγκριση με τα συστήματα θερμικής εκπομπής γι' αυτό και είναι πιο αποτελεσματικά στη δημιουργία πολύ στενών δεσμών. Στα συστήματα θερμικής εκπομπής το είδωλο στο σημείο σύγκλισης είναι της τάξης μερικών εκατοντάδων νανομέτρων γι' αυτό και είναι αποτελεσματικά σε συστήματα εγγραφής με δέσμη μεταβλητού σχήματος.

### 2.3.2.1 Συστήματα γραμμικής σάρωσης

Τα συστήματα γραμμικής σάρωσης (Raster Scan Systems) χρησιμοποιούν μια απλή γκαουσιανή δέσμη για εγγραφή σχημάτων. Η δέσμη κινείται πάνω από τη μάσκα γραμμικά όπως η δέσμη ηλεκτρονίων στην οθόνη της τηλεόρασης. Το σύστημα είναι εφοδιασμένο με ένα διακόπτη δέσμης ελεγχόμενο ηλεκτρονικά που του δίνει τη δυνατότητα να εκθέτει ή να μην εκθέτει τις αντίστοιχες περιοχές του lithογραφικού υλικού δημιουργώντας έτσι το επιθυμητό σχήμα (Εικόνα 2.6 (α)).



Εικόνα 2.6 (α) Γραμμική σάρωση (β) διανυσματική σάρωση (γ) δέσμης μεταβλητού σχήματος

Σε ένα σύστημα γραμμικής σάρωσης η δέσμη σαρώνει επαναλαμβανόμενα μία μόνο γραμμή ενώ η βάση στήριξης της μάσκας κινείται σταθερά κάτω από τη δέσμη σε κάθετη διεύθυνση. Η απλότητα αυτή δίνει στο σύστημα πολλά πλεονεκτήματα. Μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί και να ελεγχθεί. Το μήκος γραμμής σάρωσης μπορεί να είναι σχετικά μεγάλο (~1mm) χωρίς να χάνεται η ακρίβεια. Η προετοιμασία των δεδομένων είναι εύκολη. Σε αρχείο ψηφιογραφικού τύπου (bitmap) περιέχονται ως δεδομένα εγγραφής οι συντεταγμένες των πλευρών των σχημάτων.

Ο ρυθμός παραγωγής στα συστήματα αυτά εξαρτάται από τη συχνότητα διακοπής της δέσμης και το μέγεθος του εικονοστοιχείου (address size) της δέσμης δηλ. η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών εκθέσεων. Για μεγαλύτερη ακρίβεια των εγγραφομένων σχημάτων απαιτείται μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείου. Όσο μικρότερο είναι αυτό τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η συχνότητα διακοπής και το ρεύμα των ηλεκτρονίων. Οι τεχνικές δυσκολίες θέτουν όρια στην αύξηση της συχνότητας διακοπής. Στα σύγχρονα εμπορικά συστήματα η τυπική συχνότητα διακοπής της δέσμης είναι 320 MHz. Ο στόχος είναι, ο χρόνος εγγραφής για υψηλής ποιότητας μάσκες να μην ξεπερνά τις έξι ώρες.

Η απόδοση ενός συστήματος γραμμικής σάρωσης ψηφιοπλέγματος δεν εξαρτάται από την ευαισθησία του πολυμερούς. Ως κανόνας, ένα σύστημα γκαουσιανής δέσμης είναι ικανό να δώσει αρκετό ρεύμα για κάθε ευαισθησία πολυμερούς. Όλο το ρεύμα πέφτει σε μία ρίψη. Η απόδοση είναι επίσης ανεξάρτητη από τα εγγραφομένα σχήματα. Η δέσμη πρέπει να σαρώσει ολόκληρη την επιφάνεια της μάσκας ανεξάρτητα από το ποσοστό κάλυψής της από σχήματα.

### **2.3.2.2 Συστήματα Διανυσματικής σάρωσης.**

Τα συστήματα διανυσματικής (Vector Scan Systems) σάρωσης σχεδιάστηκαν ώστε να αποφεύγεται η περιττή σάρωση πάνω από περιοχές όπου δεν υπάρχουν σχήματα για εγγραφή. Η δέσμη ξεκινά τη σάρωση από την άκρη ενός σχήματος και συνεχίζει γραμμικά αλλά μόνο μεταξύ των ορίων του εγγραφομένου σχήματος. Όταν η εγγραφή ενός σχήματος τελειώσει η δέσμη αποκόπτεται και εκτρέπεται στην αρχή του επόμενου σχήματος όπου συνεχίζεται η ίδια διαδικασία (Εικόνα 2.6 (β)). Γράφοντας ένα μόνο σχήμα δεν απαιτείται διακοπή της δέσμης και έτσι η ταχύτητα σάρωσης μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Το σύστημα αυτό εγγραφής πλεονεκτεί σε απόδοση όταν τα εγγραφομένα σχέδια είναι αραιά. Παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι το VB-6 της Leica Microsystems και το JBX-9300 της Jeol.

### **2.3.2.3 Συστήματα μεταβλητού σχήματος δέσμης.**

Το σύστημα μεταβλητού σχήματος δέσμης (Variable Shaped Beam Systems, VSB) δημιουργεί δέσμη μεγαλύτερη από μια γκαουσιανή κηλίδα και εκθέτει είτε ολόκληρο το σχήμα είτε ένα σημαντικό μέρος αυτού σε μια μόνο ρίψη (Εικόνα 2.6 (γ)). Η ιδέα αναπτύχθηκε αρχικά από την IBM (Pfeiffer 1978). Η δέσμη περνά πρώτα από ένα διάφραγμα τετραγωνικής διατομής αποκτώντας έτσι τετραγωνικό σχήμα και στη συνέχεια από ένα δεύτερο τετραγωνικό διάφραγμα. Μεταξύ των δύο διαφραγμάτων ένα σύστημα εκτροπής μετατοπίζει τη δέσμη κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση ώστε ένα μέρος της κόβεται από το δεύτερο διάφραγμα. Αυτό δίνει στη δέσμη το σχήμα που απαιτείται.

Η βάση στήριξης της μάσκας (stage) μπορεί να κινείται είτε συνεχόμενα είτε βηματικά. Η συνεχόμενη κίνηση δίνει μεγαλύτερη ταχύτητα εγγραφής. Η εγγραφή ορθογωνίων παραλληλογράμμων σχημάτων (Manhattan type) με τη μέθοδο αυτή είναι απλούστερη διαδικασία. Αν τα εγγραφομένα σχήματα έχουν γωνίες διαφορετικές των  $90^\circ$  είναι απαραίτητη η αποδόμηση του σχήματος σε ορθογώνια παραλληλόγραμμα. Το ελάχιστο μέγεθος ενός τέτοιου παραλληλογράμμου καθορίζει την πλευρική τραχύτητα του εγγεγραμμένου σχήματος. Βέβαια, όσο μικρότερα τα παραλληλόγραμμα στα οποία αποδομείται το αρχικό σχήμα τόσο μικρότερη η ταχύτητα εγγραφής. Σε μια μάσκα όπου το 3% των σχημάτων περιλαμβάνουν διαγώνιες γραμμές, ο χρόνος εγγραφής μπορεί να είναι και διπλάσιος αυτού που θα απαιτούνταν αν δεν υπήρχαν τέτοιες γραμμές. Επιπλέον, σε μια μάσκα με OPC (Optical proximity correction) απαιτείται η εγγραφή μεγάλου αριθμού μικρών σε μέγεθος ορθογωνίων παραλληλογράμμων γεγονός που μειώνει περαιτέρω τον χρόνο εγγραφής. Μάσκες με πολύπλοκα σχήματα μπορεί να απαιτούν και 20 έως 30 ώρες εγγραφής με τη χρήση των συστημάτων δέσμης μεταβλητού σχήματος συστημάτων.

Το VSB σύστημα δίνει τη δυνατότητα διόρθωσης του φαινομένου γειννίας ελέγχοντας τη δόση σε κάθε ρίψη (Dose proximity correction). Ο έλεγχος της δόσης δεν αυξάνει τον όγκο των δεδομένων όπως στην περίπτωση διόρθωσης με τροποποίηση των σχημάτων. Συγκρινόμενη με τη GHOST διόρθωση που χρησιμοποιείται στα συστήματα γραμμικής σάρωσης, οι διορθώσεις δόσης και σχήματος δίνουν μεγαλύτερη αντίθεση στη σχηματιζόμενη εικόνα. Ένα από τα προβλήματα που συνδέονται με τα vector συστήματα είναι η θέρμανση του πολυμερούς. Η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς μεταβάλλει την ευαισθησία του οδηγώντας σε παραμόρφωση των δομών. Αυτός είναι ένας από τους κύριους λόγους περιορισμού της απόδοσης σε ένα VSB σύστημα. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι το EL-4 της IBM, EBM-4000 της NuFl, JBX-9000 της Joel, AEBLE της Etec Systems, HL-7000 της Hitachi και SB-350 της Leica-Microsystems.

#### **2.3.2.4 Raster-Shaped System**

Είναι ένα σύστημα που συνδυάζει τις αρχές των VSB και Raster και αναπτύχθηκε από την ETEC systems). Η δέσμη μορφοποιείται με τη χρήση δύο διαφραγμάτων και ενός εκτροπέα μεταξύ αυτών. Η δέσμη εκτρέπεται σε διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση κίνησης της βάσης. Η δέσμη κινείται πάνω από ολόκληρη την επιφάνεια της μάσκας ανεξάρτητα εάν υπάρχει σχήμα για εγγραφή ή όχι, αλλά σε αντίθεση με την γκαουσιανή κηλίδα των συστημάτων γραμμικής σάρωσης μπορεί να γράψει περισσότερες από μια ψηφίδες σε μια ρίψη. Για το λόγο αυτό η απόδοση των raster-shaped συστημάτων είναι αισθητά μεγαλύτερη των παραδοσιακών συστημάτων γραμμικής σάρωσης.

#### **2.3.2.5 Cell-Projection Systems**

Τα συστήματα ομαδικής έκθεσης μοιάζουν με τα VSB με τη διαφορά ότι εκθέτουν ένα σύνολο σχημάτων με μία μόνο ρίψη. Σε ένα σχέδιο όπως αυτό μιας DRAM τα επιμέρους σχήματα επαναλαμβάνονται εκατομμύρια φορές. Πολλά επαναλαμβανόμενα σχήματα οργανώνονται σε ομάδες. Η δέσμη μορφοποιείται κατάλληλα περνώντας από ένα διάφραγμα που έχει τη μορφή μάσκας στένσιλ. Έτσι πολλά από τα επιμέρους σχήματα γράφονται ταυτόχρονα.

Πολλές διαφορετικές ομάδες σχημάτων μπορούν να κατασκευαστούν στο ίδιο διάφραγμα ενώ υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μιας από αυτές κατά την εγγραφή. Με τον τρόπο αυτό τα επαναλαμβανόμενα σχήματα γράφονται πολύ γρήγορα. Στις μάσκες όμως υπάρχουν πάντα και μεγάλες περιοχές με μη επαναλαμβανόμενα σχήματα. Αυτές εκτίθενται με ένα VSB σύστημα. Επειδή το ρεύμα διαχέεται σε μεγαλύτερη περιοχή η ταχύτητα εγγραφής κατά τον τρόπο VSB είναι αρκετά μικρή. Η ταχύτητα εγγραφής σε ένα σύστημα ομαδικής έκθεσης είναι μεγάλη σε περιπτώσεις επαναλαμβανόμενων σχεδίων. Για το λόγο αυτό τα συστήματα ομαδικής έκθεσης δεν χρησιμοποιούνται ευρέως αλλά μόνο για την εγγραφή μνημών. Η θέρμανση του πολυμερούς είναι ένα σημαντικό θέμα στη μέθοδο αυτή. Λεπτομερής διόρθωση των φαινομένων γειννίας δεν είναι δυνατή διότι εκτίθεται μια ολόκληρη περιοχή  $5 \times 5 \mu\text{m}$  σαν μια ομάδα χωρίς μεταβολή της δόσης και του σχήματος δέσμης.

#### **2.3.2.6 Μικροστήλες**

Νέα συστήματα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων υπόσχονται να ανταπεξέλθουν στις νέες προκλήσεις της διαδικασίας κατασκευής μασκών αλλά και της άμεσης εγγραφής. Από αυτά, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα πολλαπλών δεσμών.

Το ρεύμα ηλεκτρονίων και κατ' επέκταση η αντίστοιχη ταχύτητα εγγραφής σε συνήθη συστήματα εγγραφής περιορίζεται από την τυχαία αλληλεπίδραση Coulomb η οποία οδηγεί σε θόλωση της

δέσμης και έτσι σε μειωμένη ανάλυση και έλεγχο της κρίσιμης διάστασης. Ο μόνος τρόπος για να ξεπεραστεί το πρόβλημα είναι να δημιουργηθούν πολλές δέσμες. Έχουν το πλεονέκτημα της εγγραφής ενός σχεδίου με τη χρήση ανεξάρτητα κατευθυνόμενων παράλληλων δεσμών.

Το σύστημα των μικροστηλών (Microcolumn) εφευρέθηκε από την IBM και αναπτύχθηκε αργότερα από την Etec Systems (Muray, Spallas et al. 2000). Αποτελείται από μια σειρά (array) από διαφορετικές και πολύ κοντινές στήλες καθεμία με ένα σύστημα εκπομπής Shottky. Τα επιμέρους σχήματα του σχεδίου γράφονται παράλληλα. Κάθε κολόνα σαρώνει με τρόπο raster έχοντας τη δυνατότητα εκτροπής της δέσμης σε stripes πλάτους 100 μm. Η απόσταση μεταξύ των στηλών ήταν 2 cm.

Οι ηλεκτρονικοί φακοί, τα διαφράγματα και οι εκτροπείς κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τεχνολογία MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Μια μικροστήλη κατασκευάζεται ώστε να λειτουργεί σε μικρές τάσεις 1-2 KV. Η ρητίνη είναι διπλού στρώματος με την απεικόνιση να γίνει στο πρώτο και το δεύτερο αν χρησιμοποιείται στην εγχάραξη.

### **2.3.2.7 Συστήματα τυχαίου σχήματος δέσμης**

Τα συστήματα τυχαίου σχήματος δέσμης (Arbitrarily shaped beam System, ASB) έχουν τη δυνατότητα να δώσουν στη δέσμη οποιοδήποτε σχήμα, όχι μόνο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ή τρίγωνο. Γράφοντας ένα σύνθετο σχέδιο, αυτή η ευελιξία στο σχήμα της δέσμης μπορεί να μειώσει το χρόνο εγγραφής διαιρώντας ένα σχήμα σε μικρότερα τυχαία σχήματα. Πλεονεκτούν έναντι των συστημάτων μεταβλητού σχήματος δέσμης όταν πρόκειται να γράψουν σχήματα με διαγώνιες γραμμές ή με OPC χαρακτηριστικά. Φαίνεται από το σχήμα ότι ένα ASB απαιτεί σημαντικά λιγότερες ρίψεις αλλά δίνει και πιο ακριβή αποτελέσματα αφού πλησιάζει το ιδανικό σχήμα μετά το OPC. Το ASB σύστημα χρησιμοποιεί τέσσερα διαφορετικά διαφράγματα για τη σχηματοποίηση της δέσμης καθένα από τα οποία κόβει την αρχική ευρεία δέσμη σε καθορισμένη θέση και γωνία (Babin 2004). Ηλεκτρονικοί εκτροπείς χρησιμοποιούνται όπως και στο VSB. Τα διαφράγματα είναι κυκλικά ή πολυγωνικά.

## **2.3.3 Συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων**

Στην πορεία της τεχνολογίας κατασκευής μασκών, τα συστήματα γραμμικής σάρωσης αναπτύχθηκαν πρώτα ακολουθούμενα από τα συστήματα επιλεκτικής σάρωσης. Αργότερα εμφανίστηκαν τα συστήματα μεταβλητού σχήματος δέσμης και τα συστήματα ομαδικής έκθεσης. Παρόλα αυτά μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 90 τα γραμμικής σάρωσης MEBES συστήματα παρέμειναν το κυρίαρχο εργαλείο κατασκευής μασκών. Οι βασικοί παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και που αξιολογούν ένα σύστημα ηλεκτρονικής λιθογραφίας είναι η ακρίβεια στην εγγραφή και η απόδοση.

### **2.3.3.1 Ακρίβεια στην εγγραφή σχημάτων**

- Προφίλ της δέσμης

Το προφίλ της δέσμης έχει άμεση επίδραση στην ακρίβεια εγγραφής. Το κυριότερο πλεονέκτημα των VSB συστημάτων έναντι αυτών γραμμικής σάρωσης είναι η ικανότητά τους να δίνουν κάθετα τοιχώματα (Sharp edges). Το θόλωμα της δέσμης μεταφράζεται σε μεταβολές της κρίσιμης διάστασης. Αν στα συστήματα γραμμικής σάρωσης χρησιμοποιηθεί πολύ λεπτή δέσμη με αντίστοιχα

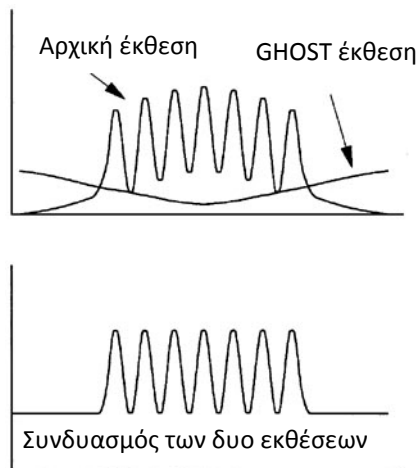
μικρό θόλωμα, το μέγεθος διεύθυνσης πρέπει να είναι πολύ μικρό πράγμα που οδηγεί μεγάλους, μη πρακτικούς χρόνους.

- Σφάλματα συνέχειας σχημάτων (stiching errors)

Λαμβάνουν χώρα εκεί όπου ένα σχήμα χωρίζεται σε περισσότερα τμήματα τα οποία πρέπει να γραφούν χωριστά. Τέτοια σφάλματα συμβαίνουν στα συστήματα γραμμικής σάρωσης σε μια διάσταση και στα vector σε δύο διαστάσεις. Στα συστήματα γραμμικής σάρωσης τα σφάλματα αυτά είναι πολύ λιγότερα συγκρινόμενα με όλα τα άλλα συστήματα. Επίσης στα συστήματα γραμμικής σάρωσης είναι ευκολότερη η ρύθμιση και η διόρθωση.

- Φαινόμενα γειτνίασης

Τα φαινόμενα γειτνίασης που προκύπτουν λόγω σκέδασης των ηλεκτρονίων οδηγούν σε μεταβολές της κρίσιμης διάστασης και εξαρτώνται από την τοπική πυκνότητα σχημάτων. Στο σύστημα γραμμικής σάρωσης δεν απαιτείται χρονοβόρα προετοιμασία δεδομένων για διόρθωση φαινομένων γειτνίασης. Με τη μέθοδο GHOST (Owen and Rissman 1983) απαιτείται μια επιπλέον σάρωση με τη χρήση μη εστιασμένης δέσμης (Εικόνα 2.7). Τα δεδομένα για τη σάρωση αυτή είναι το ίδιο σχέδιο.



Εικόνα 2.7 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου GHOST. Οι καμπύλες του πάνω σχήματος παριστάνουν την κατανομή ενέργειας στο lithογραφικό υμένιο για επτά γραμμές της βασικής έκθεσης και της έκθεσης GHOST. Το κάτω σχήμα δείχνει το τελικό αποτέλεσμα, την εξισορρόπηση της δόσης.

Αυτό εξισορροπεί παντού τη δόση των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων σε ολόκληρο το σχέδιο. Αν το συνολικό σχέδιο γράφεται σε τέσσερις διαδοχικές σαρώσεις, οι διορθώσεις των φαινομένων γειτνίασης προσθέτουν ένα ακόμη που αντιστοιχεί στο 20% του συνολικού χρόνου εγγραφής. Τα συστήματα επιλεκτικής σάρωσης χρησιμοποιούν μέθοδο διόρθωσης δόσης για κάθε εγγραφόμενο σχήμα η οποία είναι πιο ακριβής από τη μέθοδο GHOST και δεν μειώνει την αντίθεση της λανθάνουσας εικόνας (aerial image). Με τη μέθοδο όμως αυτή το πλήθος των εγγραφόμενων σχημάτων αυξάνει κατά μια τάξη μεγέθους αυξάνοντας ανάλογα και το χρόνο εγγραφής.

- Θέρμανση του lithογραφικού υλικού

Η θέρμανση του ευαίσθητου στην ηλεκτρονική δέσμη lithογραφικού υλικού είναι από τους κυριότερους παράγοντες δημιουργίας σφαλμάτων ((Ki, Ahn et al. 2005; Babin and Kuzmin 2006)). Αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά έχει σαν αποτέλεσμα μεταβολή της ευαισθησίας του πολυμερούς άρα και τη κρίσιμη διάσταση. Στα VSB συστήματα υψηλής και μεσαίας τάσης (>10KV)

εμφανίζεται κυρίως αυτό το πρόβλημα. Τυπικά, η περιοχή τοπικής αύξησης της θερμοκρασίας είναι της τάξης των 30-100nm στα 50 KV που είναι περίπου και το μέγεθος του υποπεδίου στα VSB συστήματα. Για την ελάττωση της θέρμανσης χρησιμοποιούνται πολλαπλές σάρωσεις αντί για μια με μεγαλύτερη δέσμη. Όλες οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μειώνουν όμως την ταχύτητα εγγραφής. Τα χημικώς ενισχυόμενα πολυμερή θετικού τόνου πλεονεκτούν συγκρινόμενα με άλλα ως προς την ταχύτητα εγγραφής λόγω της μεγάλης τους ευαισθησίας. Για το λόγο εμφανίζουν μικρή απόκριση στη θέρμανση. Στα συστήματα γραμμικής σάρωσης το πρόβλημα είναι μικρότερο κατά μία τάξη μεγέθους λόγω της αργής σάρωσης κατά τη διάρκεια της οποίας η θερμότητα έχει το χρόνο να διαχυθεί.

- Θόλωση, Φόρτιση, Θέρμανση του υποστρώματος

Τα παραπάνω φαινόμενα δεν εξαρτώνται από τη μέθοδο εγγραφής αλλά από τα επιμέρους στοιχεία της διάταξης εγγραφής.

*Θόλωση* είναι το φαινόμενο πρόσθετης ακτινοβολήσης του πολυμερούς από ηλεκτρόνια προερχόμενα από τη βάση των αντικειμενικών φακών (fogging electrons) (Hudek, Denker et al. 2007). Τα πρωταρχικά ηλεκτρόνια οπισθοσκεδάζονται στη μάσκα και φτάνουν στη βάση του αντικειμενικού φακού. Εκεί επανασκεδάζονται και επιστρέφουν στο πολυμερές δημιουργώντας έτσι μια ανεπιθύμητη έκθεση σε μια περιοχή μερικών χιλιοστών.

Η *φόρτιση* του πολυμερούς εξαρτάται κυρίως τις ιδιότητές του και την ενέργεια των ηλεκτρονίων.

Η *θέρμανση* του υποστρώματος της μάσκας δημιουργεί προβλήματα ακρίβειας τοποθέτησης τα οποία εξαρτώνται από το σύστημα στήριξης της μάσκας.

### **2.3.3.2 Ταχύτητα εγγραφής**

Στα συστήματα γραμμικής σάρωσης ο χρόνος εγγραφής δεν εξαρτάται από το εγγραφόμενο σχέδιο αλλά μόνο από το μέγεθος διεύθυνσης. Ιστορικά ο στόχος ήταν να διατηρηθεί ο χρόνος εγγραφής εντός του ορίου των 6 ωρών. Ο χρόνος εγγραφής στα συστήματα επιλεκτικής σάρωσης, στα συστήματα μεταβλητής δέσμης και στα ομαδικής έκθεσης εξαρτάται ισχυρά από το εγγραφόμενο σχέδιο.

Ο *χρόνος αποκατάστασης* είναι βασική παράμετρος καθορισμού του συνολικού χρόνου εγγραφής. Είναι ο χρόνος από τη στιγμή που θα ολοκληρωθεί μια στιγμιαία έκθεση μέχρι η δέσμη να μετακινηθεί και να είναι έτοιμη για την επόμενη στιγμιαία έκθεση.

Οι *διαγώνιες γραμμές* επηρεάζουν σημαντικά το χρόνο εγγραφής. Στα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούνται δέσμες σχήματος παραλληλογράμμου. Έτσι, σχήματα με διαγώνιες γραμμές προσεγγίζονται με ένα πλήθος παραλληλόγραμμων σχημάτων για την εγγραφή τους. Στα συστήματα δέσμης μεταβλητού σχήματος, το πλήθος των στιγμιαίων εκθέσεων που απαιτούνται αυξάνει σημαντικά όταν υπάρχουν διαγώνιες γραμμές. Αν το 3% των εγγραφόμενων σχημάτων έχουν διαγώνιες γραμμές, το συνολικό πλήθος στιγμιαίων εκθέσεων φτάνει στο διπλάσιο. Οι διαγώνιες γραμμές δεν επηρεάζουν τα συστήματα γραμμικής σάρωσης ούτε τα συστήματα δέσμης τυχαίου σχήματος.

Στα συστήματα μεταβλητού σχήματος δέσμης, η σχηματοποίηση της δέσμης έχει άμεση επίδραση στο χρόνο εγγραφής ο οποίος εξαρτάται από τη ευαισθησία του πολυμερούς. Το συνολικό ρεύμα της



δέσμης ηλεκτρονίων κατανέμεται ομαλά στην περιοχή έκθεσης το μέγιστο μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το σύστημα εγγραφής. Στα συστήματα μεταβλητού σχήματος δέσμης, σε μια στιγμιαία έκθεση χρησιμοποιείται ένα μέρος μόνο της συνολικής δέσμης, αυτό που επιτρέπεται να περάσει από τα διαφράγματα σχηματοποίησης της δέσμης. Αυτή η περιορισμένη χρησιμοποίηση του συνολικού ρεύματος αυξάνει το χρόνο εγγραφής αφού απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος έκθεσης. Ακόμη πιο περιορισμένη χρήση του συνολικού ρεύματος γίνεται στα συστήματα ομαδικής έκθεσης όπου η συνολική δέσμη κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με τα συστήματα δέσμης μεταβλητού σχήματος. Η χρήση μικρού μόνο μέρους και πάλι αυξάνει το χρόνο εγγραφής. Στα συστήματα γραμμικής και επιλεκτικής σάρωσης, εφόσον το συνολικό ρεύμα ηλεκτρονίων κατανέμεται σε μια απλή γκαουσιανή κηλίδα δεν υπάρχουν τέτοια προβλήματα λόγω κοψίματος της δέσμης.

Ο χρόνος εγγραφής είναι μικρότερος στα συστήματα εγγραφής με Laser από ότι στα συστήματα δέσμης ηλεκτρονίων. Η ποιότητα όμως της μάσκας που κατασκευάζεται δεν είναι το ίδιο καλή. Η τυπική πρακτική σήμερα είναι να χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων όταν πρόκειται για μικρότερες ποσότητες масκών υψηλών προδιαγραφών. Όταν οι απαιτήσεις ποιότητας δεν είναι τόσο μεγάλες αλλά το ενδιαφέρον είναι η μεγάλη παραγωγή, χρησιμοποιούνται συστήματα εγγραφής με λέιζερ.

## 2.4 Λιθογραφικά υλικά για την κατασκευή масκών

Τα λιθογραφικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας (< 5 keV) πρέπει να είναι υλικά με πολύ υψηλή αντίσταση στην εγχάραξη ώστε να γίνει εφικτή η χρήση πολύ λεπτών υμενίων τους και αυτό διότι τα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια παρουσιάζουν σημαντική μείωση στο βάθος διείσδυσης. Στη περίπτωση υλικών όπου εφαρμόζεται δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας (> 5 keV) απαιτούνται υλικά υψηλής ευαισθησίας και αυτό γιατί λόγω του μεγάλου βάθους διείσδυσης των ηλεκτρονίων, αυτά απορροφώνται σημαντικά από το υπόστρωμα και λιγότερο από το λιθογραφικό υλικό.

Η ανάπτυξη υλικών κατάλληλων για έκθεση με δέσμη ηλεκτρονίων περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση αυτών ως προς την ευαισθησία, τη διακριτική ικανότητα και την αντοχή στην εγχάραξη. Υλικά αυτής της κατηγορίας βασίζονται στο μηχανισμό διάσπασης της κύριας αλυσίδας και στο μηχανισμό χημικής ενίσχυσης. Επιπλέον έχουν αναπτυχθεί και μοριακά λιθογραφικά υλικά που διαφοροποιούνται σημαντικά από τη βασική πλατφόρμα των συνηθισμένων υλικών που βασίζονται σε πολυμερή.

### 2.4.1 Υλικά Μηχανισμού Διάσπασης Κύριας Αλυσίδας για Έκθεση σε Δέσμη Ηλεκτρονίων

Το πρώτο υλικό που βασίζεται στο μηχανισμό αποπολυμερισμού με διάσπαση της κύριας αλυσίδας και έχει μελετηθεί εκτενώς είναι το PMMA (Εικόνα 1.14) που παρέχει την υψηλότερη ανάλυση από τα περισσότερα λιθογραφικά υλικά καθώς έχει αναφερθεί η απεικόνιση δομών μικρότερων από 10 nm (Chen and Ahmed 1993).

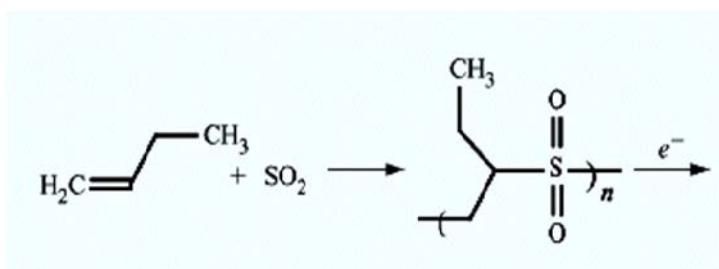
Το PMMA υφίστανται διάσπαση της βασικής αλυσίδας του πολυμερούς με αποτέλεσμα τη μείωση του μοριακού βάρους του αρχικού πολυμερούς. Αυτή η μείωση έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση στη διαλυτότητα σε κατάλληλο οργανικό εμφανιστή (Raptis, Velessiotis et al. 2000). Δηλαδή, το αρχικά αδιάλυτο υλικό μετατρέπεται στο μικρότερου μοριακού βάρους διαλυτό

πολυμερές. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση η τελική ανάλυση καθορίζεται από το μέγεθος των παραγόμενων θραυσμάτων μετά την έκθεση και όχι από το αρχικό μέγεθος του μορίου. Το PMMA - κλασικό παράδειγμα υλικού ενός συστατικού- έχει χαμηλή ευαισθησία:  $100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  στα 20 keV και επιπλέον έχει φτωχή αντίσταση στην εγχάραξη με πλάσμα. Έχει πολύ καλή πρόσφυση και δίνει πολύ καλά υμένα πάνω σε κάθε επιφάνεια, διατηρεί τις ιδιότητές του για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα και δεν είναι ευαίσθητο στο λευκό φως.

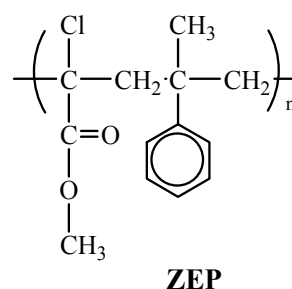
Το Poly(1-butene sulfone) ή PBS έχει μεγάλη ευαισθησία επιτρέποντας την δημιουργία σχημάτων με δόσεις κάτω από το  $1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  στα 10 kV (Bowden, Thompson et al. 1975). Το PBS είναι ένα συμπολυμερές διοξειδίου του θείου και 1-βουτενίου στο οποίο το σπάσιμο της αλυσίδας γίνεται στο δεσμό μεταξύ του άνθρακα και του θείου όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8.

Η αντίδραση έχει μεγάλη εξάρτηση από τη θερμοκρασία και δίνει διοξείδιο του θείου και οργανικά παράγωγα. Για την εμφάνιση του χρησιμοποιείται οργανικό διάλυμα μεθυλο-ισοπρόπυλο-κετόνης 30% και 70% μεθυλο-ισοάμυλο-κετόνης. Ο ρυθμός διάλυσής του εξαρτάται από την παρουσία υγρασίας.

Το PBS και το PMMA έχουν μικρή αντίσταση στην ξηρή εγχάραξη με αλογόνα, μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την εγχάραξη του χρωμίου. Για το λόγο αυτό η χρήση τους περιορίζεται σε εφαρμογές υγρής εγχάραξης.



Εικόνα 2.8 Το σπάσιμο αλυσίδας στο PBS



Εικόνα 2.9 Χημική δομή του [poly(methyl- $\alpha$ -chloroacrylate-co- $\alpha$ -methylstyrene)]

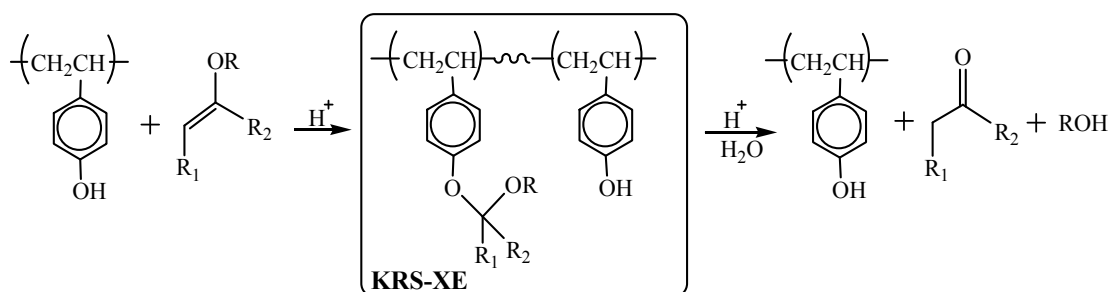
Ένα υλικό που αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα με βελτιωμένη ευαισθησία και αντοχή στην εγχάραξη είναι το [poly(methyl- $\alpha$ -chloroacrylate-co- $\alpha$ -methylstyrene), γνωστό ως ZEP]. Το ZEP (Εικόνα 2.9) χρησιμοποιείται για την κατασκευή μασκών απεικόνισης με χαρακτηριστικές διαστάσεις 250 nm (Medeiros, Aviram et al. 2001)

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το σχεδιασμό υλικών που βασίζονται στο μηχανισμό φωτοδιάσπασης της κύριας αλυσίδας του πολυμερούς κατά την έκθεση. Βασικός σκοπός της υιοθέτησης τέτοιων υλικών είναι η αντιμετώπιση της πλευρικής τραχύτητας (SUGITA 1997), (Eschbaumer, Heusinger et al. 2003) που αποτελεί έντονο πρόβλημα στην απεικόνιση πολύ μικρών δομών. Το μέγεθος των θραυσμάτων συνήθως είναι ίσο με το μήκος ελάχιστων δεσμών και συνεπώς το LER που δημιουργείται σε αυτήν την περίπτωση είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος του μορίου μίας πολυμερικής αλυσίδας (Sakamizu and Shiraishi 2004). Τέτοια πολυμερή είναι αυτά που περιέχουν καρβονυλικές, εστερικές, αιθερικές, σιλανικές, και κεταλικές ομάδες στη βασική τους αλυσίδα.

### 2.4.2 Υλικά Μηχανισμού Χημικής Ενίσχυσης για Έκθεση σε Δέσμη Ηλεκτρονίων

Για την περαιτέρω σμίκρυνση των διαστάσεων χρειάζονται συστήματα ηλεκτρονικής δέσμης τα οποία θα λειτουργούν ικανοποιητικά με μεγάλη ενέργεια ηλεκτρονικής δέσμης (μεγαλύτερη τάση). Με μεγαλύτερη ενέργεια επιτυγχάνονται καλύτερες τομές των δομών, ωστόσο αυτά τα συστήματα οδηγούν σε μείωση της ευαισθησίας των υλικών καθώς απορροφώνται λιγότερα ηλεκτρόνια από το ευαίσθητο λιθογραφικό υλικό συγκριτικά με αυτά που απορροφώνται από το υπόστρωμα. Για το λόγο αυτό, πιο ευαίσθητα υλικά, όπως τα υλικά μηχανισμού χημικής ενίσχυσης, προτάθηκαν για έκθεση σε δέσμη ηλεκτρονίων μεγάλης ενέργειας.

Στην Εικόνα 2.10 δίνεται ένα παράδειγμα υλικού μικρής ενέργειας ενεργοποίησης που φέρει την εμπορική ονομασία KRS-XE και έχει αναπτυχθεί κυρίως για έκθεση στα 248 nm. Το KRS-XE είναι συμπολυμερές με βάση το PHS μερικώς προστατευμένο με κεταλική ομάδα το οποίο επιτυγχάνει ανάλυση < 60 nm και η ευαισθησία του σε έκθεση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι  $18 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  στα 75 keV, ενώ εμφανίζεται σε υδατική βάση.



Εικόνα 2.10 Σύνθεση του πολυμερούς KRS και οξεοκαταλυόμενη αποπροστασία σε PHS

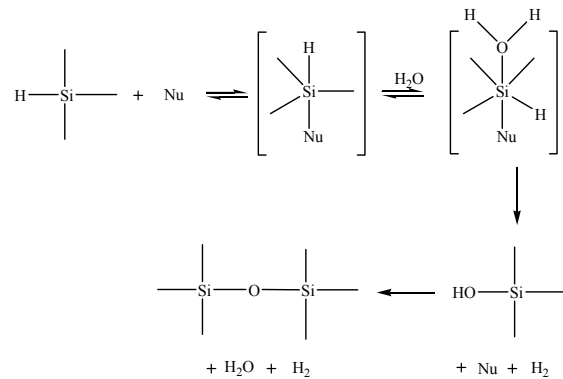
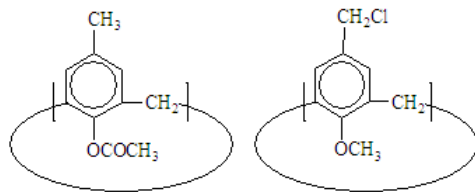
Σε έκθεση με δέσμη ηλεκτρονίων έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί τα αρνητικού τόνου εποξειδικά υλικά με άλατα τριφαινυλοσουλφονίου (Argitis, Raptis et al. 1995). Τα συγκεκριμένα αρνητικού τόνου εποξειδικά υλικά αναφέρεται ότι βρίσκουν εφαρμογή ως λιθογραφικά υλικά υψηλής ευαισθησίας εκτός από την εγγραφή με δέσμη ηλεκτρονίων (Bilenberg, Jacobsen et al. 2006), δέσμη πρωτονίων (Menzel, Spemann et al. 2006), (Auzelyte, Elfman et al. 2006) και ακτίνες-X (Seo, Lee et al. 1999), (Balslev and Romanato 2005) επίσης στην κατασκευή μασκών και στην κατασκευή μικροσυστημάτων μεγάλου λόγου ύψους προς πλάτος (Balslev, Bilenberg et al. 2005).

Ιδιαίτερα τα αρωματικά εποξειδικά υλικά παρουσιάζουν ισχυρή αντίσταση στην εγχάραξη με πλάσμα λόγω των αρωματικών δακτυλίων του πολυμερούς. Παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το αρωματικό πολυμερές κρεσόλης-φορμαλδεΰδης, και περιέχει ως φωτοευαίσθητοπινητή ένα άλας τριαρυλοσουλφονίου. Η χημεία αλλαγής διαλυτότητας βασίζεται στην οξεοκαταλυόμενη δημιουργία σταυροδεσμών μεταξύ των εποξειδικών δακτυλίων ((Argitis, Raptis et al. 1995), (Argitis, Boyatzis et al. 1998)).

### 2.4.3 Μοριακά Ακτινοευαίσθητα Υλικά για Έκθεση σε Δέσμη Ηλεκτρονίων

Τα τελευταία χρόνια αναφέρονται στη βιβλιογραφία μικρού μοριακού βάρους τόσο οργανικά και ανόργανα μόρια όσο και πολυμερή, ενώ επίσης έχουν γίνει μελέτες με χημικώς ενισχυμένα και μη υλικά. Εκτεταμένη έρευνα σε αυτήν την κατηγορία υλικών έχει πραγματοποιηθεί με βάση τα calixarenes (Εικόνα 2.11), τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως -ανάλογα των φαινολικών πολυμερών- κυκλικά ολιγομερή. Τα calix[n]arenes, όπου n= 4-20 ο αριθμός των φαινολικών ομάδων που υπάρχουν στο μόριο σε κυκλική διευθέτηση (Handique and Baruah 2002), έχουν διάμετρο

μορίου ~1 nm και συντίθενται με συμπύκνωση φαινολών με φορμαλδεΐδη. Γενικά έχουν μικρή διαλυτότητα στους οργανικούς διαλύτες και είναι κυρίως κρυσταλλικά. Παρουσιάζουν ισχυρή απορρόφηση στα 216 και 285 nm, ενώ είναι διαπερατά περίπου στα 250 και πάνω από τα 300 nm. Η ευαισθησία τους είναι αρκετά μικρότερη από τα συνήθη υλικά ηλεκτρονικής δέσμης (απαιτούν 20 φορές μεγαλύτερη δόση έκθεσης από τον PMMA) καθώς λόγω του μικρού μορίου τους απαιτείται μεγαλύτερη δόση για τη χημική σταυροδέσμευση περισσότερων σημείων που θα οδηγήσει σε gel (Fujita, Ohnishi et al. 1998) Η διακριτική ικανότητα των υλικών αυτών είναι 10 nm (Fujita, Ohnishi et al. 1996), ενώ του χλωριωμένου αναλόγου είναι 8 nm δηλαδή έχουν αποτυπωθεί δομές με ελάχιστη διάσταση 8 φορές του μεγέθους του μορίου.



Εικόνα 2.11 Παραδείγματα λιθογραφικών υλικών ηλεκτρονικής δέσμης με βάση τα calixarenes.

Εικόνα 2.12 Λιθογραφικό υλικό ηλεκτρονικής δέσμης είναι και οι υδρογονωμένες σιλεναμισοξάνες. Στην εικόνα φαίνεται ο προτεινόμενος μηχανισμός μετατροπής των ομάδων Si-H σε σιλoxανικό δίκτυο Si-O-Si παρουσία νερού και ενός πυρηνόφιλου (Nu).

Παρόμοια με τα calixarenes μοριακά συστήματα μικρού μοριακού βάρους αποτελούν οι υδρογονωμένες σιλεναμισοξάνες (Hydrogen Silsesquioxanes, HSQ) (Namatsu, Takahashi et al. 1998a; Namatsu, Yamaguchi et al. 1998b) που δίνουν αρνητικού τόνου απεικόνιση με έκθεση σε δέσμη ηλεκτρονίων (Εικόνα 2.12). Σύμφωνα με τον προτεινόμενο μηχανισμό, η ακτινοβολία προκαλεί διάσπαση των σιλανικών δεσμών (Si-H) που μετατρέπονται παρουσία μορίων νερού σε ομάδες Si-OH. Οι τελευταίες συμπυκνώνονται για να σχηματίσουν το αδιάλυτο σιλoxανικό δίκτυο (Si-O-Si). Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των υλικών είναι ότι παρέχουν εύκολα υμένια με μηχανική επίστρωση, επιδεικνύουν ικανότητα υψηλής ανάλυσης -με πολύ χαμηλή όμως ευαισθησία- και παρουσιάζουν πρόβλημα σταθερότητας. Η ευαισθησία τους μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση φωτοβάσεων που παράγουν πυρηνόφιλη ομάδα και καταλύουν το σχηματισμό του χημικού δικτύου (Jeyakumar and Henderson 2004).

Στις πρώτες ερευνητικές προσπάθειες εισαγωγής μικρών μορίων στη λιθογραφία συγκαταλέγεται και η μελέτη των P.G. Robinson et al (Robinson, Palmer et al. 1999), σχετικά με τα φουλερένια και παράγωγα αυτών. Τα φουλερένια έχουν χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετα σε μήτρες άλλων υλικών όπως για παράδειγμα σε υλικά των 193 nm (PMMA) με σκοπό να αυξήσουν την αντοχή τους στην εγχάραξη. Επίσης τα φουλερένια έχουν προστεθεί στο ZEP με στόχο την αύξηση της θερμικής του αντίστασης (αύξηση της  $T_g$ ) και τη βελτίωση της μηχανικής αντίστασης για την αποφυγή της κατάρρευσης των δομών κατά την εμφάνιση (Ishii, Nozawa et al. 1997). Το μέγεθος του φουλερενίου ( $C_{60}$ ) είναι ~ 1 nm και έχουν χρησιμοποιηθεί ως αρνητικού τόνου υλικά, μικρής ευαισθησίας που υφίστανται πολυμερισμό με έκθεση σε δέσμη ηλεκτρονίων. Ο σχηματισμός των υμενίων αυτών των

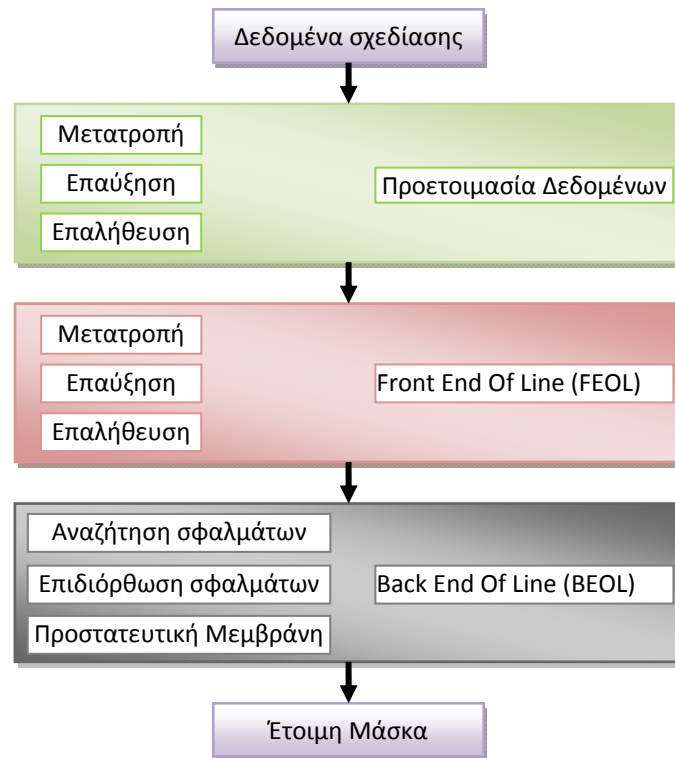
υλικών πραγματοποιείται με απόθεση από αέρια φάση, ωστόσο έχουν αναπτυχθεί και παράγωγα των φουλερενίων που σχηματίζουν υμένια με μηχανική επίστρωση και παρέχουν ανάλυση δομών διάστασης μέχρι και 20 nm (Tada and Kanayama 1996). Η ευαισθησία του C<sub>60</sub> είναι 10 mC/cm<sup>2</sup> και του PMMA 5 mC/cm<sup>2</sup> στα 20 keV, η ευαισθησία όμως του φουλερενίου αυξάνει σημαντικά με την εισαγωγή πολυ(αιθερικών) λειτουργικών ομάδων ευαίσθητων σε όξινη κατάλυση, με την εφαρμογή δηλαδή της αρχής της χημικής ενίσχυσης (Robinson, Zaid et al. 2006).

Η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων έχει αποτελέσει σημείο αναφοράς για τα μοριακά ακτινοευαίσθητα υλικά. Η ανάγκη για σχεδιασμό λιθογραφικών υλικών πολύ μεγάλης διακριτικής ικανότητας για λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης και για λιθογραφία της επόμενης γενιάς, (διακριτική ικανότητα < 50 nm) που να πληρούν αυστηρά τις προδιαγραφές πλευρικής τραχύτητας, έχει οδηγήσει στη θεώρηση ότι οι μοριακές διαστάσεις των συστατικών του υλικού μπορούν να παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα των σχηματιζόμενων δομών. Παρόλα αυτά, σε κάθε περίπτωση πρέπει να ληφθούν επίσης υπόψη: η ευαισθησία, η συμβατότητα με τις λιθογραφικές διεργασίες της βιομηχανίας δηλαδή εμφάνιση σε υδατική βάση, μηχανική επίστρωση, ιδιότητες μεταφοράς απεικόνισης με εγχάραξη κ.ά.

## 2.5 Διαδικασία κατασκευής μάσκας

Μάσκες κατασκευάζονται με μια ποικιλία μεθόδων από το 1960. Η διαδικασία κατασκευής των χρώμιο σε γυαλί μασκών είναι τυποποιημένη και ευρέως γνωστή σήμερα παρότι ειδικές λεπτομέρειες αποτελούν ιδιοκτησία του κατασκευαστή.

Τα σχήματα που φέρουν οι μάσκες δημιουργούνται από ειδικά λογισμικά αυτοματοποιημένης σχεδίασης γνωστά ως CAD (computer aided design) ή EDA (electronic design automation). Τα δεδομένα εξόδου του λογισμικού σχεδίασης αποτελούν τα δεδομένα εισόδου της διαδικασίας κατασκευής της μάσκας η οποία μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια: προετοιμασία των δεδομένων, Front End Of Line (FEOL), Back End Of Line BEOL (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας κατασκευής μάσκας

### 2.5.1 Προετοιμασία δεδομένων

Τα αρχεία δεδομένων της μάσκας που δημιουργούνται από τους σχεδιαστές μπορεί να περάσουν κατευθείαν στο στάδιο Front End Of Line ή να υποστούν πριν μια διαδικασία προετοιμασίας. Η διαδικασία αυτή μπορεί σε αδρές γραμμές να χωριστεί σε τρία βήματα: Μετατροπή, Επαύξηση, Επαλήθευση.

- Μετατροπή

Πρόκειται για μετατροπή της αρχικής μορφοποίησης (format) των δεδομένων σε μορφοποίηση συμβατή με το εργαλείο εγγραφής της μάσκας. Οι διάφοροι τύποι μορφοποίησης αρχείων δεδομένων σχεδίου περιγράφονται παρακάτω ( ).

- Επαύξηση

Προσθήκη δεδομένων. Αυτά μπορεί να είναι προσθήκες σχημάτων για οπτικές διορθώσεις φαινομένων γεινίασης (Optical Proximity Correction, OPC) ή προσθήκη τυποποιημένων σχημάτων για μάσκες (γραμμωτοί κώδικες, ετικέτες, σημάδια ευθυγράμμισης)

- Επαλήθευση

Αυτοματοποιημένες ή χειροκίνητες διαδικασίες επανεξέτασης των δεδομένων και επαλήθευσή τους για την ελαχιστοποίηση εσφαλμένων κατασκευών.

### 2.5.2 Front End Of Line

Περιλαμβάνει τα στάδια της εγγραφής, χημικής κατεργασίας και μετρολογίας. Η μετρολογία ενδέχεται να επαναληφθεί πολλές φορές σε ολόκληρη τη διαδικασία.

- Εγγραφή

Οι μάσκες εγγράφονται με δύο κυρίως εργαλεία, δέσμη ηλεκτρονίων και λέιζερ. Οι εγγραφείς δέσμης ηλεκτρονίων χρησιμοποιούν μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων η οποία κατευθύνεται με ακρίβεια στο υπόστρωμα της μάσκας ενώ ένα συμβολόμετρο προσδιορίζει το σημείο πρόσπτωσης. Οι εγγραφείς λέιζερ έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας με τη διαφορά ότι για την εναπόθεση ενέργειας στο πολυμερικό επίχρισμα δεν χρησιμοποιούν αρνητικά φορτισμένα σωματίδια αλλά φωτόνια.

- Κατεργασία

Η χημική κατεργασία περιλαμβάνει την εμφάνιση του πολυμερούς και την εγχάραξη του στρώματος χρωμίου.

*Εμφάνιση:* Στη επιφάνεια του υποστρώματος της μάσκας, πάνω από το στρώμα χρωμίου έχει τοποθετηθεί ένα πολυμερικό επίχρισμα σχεδιασμένο ώστε να αντιδρά στη δέσμη ηλεκτρονίων ή στο φως λέιζερ αντίστοιχα. Οι εκτεθειμένες περιοχές γίνονται ευαίσθητες ή αναισθητες σε χημικούς εμφανιστές ανάλογα με το είδος του πολυμερούς. Όταν στο στάδιο αυτό αφαιρούνται οι εκτεθειμένες περιοχές του πολυμερούς αναφερόμαστε σε ρητίνη θετικού τόνου ενώ στην αντίθετη περίπτωση σε ρητίνη αρνητικού τόνου.

*Εγχάραξη:* Η επιφάνεια που έχει απομείνει ακάλυπτη από τη ρητίνη υφίσταται χημική εγχάραξη. Η ρητίνη έχει επιλεγεί ώστε να ανθίσταται στην εγχάραξη ή έστω ο ρυθμός διάλυσής της να είναι μικρότερος από αυτόν του χρωμίου. Η εγχάραξη πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κάποιο υγρό (υγρή εγχάραξη) ή πλάσμα (ξηρή εγχάραξη). Μετά την πλήρη απομάκρυνση του ανεπιθύμητου χρωμίου η μάσκα καθαρίζεται πλήρως από την εναπομένουσα ρητίνη.

- Μετρολογία

Οι μάσκες υπόκεινται σε μετρολογία μετά την εμφάνιση και μετά την εγχάραξη. Μετρήσεις των κρίσιμων διαστάσεων μετά την εμφάνιση πραγματοποιούνται για να εξεταστεί αν ο επιλεγμένος χρόνος εμφάνισης έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερη ή μικρότερη κρίσιμη διάσταση από την επιθυμητή. Συχνά, επαναληπτική διαδικασία εμφάνισης εξασφαλίζει ότι οι τελικές κρίσιμες διαστάσεις θα είναι οι επιθυμητές. Σπανιότερα εφαρμόζεται επαναληπτική διαδικασία εγχάραξης. Από τη στιγμή που ένα δείγμα κρίσιμων διαστάσεων, μετά την εγχάραξη, βρεθεί κοντά στις επιθυμητές τιμές, γίνεται δειγματοληπτική μετρολογία σύμφωνα με τα σχέδια και τις ανάγκες του πελάτη. Ένα άλλο είδος μετρολογίας που εφαρμόζεται είναι μετρολογία θέσης. Το είδος αυτό μετρολογίας εφαρμόζεται για να εξασφαλιστεί το γεγονός ότι όλα τα στοιχεία της μάσκας έχουν τοποθετηθεί στις προσχεδιασμένες θέσεις σε σχέση με τα άλλα στοιχεία που έχουν καθοριστεί από τον πελάτη.

### 2.5.3 Back End Of Line

Αυτή η σειρά βημάτων εφαρμόζεται για να εξασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος και να προστατευτεί η ευαίσθητη επιφάνεια της μάσκας από σωματίδια όταν φτάσει στο χρήστη.

Περιλαμβάνει τα στάδια της αναζήτησης σφαλμάτων, επιδιόρθωσή τους και την τοποθέτηση προστατευτικής μεμβράνης.

- Αναζήτηση σφαλμάτων

Οι μάσκες εξετάζονται για σφάλματα ή ατέλειες με αυτοματοποιημένα εργαλεία τα οποία σαρώνουν την μάσκα συγκρίνοντας συνεχώς τη φυσική μάσκα με μια εικόνα αναφοράς. Για κάθε ανωμαλία που διαπιστώνεται καταγράφεται η θέση της για μελλοντική επανεξέταση. Η εικόνα αναφοράς μπορεί να είναι είτε η εικόνα ενός επιδιωκόμενου ιδανικού σχήματος από άλλη περιοχή της ίδιας μάσκας, (die to die inspection) είτε η εικόνα του αρχικού σχήματος όπως προέκυψε μετά τη μετατροπή των αρχικών δεδομένων στο στάδιο της προετοιμασίας των δεδομένων.

- Επιδιόρθωση σφαλμάτων

Τα σφάλματα που έχουν εντοπιστεί και είναι αρκετά μεγάλα ώστε να τυπωθούν, πρέπει να επιδιορθωθούν. Δεν έχει βρεθεί μια διαδικασία αξιολόγησης των εκτυπώσιμων σφαλμάτων καθολικά αποδεκτή, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται η πρακτική της επιδιόρθωσης κάθε ατέλειας που εντοπίζεται. Η επιδιόρθωση πραγματοποιείται με συνδυασμένη χρήση εστιασμένης δέσμης ιόντων και μικροσκοπίου ατομικής δύναμης (AFM). Σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται λέιζερ ως εργαλεία επιδιόρθωσης.

- Τοποθέτηση προστατευτικής μεμβράνης

Μετά από σχολαστικό καθαρισμό και ενδελεχή εξέταση ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν έχουν απομείνει ρύποι και χημικές κηλίδες, προστατευτική μεμβράνη τοποθετείται πάνω από την σχηματοποιημένη επιφάνεια του χρωμίου ώστε να κρατηθούν μακριά πιθανοί ρύποι κατά τη μεταφορά και χρήση της μάσκας. Ένας τελικός έλεγχος της διαδιδόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας πιστοποιεί ότι η περιοχή κάτω από την προστατευτική μεμβράνη παρέμεινε καθαρή από ρύπους και δεν προσβλήθηκε το σχέδιο κατά την τοποθέτηση της μεμβράνης.

## 2.5.4 Τύποι μορφοποίησης αρχείων δεδομένων σχεδίου

Η διαδικασία εγγραφής της μάσκας απαιτεί είσοδο δεδομένων τα οποία συνήθως δεν έχουν την ίδια μορφοποίηση με αυτά που προκύπτουν από το λογισμικό σχεδίασης. Στο στάδιο προετοιμασίας των δεδομένων γίνεται μετατροπή από την αρχική μορφοποίηση σε άλλη κατάλληλη για το χρησιμοποιούμενο εργαλείο εγγραφής. Τα διαφορετικά εργαλεία εγγραφής μασκών αλλά και εξέτασης και μετρολογίας χρησιμοποιούν δική τους μορφοποίηση. Ένα σύστημα μορφοποίησης δεδομένων σχεδίασης πρέπει να είναι ικανό να περιγράφει γεωμετρικά σχήματα, συνήθως παραλληλόγραμμα ή πολύγωνα. Συνήθη τέτοια συστήματα είναι το CIF, το GDS2 και το OASIS.

### 2.5.4.1 Μορφοποίηση CIF

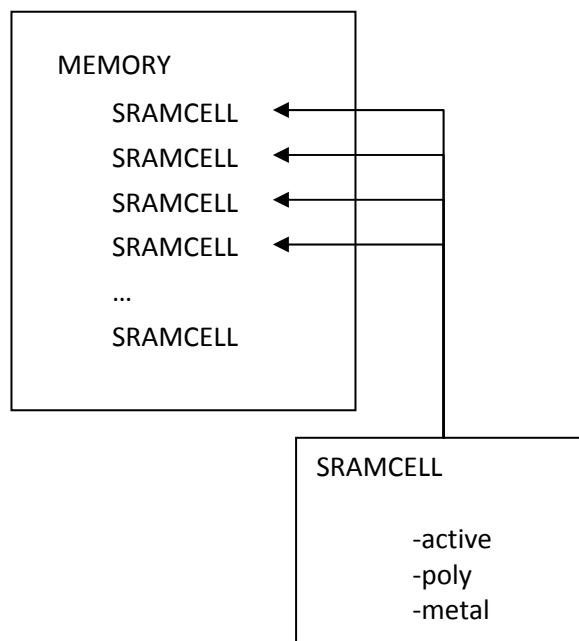
Το πρότυπο μορφοποίησης CIF (Caltech Intermediate Format) είναι μια απλή μέθοδος περιγραφής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (OK). Πρόκειται για αρχείο κειμένου (txt file) που περιέχει πληροφορίες για τα στρώματα (layers) και τα σχήματα που αυτά περιλαμβάνουν. Επειδή δημιουργήθηκε για να καλύψει τις ανάγκες περιγραφής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έχει τη δυνατότητα περιγραφής μόνο της γεωμετρίας των κυκλωμάτων: παραλληλόγραμμα, πολύγωνα, αγωγούς σύνδεσης και κυκλικά σχήματα. Δεν μπορεί να περιγράψει στοιχεία κειμένου ή καμπύλες. Στα πλεονεκτηματά του συμπεριλαμβάνεται η ικανότητα ιεράρχησης, στοιχείο που επιτρέπει την



περιγραφή πολύπλοκων σχημάτων με τρόπο συμπαγή. Η Γλώσσα που χρησιμοποιεί είναι δομημένη, επιτρέποντας την συνένωση περισσότερων CIF αρχείων σε ένα μεγαλύτερο, και έτσι μικρότερα σχέδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην υλοποίηση μεγαλύτερων. Το μειονέκτημά τους είναι ότι, δεν είναι συμβατά με όλα τα συστήματα εγγραφής γι' αυτό και πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε άλλο σύστημα μορφοποίησης πριν χρησιμοποιηθούν (συνήθως GDSII). Στο παράρτημα Α περιγράφεται συνοπτικά η δομή ενός αρχείου CIF.

### 2.5.4.2 Μορφοποίηση GDSII

Το GDSII αποτελεί το κυρίαρχο πρότυπο μορφοποίησης στη βιομηχανία για περιγραφή σχεδίων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Είναι γνωστό και ως “Calma Stream” από το όνομα της εταιρίας Calma που το διέθεσε στην αγορά στα μέσα της δεκαετίας του `70. Τα GDSII αρχεία είναι αρχεία δυαδικής μορφοποίησης, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορούν να διαβαστούν απευθείας από έναν επεξεργαστή κειμένου. Πρέπει να διαβαστούν κατάλληλα τα δυαδικά ψηφία σύμφωνα με το πρότυπο μορφοποίησης. Μπορεί να αναπαριστά επίπεδα γεωμετρικά σχήματα, κείμενο και ορισμένες άλλες πληροφορίες που αναπτύσσονται παρακάτω. Το πλεονέκτημα του GDSII είναι η δυνατότητα ιεραρχίας που παρέχει. Η ιεραρχία επιτρέπει την περιγραφή μεγάλου αριθμού επαναλαμβανόμενων σχημάτων χωρίς να αυξάνεται ο όγκος του αρχείου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η ιδέα των κελιών. Αντί να περιγράφεται κάθε παραλληλόγραμμο χωριστά, ένα κελί περιγράφει ένα παραλληλόγραμμο και στη συνέχεια γίνεται αναφορά αυτού του κελιού σε ένα άλλο κελί (Εικόνα 2.14).



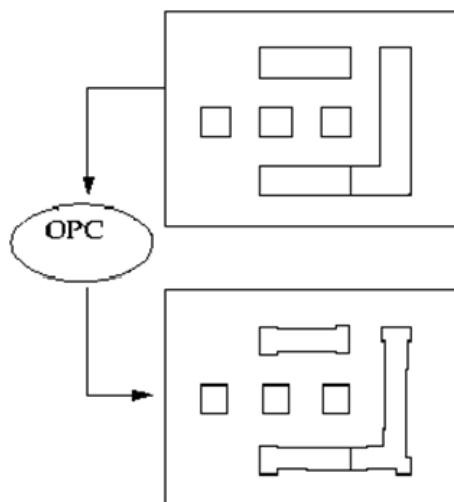
Εικόνα 2.14 Ιεραρχία σε μορφοποίηση GDSII

Έτσι ένα κελί μπορεί να περιγράφει από ένα απλό παραλληλόγραμμο έως μια διάταξη, ένα στοιχείο μνήμης ή μια πύλη. Για σχέδια με μεγάλο πλήθος επαναλήψεων όπως οι μνήμες η αποτελεσματικότητα είναι προφανής. Στο παράρτημα Β παρουσιάζεται η δομή ενός αρχείου GDSII.

### 2.5.5 Οπτικά φαινόμενα γειτνίασης

Ένα επίμαχο θέμα στη λιθογραφία είναι η μη γραμμικότητα στη μεταφορά των σχημάτων από τη μάσκα στο δισκίδιο. Γραμμικότητα στη μεταφορά των σχημάτων σημαίνει ότι τα εγγραφόμενα στο δισκίδιο γεωμετρικά σχήματα είναι ακριβώς ίδια με αυτά της μάσκας, σμικριμένα κατά ένα παράγοντα. Η μη γραμμικότητα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην περίθλαση του φωτός όταν αυτό περνά από τη μάσκα. Γι' αυτό και τα φαινόμενα αυτά ονομάστηκαν οπτικά φαινόμενα γειτνίασης (optical proximity effects, OPE). Άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν στη μη γραμμικότητα στη μεταφορά σχημάτων είναι η διαδικασία εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού και η διαδικασία εγχάραξης. Ο όρος OPE σήμερα χρησιμοποιείται ώστε να συμπεριλαμβάνει όλους τους παράγοντες που συμβάλουν στη μη γραμμικότητα και όχι μόνο για τα οπτικά φαινόμενα.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης της μη γραμμικότητας, από όποιο παράγοντα κι αν προέρχεται, είναι η διόρθωση των σχημάτων που γράφονται στη μάσκα ώστε τα τελικά σχήματα που θα εκτυπωθούν στο δισκίδιο να είναι πιο κοντά στα επιθυμητά. Η διόρθωση γίνεται κατά το στάδιο προετοιμασίας των. Η διαδικασία καλείται διόρθωση οπτικών φαινομένων γειτνίασης (optical proximity correction, OPC) και προϋποθέτει μετατροπές των σχημάτων με προσθήκη πολλών επιπλέον γωνιών πράγμα που οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του όγκου των δεδομένων. (Εικόνα 2.15). Πρόκειται για ένα ημιεμπειρικό μοντέλο, ένα μοντέλο δηλαδή το οποίο έχει τη βάση του σε μαθηματικό μοντέλο αλλά εφαρμόζονται και πρόσθετες πειραματικές διορθώσεις.



Εικόνα 2.15 Εφαρμογή OPC σε ένα σχέδιο πριν την εγγραφή της μάσκας

Η διόρθωση των σφαλμάτων λόγω οπτικών φαινομένων γειτνίασης (OPC) είναι μία από τις τεχνικές που εφαρμόζονται για βελτίωση της ανάλυσης (resolution enhancement techniques, RET).

### 2.5.6 Φαινόμενα γειτνίασης δέσμης ηλεκτρονίων

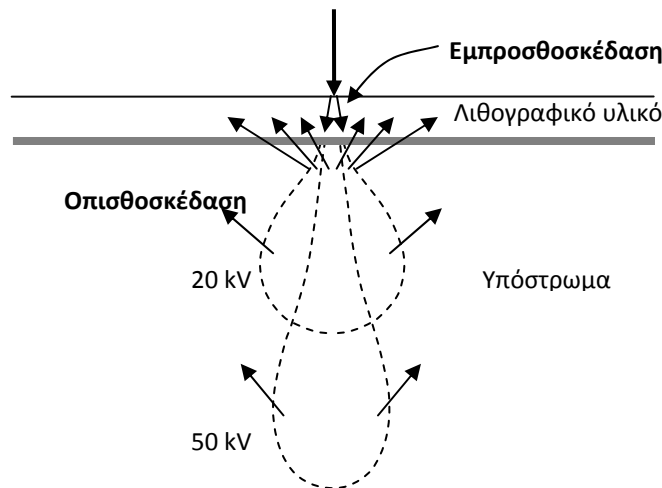
Κατά την εγγραφή της μάσκας με δέσμη ηλεκτρονίων, η ίδια η δέσμη είναι τόσο λεπτή ώστε δεν επηρεάζει την ανάλυση. Η υψηλή τάση επιτάχυνσης που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της δέσμης ηλεκτρονίων τους δίνει αρκετή ενέργεια ώστε αυτά αφού διαπεράσουν το πολυμερές να σκεδαστούν πολλές φορές από τα άτομα του υποστρώματος και να επιστρέψουν στο πολυμερές. Η σκέδαση αυτή των ηλεκτρονίων οδηγεί σε φαινόμενα γειτνίασης δέσμης ηλεκτρονίων.

Η απόσταση στην οποία μπορούν να φτάσουν τα ηλεκτρόνια αναφορικά με το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης εξαρτάται από την αρχική κινητική ενέργεια τους αλλά και τη σύνθεση του υποστρώματος. Η απόσταση αυτή μπορεί να φτάσει και μερικές δεκάδες μικρά για επιταχύνουσες τάσεις 50-100 KV.

Τα φαινόμενα γειννίαςης δέσμης ηλεκτρονίων μπορούν να προσομοιωθούν από μια συνάρτηση η οποία είναι ένα σταθμισμένο άθροισμα γκαουσιανών καμπυλών της μορφής (Chang 1975):

$$psf(r) = \frac{1}{\pi(1+n)} \left\{ \frac{1}{a^2} e^{-\frac{r^2}{a^2}} + \frac{n}{b^2} e^{-\frac{r^2}{b^2}} \right\} \quad (2.5)$$

Στο παραπάνω άθροισμα, η πρώτη από τις δυο γκαουσιανές είναι πολύ στενή και ψηλή και περιγράφει τα εμπροσθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια ενώ η δεύτερη είναι κοντή και πολύ πλατιά και περιγράφει τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια. Ο παράγοντας στάθμισης  $n$  παίρνει τιμές από 0 έως 1.



Εικόνα 2.16 Οπισθοσκέδαση των ηλεκτρονίων οδηγεί σε φαινόμενα γειννίαςης δέσμης ηλεκτρονίων

Η παραπάνω μορφή της  $psf(r)$  δεν είναι η μοναδική στη βιβλιογραφία. Οι συναρτήσεις που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί προκύπτουν είτε από πειραματικές μετρήσεις είτε από προσομοιώσεις των τροχιών των ηλεκτρονίων με μεθόδους Monte Carlo. Η δόση που εναποτίθεται στο φωτοευαίσθητο πολυμερές μπορεί να υπολογιστεί από τη συνέλιξη της  $psf(r)$  με τα δεδομένα του σχεδίου.

$$d(x, y) = psf(r) \otimes p(x, y) \quad (2.6)$$

Με αυτή την προσέγγιση μπορούν να γίνουν διορθώσεις των δεδομένων για τη διόρθωση των σφαλμάτων λόγω γειννίαςης της δέσμης ηλεκτρονίων. Η λύση της παραπάνω εξίσωσης επιτυγχάνεται στο χώρο των συχνοτήτων με τη χρήση μετασχηματισμών Fourier (Eisenmann, Waas et al. 1993). Ο πιο κοινός τρόπος διόρθωσης των σφαλμάτων γειννίαςης είναι η τροποποίηση της δόσης εγγραφής ώστε να εξισορροπηθεί η δόση των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα σχημάτων θα δεχθούν μικρότερη δόση ενώ πιο απομακρυσμένα σχήματα θα δεχθούν μεγαλύτερη δόση. Εναλλακτικά, θα πρέπει να τροποποιηθούν οι πλευρές των σχημάτων ώστε να αντισταθμιστούν τα φαινόμενα γειννίαςης.

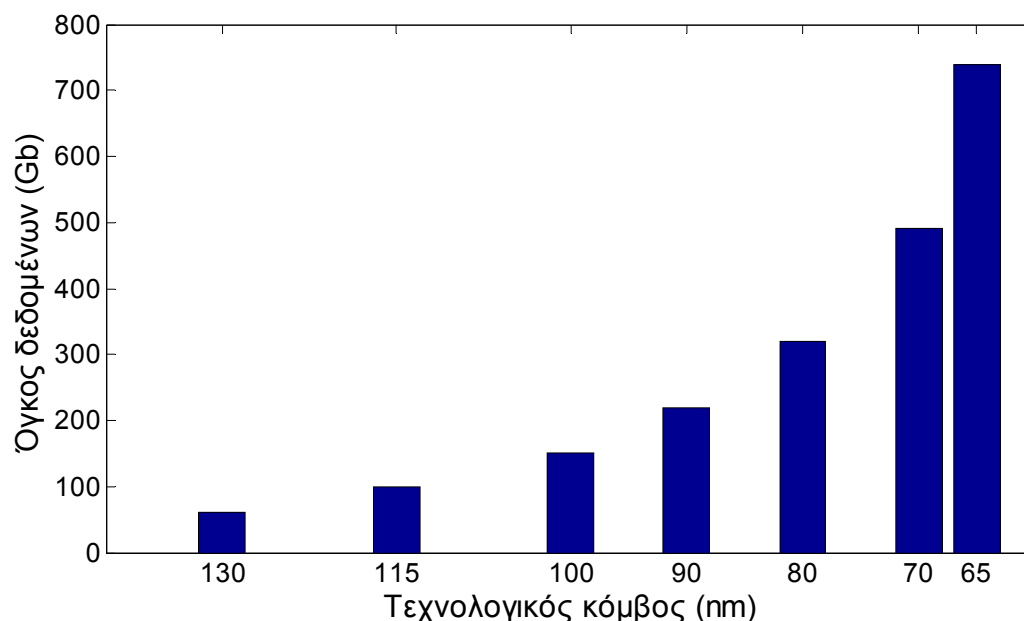
Ο χρόνος ολοκλήρωσης των υπολογισμών για διόρθωση σφαλμάτων γειτνίασης δέσμης ηλεκτρονίων εξαρτάται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του χρησιμοποιούμενου υπολογιστικού συστήματος. Λόγω του μεγάλου ακτινικού βεληνεκού των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς μεγάλος όγκος δεδομένων. Κατά την εγγραφή ενός σχήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα σχήματα που βρίσκονται μέσα στο βεληνεκές των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Σε πολλές περιπτώσεις τα δεδομένα των σχημάτων αυτών μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικά αρχεία τα οποία πρέπει να συνενωθούν σε ένα μεγάλο αρχείο. Για τους λόγους αυτούς η διαδικασία είναι πολύ χρονοβόρα. (ROSENBUSCH, KALUS et al. ; Kalus, Roessl et al. 2002)

### 2.5.7 Χρόνος προετοιμασίας των δεδομένων

Στη ιστορία κατασκευής μασκών παρατηρείται μεγάλη αύξηση της πολυπλοκότητας της διαδικασίας προετοιμασίας των δεδομένων για την εγγραφή της μάσκας. Οι λόγοι είναι:

- Εφαρμογή RET
- Σύνθετοι συνδυασμοί στρωμάτων (Boolean)
- Αύξηση του αριθμού των μασκών ανά διαδικασία
- Διαφορετικά εργαλεία εγγραφής μασκών
- Αύξηση του όγκου δεδομένων λόγω μείωσης των διαστάσεων των σχημάτων
- Διορθώσεις φαινομένων γειτνίασης δέσμης ηλεκτρονίων

Όλα τα παραπάνω αυξάνουν κατά πολύ τον όγκο των δεδομένων προς επεξεργασία και φυσικά το χρόνο προετοιμασίας των δεδομένων (Εικόνα 2.17).



Εικόνα 2.17 Ογκος δεδομένων για επεξεργασία ανά τεχνολογικό κόμβο (πηγή ITRS)

Ο συνολικός χρόνος προετοιμασίας υπερβαίνει το χρόνο εγγραφής της μάσκας. Οι απαιτήσεις για μικρότερο συνολικά χρόνο είναι αυξανόμενες με αποτέλεσμα να πρέπει να μειωθεί ο χρόνος προετοιμασίας των δεδομένων. Για τη μείωση αυτή οι προσεγγίσεις είναι ποικίλες, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται και από το λογισμικό που χρησιμοποιείται αλλά και από τα ίδια τα δεδομένα για να μην παραλείψουμε βέβαια τις δυνατότητας του υπολογιστικού συστήματος.

Ένας γενικός κανόνας είναι να αποφεύγονται οι πολύ αργές διαδικασίες όπως η παραγωγή πολύ μεγάλων ενδιάμεσων αρχείων ή ο συνδυασμός τέτοιων αρχείων με τη χρήση δυαδικών τελεστών. Μια άλλη διέξοδος είναι η παράλληλη επεξεργασία είτε με τη χρήση περισσότερων CPU είτε σπάζοντας τη διαδικασία σε ανεξάρτητα μέρη τα οποία μπορούν να υποστούν επεξεργασία χωριστά, σε διαφορετικά υπολογιστικά συστήματα, είτε βέβαια συνδυάζοντας τους δυο παραπάνω τρόπους. (Amdahl 1967; Gustafson 1988)

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν υπάρχουν πολλά όμοια επαναλαμβανόμενα σχήματα, είναι εύκολο να γίνει η επεξεργασία σε ένα από αυτά. Τις περισσότερες όμως φορές, όταν πρόκειται για διορθώσεις σφαλμάτων γειννίας, έχουν μεγάλη σημασία στην εκτίμηση του αποτελέσματος εγγραφής τα γύρω σχήματα. Έτσι, δυο σχήματα μπορεί να είναι ταυτόσημα αλλά να απαιτούν διαφορετική επεξεργασία λόγω των διαφορετικών σχημάτων που τα περιβάλλουν.

## 2.6 Γιατί χρειάζεται η προσομοίωση

Πρόκληση για την προσομοίωση και μοντελοποίηση στη λιθογραφία αποτελεί η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς του φωτοευαίσθητου υλικού λιθογραφίας στις διαφορετικές τεχνικές απεικόνισης και επεξεργασίας του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αναπτυχθούν καλύτερα φυσικά και χημικά μοντέλα που θα προβλέπουν το σχηματισμό τρισδιάστατων δομών. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να προβλεφθούν είναι η διάσταση των σχημάτων (Critical Dimension, CD) και η πλευρική τραχύτητα (Line Edge Roughness, LER) στις τρεις διαστάσεις. Με την κατανόηση των LWR και LER η προσομοίωση θα συμβάλει στην ελάττωση της επίδρασής τους στη λειτουργία των συσκευών και των διασυνδέσεών τους. Καθώς είναι κυρίως τα LER και LWR των σχημάτων που εγχάρασσονται στο δισκίδιο και όχι το ίδια τα σχήματα, που επηρεάζουν τη λειτουργία της συσκευής, είναι απαραίτητη η προσομοίωση της έκθεσης του ακτινοευαίσθητου υλικού, της διάλυσής του και της διαδικασίας εγχάραξης του υποστρώματος. Ένα άλλο αίτημα από την μοντελοποίηση και προσομοίωση της διαδικασίας είναι η ανάγκη ανάπτυξης εργαλείων για γρήγορη και αποτελεσματική προσομοίωση μεγάλων περιοχών και η μελέτη με προσομοιώσεις μεγάλου πλήθους φυσικών παραμέτρων αλλά και σχημάτων ώστε να αποφευχθεί η άσκοπη κατασκευή δαπανηρών μασκών με σφάλματα. Οι προσομοιώσεις αυτές θα πρέπει να είναι ακριβείς και αρκετά γρήγορες ώστε να επιτυγχάνουν την προσομοίωση ολόκληρου του σχεδίου σε εύλογο χρόνο.

Η πρόοδος της λιθογραφικής τεχνολογίας με επακόλουθο την συνεχόμενη ελάττωση των σχηματιζόμενων δομών θέτει νέες προκλήσεις και στην Μετρολογία. Η ακρίβεια στη μέτρηση της κρίσιμης διάστασης (CD) με τα υπάρχοντα εργαλεία μέτρησης δεν φτάνει στο 20% για τις πιο προχωρημένες τεχνολογίες. Ένας παράγοντας κλειδί που μετριέται είναι η διακύμανση πλάτους γραμμής (Line Width Roughness, LWR). Η ακρίβεια στη μέτρηση του LWR πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για τη μέτρηση του πλάτους γραμμής. Ένα βασικό εργαλείο μέτρησης των παραπάνω μεγεθών είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Είναι ανάγκη

να αναπτυχθεί κατάλληλο λογισμικό για την αυτοματοποιημένη διεξαγωγή των μετρήσεων. Το λογισμικό αυτό θα πρέπει να είναι σε θέση να δώσει τις τιμές των CD, LWR, LER μέσα από την επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Θα πρέπει επίσης να παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης αναζήτησης ενός σχήματος μέσα σε μια εικόνα (Pattern Matching).

Ειδικότερα για τη λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων είναι απαραίτητη η πρόβλεψη των φαινομένων γειτνίασης. Η δέσμη ηλεκτρονίων κατά την είσοδό της στο φωτοπολυμερές και το υπόστρωμα της μάσκας υφίστανται διεύρυνση λόγω σκέδασης των ηλεκτρονίων. Με τη μέθοδο Monte Carlo μπορούν να προσομοιωθούν τα φαινόμενα σκέδασης και να εκτιμηθεί η ενεργειακή εναπόθεση. Είναι φανερό ότι η σκέδαση περιορίζει την ανάλυση στη λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης. Τα φαινόμενα γειτνίασης εξαρτώνται από την ενέργεια της δέσμης αλλά και από το είδος του υποστρώματος. Γενικά, σε μικρές ενέργειες το πλευρικό άνοιγμα της δέσμης που οφείλεται σε εμπροσθοσκέδαση είναι μεγαλύτερο. Για ενέργειες από 30 KeV και πάνω το πλευρικό άνοιγμα είναι αμελητέο αλλά αυξάνει σημαντικά η συνεισφορά των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Το άνοιγμα της δέσμης λόγω εμπροσθοσκέδασης δίνει φαινόμενα γειτνίασης κατά την εγγραφή ενός σχήματος, λόγω επικάλυψης των γειτονικών εκθέσεων. Η οπισθοσκέδαση προκαλεί φαινόμενα γειτνίασης μεταξύ γειτονικών σχημάτων.

## **3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ**

### **3.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την επίλυση του προβλήματος προσομοίωσης της ηλεκτρονικής λιθογραφίας. Το πρόβλημα αναλύθηκε σε υποπροβλήματα για το καθένα από τα οποία αναπτύχθηκε αλγόριθμος επίλυσης του. Ο συνολικός αλγόριθμος αποτελείται από τμήματα που αντιστοιχούν στα υποπροβλήματα αυτά. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε αυτά τα τμήματα αλγορίθμου τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

### **3.2 Προδιαγραφές προσομοιωτή**

Η προσομοίωση της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης περιλαμβάνει την προσομοίωση της έκθεσης του λιθογραφικού υλικού με δέσμη ηλεκτρονίων και την πρόβλεψη της μορφής των σχηματιζόμενων δομών σε αυτό. Η πρόβλεψη γίνεται με βάση την ενέργεια που εναποθέτουν τα ηλεκτρόνια σε αυτό χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής μορφή της δομής του λιθογραφικού υλικού (συνηθέστερα πολυμερούς) και της διάχυσης του φωτοευαισθητοποιητή (PAG) στην περίπτωση των χημικώς ενισχυόμενων πολυμερικών υλικών. Ακριβής προσομοίωση των διαδικασιών αυτών αποτέλεσε αντικείμενο άλλης διδακτορικής διατριβής στα πλαίσια του προγράμματος ΠΕΝΕΔ-2003. Στόχος της προσομοίωσης εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων είναι ο ακριβής υπολογισμός της ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό. Η ενεργειακή αυτή κατανομή αποτελεί βασικό δεδομένο εισόδου για την προσομοίωση της διαδικασίας εμφάνισης.

Ένα από τα βασικά δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο προσομοίωσης είναι το σχέδιο που πρόκειται να εγγραφεί. Το λογισμικό της προσομοίωσης είναι ικανό να διαβάζει αρχεία CIF και GDSII που αποτελούν τους συνηθέστερους τύπους μορφοποίησης αρχείων με δεδομένα σχεδίασης. Τα αρχεία αυτά περιέχουν το προς εγγραφή σχέδιο και παράγονται από τα περισσότερα αυτοματοποιημένα προγράμματα σχεδίασης που κυκλοφορούν σήμερα στο εμπόριο.

Άλλα δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της έκθεσης με ηλεκτρονική δέσμη είναι η ενέργεια των ηλεκτρονίων της δέσμης, η δόση έκθεσης, η σύνθεση και η διαμόρφωση του λιθογραφικού υλικού και του υποστρώματος. Όλα τα παραπάνω καθορίζονται από το χρήστη κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Υπάρχει πλήρης ευελιξία στον καθορισμό του είδους και του πλήθους των επιμέρους υποστρωμάτων από τα οποία αποτελείται το υπόστρωμα. Η γνώση τους είναι καθοριστικής σημασίας για τον υπολογισμό της ενεργειακής εναπόθεσης. Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στην ικανότητα του λογισμικού να επιτρέπει στο χρήστη την επιλογή πολυστρωματικής στοίβας στο υπόστρωμα της μάσκας, καθώς το ενδιαφέρον σήμερα είναι η κατασκευή μασκών για λιθογραφία ακραίου

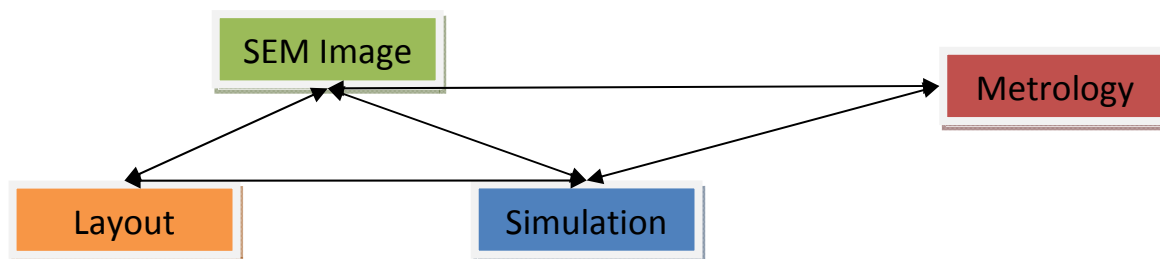
υπεριόδους, μια τεχνική που όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.4 είναι πολλά υποσχόμενη αλλά το υψηλό κόστος της δεν έχει επιτρέψει ακόμη την εφαρμογή της στη βιομηχανία.

Το λογισμικό προσομοίωσης προβλέπει το μέγεθος και τη μορφή των σχηματιζόμενων δομών με βάση την εναποτιθέμενη ενέργεια, εφαρμόζοντας μια τιμή κατωφλίου για την ενέργεια. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια απλοποιημένη προσέγγιση του προβλήματος εμφάνισης και μπορεί να δώσει με πολύ καλή ακρίβεια την κρίσιμη διάσταση και την εξάρτησή της από τη δόση και τα φαινόμενα γειτνίασης. Ακριβέστερες τιμές της πλευρικής τραχύτητας και της διακύμανσης του πλάτους γραμμής προκύπτουν αφού εφαρμοστεί και ο αλγόριθμος προσομοίωσης της εμφάνισης. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε αλγόριθμος, μέρος του λογισμικού προσομοίωσης, ο οποίος δίνει στατιστικές μετρήσεις της κρίσιμης διάστασης (CD), της πλευρικής τραχύτητας (LER), και της διακύμανσης του πλάτους γραμμής (LWR).

Ένα άλλο τμήμα του λογισμικού είναι η αυτοματοποιημένη επεξεργασία εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) για την πραγματοποίηση μετρήσεων επί των πειραματικών δεδομένων (metrology). Το ενδιαφέρον αυτού του τμήματος αλγορίθμου είναι διπλό. Πρώτον, η πραγματοποίηση μετρήσεων στα πειραματικά δεδομένα είναι πολύ βασική για τον έλεγχο και την αξιολόγηση του αλγορίθμου προσομοίωσης. Έτσι, ελέγχεται η αξιοπιστία των φυσικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς ώστε να βελτιωθούν. Δεύτερον, η λειτουργικότητα αυτού του τμήματος λογισμικού είναι πολύ μεγάλη για την πραγματοποίηση μετρήσεων μετά την εγγραφή των δομών. Παρέχεται η δυνατότητα αυτοματοποιημένης εξέτασης των εικόνων SEM και εξαγωγής συμπερασμάτων σε μικρό χρόνο.

Τέλος, για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, το λογισμικό πραγματοποιεί αυτόματη αναζήτηση ενός δεδομένου σχήματος σε μια εικόνα SEM, διαδικασία που υλοποιείται στη βάση ταυτοποίησης σχημάτων (pattern matching). Η αυτοματοποιημένη αναζήτηση δεν μειώνει μόνο το χρόνο της μετρολογίας αλλά προσφέρει ακριβέστερη ταύτιση των σχημάτων.

Το διάγραμμα (Εικόνα 3.1) αναπαριστά τους βασικούς πόλους πάνω στους οποίους βασίζεται η μοντελοποίηση της διαδικασίας λιθογραφίας καθώς και τη σχέση μεταξύ τους. Το αρχικό σχήμα (layout) προσομοιώνεται και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για τη μετρολογία. Από το ίδιο αρχικό σχήμα, με πραγματική εγγραφή προκύπτουν τα πειραματικά δεδομένα (SEM image) τα οποία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στο στάδιο της ανάπτυξης του λογισμικού, η σύγκριση αυτή είναι απαραίτητη για τη αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της μεθόδου.



Εικόνα 3.1 Οι βασικοί πόλοι του προβλήματος μοντελοποίησης της λιθογραφικής διαδικασίας

Έχοντας αναπτύξει το λογισμικό, η διαδικασία αυτή ακολουθείται αντίστροφα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση του αρχικού σχήματος (layout). Η προσομοίωση δηλαδή βοηθά στην ανάπτυξη των κατάλληλων κανόνων σχεδίασης ώστε το



παραγόμενο αποτέλεσμα να είναι το επιθυμητό, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα γεινίασης και τις ιδιαιτερότητες του υποστρώματος. Τέλος, με βάση τα δεδομένα της προσομοίωσης, υπολογίζεται η κατάλληλη δόση εγγραφής, αποφεύγοντας έτσι αποτυχημένες και πολύ κοστοβόρες εγγραφές.

Ο προσομοιωτής μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια δομές κρίσιμης διάστασης σημαντικά μικρότερης των 100nm. Η προσομοίωση γίνεται στις τρεις διαστάσεις, προβλέποντας έτσι την διαφοροποίηση στις διαστάσεις και την τραχύτητα μιας δομής κατά το βάθος του λιθογραφικού υλικού.

### 3.3 Γενική παρουσίαση του προσομοιωτή

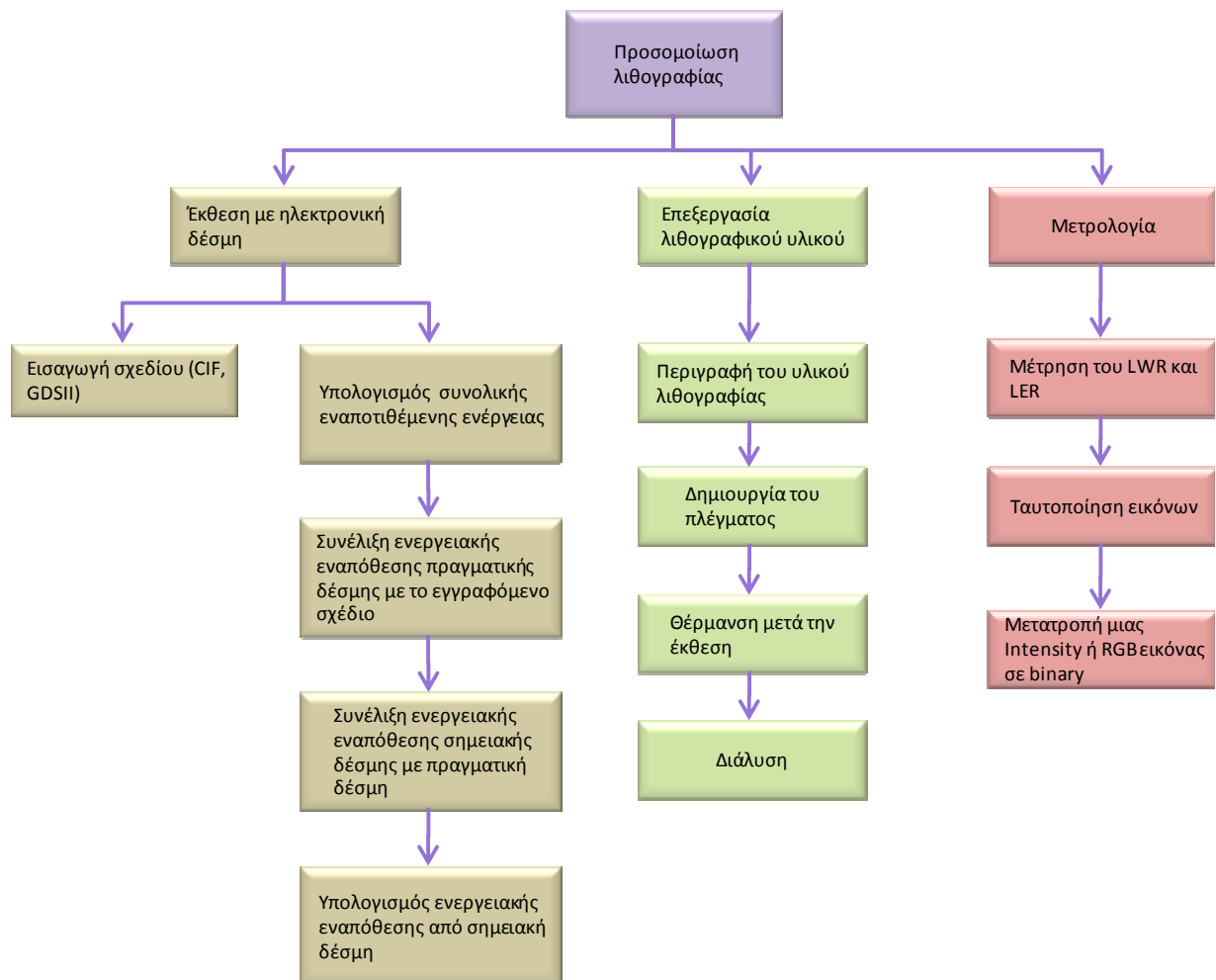
Τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια της δέσμης κατά την επιβραδυνόμενη κίνησή τους στην ύλη εναποθέτουν ενέργεια στο λιθογραφικό υλικό και το υπόστρωμα μέχρι να απορροφηθούν από αυτό ή να ανακλαστούν. Στόχος του προσομοιωτή είναι ο υπολογισμός της εναποτιθέμενης ενέργειας στο λιθογραφικό υλικό κατά την εγγραφή του σχεδίου. Η εγγραφή του συνολικού σχεδίου γίνεται με συνεχείς ρίψεις (flashes) της δέσμης σε διαδοχικές θέσεις στο επίπεδο x-y όπως προβλέπεται από τα δεδομένα του σχεδίου. Σε κάθε ρίψη εναποτίθεται ενέργεια σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Η ενέργεια αυτή καθιστά το λιθογραφικό υλικό διαλυτό ή αδιάλυτο σε κάποιο διαλύτη. Με δεδομένη την ενέργεια προσομοιώνεται η εμφάνιση του λιθογραφικού υλικού.

Για την υλοποίηση του λογισμικού, το πρόβλημα της προσομοίωσης της λιθογραφικής διαδικασίας αναλύεται στα παρακάτω τμήματα (Εικόνα 3.4):

- **Έκθεση με ηλεκτρονική δέσμη:**
  - i. Εισαγωγή των δεδομένων του σχεδίου (ανάγνωση CIF ή GDSII αρχείου)
  - ii. Προσομοίωση της έκθεσης με ηλεκτρονική δέσμη
  - iii. Προσομοίωση σημειακής δέσμης
  - iv. Συνέλιξη με την πραγματική δέσμη
  - v. Συνέλιξη με το εγγραφόμενο σχέδιο
- **Προσομοίωση της επεξεργασίας του λιθογραφικού υλικού**
  - vi. Περιγραφή του υλικού λιθογραφίας
  - vii. Δημιουργία του πλέγματος
  - viii. Θέρμανση μετά την έκθεση
  - ix. Διάλυση
- **Μετρολογία**
  - x. Μέτρηση του LWR και LER

- xi. Μετατροπή μιας εικόνας κλίμακας του γκρι (Intensity ή RGB) σε δυαδική ασπρόμαυρη
- xii. Αναζήτηση σχημάτων (Pattern Matching)

Τα στάδια αυτά περιγράφουν τη λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης με τρόπο τέτοιο ώστε να μπορούν να αναπτυχθούν οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι ανεξάρτητα για το καθένα παρέχοντας τη μέγιστη δυνατή ευελιξία.



Εικόνα 3.2 Διαγραμματική αναπαράσταση του προβλήματος προσομοίωσης της λιθογραφίας

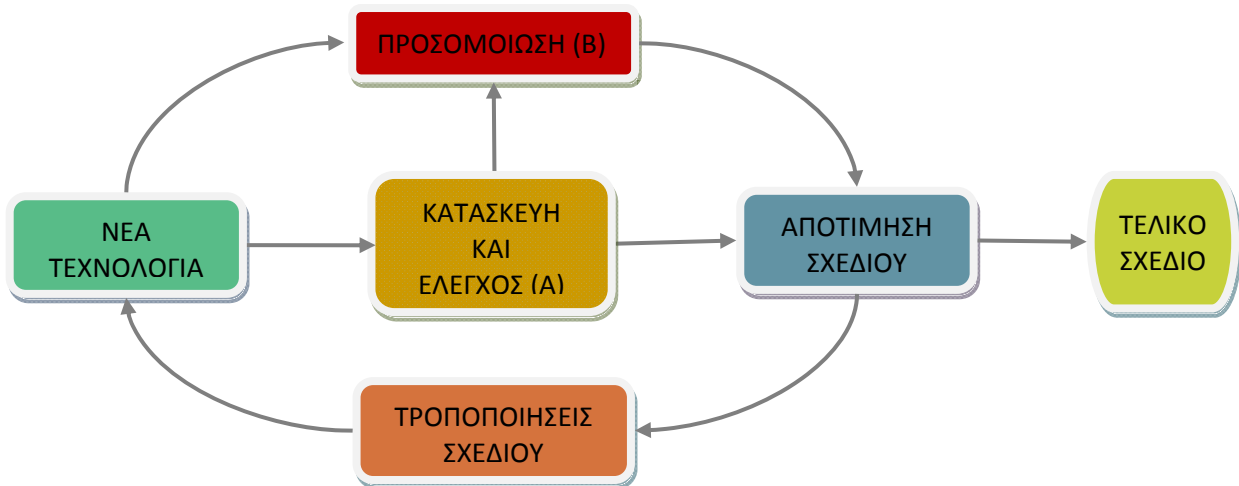
Για το πρώτο στάδιο, αναπτύχθηκε αλγόριθμος ανάγνωσης αρχείων CIF, GDSII και μετατροπής των δεδομένων σε ένα σύστημα μορφοποίησης κοινό για όλα τα υπόλοιπα τμήματα καθιστώντας τα ανεξάρτητα από τον αρχικό τύπο αρχείου εισόδου. Ο υπολογισμός της ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό χωρίστηκε σε τρία στάδια: α) Προσομοίωση σημειακής δέσμης β) συνέλιξη με την πραγματική δέσμη γ) συνέλιξη με το εγγραφόμενο σχέδιο. Υπολογίζεται δηλαδή αρχικά, η ενεργειακή εναπόθεση από μια ιδεατή σημειακή δέσμη, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το σχήμα της πραγματικής δέσμης αλλά μόνο δεδομένα για το λιθογραφικό υλικό, το υπόστρωμα και την ενέργεια των ηλεκτρονίων. Τα αποτελέσματα αυτού του τμήματος μπορούν να αποθηκευτούν σε μια βάση δεδομένων και να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικά σχήματα δέσμης, χωρίς να είναι απαραίτητο να εκτελείται κάθε φορά αυτό το τμήμα του προγράμματος. Στο τμήμα συνέλιξης με την πραγματική δέσμη, διαφορετικά σχήματα δέσμης μπορούν να επιλεγούν και να συνδυαστούν με μια από τις παραπάνω συναρτήσεις, για σύγκριση και μελέτη. Τα αποτελέσματα αυτά, που αντιστοιχούν σε

διαφορετικές πραγματικές δέσμες, μπορούν και πάλι να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν για εγγραφή διαφορετικών σχημάτων.

Η μετρολογία είναι ανεξάρτητη από τα προηγούμενα στάδια. Μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε εικόνα, πειραματική ή αποτέλεσμα προσομοίωσης. Το τμήμα προσομοίωσης της επεξεργασίας του λιθογραφικού υλικού δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Αναλυτική παρουσίαση όλων των τμημάτων του λογισμικού ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους.

### 3.4 Προϊόντα πού διατίθενται στο εμπόριο

Δεδομένου ότι για την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος απαιτούνται αρκετές δεκάδες ανεξάρτητων βημάτων, η προσομοίωση των διεργασιών αποτελεί σημαντικό βοήθημα στην επιλογή της βέλτιστης μεθόδου κατασκευής. Ιστορικά, η ανάπτυξη νέας τεχνολογίας γινόταν με τη μέθοδο διαδοχικών δοκιμών (trial and error). Αυτή η διαδικασία ξεκινούσε από μια ήδη υπάρχουσα τεχνολογία στην οποία μεταβάλλονταν οι συνθήκες ορισμένων βημάτων μαζί με τις διαστάσεις των διατάξεων. Με αυτή την τροποποιημένη τεχνολογία κατασκευάζονταν αρκετές παρτίδες Ο.Κ. Στη συνέχεια, από τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών λειτουργίας των Ο.Κ. γινόταν η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών της νέας τεχνολογίας. Η κατασκευή μια παρτίδα Ο.Κ. έχει όμως πολύ μεγάλο κόστος σε χρήμα και ανθρωπόωρες. Τα εργαλεία προσομοίωσης δίνουν τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της μεθόδου πιο εύκολα και με μικρότερο κόστος (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3 Οι δύο μέθοδοι ανάπτυξης νέας τεχνολογίας: (Α) χρησιμοποιώντας πειράματα και (Β) με προσομοίωση

Πολλά προγράμματα έχουν γραφεί για τα διαφορετικά βήματα της διαδικασίας κατασκευής Ο.Κ. Το SUPREM IV είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης των θερμικών διεργασιών (εμφύτευση, διάχυση, οξείδωση, ανόπτηση). Αναπτύχθηκε (Antoniadis, Hansen et al. 1978) στο πανεπιστήμιο του Stanford. Το SAMPLE είναι ένα λογισμικό για την προσομοίωση των διαδικασιών οπτικής λιθογραφίας και εγχάραξης (Dill, Neureuther et al. 1975). Αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Berkeley. Το CASINO (monte CARlo SIMulation of electroN trajectory in sOLids) είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης των τροχιών των ηλεκτρονίων δέσμης χαμηλής ενέργειας κατά τη διείσδυσή τους σε λεπτά μεταλλικά φύλλα. Είναι σχεδιασμένο για υπολογισμό κυρίως των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων και των παραγόμενων ακτίνων Χ. Σχεδιάστηκε για προσομοίωση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης από την ομάδα του καθηγητή Raynald Gauvin του πανεπιστημίου Sherbrooke στο Κεμπέκ του

Καναδά (Hovington, Drouin et al. 1997). Το SELID (Simulation of E-Beam Lithography in 3 Dimensions) είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης. Αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα: προσομοίωση της έκθεσης, προσομοίωση της θέρμανσης μετά την έκθεση, προσομοίωση της εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού και το τμήμα ανάλυσης. Το τμήμα προσομοίωσης της έκθεσης είναι αποτέλεσμα ερευνητικής εργασίας που διεξήχθη στο ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής του Δημόκριτου. Το λογισμικό διατίθεται στο εμπόριο από την εταιρία SIGMA-C GmbH (Munich).

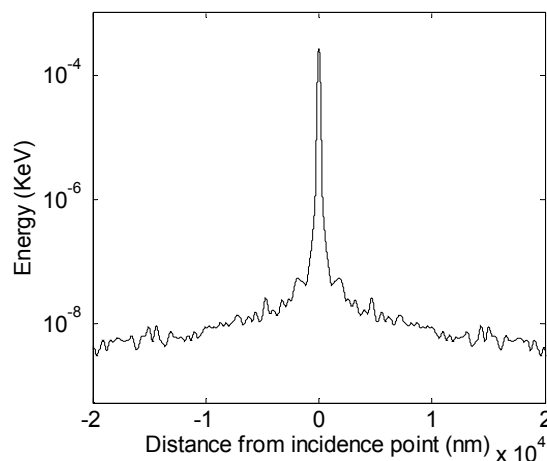
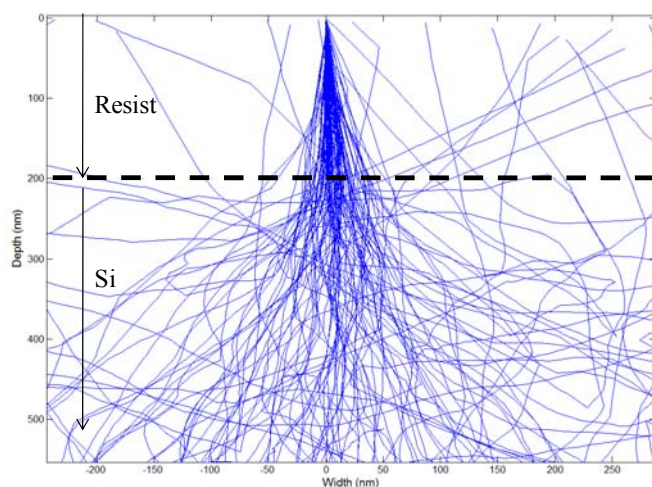
### 3.5 Χαρακτηριστικά του προσομοιωτή

Το λογισμικό της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ειδικά για την προσομοίωση της λιθογραφίας με δέσμη ηλεκτρονίων. Υπολογίζει την ενέργεια που εναποτίθεται στο λιθογραφικό υλικό λαμβάνοντας υπόψη τη δομή του υποστρώματος που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τόσο σε απευθείας εγγραφή με δέσμη ηλεκτρονίων όσο και στην κατασκευή μασκών. Ειδικά για τις μάσκες λιθογραφίας ακραίου υπεριώδους χρησιμοποιούνται πολύπλοκα υποστρώματα, η δομή των οποίων πρέπει να ληφθεί υπόψη για την ακριβή πρόβλεψη της ενέργειας στο λιθογραφικό υλικό.

Ο υπολογισμός της ενέργειας γίνεται σε τρεις διαστάσεις παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα πρόβλεψης της μορφής των σχηματιζόμενων δομών σε όλο το πάχος του λιθογραφικού υλικού. Η υπολογιζόμενη ενεργειακή εναπόθεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λογισμικό προσομοίωσης της διαδικασίας εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού, αποτελώντας με τον τρόπο αυτό ένα ολοκληρωμένο λογισμικό προσομοίωσης της πλήρους διαδικασίας έκθεσης και εμφάνισης. Τέλος παρέχει τη δυνατότητα διεξαγωγής αυτοματοποιημένων μετρήσεων της κρίσιμης διάστασης, της πλευρικής τραχύτητας και της διακύμανσης του πλάτους γραμμής.

### 3.6 Προσομοίωση σημειακής δέσμης

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό είναι η προσομοίωση σημειακής δέσμης, μιας δέσμης δηλαδή της οποίας τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν όλα στο ίδιο σημείο του υλικού. Προσομοιώνεται η τροχιά κάθε ηλεκτρονίου σε τρεις διαστάσεις με τη χρήση μεθόδων Monte Carlo και υπολογίζεται η εναπόθεση ενέργειας στο υλικό.



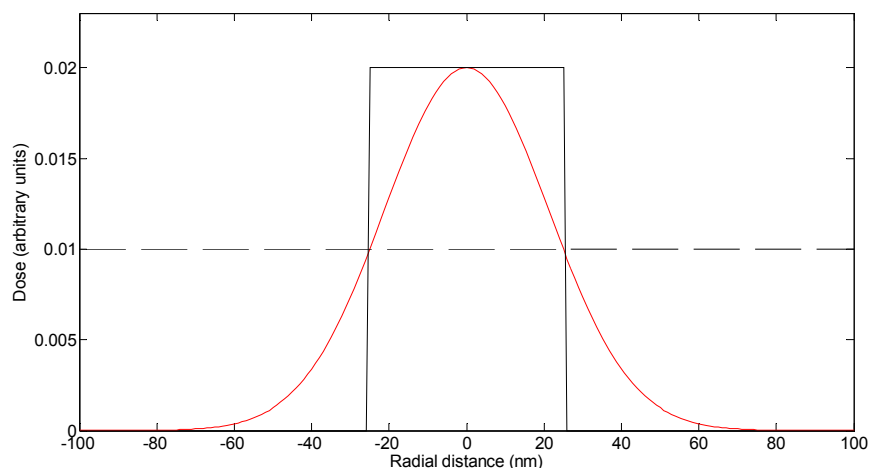
Εικόνα 3.4 Λεπτομέρεια από την προσομοίωση των Εικόνα 3.5 Η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης σε

τροχιών των ηλεκτρονίων κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια λιθογραφικού υλικού -υποστρώματος συνάρτηση με την ακτινική απόσταση από το σημείο πρόσπτωσης

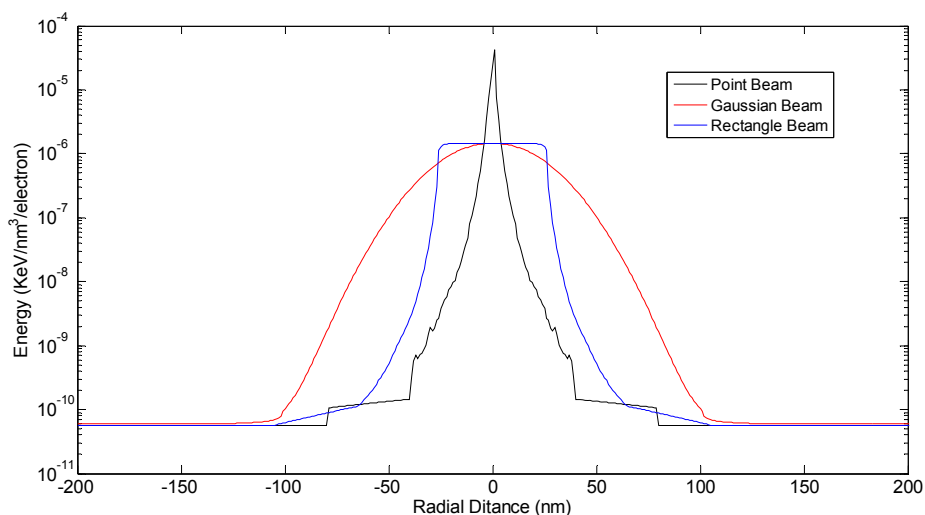
Κάθε ηλεκτρόνιο προσπίπτει στην επιφάνεια του λιθογραφικού υλικού με αρχική κινητική ενέργεια που καθορίζεται από το χρήστη. Η αρχική γωνία πρόσπτωσης καθορίζεται και αυτή από το χρήστη και είναι μηδέν σε περίπτωση που η δέσμη θεωρηθεί ότι προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια. Η τροχιά του ηλεκτρονίου είναι μια τεθλασμένη γραμμή στον τρισδιάστατο χώρο. Το ηλεκτρόνιο θεωρείται ότι ακολουθεί μια ελεύθερη διαδρομή η οποία διακόπτεται από ελαστικές ή ανελαστικές κρούσεις (Εικόνα 3.4). Μετά από κάθε κρούση καθορίζεται η νέα διεύθυνση κίνησής του από τις γωνίες σκέδασης οι οποίες εξαρτώνται από την ενέργεια του ηλεκτρονίου πριν την κρούση, το είδος της κρούσης καθώς και το υλικό. Μετά την κρούση καθορίζεται επίσης το νέο μήκος ελεύθερης διαδρομής το οποίο εξαρτάται από την ενέργεια του ηλεκτρονίου μετά την κρούση και το υλικό. Παράλληλα αποθηκεύεται το ποσό ενέργειας που εναποτίθεται στο υλικό λόγω ανελαστικών σκεδάσεων και οι συντεταγμένες του χώρου στις οποίες το ανελαστικό αυτό γεγονός έχει συμβεί. Επειδή κατά την κίνησή του το ηλεκτρόνιο περνά από ένα στρώμα υλικού σε άλλο, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε όλοι οι υπολογισμοί των γωνιών, της ελεύθερης διαδρομής και της απώλειας ενέργειας να γίνονται με βάση τα δεδομένα του υλικού του τρέχοντος στρώματος. Τα φυσικά μοντέλα και οι ακριβείς σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2. Επειδή οι ακριβείς θέσεις των ατόμων του υλικού δεν μπορεί να είναι γνωστές, η προσέγγιση που ακολουθείται είναι στατιστική. Οι σχέσεις που δίνουν τις γωνίες σκέδασης, το μήκος ελεύθερης διαδρομής και την απώλεια ενέργειας είναι κατανομές πιθανότητας γύρω από κάποια τιμή. Τυχαίοι αριθμοί παράγονται κάθε φορά για τον υπολογισμό των ακριβών τιμών. Γι' αυτό και η προσέγγιση αυτή ονομάζεται Monte Carlo. Για την στατιστική λοιπόν αυτή προσέγγιση υπολογίζεται η εναποτιθέμενη ενέργεια από ένα μεγάλο πλήθος ηλεκτρονίων, της τάξης των  $10^4$ , από τα οποία προκύπτει τελικά η ενέργεια ανά ηλεκτρόνιο και ανά μονάδα όγκου του υλικού. Λόγω κυκλικής συμμετρίας, η ενεργειακή εναπόθεση είναι συνάρτηση της ακτινικής απόστασης από το σημείο πρόσπτωσης  $R$  και του βάθους του υλικού. Ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιων αποτελεσμάτων δίνεται στην Εικόνα 3.5. Πρόκειται για την ενεργειακή εναπόθεση δέσμης 100 KeV σε PMMA και υπόστρωμα Si.

### 3.7 Συνέλιξη με την πραγματική δέσμη

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η πραγματική δέσμη ενός e-Beam δεν είναι σημειακή. Τα ηλεκτρόνια κατά την έκθεση κατανέμονται γύρω από το σημείο εστίασης με κατανομή πιθανότητας που καθορίζεται από τα χρησιμοποιούμενα διαφράγματα και τους φακούς εστίασης του συστήματος εγγραφής. Έτσι, κάθε σύστημα εγγραφής δίνει διαφορετικό προφίλ δέσμης. Από τη συνέλιξη των δύο συναρτήσεων, του προφίλ της δέσμης και της ενεργειακής εναπόθεσης σημειακής δέσμης υπολογίζεται η συνολική ενεργειακή εναπόθεση από την πραγματική δέσμη.



Εικόνα 3.6 Δυο περιπτώσεις προφίλ: Γκαουσιανής και τετραγωνικής δέσμης. Οι καμπύλες είναι κανονικοποιημένες έτσι ώστε η δόση καθεμιάς να ισούται με τη μονάδα. Το FWHM καθεμιάς είναι 50 nm.

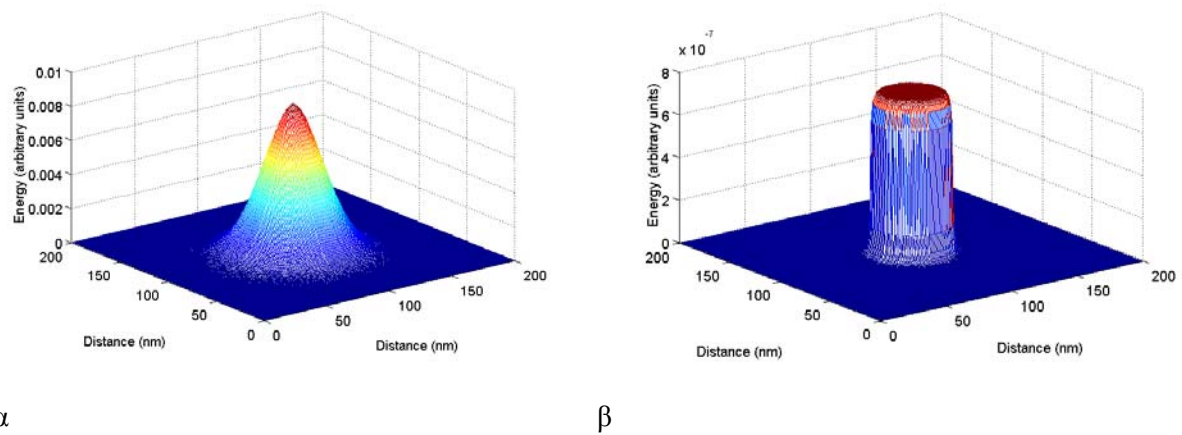


Εικόνα 3.7 Συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης από δέσμες ηλεκτρονίων γκαουσιανού και τετραγωνικού προφίλ σε σύγκριση με την ενεργειακή εναπόθεση σημειακής δέσμης.

Στην Εικόνα 3.6 παριστάνονται δύο περιπτώσεις δεσμών διαφορετικού προφίλ: τετραγωνικού και γκαουσιανού. Οι δύο δέσμες έχουν την ίδια μέγιστη ένταση και το ίδιο FWHM. Στην τετραγωνική δέσμη τα ηλεκτρόνια κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιοχή  $\left(-\frac{FWHM}{2}, \frac{FWHM}{2}\right)$ , ενώ στην γκαουσιανή σε μια ευρύτερη περιοχή ακολουθώντας γκαουσιανή κατανομή ώστε το συνολικό πλήθος των ηλεκτρονίων να παραμένει το ίδιο. Η πρώτη είναι μια θεωρητική περίπτωση και παρατίθεται για σύγκριση με την γκαουσιανή που αποτελεί συνήθη περίπτωση πραγματικής δέσμης.

Από τη συνέλιξη της συνάρτησης εναποτιθέμενης ενέργειας από σημειακή δέσμη και την κατανομή των ηλεκτρονίων της δέσμης προκύπτει η συνάρτηση εναποτιθέμενης ενέργειας από πραγματική δέσμη.

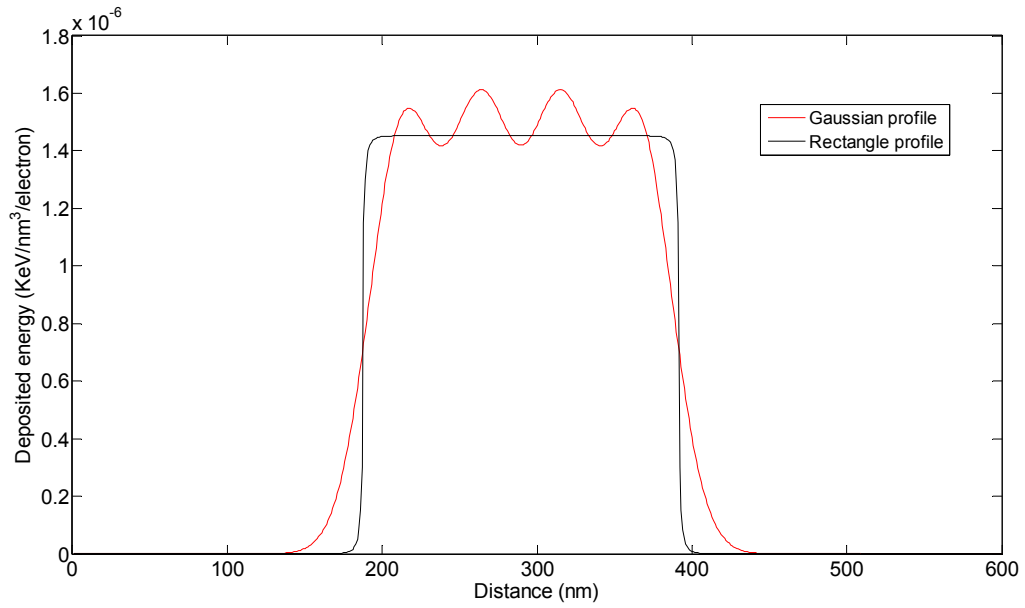
Στην Εικόνα 3.7 φαίνονται αποτελέσματα συνέλιξης δεσμών γκαουσιανού και τετραγωνικού προφίλ σε σύγκριση με την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης σημειακής δέσμης σε δύο διαστάσεις. Τα ίδια αποτελέσματα σε τρισδιάστατη απεικόνιση φαίνονται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης από πραγματική δέσμη (α) γκαουσιανού προφίλ και (β) τετραγωνικού προφίλ με FWHM=50nm

### 3.8 Συνέλιξη με το εγγραφόμενο σχέδιο

Το επόμενο στάδιο είναι ο υπολογισμός της ολικής εναποτιθέμενης ενέργειας στο λιθογραφικό υλικό. Τα δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο αυτό είναι το προς εγγραφή σχέδιο, η ενεργειακή εναπόθεση από την πραγματική δέσμη και το βήμα του συστήματος εγγραφής. Έτσι, το πρώτο βήμα είναι η ανάγνωση των δεδομένων του σχεδίου από το αρχείο CIF ή GDSII που έχει παραχθεί από το λογισμικό σχεδίασης. Αρχεία τέτοιας μορφής περιέχουν ως πληροφορίες τις συντεταγμένες των κορυφών των περιεχομένων παραλληλογράμμων (ή γενικότερα πολυγωνικών) σχημάτων. Από αυτές και το βήμα του συστήματος εγγραφής παράγεται η συνάρτηση των θέσεων έκθεσης. Η ολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό παράγεται από τη συνέλιξη της παραπάνω συνάρτησης με την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης από πραγματική δέσμη. Ο αλγόριθμος περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 1. Στην εικόνα δίνεται ένα παράδειγμα συνέλιξης τεσσάρων διαδοχικών εκθέσεων χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης που προέκυψαν από την προσομοίωση (Εικόνα 3.7). Το βήμα της έκθεσης είναι 50 nm, ίσο με το FWHM της δέσμης.



Εικόνα 3.9 Το αποτέλεσμα της συνέλιξης της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης με τη συνάρτηση των θέσεων έκθεσης



## 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΘΕΣΗΣ ΜΕ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ MONTE CARLO

### 4.1 Εισαγωγή

Βασικό τμήμα του αλγορίθμου είναι η προσομοίωση της κίνησης των ηλεκτρονίων σε στερεό με στόχο τον υπολογισμό της εναποτιθέμενης ενέργειας σε αυτό. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσέγγιση Monte Carlo που ακολουθήθηκε, τα φυσικά μοντέλα που περιγράφουν την κίνηση των ηλεκτρονίων στο υλικό, καθώς και αποτελέσματα υπολογισμού της ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό από σημειακή δέσμη ηλεκτρονίων. Η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης αποτελεί το δεδομένο εξόδου αυτού του τμήματος αλγορίθμου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στον παραπέρα υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που εναποτίθεται στο λιθογραφικό υλικό.

### 4.2 Φυσικά μοντέλα

Κατά τη διαδικασία εγγραφής της μάσκας, το λιθογραφικό υλικό βομβαρδίζεται με δέσμη ηλεκτρονίων για τη σχηματοποίησή του, η οποία βεβαίως λαμβάνει χώρα κατά την εμφάνιση. Τα ηλεκτρόνια που προσπίπτουν στο υλικό, διαπερνούν την επιφάνεια από όπου αρχίζει μια σύνθετη σειρά διαδοχικών σκεδάσεων από φαινόμενα όπως η παραγωγή ακτίνων X, δημιουργία ηλεκτρονίων Auger, διεγέρσεις πλάσματος, παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων. Προσπάθειες μελέτης των αλληλεπιδράσεων αυτών και προσομοίωσης τους έχουν γίνει για διάφορους στόχους, electron probe microanalysis (EPMA), ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), αναλυτική ηλεκτρονική μικροσκοπία (AEM), φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger (AES) και λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης (EBL) (Shimizu and Ding 1992).

Όσον αφορά στη λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης, η μελέτη της αλληλεπίδρασης του ηλεκτρονίου με την ύλη έχει ως στόχο την κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση των διαδικασιών σκέδασης ώστε να υπολογιστεί η εναποτιθέμενη ενέργεια στο λιθογραφικό υλικό (συνήθως πολυμερές) και στη συνέχεια να προβλεφθεί η σχηματοποίησή του μετά τη διαδικασία της εμφάνισης. Για τη μελέτη των φαινομένων αυτών χρησιμοποιούνται μέθοδοι Monte Carlo. Η εναπόθεση ενέργειάς από τα ηλεκτρόνια προκύπτει προσομοιώνοντας ένα μεγάλο πλήθος τροχιών ηλεκτρονίων με τη χρήση του κατάλληλου μοντέλου σκέδασης και μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Η μέθοδος Monte Carlo φαίνεται να είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος διότι είναι απλό να συμπεριληφθούν διαφορετικοί μηχανισμοί διάχυσης και διαφορετικές γεωμετρικές οριακές συνθήκες (Shimizu 2005). Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια των χρησιμοποιούμενων μοντέλων ελαστικής και ανελαστικής σκέδασης.

Μια εναλλακτική μέθοδος για την προσομοίωση της έκθεσης είναι η χρήση της εξίσωσης Μεταφοράς (Raptis 1995). Από την εξίσωση Boltzmann για την συνάρτησης κατανομής της ηλεκτρονικής δέσμης υπολογίζεται α) η πυκνότητα πιθανότητας των ηλεκτρονίων με το βάθος του

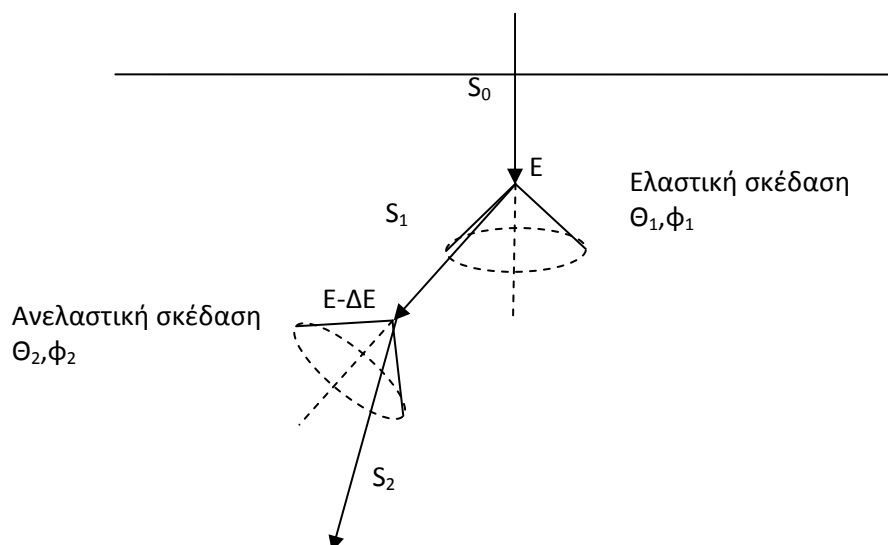
υποστρώματος επιλύοντας την εξίσωση μεταφοράς σε μια διάσταση και β) η πιθανότητα υπό συνθήκη να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο σε πλευρική απομάκρυνση  $r$  δεδομένου ότι βρίσκεται σε βάθος  $z$  και έχει ενέργεια  $E$ . Από το συνδυασμό των παραπάνω πιθανοτήτων και την απώλεια ενέργειας Bethe υπολογίζεται η εναπόθεση ενέργειας σε κάθε σημείο του πρώτου στρώματος. Η αναλυτική λύση για το πρώτο στρώμα χρησιμοποιείται σαν αρχική συνθήκη για μια αριθμητική λύση για τα μεγαλύτερα βάρη.

Ιστορικά, σε Monte Carlo προσομοιώσεις έχει υποτεθεί ότι το ηλεκτρόνιο υφίσταται ελαστικές σκεδάσεις με το ατομικό δυναμικό και ανελαστικές σκεδάσεις στην αλληλεπίδρασή του με τα ηλεκτρόνια του υλικού προκαλώντας τη διέγερσή ενός ή πολλών ηλεκτρονίων. Συνήθεις (Bishop 1965; Shimizu, Ikuta et al. 1972; Love, Cox et al. 1977) Monte Carlo προσεγγίσεις του φαινομένου αυτού κάνουν χρήση του μοντέλου απώλειας ενέργειας του Bethe (1933) (the continuous slowing-down approximation - CSDA) για τον υπολογισμό της εναποτιθέμενης ενέργειας στο υλικό και της ενεργού διατομής του Wentzel (1927) για τον υπολογισμό της γωνίας σκέδασης σε ελαστικές κρούσεις.

Ορισμένα φαινόμενα που σχετίζονται με την διείσδυση των ηλεκτρονίων στην ύλη (π.χ. οπισθοσκέδαση, γωνιακή κατανομή, συνάρτηση της δόσης με το βάθος διείσδυσης, παραγωγή ακτίνων X) έχουν περιγραφεί (ήδη από τη δεκαετία του 70) με επιτυχία χρησιμοποιώντας τεχνικές Monte Carlo. Η κατανομή εναποτιθέμενης ενέργειας στην ύλη από τη διαχεόμενη δέσμη των ηλεκτρονίων δεν είχε ακόμη με ακρίβεια περιγραφεί. Ορισμένες προσπάθειες είχαν ήδη γίνει (McDonald, Lamki et al. 1971; Shimizu, Ikuta et al. 1975; Liljequist 1978) στη δεκαετία του 70 κάνοντας χρήση του CSDA εισάγοντας ένα παράγοντα απώλειας ενέργειας. Οι προσεγγίσεις αυτές παρέμειναν μη ρεαλιστικές διότι η μέση απώλεια ενέργειας σε μια ανελαστική κρούση θεωρείται σταθερή, ανεξάρτητη από την ενέργεια του ηλεκτρονίου. Επιπλέον, η θεωρία του Bethe δεν ισχύει για ενέργειες ηλεκτρονίων ίσης ή μικρότερης της ενέργειας σύνδεσης των ατόμων.

Αντί του μοντέλου του Bethe, ορισμένοι ερευνητές (Green and Leckey 1976; Shimizu, Kataoka et al. 1976) εφαρμόζουν υπολογισμούς Monte Carlo κάνοντας χρήση θεωρητικών ενεργών διατομών για να περιγράψουν τις στοιχειώδεις διαδικασίες διέγερσης. Η διαδικασία αυτή όμως είναι εφαρμόσιμη μόνο σε μέταλλα, κυρίως το αλουμίνιο για το οποίο η αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με το στερεό είναι γνωστή με ακρίβεια. Για άλλα υλικά, κράματα ή μίγματα, η αλληλεπίδραση δεν μας είναι με ακρίβεια γνωστή λόγω της πολυπλοκότητας του υλικού. Για το λόγο αυτό, είναι πιο βολικό να χρησιμοποιούνται απλά μοντέλα σκέδασης που θα ισχύουν κατά προσέγγιση σε μεγαλύτερο εύρος υλικών.

Το CSDA είναι ένα αρκετά ακριβές και πολύ απλό στοχαστικό μοντέλο περιγραφής των φαινομένων που σχετίζονται με την κίνηση των ηλεκτρονίων στην ύλη για ενέργειες της τάξης KeV. Η τροχιά του ηλεκτρονίου περιγράφεται ως μια διαδοχή συνεχόμενων ευθύγραμμων ελεύθερων τροχιών (Εικόνα 4.1) που σχηματίζουν γωνίες μεταξύ τους οφειλόμενες στις ελαστικές και ανελαστικές σκεδάσεις με τα άτομα. Η μέθοδος Lenz (1954) βασισμένη στο μοντέλο του Wentzel (1927) για το άτομο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των ελαστικών και ανελαστικών ενεργών διατομών. Ο μέσος ρυθμός απώλειας ενέργειας του ηλεκτρονίου κατά μήκος της τροχιάς του προκύπτει από τη σχέση του Bethe αφού διαμορφώθηκε (Rao-Sahib and Wittry 1974) ώστε να ισχύει και στις χαμηλές ενέργειες.



Εικόνα 4.1 Η τροχιά του ηλεκτρονίου ως αποτέλεσμα διαδοχικών σκεδάσεων

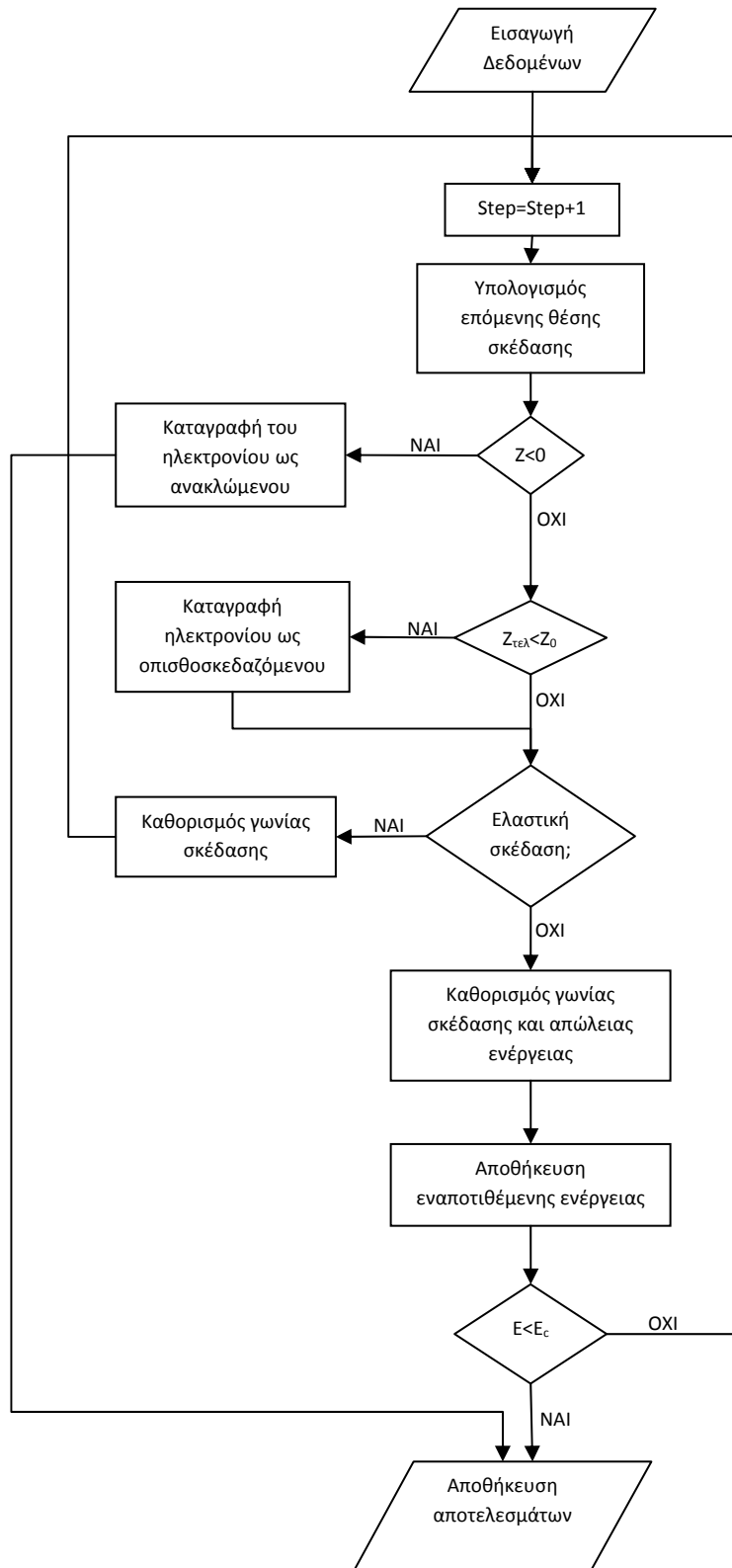
Η βασική ιδέα του μοντέλου φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Στην Εικόνα 4.2 παριστάνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμών. Τα δεδομένα εισόδου είναι:

- Η αρχική ενέργεια των ηλεκτρονίων ( $E$ )
- Το πλήθος των ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση ( $N$ )
- Η χημική σύσταση του λιθογραφικού υλικού.
- Το πάχος του λιθογραφικού υλικού.
- Η αρχιτεκτονική και η χημική σύσταση του υποστρώματος

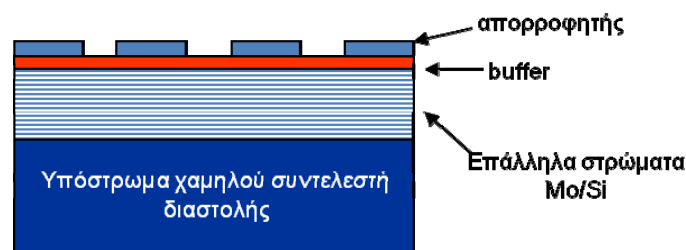
Ο αλγόριθμος προσφέρει τη δυνατότητα ελεύθερης επιλογής ενός ή περισσότερων υποστρωμάτων στα επιθυμητά πάχη. Επίσης δίνεται η δυνατότητα επιλογής πολυστρωματικής στοίβας, υποστρώματος δηλαδή με περιοδικότητα για τις περιπτώσεις εγγραφής μασκών λιθογραφίας ακραίου υπεριώδους. Ο χρήστης καθορίζει το πλήθος, το πάχος και το είδος των υποστρωμάτων μιας περιόδου καθώς και το πλήθος των περιόδων. Ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιου υποστρώματος φαίνεται στην Εικόνα 4.3.

Για κάθε ένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται (λιθογραφικά υλικά και υποστρώματα) απαιτούνται ως δεδομένα εισόδου:

- η πυκνότητά του  $\rho$
- ο ατομικός αριθμός  $Z$
- η ατομική του μάζα  $A$



Εικόνα 4.2 Διάγραμμα ροής προσομοίωσης της τροχιάς των ηλεκτρονίων



Εικόνα 4.3 Διάγραμμα EUV μάσκας

#### 4.2.1 Υπολογισμός του μήκους ελεύθερης διαδρομής

Για την έναρξη των υπολογισμών δίνεται αρχική τιμή στην πολική ( $\theta$ ) και αζιμουθιακή ( $\varphi$ ) γωνία της τροχιάς του ηλεκτρονίου (για δέσμη που προσπίπτει κάθετα στο δισκίδιο είναι  $\theta=0$  ενώ στη  $\varphi$  δίνεται μια τυχαία αρχική τιμή). Με βάση τα δεδομένα του λιθογραφικού υλικού υπολογίζεται αρχικά το μήκος ελεύθερης διαδρομής ώστε να καθοριστεί η θέση της επόμενης σκέδασης. Για άμορφα υλικά η κατανομή των μηκών ελεύθερης διαδρομής ακολουθεί νόμο Poisson. Προκύπτει ότι το μήκος ελεύθερης διαδρομής του ηλεκτρονίου μέχρι την επόμενη κρούση δίνεται από τη σχέση:

$$s = -\lambda_T \ln(r_1) \quad (4.1)$$

όπου  $\lambda_T$  το μέσο μήκος ελεύθερης διαδρομής μεταξύ δύο κρούσεων το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\lambda_T} = \frac{N_A \rho}{A} \sigma_T \quad (4.2)$$

όπου  $\sigma_T$  η ολική ενεργός διατομή σκέδασης:

$$\sigma_T = \sigma_{el}(\pi) + \sigma_{in} \quad (4.3)$$

και  $\sigma_{el}(\pi)$  η ολική ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης για γωνίες  $0-\pi$ ,  $\sigma_{in}$  η ενεργός διατομή ανελαστικής σκέδασης. Ο  $r_1$  είναι ένας τυχαίος αριθμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στο διάστημα  $0-1$ .

Η ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης για γωνίες από μηδέν έως  $\theta$  δίνεται από τη σχέση (Salvat and Parellada 1984):

$$\sigma_{el}(\theta) = 4\pi\alpha_0^2 \frac{Z^2 R}{E} \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{a^2 + 2 \frac{E}{R} (1 - \cos \theta)} \right) \quad (4.4)$$

όπου:

$$\alpha = Z^{\frac{1}{3}}$$

Ε η κινητική ενέργεια, R η ενέργεια Rydberg και  $a_0$  η ακτίνα του Bohr. Ουσιαστικά πρόκειται για την ενεργό διατομή Rutherford στην οποία εμφανίζεται ο όρος  $\alpha^2$  ο οποίος εμποδίζει τη ενεργό διατομή να απειριστεί καθώς η γωνία σκέδασης τείνει στο μηδέν.

Η ενεργός διατομή ανελαστικής σκέδασης δίνεται από τη σχέση (Salvat, Martinez et al. 1985):

$$\sigma_{in} = 4\pi\alpha_0^2 \frac{ZR}{E} \frac{1}{\alpha^2} \left( 2 \ln \frac{\alpha^2 + (\bar{q}a_0)^2}{(\bar{q}a_0)^2} - \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\bar{q}a_0)^2} \right) \quad (4.5)$$

όπου

$$(\bar{q}a_0)^2 = \frac{J^2}{16ER} \quad (4.6)$$

όπου J η ενέργεια πρώτου ιονισμού του ατόμου.

#### 4.2.2 Υπολογισμός απώλειας ενέργειας

Ο μέσος ρυθμός μείωσης της ενέργειας για ένα μη σχετικιστικό ηλεκτρόνιο υπολογίζεται από τη σχέση του Bethe (Bethe 1933) διορθωμένος από τους Rao-Sahib and Wittry (1974) ώστε να συμπεριλάβει τη συμπεριφορά στις πολύ χαμηλές ενέργειας. Είναι:

$$-\frac{dE}{d(\rho s)} = \begin{cases} a \frac{1}{\xi} \left[ \ln(\xi) + \frac{1}{2}(1 - \ln 2) \right] & \xi > \xi_c \\ a \left( \frac{2}{e} \right)^{3/4} \xi^{-1/2} & \xi \leq \xi_c \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου

$$\alpha = 4\pi\alpha_0^2 \frac{N_A}{A} 2Z \frac{R^2}{I} \quad (4.8)$$

$\xi = E/I$  και  $\xi_c = 6,338$ . Το I σε συνάρτηση με το Z για μικρούς ατομικούς αριθμούς δίνεται από τη σχέση του Bloch (Birkhoff 1958)

$$I = \begin{cases} RZ = 0.0136 Z \text{ (keV)}, & Z < 10 \\ (0.00976 + 0.0588 Z^{-1.19})Z \text{ (keV)}, & Z \geq 10 \end{cases} \quad (4.9)$$

Για σύνθετα υλικά η μέση ενέργεια διέγερσης μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$\ln I = \frac{1}{Z} \sum_i Z_i \ln I_i \quad (4.10)$$

Αν προκύψει ανελαστική σκέδαση, η μέση απώλεια ενέργειας ανά ανελαστική σκέδαση υπολογίζεται από τη σχέση (Salvat, Martinez et al. 1985):

$$W_{av} = - \frac{dE}{d(\rho s)} \frac{A}{N_A \sigma_{in}} \quad (4.11)$$

Η ελάχιστη απώλεια ενέργειας  $W_{in}$  δίνεται από την προσεγγιστική λύση:

$$\ln W_{min}^{(ap)} = \left( 1 + \frac{1}{1 - 0.3 \ln W_{av}} \right) \ln W_{av} \quad (4.12)$$

Η ενέργεια που χάνει το προσπίπτον ηλεκτρόνιο σε μια ανελαστική σκέδαση αποφασίζεται βρίσκοντας μια τιμή  $W$  η οποία ικανοποιεί την εξίσωση:

$$r_2 = \int_{W_{min}}^W P(W) dW' \quad (4.13)$$

Όπου  $r_2$  είναι άλλος ένας τυχαίος αριθμός. Προκύπτει:

$$W = W_{min} \left[ 1 - r_2 \left( 1 - \frac{W_{min}}{E} \right) \right]^{-1} \quad (4.14)$$

### 4.2.3 Υπολογισμός γωνιών σκέδασης

Ένας δεύτερος τυχαίος αριθμός  $r_2$  χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί αν η κρούση είναι ελαστική ή ανελαστική. Έτσι, αν ισχύει η ανίσωση:

$$r_3 \sigma_T \leq \sigma_{el}(\pi) \quad (4.15)$$

η επόμενη κρούση είναι ελαστική. Αν όχι, είναι ανελαστική.

Αν προκύψει ελαστική σκέδαση, η πολική και αζιμουθιακή γωνία σκέδασης αποφασίζονται με τη χρήση άλλων δύο τυχαίων αριθμών  $r_4$  και  $r_5$  σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\sigma_{el}(\theta) = r_4 \sigma_{el}(\pi) \quad (4.16)$$

$$\varphi = 2\pi r_5 \quad (4.17)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται εκ νέου το μήκος ελεύθερης διαδρομής ώστε να προσδιοριστεί η επόμενη θέση σκέδασης.

Αν προκύψει ανελαστική σκέδαση, η πολική γωνία σκέδασης δίνεται από την σχέση:

$$\sin^2 \theta = \frac{W}{E} \quad (4.18)$$

ενώ η αζιμουθιακή γωνία  $\varphi$  και πάλι από τη σχέση:

$$\varphi = 2\pi r_4 \quad (4.19)$$

Η πολική γωνία  $\theta$  μετριέται από τον άξονα κίνησης του ηλεκτρονίου. Αν  $\theta_n$  η πολική γωνία ως προς τον άξονα  $z$ , τον κάθετο στο δισκίδιο, μετά την κρούση, και  $\theta_{n-1}$  αντίστοιχη γωνία πριν την κρούση ισχύει:

$$\cos(\theta_n) = \cos(\theta_{n-1}) * \cos \theta - \sin(\theta_{n-1}) * \sin \theta * \cos \varphi \quad (4.20)$$

Αν  $\Delta\varphi$  είναι η μεταβολή της αζιμουθιακής γωνίας μετρούμενη ως προς το σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου, ισχύει:

$$\tan \Delta\varphi = \frac{\sin(\theta_{n-1}) * \sin \theta * \sin \varphi}{\cos \theta - \cos(\theta_{n-1}) * \cos(\theta_n)} \quad (4.21)$$

Οπότε η νέα τιμή της αζιμουθιακής γωνίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \Delta\varphi \quad (4.22)$$

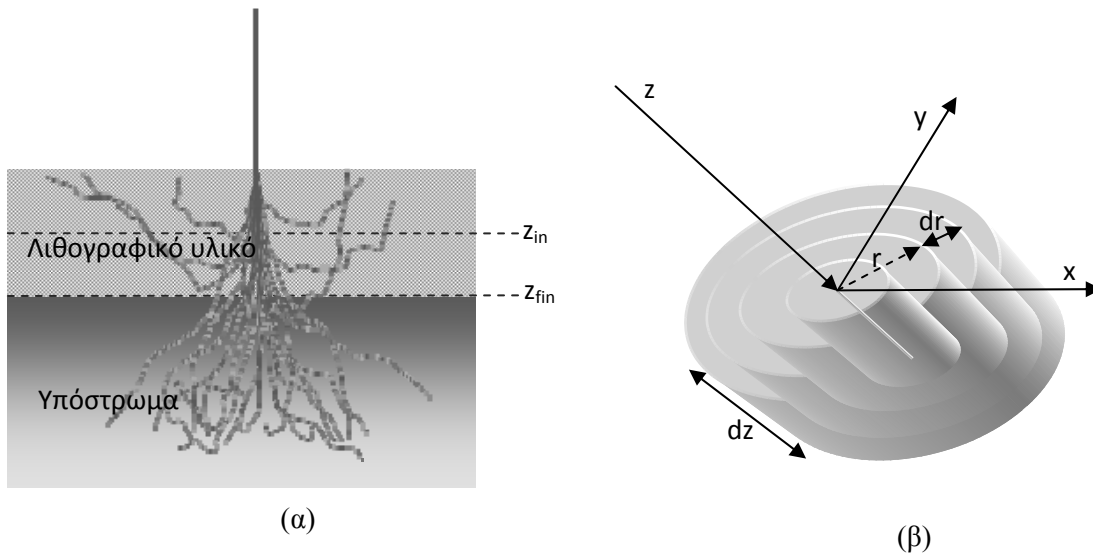
Οι νέες συντεταγμένες του ηλεκτρονίου υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \\ z_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} + s_n \begin{pmatrix} \sin \theta_n \cos \varphi_n \\ \sin \theta_n \sin \varphi_n \\ \cos \theta_n \end{pmatrix} \quad (4.23)$$



#### 4.2.4 Αποθήκευση της εναποτιθέμενης ενέργειας

Για λόγους ταχύτητας και οικονομίας μνήμης, δεν αποθηκεύεται η ενέργεια που εναποτίθεται σε κάθε περιοχή του υποστρώματος, αλλά μόνο στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η περιοχή αυτή μπορεί να είναι ολόκληρο το λιθογραφικό υλικό ή ένα μόνο στρώμα αυτού και καθορίζεται από το χρήστη κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Ο χρήστης επιλέγει το τμήμα του λιθογραφικού υλικού επιλέγοντας τα  $z_{in}$  και  $z_{fin}$  που φαίνονται στην Εικόνα 4.4(α).



Εικόνα 4.4 (α) Καθορισμός του στρώματος υπολογισμού ενέργειας (β) Τα στοιχεία όγκου  $2\pi r dr dz$  στα οποία αποθηκεύεται η ενέργεια

Λόγω κυκλικής συμμετρίας, αποθηκεύεται η ενέργεια που εναποτίθεται ανά μονάδα όγκου σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση  $r$  και το βάθος  $z$ . Έτσι προκύπτει ένας πίνακας τιμών για την εναποτιθέμενη ενέργεια από σημειακή δέσμη (point spread function, PSF) ανά μονάδα όγκου και ανά ηλεκτρόνιο σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση  $r$  και το βάθος.

$$PSF = f(r, z) \quad (4.24)$$

Κάθε φορά που ένα ανελαστικό γεγονός λαμβάνει χώρα, ελέγχεται η θέση του ηλεκτρονίου. Αν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος ελέγχεται το βάθος του στο υλικό και η ακτινική του απόσταση  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  ώστε να αποθηκευτεί η ενέργεια στο αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα PSF. Κάθε στοιχείο του πίνακα PSF αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο όγκου  $dV=2\pi r dr dz$  (Εικόνα 4.4(β)). Η διαμερίσεις  $dr$  και  $dz$  επιλέγονται από το χρήστη. Βέβαια όσο μικρότερες οι τιμές τους τόσο μεγαλύτερο ποσό μνήμης απαιτείται για την αποθήκευση των αποτελεσμάτων. Τυπικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι  $dz=10\text{nm}$  και  $dr=1\text{nm}$ . Δεδομένου ότι το λογισμικό της προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στοχεύει στη προσομοίωση δομών στη νανοκλίμακα είναι κρίσιμο να μπορεί να χειρισθεί κυψελίδες τόσο μικρής διάστασης.

Η ενέργεια που εναποτίθεται σε κάθε βήμα και για κάθε ηλεκτρόνιο προστίθεται στο αντίστοιχο στοιχείο πίνακα. Στο τέλος της διαδικασίας των υπολογισμών κάθε στοιχείο του πίνακα PSF διαιρείται με τον όγκο του  $dV$  και το πλήθος  $N$  των ηλεκτρονίων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση ώστε προκύπτει η ενεργειακή κατανομή ανά μονάδα όγκου και ανά ηλεκτρόνιο σε μονάδες  $\frac{\text{KeV}}{\text{nm}^3 \cdot \text{electron}}$

#### 4.2.5 Μέθοδος προγραμματισμού

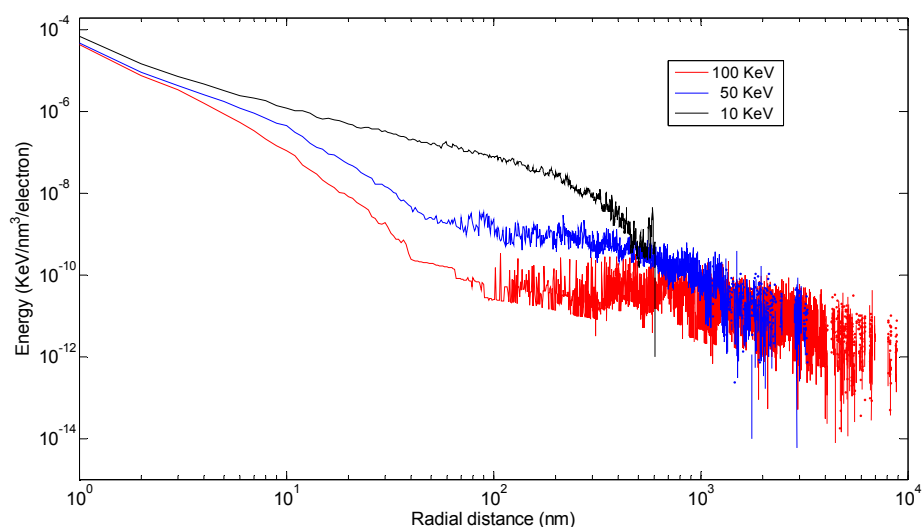
Οι υπολογισμοί που περιγράφηκαν παραπάνω επαναλαμβάνονται για ένα πλήθος  $N$  ηλεκτρονίων. Για μια ικανοποιητική στατιστική, επιλέγεται συνήθως ένα πλήθος της τάξης των  $10^4$  ηλεκτρονίων. Ο κώδικας έχει γραφεί σε MatLab. Επειδή η χρήση βρόχων τύπου «for» για την πραγματοποίηση επαναληπτικών διαδικασιών θα απαιτούσε πολύ μεγαλύτερους υπολογιστικούς χρόνους, τέτοιες διαδικασίες υλοποιούνται με τη χρήση πινάκων. Έτσι, κατά την έναρξη των υπολογισμών, δημιουργείται ένας πίνακας δεδομένων  $N \times m$ , όπου  $N$  το πλήθος των ηλεκτρονίων που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση και  $m$  οι μεταβλητές για κάθε ηλεκτρόνιο. Στις μεταβλητές αυτές αποθηκεύονται όλες οι απαραίτητες σταθερές καθώς και το μήκος ελεύθερης διαδρομής του, οι συντεταγμένες αρχικής και τελικής θέσης, η τρέχουσα ενέργεια του ηλεκτρονίου. Με τον τρόπο αυτό οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται ταυτόχρονα για τα  $N$  ηλεκτρόνια. Αφού υπολογιστούν τα μήκη ελεύθερης διαδρομής, αποφασίζεται το είδος της σκέδασης για κάθε ηλεκτρόνιο. Για το καθένα ελέγχεται επίσης το υλικό μέσα στο οποίο βρίσκεται κάθε φορά. Ο αλγόριθμος των υπολογισμών είναι ο ίδιος για κάθε ηλεκτρόνιο, οι σταθερές όμως που χρησιμοποιούνται και οι σχέσεις των υπολογισμών είναι διαφορετικές. Οι πραγματοποιήσή τους εξυπηρετείται από τη χρήση δεικτών. Αν για κάποιο ηλεκτρόνιο βρεθεί ότι η τελική του θέση είναι εκτός του υλικού ( $z_{\text{τελ}} < 0$ ), λογαριάζεται ως ανακλώμενο και αφαιρείται από τον πίνακα. Αν η ενέργεια κάποιου ηλεκτρονίου πέσει κάτω από μια κρίσιμη τιμή τότε αυτό θεωρείται απορροφημένο και αφαιρείται και πάλι από τον πίνακα. Οι υπολογισμοί συνεχίζονται ώσπου ο πίνακας των ηλεκτρονίων να αδειάσει και όλα τα ηλεκτρόνια ή θα απορροφηθούν από το υλικό ή θα ανακλαστούν.

#### 4.2.6 Υπολογισμός του συντελεστή οπισθοσκέδασης

Τα ηλεκτρόνια που βάζονται προς την επιφάνεια του λιθογραφικού υλικού εισέρχονται σε αυτό και συνεχίζουν την κίνησή τους περνώντας στο υπόστρωμα. Ορισμένα από αυτά, μετά από μια πορεία διαδοχικών σκεδάσεων στο υπόστρωμα περνούν εκ νέου στη ρητίνη. Τα ηλεκτρόνια αυτά για τα οποία ισχύει  $z_{\text{fin}} < z_0$ , όπου  $z_0$  το πάχος του λιθογραφικού υλικού, καταμετρώνται ως οπισθοσκεδαζόμενα. Στόχος του υπολογισμού του συντελεστή οπισθοσκέδασης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα άλλων προσομοιώσεων αλλά και με τα πειραματικά δεδομένα.

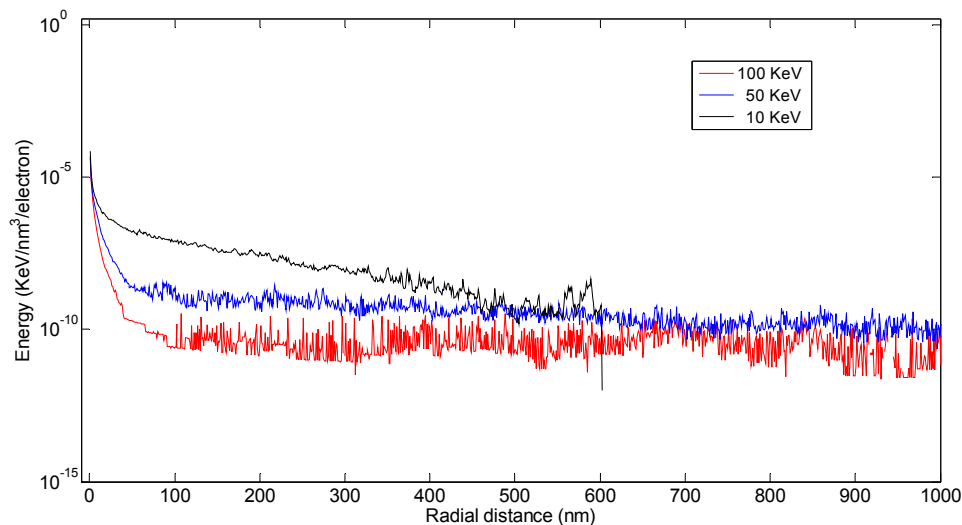
### 4.3 Τυπικά αποτελέσματα

Ακολουθούν αποτελέσματα ενεργειακής εναπόθεσης που προκύπτουν από τον παραπάνω αλγόριθμο.



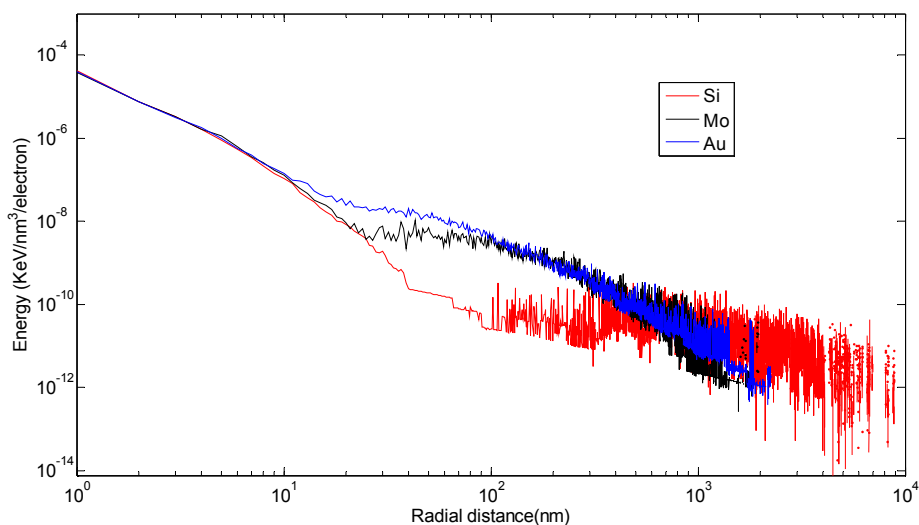
Εικόνα 4.5 Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών ενεργειακής εναπόθεσης για τρεις ενέργειες ηλεκτρονικής δέσμης.

Στην Εικόνα 4.5 παριστάνεται η ενεργειακή εναπόθεση σε υμένιο PMMA πάχους 100 nm πάνω από υπόστρωμα Si για τρεις ενέργειες ηλεκτρονικής δέσμης, 10 KeV, 50 KeV και 100 KeV. Η ενέργεια δίνεται σαν συνάρτηση της ακτινικής απόστασης από το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης σε λογαριθμικούς άξονες. Από το διάγραμμα φαίνεται η διαφορά στην εμβέλεια της δέσμης ανάλογα με την ενέργειά της. Παρότι πρόκειται για σημειακή δέσμη, εναπόθεση ενέργειας γίνεται σε μια ευρύτερη περιοχή, το εύρος της οποίας εξαρτάται από την ενέργειά της. Υπεύθυνα για αυτή την κατανομή ενέργειας είναι τα φαινόμενα σκέδασης των ηλεκτρονίων. Το άνοιγμα της καμπύλης σε μικρές ακτινικές αποστάσεις οφείλεται στην ομπροσθοσκέδαση των ηλεκτρονίων και δίνει σημαντικά ποσά ενέργειας γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Παρατηρούμε ότι τα φαινόμενα εμπροσθοσκέδασης είναι εντονότερα στις μικρές ενέργειες δίνοντας πολύ μεγαλύτερη ενέργεια στο λιθογραφικό υλικό σε μια περιοχή της τάξης μερικών δεκάδων νανομέτρων γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Τα ταχύτερα ηλεκτρόνια είναι πιο διεισδυτικά, περνούν στο υπόστρωμα χωρίς μεγάλες σκεδάσεις γι'αυτό και γενικά δίνουν λεπτότερη δέσμη. Στην περίπτωση τους όμως είναι πολύ μεγαλύτερη η ουρά της καμπύλης. Τα ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια εισχωρούν βαθύτερα στο υπόστρωμα και μετά από διαδοχικές σκεδάσεις επιστρέφουν στο λιθογραφικό υλικό. Το φαινόμενο καλείται οπισθοσκέδαση και είναι υπεύθυνο για την εναπόθεση ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Η ενέργεια αυτή είναι πολύ μικρότερη, τέσσερις έως έξι τάξεις μεγέθους πιο κάτω από αυτή των ομπροσθοσκεδαζόμενων και είναι υπεύθυνη για τα φαινόμενα γειτνίασης όταν η πυκνότητα των εγγραφόμενων σχημάτων είναι μεγάλη.



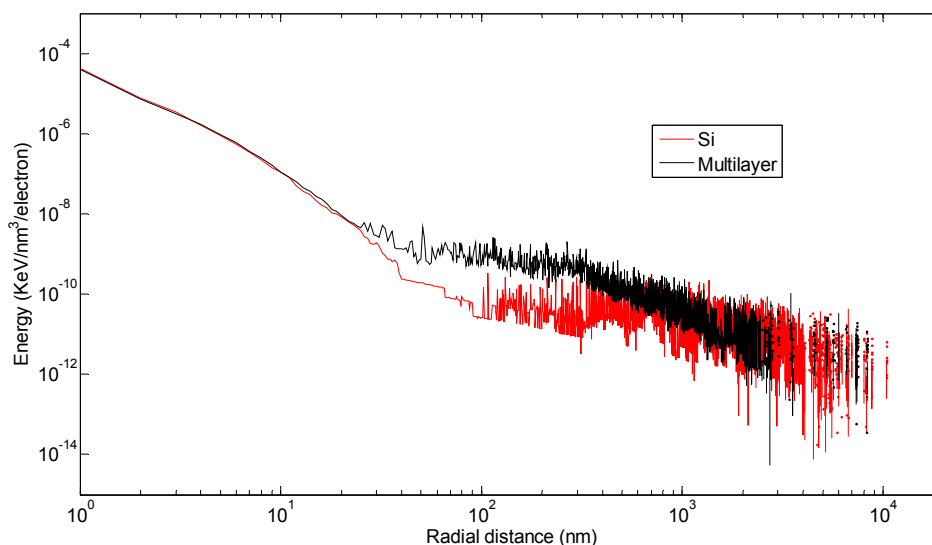
Εικόνα 4.6 Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών ενεργειακής εναπόθεσης για τρεις ενέργειες ηλεκτρονικής δέσμης σε ημιλογαριθμικούς άξονες.

Στην Εικόνα 4.6 παριστάνεται η ίδια ενεργειακή εναπόθεση σε ημιλογαριθμικούς άξονες για το πρώτο 1μm όπου είναι εμφανέστερη η διαφορά τους σε μικρές ακτινικές αποστάσεις.



Εικόνα 4.7 Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών ενεργειακής εναπόθεσης για τρία υποστρώματα (Si, Mo και Au) στην ίδια ενέργεια, 100 KeV

Στην Εικόνα 4.7 παριστάνονται συγκριτικά συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης σε υμένιο PMMA πάχους 100 nm για τρεις περιπτώσεις υποστρωμάτων, Si, Mo και Au για αρχική ενέργεια ηλεκτρονίων 100 KeV σε λογαριθμικούς άξονες. Στις καμπύλες αυτές φαίνεται η επίδραση του υποστρώματος λόγω οπισθοσκέδασης των ηλεκτρονίων σε αυτό. Στα βαρύτερα υλικά είναι εντονότερο το φαινόμενο αυξάνοντας δύο τάξεις μεγέθους την εναποτιθέμενη ενέργεια σε μια περιοχή 1 μm γύρω από το σημείο πρόσπτωσης κάνοντας έτσι εντονότερα τα φαινόμενα γειννίασης.



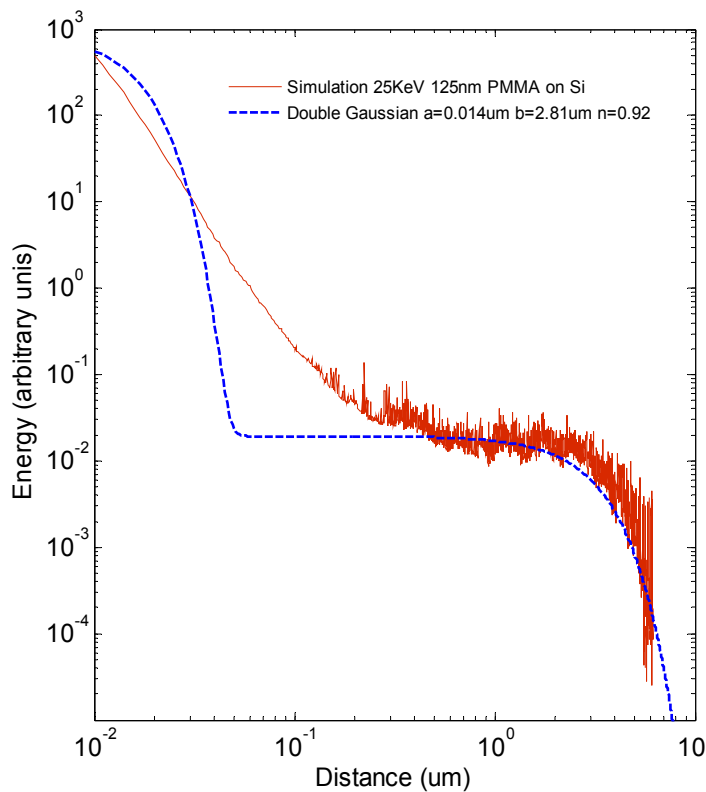
Εικόνα 4.8 Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών ενεργειακής εναπόθεσης για υπόστρωμα Si και υπόστρωμα με πολυστρωματική στοιβα Mo-Si στην ίδια ενέργεια, 100 KeV

Στην Εικόνα 4.8 δίνεται ένα διάγραμμα σύγκρισης της ενεργειακής εναπόθεσης για υπόστρωμα Si και υπόστρωμα με πολυστρωματική στοιβα που χρησιμοποιείται για κατασκευή μασκών λιθογραφίας ακραίου υπεριώδους. Το λιθογραφικό υλικό είναι PMMA πάχους 100 nm. Στην περίπτωση της EUV μάσκα, το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση αποτελείται από υμένιο χρωμίου 70 nm, υμένιο SiO<sub>2</sub> 70 nm, υμένιο Si 10 nm, πολυστρωματική στοιβα 40 περιόδων και τέλος υπόστρωμα πυριτίου σύμφωνα με μια τυπική δομή μάσκα EUV όπως παριστάνεται στην Εικόνα 2.2. Η πολυστρωματική στοιβα αποτελείται από ζεύγη υμενίων Mo-Si πάχους 2.8 nm και 4.1 nm αντίστοιχα. Είναι εμφανής η επίδραση των υμενίων Mo στην ενεργειακή εναπόθεση συγκρίνοντάς τη με την περίπτωση του απλού υποστρώματος Si.

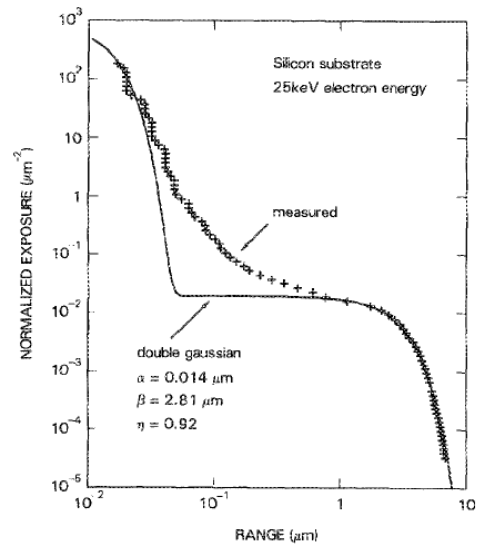
#### 4.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία

Για την αξιολόγηση του αλγόριθμου υπολογισμού της ενεργειακής εναπόθεσης, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι Rishton και Kern (Rishton and Kern 1987) δημοσίευσαν πειραματικά αποτελέσματα της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό σε συνάρτηση με την τάση επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων. Για την εγγραφή χρησιμοποίησαν ένα σύστημα διανυσματικής σάρωσης το οποίο δίνει δέσμη με FWHM=10-20nm και ως λιθογραφικό υλικό το methacrylate copolymer πάχους 125nm. Από την προσαρμογή των αποτελεσμάτων τους σε καμπύλη δύο γκαουσιανών (2.5) προέκυψε  $a=0.014\mu\text{m}$ ,  $b=2.81\mu\text{m}$ , και  $n=0.92$ . Με τις ίδιες συνθήκες με αυτές του πειράματος, υπολογίστηκε η ενεργειακή εναπόθεση από σημειακή δέσμη με τη μέθοδο Monte Carlo όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν  $10^3$  ηλεκτρόνια ενέργειας 25 KeV. Στην Εικόνα 4.9(α) παριστάνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σύγκριση με την καμπύλη δύο γκαουσιανών, με τις παραμέτρους  $a, b, n$  που προέκυψαν από τα πειράματα των Rishton και Kern.



(α)



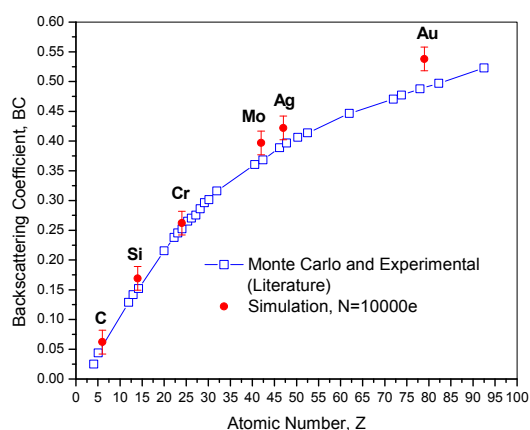
(β)

Εικόνα 4.9 (α) Ενεργειακή εναπόθεση σε 125 nm PMMA όπως προέκυψε από την προσομοίωση για δέσμη ηλεκτρονίων 25KeV υποστρώμα Si. Με διακεκομμένη παρουσιάζεται η καμπύλη δύο γκαουσιανών με τις τιμές που προέκυψαν από το πείραμα των Rishton και Kern. (β) Πειραματικά αποτελέσματα όπως δημοσιεύτηκαν από τους Rishton και Kern (Rishton and Kern 1987)

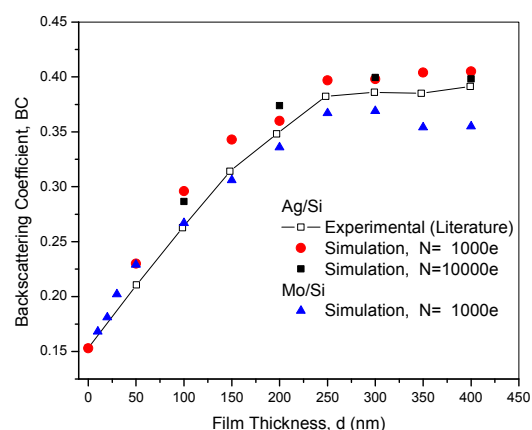
Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Εικόνα 4.9α) αλλά και τα πειραματικά (Εικόνα 4.9β) η προσέγγιση με δύο γκαουσιανές είναι καλή για τις μεγάλες αποστάσεις, αλλά σε μικρές αποστάσεις η ασυμφωνία είναι μεγάλη καθιστώντας ακατάλληλη για πρόβλεψη την προσέγγιση αυτή.

Για τις μικρές τιμές της κρίσιμης διάστασης της σημερινής τεχνολογίας (κάτω από 100 nm ) είναι αναγκαία η χρήση συνάρτησης που θα προβλέπει με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια την ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό. Επειδή η ενεργειακή εναπόθεση δεν εξαρτάται μόνο από την ενέργεια των ηλεκτρονίων αλλά και από τη σύσταση και δομή του υποστρώματος, η χρήση τέτοιων συναρτήσεων που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις δεν αποτελεί λύση αφού για κάθε εγγραφή θα πρέπει να πραγματοποιούνται χρονοβόρα και πολυέξοδα πειράματα. Για το λόγο αυτό, το ενδιαφέρον έχει στραφεί σε ακριβείς προσομοιώσεις οι οποίες θα μπορούν να προβλέψουν την ενεργειακή εναπόθεση για κάθε περίπτωση υποστρώματος, ειδικότερα για σύνθετα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μασκών νέας γενιάς.

Μία ακόμη μέθοδος αξιολόγησης της μεθόδου είναι η σύγκριση των τιμών του συντελεστή οπισθοσκέδασης που προκύπτει από την προσομοίωση με δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα. Μετρήθηκε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σε συνάρτηση με τον ατομικό αριθμό του υποστρώματος και με το πάχος του.



(α)



(β)

Εικόνα 4.10 Συντελεστής οπισθοσκέδασης σε συνάρτηση (α) με τον ατομικό αριθμό του υποστρώματος (β) με το πάχος για δυο περιπτώσεις υμενίων (Ag, Mo) πάνω από πυρίτιο.

Στην Εικόνα 4.10(α) παριστάνεται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σε συνάρτηση με τον ατομικό αριθμό του υποστρώματος. Η συνεχής γραμμή παριστάνει πειραματικά δεδομένα (Dapor 1992). Προσομοιώσεις με  $N=10^5$  και  $10^4$  ηλεκτρόνια για ενέργεια 10KeV δείχνουν πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

Στην Εικόνα 4.10(β) παριστάνεται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σε συνάρτηση με το πάχος υμενίου Ag και Mo πάνω από πυρίτιο. Η συνεχής γραμμή παριστάνει πειραματικά δεδομένα (Dapor 1992) για ηλεκτρόνια ενέργειας 20KeV. Προσομοιώσεις με  $N=10^5$  και  $10^3$  ηλεκτρόνια για ενέργεια 10KeV δείχνουν επίσης πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.





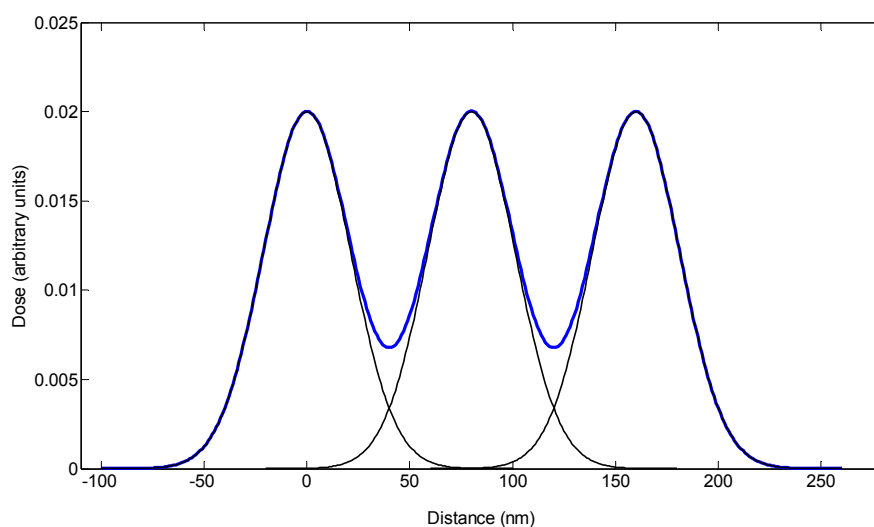
## 5 ΣΥΝΕΛΙΞΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΤΟ ΕΓΓΡΑΦΟΜΕΝΟ ΣΧΕΔΙΟ

### 5.1 Εισαγωγή

Η συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό κατά την εγγραφή με ηλεκτρονική δέσμη προκύπτει από την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης σημειακής δέσμης σε δύο βήματα: Τη συνέλιξη με την συνάρτηση κατανομής των ηλεκτρονίων της δέσμης και τη συνέλιξη με το εγγραφόμενο σχέδιο. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα αυτά και η μεθοδολογία των υπολογισμών.

### 5.2 Συνέλιξη με το προφίλ της δέσμης

Η πράξη της συνέλιξης αναπαριστά την συνεισφορά όλων των ηλεκτρονίων της δέσμης στην ενεργειακή εναπόθεση (Εικόνα 5.1). Από την Monte Carlo προσομοίωση (κεφάλαιο 1) έχει προκύψει η συνάρτηση PSF( $r$ ) που δίνει την εναποτιθέμενη ενέργεια από ένα μόνο ηλεκτρόνιο της δέσμης. Καθώς η δέσμη δεν είναι σημειακή, ένα πλήθος  $N$  ηλεκτρονίων προσπίπτουν στο υπόστρωμα με μια κατανομή  $I(r)$  γύρω από το σημείο εστίασης της δέσμης. Το αποτέλεσμα της συνέλιξης είναι η συνάρτηση TSF( $r$ ) που δίνει την ενεργειακή εναπόθεση από το συνολικό πλήθος των  $N$  ηλεκτρονίων.



Εικόνα 5.1 Ένα παράδειγμα συνέλιξης. Η περιβάλλουσα αναπαριστά το αποτέλεσμα τριών γειτονικών εκθέσεων

Για τον υπολογισμό της ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέσμη πρέπει να είναι γνωστή η συνάρτηση κατανομής της έντασης της δέσμης που παράγει το συγκεκριμένο σύστημα λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης. Αν και τα συνήθη εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην

Συνέλιξη σημειακής δέσμης με την πραγματική και το εγγραφόμενο σχέδιο

βιομηχανία έχουν προφίλ που ακολουθεί τη γκαουσιανή κατανομή, έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία συστήματα εγγραφής με δέσμες διαφορετικού προφίλ (Kotsugi, Fuse et al. 2008). Σε κάθε περίπτωση, γίνεται συνέλιξη της συνάρτησης  $I(r)$  του προφίλ της δέσμης με την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης  $PSF(r)$  από σημειακή δέσμη.

$$TSF(r) = I(r) \otimes PSF(r) \quad (5.1)$$

Όπου το σύμβολο  $\otimes$  παριστάνει τη μαθηματική πράξη της συνέλιξης δύο συναρτήσεων. Το δεδομένο εξόδο του τμήματος προγράμματος που υπολογίζει την  $PSF(r)$  είναι ένας πίνακας  $m \times n$ . Κάθε γραμμή του πίνακα δίνει την ενέργεια σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση σε βάθος  $z$  στρώματος πάχους  $dz$ . Κάθε κελί αντιστοιχεί σε ακτινική απόσταση μεταξύ  $r$  και  $r+dr$ . Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών σε Matlab, από την αναλυτική σχέση που δίνει το προφίλ της δέσμης παράγεται μονοδιάστατος πίνακας  $I(r)$  κάθε κελί του οποίου αντιστοιχεί στο ίδιο εύρος  $dr$ . Η συνέλιξη πραγματοποιείται σειριακά μεταξύ της  $I(r)$  και κάθε μιας γραμμής του πίνακα  $PSF(r)$ . Πρόκειται δηλαδή για συνέλιξη μονοδιάστατων πινάκων κατά το σχήμα:

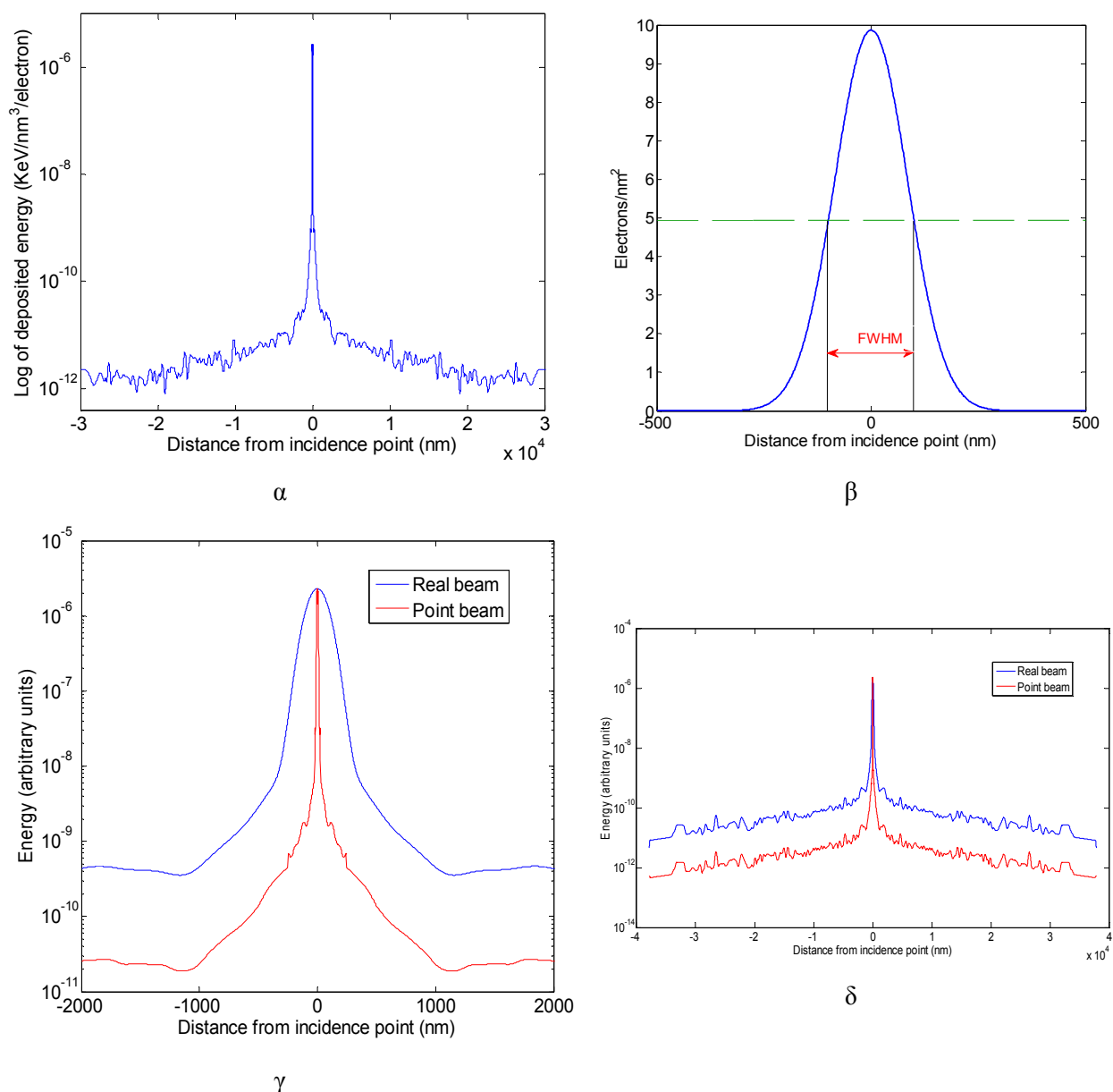
$$TSF(k) = \sum_j I(j) * PSF(k + 1 - j) \quad (5.2)$$

που δίνει το  $k$  στοιχείο του πίνακα  $TSF$ . Η άθροιση γίνεται για όλα τα  $j$  που αντιστοιχούν σε επιτρεπούς δείκτες πίνακα. Δηλαδή, αν  $M, N$  τα μήκη των πινάκων  $I(r)$  και  $PSF(r)$  αντίστοιχα, ο δείκτης  $j$  παίρνει τιμές από  $\max(1, k+1-N)$  έως  $\min(k, M)$ . Ο πίνακας  $TSF$  που προκύπτει έχει μήκος  $M+N-1$ . Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με τη χρήση της ενσωματωμένης συνάρτησης  $conv()$  του Matlab η οποία βασίζεται στο θεώρημα της συνέλιξης:

$$\mathcal{F}(f \otimes g) = \mathcal{F}(f) * \mathcal{F}(g) \quad (5.3)$$

όπου  $\mathcal{F}$  ο μετασχηματισμός Fourier.

Η παραπάνω προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε, του υπολογισμού δηλαδή της  $PSF$  ανά ηλεκτρόνιο από σημειακή δέσμη, δίνει μεγάλη ευελιξία στον αλγόριθμο υπολογισμού της ενέργειας από την πραγματική δέσμη. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι Monte Carlo υπολογισμοί είναι μια χρονοβόρα διαδικασία (της τάξης των δύο ωρών). Έχοντας ανεξάρτητα υπολογίσει και αποθηκεύσει την  $PSF$ , είναι εύκολο να υπολογιστεί η  $TSF$  για διαφορετικά προφίλ δέσμης σε μικρό χρόνο, αφού η διαδικασία της συνέλιξης πινάκων δεν απαιτεί παρά μόνο λίγα δευτερόλεπτα για τα συνήθη μεγέθη πινάκων.



Εικόνα 5.2 (α) Η συνάρτηση PSF της ενεργειακής εναπόθεσης από σημειακή δέσμη που προέκυψε από Monte Carlo υπολογισμούς (β) Η συνάρτηση  $I(r)$  κατανομής της έντασης της δέσμης ηλεκτρονίων (γ) και (δ) Η συνάρτηση TSF ενεργειακής εναπόθεσης από πραγματική δέσμη

Το παράδειγμα στην Εικόνα 5.2 δίνει παραστατικότερα τη διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης TSF. Στην εικόνα (α) φαίνεται η συνάρτηση PSF που προκύπτει από Monte Carlo υπολογισμούς και στην εικόνα (β) η συνάρτηση  $I(r)$  κατανομής της έντασης της δέσμης. Πρόκειται για γκαουσιανή δέσμη όπου το FWHM (Full Width Half Maximum) είναι δεδομένο εισόδου του αλγόριθμου. Οι εικόνες (γ) και (δ) δίνουν την παραγόμενη συνάρτηση TSF. Η εικόνα (γ) δίνει σε λεπτομέρεια την TSF γύρω από το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης.

### 5.2.1 Στατιστική αναπαράσταση της πραγματικής δέσμης

Η συνάρτηση  $I(r)$  του προφίλ της δέσμης δίνει την θεωρητική κατανομή της έντασης της δέσμης χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη στατιστική διακύμανση. Αν αυτό είναι ακριβές για μεγάλες δόσεις, σε

Συνέλιξη σημειακής δέσμης με την πραγματική και το εγγραφόμενο σχέδιο

μικρές δόσεις η στατιστική διακύμανση παίζει σημαντικό ρόλο στη διακύμανση της κρίσιμης διάστασης και στην τραχύτητα των σχηματιζόμενων δομών. Για την καλύτερη στατιστική προσέγγιση οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται ως εξής: Με δεδομένη τη δόση  $D$  στην οποία θα εκτεθεί το lithογραφικό υλικό, υπολογίζεται το πλήθος των ηλεκτρονίων σε μια έκθεση. Η δόση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας. Άρα:

$$N = \frac{D * S}{e} \quad (5.4)$$

όπου  $N$  το πλήθος των ηλεκτρονίων σε ένα βομβαρδισμό,  $D$  η δόση σε μονάδες φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας,  $S$  η επιφάνεια της δέσμης και  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η επιφάνεια της δέσμης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = FWHM^2 \quad (5.5)$$

όπου FWHM είναι το Full Width Half Maximum της δέσμης, το πλάτος δηλαδή της δέσμης στο μισό του μεγίστου της έντασης.

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων είναι η κατανομή της έντασης της δέσμης  $I(r)$ . Το FWHM αποτελεί δεδομένο εισόδου στον αλγόριθμο παραγωγής του στατιστικού προφίλ της δέσμης.

Από την κατανομή πιθανότητας  $I(r)$  παράγεται η αθροιστική κατανομή πιθανότητας σύμφωνα με τη σχέση:

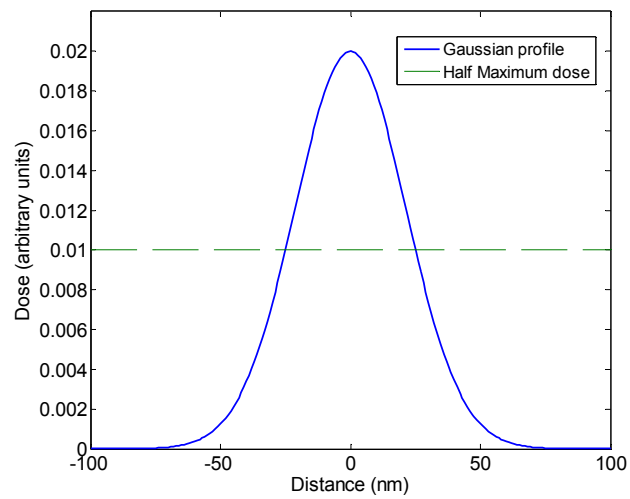
$$cdf(k) = \sum_{j=1}^k I(k) \quad (5.6)$$

Τα  $N$  ηλεκτρόνια που υπολογίστηκαν παραπάνω κατανέμονται σε μια επιφάνεια γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Για κάθε ένα ηλεκτρόνιο παράγονται οι συντεταγμένες του σημείου πρόσπτωσης ( $R_x, R_y$ ), σύμφωνα με την παραπάνω κατανομή. Οι τυχαίοι αυτοί αριθμοί προκύπτουν από τη σχέση:

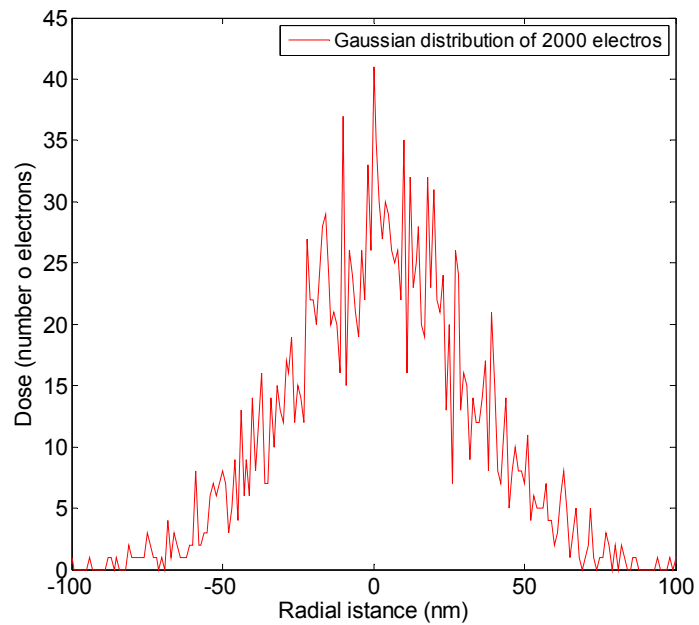
$$\begin{aligned} cdf(R_x) &= R_1 \\ cdf(R_y) &= R_2 \end{aligned} \quad (5.7)$$

όπου  $R_1$  και  $R_2$  τυχαίοι αριθμοί ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο διάστημα  $[0,1]$ . Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται η κατανομή των ηλεκτρονίων σε μια διάσταση για μια δέσμη γκαουσιανού προφίλ και στην Εικόνα 5.5 η ίδια κατανομή σε τρεις διαστάσεις.

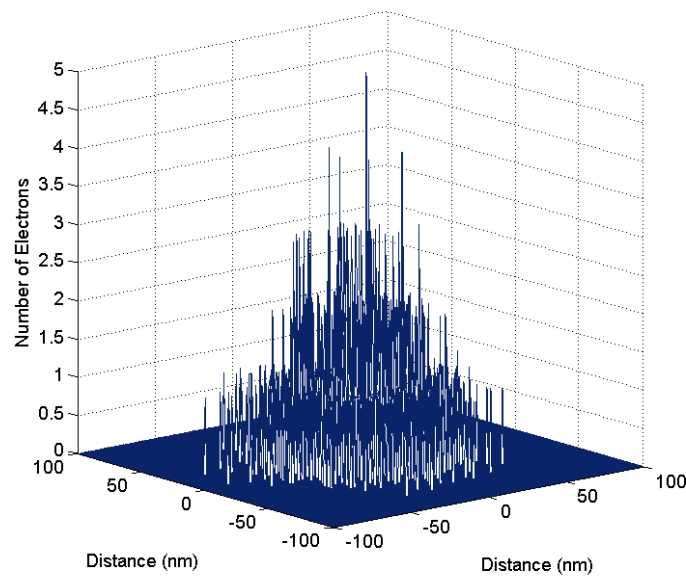
Συνέλιξη σημειακής δέσμης με την πραγματική και το εγγραφόμενο σχέδιο



Εικόνα 5.3 Γκαουσιανό προφίλ δέσμης με FWHM=50nm



Εικόνα 5.4 Γκαουσιανή κατανομή 2000 ηλεκτρονίων με FWHM=50nm ( $12.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) αναπαριστά το προφίλ της δέσμης ηλεκτρονίων



Εικόνα 5.5 Γκαουσιανή τρισδιάστατη κατανομή 2000 ηλεκτρονίων με FWHM=50 αναπαριστά το προφίλ της δέσμης ηλεκτρονίων

Με τη μέθοδο αυτή παράγεται ένας δισδιάστατος πίνακας  $m \times n$  που περιέχει την κατανομή των  $N$  προσπιπτόντων ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια παράγεται η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέσμη με συνέλιξη του πίνακα των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων  $I(r)$  με τη συνάρτηση PSF( $r$ ) αφού πρώτα αυτή μετατραπεί σε δισδιάστατο πίνακα.

### 5.2.2 Αξιολόγηση των δυο μεθόδων

Σύμφωνα με τη στατιστική μέθοδο, η συνέλιξη πραγματοποιείται με τη χρήση δισδιάστατων πινάκων. Οι απαιτήσεις σε όγκο μνήμης και υπολογιστικό χρόνο είναι πολύ μεγάλες. Μια τυπική τιμή της μνήμης που απαιτείται για ένα τέτοιο πίνακα είναι της τάξης των 300MB. Ο λόγος είναι ότι η κατανομή εναποτιθέμενης ενέργειας PSF( $r$ ) από σημειακή δέσμη ξεπερνάει σε ακτινική απόσταση τα 20 $\mu$ m. Αν χρησιμοποιηθούν πίνακες όπου κάθε κελί αντιστοιχεί σε 5nm, απαιτούνται πίνακες διαστάσεων 40000x40000 κελιών. Για πραγματικούς αριθμούς των 4 Bytes, προκύπτει ότι το μέγεθος μνήμης που καταλαμβάνει ένας τέτοιος πίνακας φτάνει τα 250MB και ο χρόνος υπολογισμού της συνέλιξης τέτοιων πινάκων αυξάνεται τόσο που κάνει τον αλγόριθμο δύσχρηστο. Και αυτό περιορίζοντας την ακρίβεια στα 5 nm. Η μέθοδος ενδείκνυται για μικρότερους πίνακες, όταν δηλαδή το εγγραφόμενο σχέδιο είναι μικρό όπου η συμμετοχή των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.. Τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μικρό μόνο μέρος της συνάρτησης PSF( $r$ ) που παριστάνει τη συνεισφορά των εμπροσθοσκεδαζόμενων κυρίως ηλεκτρονίων.

### 5.3 Συνέλιξη της ενεργειακής εναπόθεσης με το αρχικό σχέδιο

Για τον υπολογισμό της εναποτιθέμενης ενέργειας στο lithογραφικό υλικό τα δεδομένα εισόδου είναι το εγγραφόμενο σχήμα και η ενεργειακή εναπόθεση από πραγματική δέσμη. Τα δεδομένα του

Συνέλιξη σημειακής δέσμης με την πραγματική και το εγγραφόμενο σχέδιο

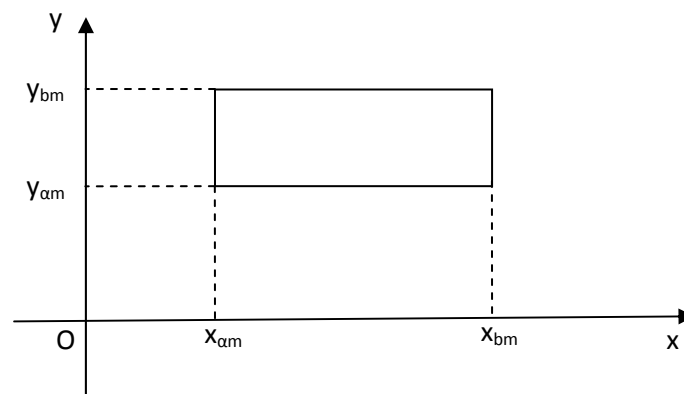
σχεδίου προέρχονται από το αρχείο CIF ή GDSII ενώ η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης της δέσμης του e-Beam προκύπτει από την προσομοίωση όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2.

Για την εισαγωγή των δεδομένων του σχεδίου που πρόκειται να εγγραφεί αναπτύχθηκε κώδικας σε Matlab ανάγνωσης αρχείων CIF και GDSII. Από την ανάγνωση ενός τέτοιου αρχείου προκύπτουν οι συντεταγμένες των περιεχόμενων γεωμετρικών σχημάτων:

$$bx = \begin{bmatrix} x_{a1} & x_{b1} \\ \vdots & \vdots \\ x_{am} & x_{bm} \end{bmatrix}$$

$$by = \begin{bmatrix} y_{a1} & y_{b1} \\ \vdots & \vdots \\ y_{am} & y_{bm} \end{bmatrix}$$

όπου οι πίνακες  $bx$ ,  $by$ , περιέχουν τις  $x$  και  $y$  συντεταγμένες των σημείων που περιγράφουν ορθογώνια παραλληλόγραμμα. Οι πίνακες  $bx$ ,  $by$  περιγράφουν  $m$  παραλληλόγραμμα, καθένα από τα οποία ορίζεται από τα σημεία  $x_{am}, x_{bm}$  όπως φαίνεται στην εικόνα Εικόνα 5.6



Εικόνα 5.6 Οι συντεταγμένες που περιγράφουν ένα παραλληλόγραμμα

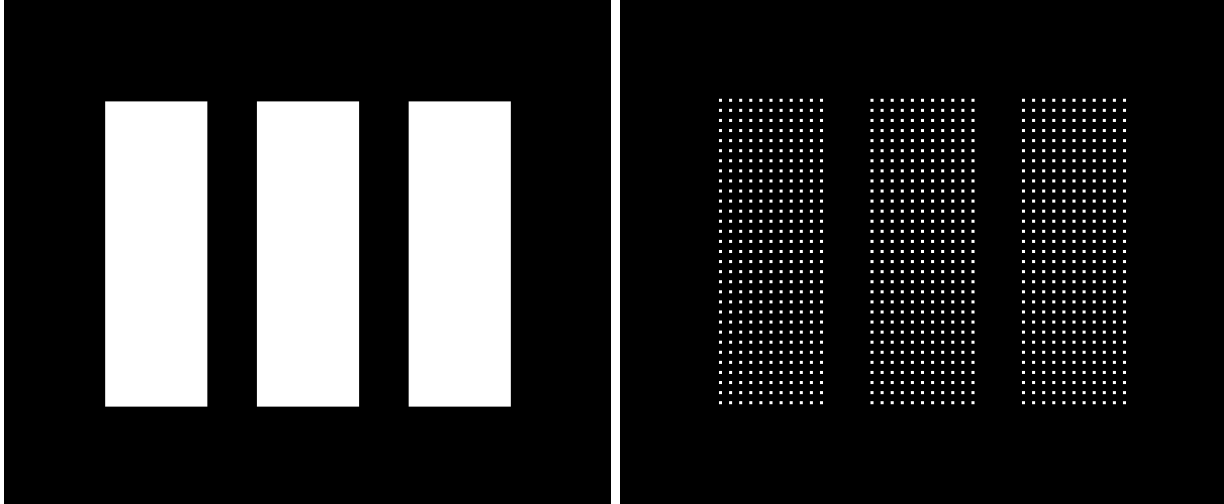
Επειδή στο αρχείο εισόδου περιέχονται συνήθως πολλά στρώματα (Layers) καθένα από τα οποία περιέχει ένα σύνολο σχημάτων, τα δεδομένα κατανέμονται σε ένα ισάριθμο πλήθος πινάκων δίνοντας στο χρήστη το δικαίωμα επιλογής του στρώματος που πρόκειται να προσομοιωθεί. Η συνέχεια της προσομοίωσης είναι η προσομοίωση της διαδικασίας εγγραφής με το e-Beam.

Για παράδειγμα, οι πίνακες:

$$bx = \begin{bmatrix} 0 & 100 \\ 150 & 250 \\ 300 & 400 \end{bmatrix}$$

$$by = \begin{bmatrix} 0 & 300 \\ 0 & 300 \\ 0 & 300 \end{bmatrix}$$

περιγράφουν τρία όμοια ορθογώνια παραλληλόγραμμα πλάτους 100nm το καθένα, ύψους 300nm. Το πλάτος του διάκενου είναι 50nm ή αλλιώς το pitch είναι 150nm. Η Εικόνα 5.7 δείχνει την εικόνα που δημιουργείται από τα παραλληλόγραμμα αυτά (πίνακας με λογικές τιμές 0 και 1). Μηδέν σε κάθε στοιχείο του πίνακα εκτός από την περιοχή που ορίζεται από τις συντεταγμένες  $b_x$ ,  $b_y$  όπου έχει την τιμή 1.



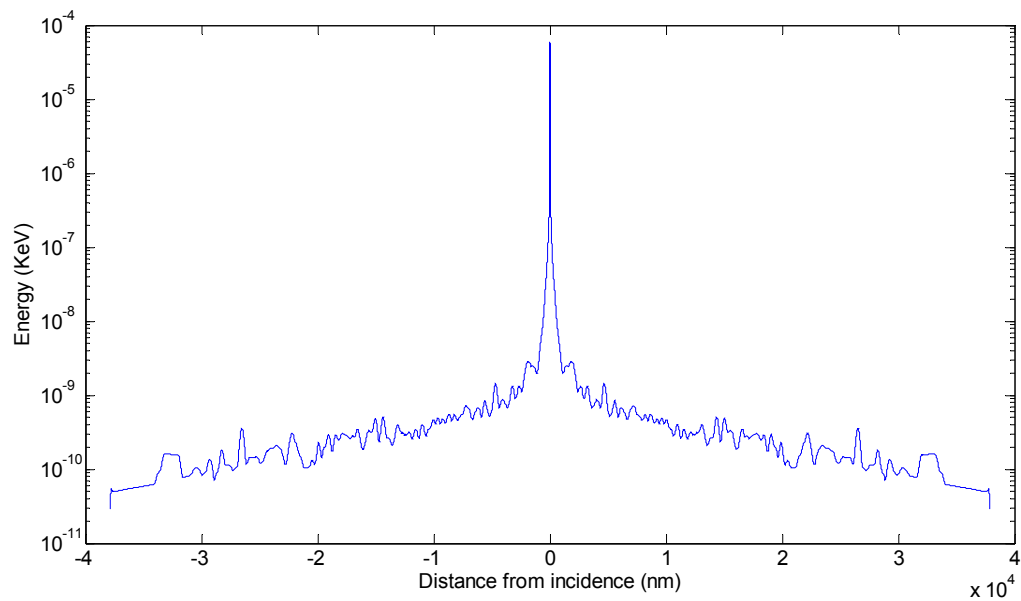
Εικόνα 5.7 Layout. Παραλληλόγραμμα 100x300nm με πλάτος διάκενου 50nm Εικόνα 5.8 Οι θέσεις έκθεσης με βήμα  $s=10\text{nm}$

Για την εγγραφή του σχεδίου, το e-Beam κινείται πάνω από το δείγμα με βήμα  $s$ . Σε κάθε βήμα εκθέτει το λιθογραφικό υλικό με δεδομένη δόση. Η Εικόνα 5.8 δείχνει τα σημεία έκθεσης τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $s=10\text{nm}$ . Τα σημεία αυτά αποτελούν τα σημεία πρόσπτωσης της δέσμης. Η εικόνα αυτή αποτελεί τη μαθηματική αναπαράσταση των δεδομένων εισόδου στον αλγόριθμο προσομοίωσης της εγγραφής. Πρόκειται για μια συνάρτηση  $G(x,y)$  με λογικές τιμές 1 για κάθε ζευγάρι συντεταγμένων  $x_i, y_i$  στο οποίο έχουμε πρόσπτωση της δέσμης και μηδέν αλλού. Από τη συνέλιξη του πίνακα  $G(x,y)$  με την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέσμη προκύπτει η συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό.

$$ED(x, y) = G(x, y) \otimes TSF(x, y) \quad (5.8)$$

Η Εικόνα 5.9 δείχνει ένα παράδειγμα συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης  $TSF(r)$  από πραγματική δέσμη. Έχει παραχθεί θεωρώντας e-Beam γκαουσιανού προφίλ με  $\text{FWHM}=200\text{nm}$ , ηλεκτρόνια ενέργειας 100KeV, λιθογραφικό υλικό PMMA 100nm, υπόστρωμα πολυστρωματικό 70 στρωμάτων Mo-Si πάχους 2,8 και 4,1 nm αντίστοιχα. Αν πρόκειται για μονοδιάστατο πίνακα που παράγεται θα πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε δισδιάστατο πίνακα για να πραγματοποιηθεί η συνέλιξη. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μεγάλο όγκο μνήμης και υπολογιστικό χρόνο.



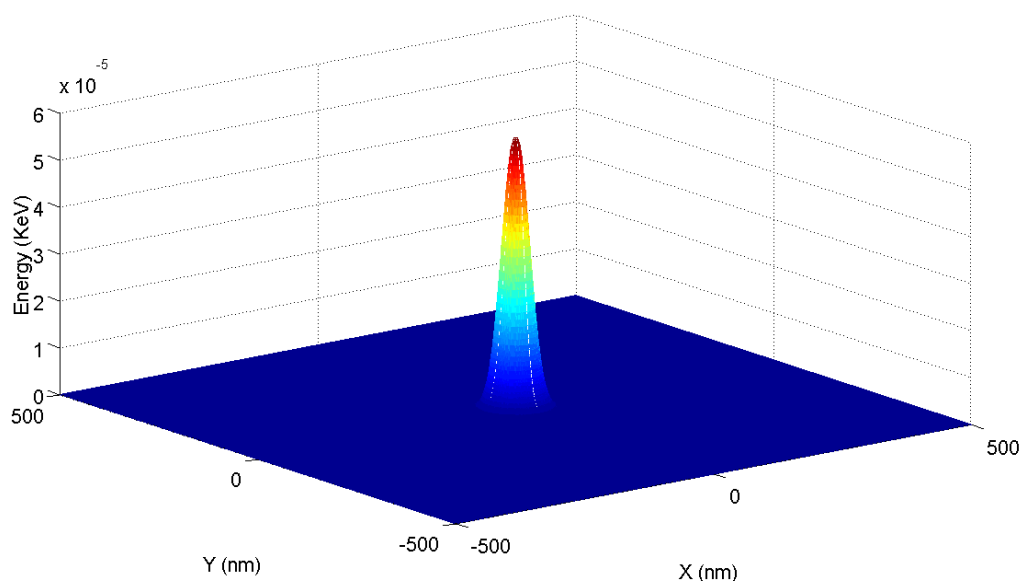


Εικόνα 5.9 Η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης από πραγματική δέσμη για ηλεκτρόνια των 100KeV γκαουσιανής δέσμης με FWHM=200nm προσπίπτουσα σε 100nm PMMA πάνω σε πολυστρωματικό υπόστρωμα Mo-Si 70 περιόδων πάχους 2,8nm και 4,1nm αντίστοιχα.

Μια απεικόνιση του διδιάστατου πίνακα φαίνεται στην Εικόνα 5.10. Έχει χρησιμοποιηθεί ένα μικρό μόνο μέρος της δέσμης (500nm ακτινική απόσταση).

Ένας απλός υπολογισμός δείχνει το μέγεθος μνήμης που απαιτείται για τέτοιους πίνακες. Αν η μέγιστη ακτινική απόσταση στην οποία εναποτίθεται ενέργεια είναι της τάξης των  $4 \cdot 10^4$  nm όπως το παράδειγμα στην Εικόνα 5.9, και σε κάθε κελί του πίνακα αντιστοιχεί 1nm, ο πίνακας που απαιτείται έχει διάσταση  $8 \cdot 10^4 \times 8 \cdot 10^4 = 64 \cdot 10^8$ . Αν χρησιμοποιήσουμε πραγματικούς των 4 Bytes το μέγεθος μνήμης που απαιτείται ανέρχεται στα 24 GB. Με τα σημερινά δεδομένα, ο χειρισμός τέτοιων πινάκων είναι αδύνατος.

Οι λύσεις που έχουμε για να μειώσουμε το μέγεθος της απαιτούμενης μνήμης είναι δύο. Η πρώτη είναι να αυξήσουμε το μέγεθος που αντιστοιχεί σε κάθε κελί του πίνακα (pixel size). Έτσι, αν σε κάθε κελί αντιστοιχούν 2nm, για την ίδια μέγιστη ακτινική απόσταση των  $4 \cdot 10^4$  nm απαιτείται πίνακας  $4 \cdot 10^4 \times 4 \cdot 10^4$ , και το μέγεθος μνήμης που απαιτείται πέφτει στα 6 GB. Η ελάττωση αυτή δεν γίνεται βέβαια χωρίς κόστος.



Εικόνα 5.10 Η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης της εικόνας Εικόνα 5.9 TSF(x,y). Δίνει την εναποτιθέμενη ενέργεια στο επίπεδο x,y γύρω από το σημείο πρόσπτωσης.

Το pixel size ορίζει την ελάχιστη ακρίβεια που μπορούμε να έχουμε. Όσο αυξάνουμε το pixel size, μειώνεται το μέγεθος μνήμης που απαιτείται για τους χρησιμοποιούμενους πίνακες μειώνοντας ταυτόχρονα και την ακρίβεια στους υπολογισμούς. Γενικεύοντας, το μέγεθος μνήμης που απαιτείται για την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης TSF(x,y) υπολογίζεται από τη σχέση:

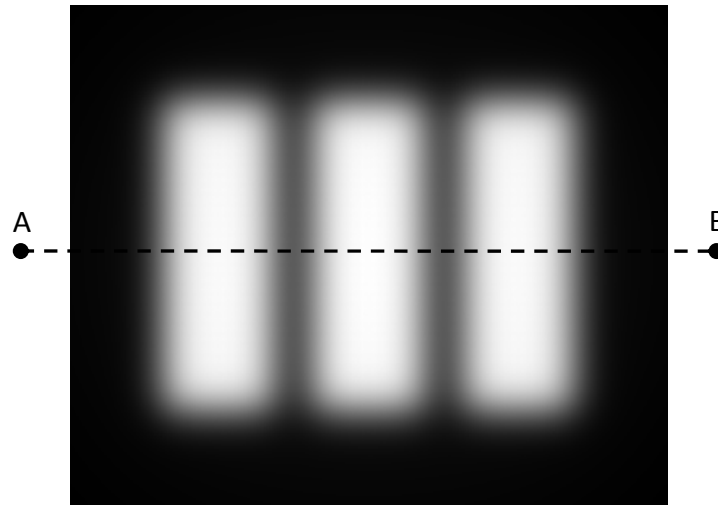
$$M = \left( \frac{2 * R_{max}}{PS} \right)^2 * N \quad (5.9)$$

Όπου  $R_{max}$  η μέγιστη ακτινική απόσταση στην οποία εναποτίθεται ενέργεια, PS είναι το pixel size, η απόσταση δηλαδή που αντιστοιχεί σε ένα κελί το πίνακα, και N είναι το πλήθος των Bytes που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των πραγματικών αριθμών που περιέχει ο πίνακας. Το N μπορεί να πάρει την τιμή 4 Bytes για πραγματικούς αριθμούς τύπου Single, και 8 Bytes για πραγματικούς τύπου Double.

Μια δεύτερη λύση στο πρόβλημα της εμφάνισης πολύ μεγάλων πινάκων είναι η χρήση μικρού μόνο τμήματος της TSF(r) θεωρώντας ότι από μια κρίσιμη απόσταση  $R_c$  και πάνω η εναποτιθέμενη ενέργεια είναι σχεδόν σταθερή. Έτσι η συνέλιξη που περιγράφεται από τη σχέση (5.8) μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός πολύ μικρότερου πίνακα TSF(x,y) που εκφράζει τη συνεισφορά των ομπροσθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων προθέτοντας ταυτόχρονα μια σταθερή τιμή που αντιστοιχεί στην ουρά της καμπύλης TSF(r) και εκφράζει τη συνεισφορά των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων.

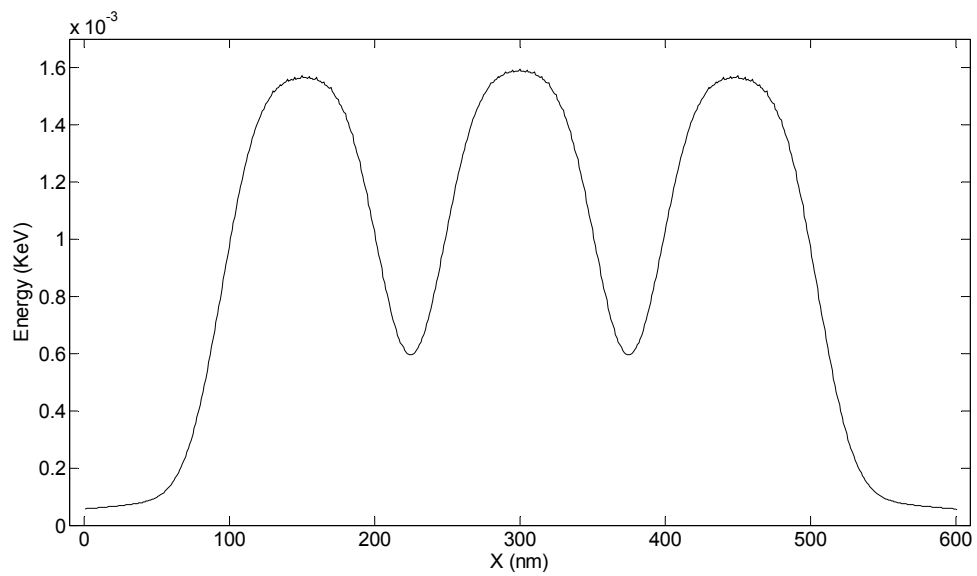
Στην Εικόνα 5.11 φαίνεται η συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος. Είναι το αποτέλεσμα της συνέλιξης της εξίσωσης (5.8) και δείχνει τη συνολική ενέργεια που έχει εναποτεθεί στο λιθογραφικό υλικό κατά την εγγραφή του σχεδίου που φαίνεται στην Εικόνα 5.7. Η συνολική ενέργεια στην Εικόνα 5.11 οποίο παριστάνεται σαν εικόνα grayscale όπου στο μαύρο αντιστοιχεί ενέργεια μηδέν και στο λευκό το μέγιστο της ενέργειας.

Συνέλιξη σημειακής δέσμης με την πραγματική και το εγγραφόμενο σχέδιο



Εικόνα 5.11 Η ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό

Η Εικόνα 5.12 δείχνει την μεταβολή της εναποτιθέμενης ενέργειας κατά μήκος της τομής AB.



Εικόνα 5.12 Η ενεργειακή εναπόθεση σε μια διατομή του λιθογραφικού υλικού

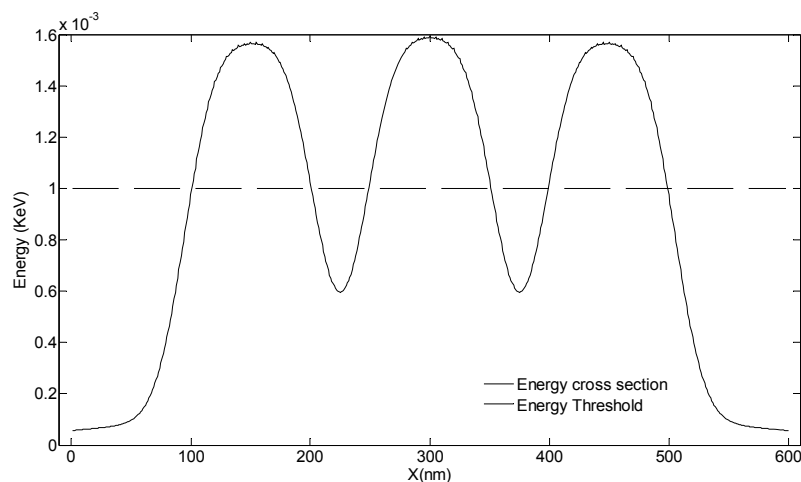
Συνέλιξη σημειακής δέσμης με την πραγματική και το εγγραφόμενο σχέδιο

## 6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ

Μετά την προσομοίωση της έκθεσης του λιθογραφικού υλικού όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 1, ακολουθεί η προσομοίωση της εμφάνισής του. Στην παρούσα διατριβή εφαρμόστηκε ένα απλό μοντέλο για την πρόβλεψη του αποτελέσματος μετά την εμφάνιση, η εφαρμογή μιας τιμής κατωφλίου για την ενέργεια. Η ακριβής προσομοίωση της εμφάνισης περιλαμβάνει τα στάδια της θέρμανσης του λιθογραφικού υλικού όπου λαμβάνει χώρα διάχυση του φωτοευαίσθητοποιητή στην περίπτωση των χημικώς ενισχυόμενων πολυμερών, της αποπροστασίας και της διάλυσης. Η αναλυτική προσομοίωση της διαδικασίας αποτέλεσε αντικείμενο διατριβής του Δ. Δρυγιαννάκη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ίδιου προγράμματος ΠΕΝΕΔ-2003. Συνοπτικά η μέθοδος προσομοίωσης περιγράφεται στην παράγραφο 6.2.

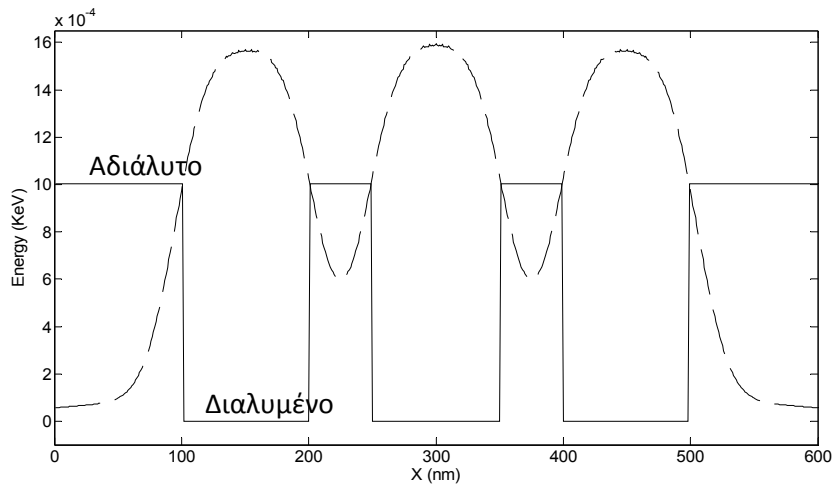
### 6.1 Μοντέλο εμφάνισης με τη χρήση τιμής κατωφλίου

Ένας απλός τρόπος να εκτιμήσουμε το αποτέλεσμα μετά την εμφάνιση του λιθογραφικού υλικού είναι να εφαρμόσουμε ένα απλουστευμένο μοντέλο εμφάνισης με τη χρήση μιας τιμής κατωφλίου για την ενέργεια. Στην Εικόνα 6.1 φαίνεται η εναποτιθέμενη ενέργεια στη ρητίνη κατά μήκος της διατομής AB (Εικόνα 5.11). Στις περιοχές όπου η ενέργεια που έχει εναποτεθεί είναι μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου, το λιθογραφικό υλικό σε εκείνη την περιοχή θα διαλυθεί (για θετικού τόνου υλικά) ενώ στις υπόλοιπες θα παραμείνει αδιάλυτο αποκτώντας έτσι την τελική του μορφή.



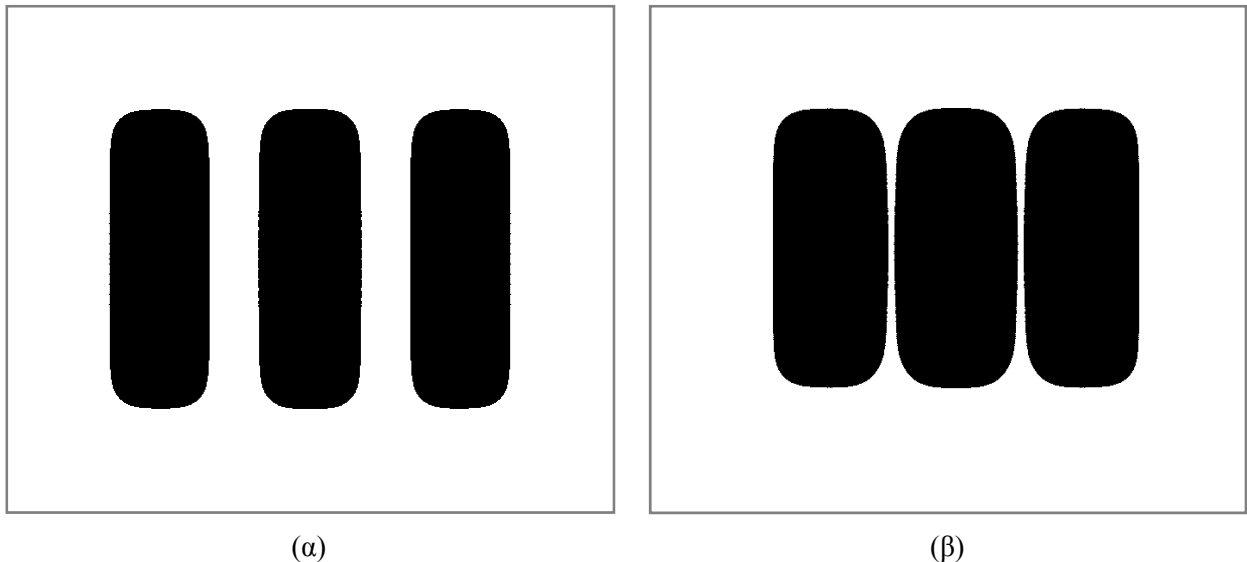
Εικόνα 6.1 Μια διατομή της εναποτιθέμενης ενέργειας. Η διακεκομμένη γραμμή είναι μια τιμή κατωφλίου ενέργειας. Η επιλογή της καθορίζει το πλάτος των εγγραφόμενων δομών.

Τα αποτελέσματα μετά την εμφάνιση του υλικού με τον τρόπο αυτό δίνονται στην Εικόνα 6.2. Η διακεκομμένη γραμμή δίνει την εναποτιθέμενη ενέργεια στο υλικό ενώ η συνεχής γραμμή δείχνει σε ποιές περιοχές το λιθογραφικό υλικό διαλύεται και σε ποιες όχι.



Εικόνα 6.2 Η διαμόρφωση του λιθογραφικού υλικού μετά την εμφάνιση

Προβλέπεται έτσι το αποτέλεσμα για μια ορισμένη τιμή της ενέργειας κατωφλίου. Επιπλέον, είναι δυνατό να απαντηθεί το αντίστροφο πρόβλημα, ποια δηλαδή είναι η βέλτιστη τιμή της ενέργειας κατωφλίου για το ζητούμενο αποτέλεσμα. Στο παραπάνω παράδειγμα, υπολογίστηκε η ενέργεια κατωφλίου ώστε το πλάτος γραμμής, στα μισά του μήκους της, να είναι ίσο με 100nm, όσο δηλαδή και το αρχικό σχέδιο το οποίο προσομοιάστηκε. Στην Εικόνα 6.3 φαίνεται σε κάτοψη η περιοχή προσομοίωσης. Πρόκειται για την Εικόνα 5.11 στην οποία έχει εφαρμοστεί ο αλγόριθμος εμφάνισης για δύο τιμές της ενέργειας κατωφλίου.



Εικόνα 6.3 Κάτοψη του λιθογραφικού υλικού μετά την εμφάνιση για δυο διαφορετικές τιμές της ενέργειας κατωφλίου

Στην εικόνα αυτή φαίνεται η εξέλιξη του πλάτους κατά μήκος κάθε γραμμής και η ανεπιθύμητη καμπύλωση των γωνιών. Ακριβείς μετρήσεις αποτελούν αντικείμενο του τμήματος μετρολογίας το οποίο θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.

## 6.2 Στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της θερμικής κατεργασίας και εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού

Ως στοχαστικό μοντέλο ορίζεται το μοντέλο το οποίο προβλέπει το αποτέλεσμα μιας διαδικασίας με τη χρήση τυχαίων αριθμών. Τα στάδια προσομοίωσης της διαδικασίας εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού είναι:

- Δημιουργία του υμενίου με κατάλληλο ελεύθερο όγκο. Τα αντίστοιχα στάδια της πειραματικής διαδικασίας είναι η επίστρωση της ρητίνης στο δισκίο και η θέρμανση πριν την έκθεση για την απομάκρυνση του διαλύτη.
- Προσομοίωση της αλλαγής διαλυτότητας με τη χρήση δεδομένων ενεργειακής εναπόθεσης. Γίνεται χρήση τυχαίων αριθμών για την πιθανότητα αποπροστασίας ή την πιθανότητα ενεργοποίησης ενός μορίου φωτοευαίσθητοποιητή.
- Διάχυση του οξέος, στην περίπτωση φωτοευαίσθητων υλικών χημικής ενίσχυσης. Το βήμα αυτό αντιστοιχεί στη θέρμανση μετά την έκθεση (Post Exposure Bake).
- Εμφάνιση των εκτεθειμένων περιοχών.

Το στοχαστικό μοντέλο της προσομοίωσης, βασίζεται σε ένα πλέγμα μέσα στο οποίο έχουν τοποθετηθεί μόρια του φωτοευαίσθητου υλικού. Η πλεγματική σταθερά (δηλαδή το μέγεθος μίας κυψελίδας του πλέγματος) είναι ανάλογο του μορίου του υλικού, και κυμαίνεται από 0.2 nm (στην περίπτωση μοριακών υλικών) έως 1 nm (στην περίπτωση μονομερών πολυμερών). Με τη χρήση του πλέγματος μοντελοποιούνται γραμμικές ή διακλαδισμένες αλυσίδες πολυμερών και μοριακά υλικά. Η ανάπτυξη των αλυσίδων μέσα στο πλέγμα γίνεται με τη χρήση τυχαίων περιπάτων. Χαρακτηριστικές παράμετροι για την τοποθέτηση των μορίων στο πλέγμα είναι το μέσο μήκος πολυμερισμού, το είδος και η διαμόρφωση των αλυσίδων και ο ελεύθερος όγκος. Ως ελεύθερος όγκος ενός πλέγματος ορίζεται το ποσοστό των κενών κυψελίδων του πλέγματος, μετά την τοποθέτηση όλων των αλυσίδων.

Η αλλαγή της διαλυτότητας στην περίπτωση των συμβατικών φωτοευαίσθητων υλικών, συμβαίνει κατά το στάδιο της έκθεσης, μετατρέποντας το αδιάλυτο φωτοευαίσθητο συστατικό σε διαλυτό. Αντίθετα, στις περιπτώσεις των υλικών χημικής ενίσχυσης, το μόριο του πολυμερούς είναι πλήρως ή μερικώς προστατευμένο, και η αλλαγή στη διαλυτότητα συμβαίνει λόγω καταλυτικής αντίδρασης των ομάδων προστασίας με ένα φωτοχημικά παραγόμενο οξύ. Για την προσομοίωση των χημικά ενισχυόμενων πολυμερών εισάγονται και άλλα μόρια, εκτός των μορίων της ρητίνης, στο ίδιο πλέγμα. Αυτά τα μόρια μπορεί να είναι στην περίπτωση των φωτοευαίσθητων υλικών χημικής ενίσχυσης, ο φωτοευαίσθητοποιητής (PAG) και ο αναστολέας του οξέος (Quencher). Για την στοχαστική προσομοίωση, αλλαγή διαλυτότητας σημαίνει «μαρκάρισμα» των κελιών που περιέχουν ομάδες προστασίας ως αποπροστατευμένα. Ο λόγος των αποπροστατευμένων κελιών προς το πλήθος των κελιών που περιέχουν ομάδες προστασίας χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των αλυσίδων από το πλέγμα.

Η «αποπροστασία» γίνεται κάνοντας χρήση των δεδομένων ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό. Όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους, το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της έκθεσης είναι ένας πίνακας ενέργειας που έχει εναποτεθεί στο λιθογραφικό υλικό, σε κάθε κυψελίδα δηλαδή του πλέγματος. Η τιμή της ενέργειας χρησιμοποιείται ως πάνω όριο της πιθανότητας αποπροστασίας του αντίστοιχου κελιού. Για τα συμβατικά υλικά, αν ένας τυχαίος

αριθμός είναι μικρότερος από αυτό το όριο, τότε το μονομερές που υπάρχει σε εκείνο το κελί θεωρείται αποπροστατευμένο. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$Deprotection(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } random < image(x,y) \\ 0, & \text{if } random \geq image(x,y) \end{cases} \quad (6.1)$$

όπου *random* είναι ένας τυχαίος αριθμός στην περιοχή [0, 1] και *image(x,y)* είναι η κανονικοποιημένη τιμή του πίνακα ενεργειακής εναπόθεσης στη θέση (x,y).

Στα υλικά χημικής ενίσχυσης, τα μόρια του φωτοευαισθητοποιητή ενεργοποιούνται μέσω της έκθεσης παράγοντας ένα ισχυρό οξύ. Ένας επιπλέον αλγόριθμος για τα υλικά αυτά προσομοιώνει τη διάχυση του οξέως στο υμένιο. Πρόκειται για το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα κατά τη θέρμανση μετά την έκθεση. Το οξύ αποπροστατεύει τα μονομερή με τα οποία έρχεται σε επαφή. Χαρακτηριστική παράμετρος είναι το μήκος διάχυσης του οξέως.

Οι τιμές του πίνακα ενεργειακής εναπόθεσης χρησιμοποιούνται ως ένα πάνω όριο για την πιθανότητα μετατροπής του PAG σε οξύ. Ο αλγόριθμος έχει τη μορφή:

$$Acid(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } random < image(x,y) \\ 0, & \text{if } random \geq image(x,y) \end{cases} \quad (6.2)$$

Το τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης περιλαμβάνει την εμφάνιση των εκτεθειμένων περιοχών του υμενίου. Μετά την προσομοίωση της έκθεσης και της θέρμανσης μετά την έκθεση, το πλέγμα περιέχει τριών ειδών κελιά: κενά, προστατευμένα και αποπροστατευμένα. Ως προστατευμένα θεωρούνται τόσο τα κελιά τα οποία περιέχουν χημικές ομάδες υπεύθυνες για την προστασία των μορίων, αλλά δεν αποπροστατεύθηκαν από τα μόρια του οξέως, όσο και κελιά τα οποία περιέχουν ουδέτερες χημικές ομάδες, ή ομάδες από τα υπόλοιπα μόρια που υπάρχουν στο πλέγμα (μόρια φωτοευαισθητοποιητή και αναστολέα). Ως κριτήριο απομάκρυνσης των πολυμερικών αλυσίδων από το πλέγμα χρησιμοποιείται το ποσοστό των αποπροστατευμένων μονομερών προς τα ολικά μονομερή της αλυσίδας. Το κατώτατο όριο αυτού του ποσοστού ονομάζεται *κρίσιμο ποσοστό ιονισμού* (critical ionization fraction, CIF), και αποτελεί μεταβλητή εισόδου στον αλγόριθμο εμφάνισης.



## 7 ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΙΚΟΝΕΣ SEM ΚΑΙ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ

### 7.1 Εισαγωγή

Αναζήτηση σχημάτων (Pattern matching) είναι η διαδικασία αναζήτησης ενός προτύπου σχήματος σε μια εικόνα. Η εικόνα ενδέχεται να είναι αποτέλεσμα προσομοίωσης ή του πειράματος. Στόχος της διαδικασίας ταυτοποίησης είναι να βρεθεί αυτόματα σε ένα πολύπλοκο σχέδιο ο σχηματισμός που ενδιαφέρει να συγκριθεί με το αρχικό σχέδιο και να μετρηθεί (Miura, Fujita et al. 2005). Το όφελος από αυτό το τμήμα αλγορίθμου είναι διπλό. Πρώτον, όφελος σε χρόνο αλλά και ευκολία πραγματοποίησης των μετρήσεων. Επειδή οι φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου περιέχουν πολλά και πολύπλοκα σχέδια, η αναζήτηση χωρίς μια αυτόματη μέθοδο είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Δεύτερον, παρέχεται μια γενική μέθοδος σύγκρισης των σχημάτων χωρίς να υπεισέρχεται το υποκειμενικό στοιχείο. Για να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε μια δομή που έχει φωτογραφηθεί με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, θα πρέπει να συγκριθούν οι πλευρές της με αυτές του αρχικού σχήματος του Layout. Η υπέρθεση των δύο αυτών σχημάτων, αν πρέπει να γίνει χειροκίνητα από το χρήστη, είναι δύσκολη και με έντονο το υποκειμενικό στοιχείο.

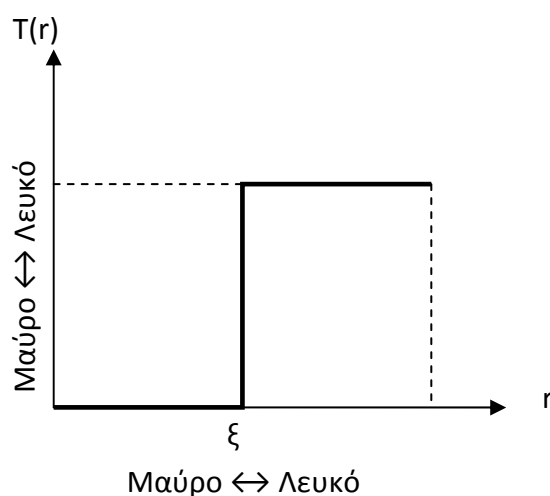
Οι πειραματικές εικόνες είναι grayscale εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM. Η επεξεργασία τους (Image processing) είναι απαραίτητη για την ταυτοποίηση σχημάτων και την άντληση οποιασδήποτε πληροφορίας από αυτές. Οι εικόνες αυτές εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία ως προς την αντίθεση (contrast) και το θόρυβο γι' αυτό και απαιτούν ειδικό χειρισμό από το χρήστη. Είναι εικόνες grayscale, κάθε pixel έχει τιμή από μηδέν έως μια μέγιστη τιμή ενδεικτική του επιπέδου του γκρι. Η τιμή μηδέν αντιστοιχεί στο μαύρο ενώ η μέγιστη τιμή στο λευκό. Μια εικόνα είναι με άλλα λόγια ένας πίνακας  $m \times n$ . Οι τιμές του πίνακα μπορεί να είναι κινητής υποδιαστολής αριθμοί ή ακέραιοι. Στην περίπτωση των πραγματικών, οι τιμές του είναι δεκαδικοί αριθμοί κυμαινόμενοι από μηδέν έως 1. Στην περίπτωση των ακεραίων, η μέγιστη τιμή τους εξαρτάται από το πλήθος των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράστασή τους. Έτσι, αν πρόκειται για ακεραίους των 8 bits, οι τιμές τους κυμαίνονται από 0 έως 255, επιτρέποντας  $2^8=256$  διαβαθμίσεις του γκρι.

### 7.2 Αλγόριθμος αναζήτησης σχήματος σε εικόνα SEM.

Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία των εικόνων SEM είναι η μετατροπή τους σε ασπρόμαυρες (binary) εικόνες στις οποίες κάθε pixel έχει τιμή 0 ή 1. Με τον τρόπο αυτό καθορίζονται τα όρια των γεωμετρικών σχηματισμών που έχουν δημιουργηθεί με τη λιθογραφία. Για τη μετατροπή μιας grayscale εικόνας  $g(x,y)$  σε εικόνα δυο επιπέδων (binary) εφαρμόζεται μια συνάρτηση καταωφλίου  $T(t)$  ώστε να παραχθεί η δυαδική εικόνα  $h(x,y)$ :

$$h(x, y) = T[g(x, y)]$$

όπου η συνάρτηση  $T(r)$  παριστάνεται στην Εικόνα 7.1



Εικόνα 7.1 Η συνάρτηση μετατροπής μιας εικόνας κλίμακας του γκρι σε ασπρόμαυρη δύο τιμών

Η τιμή  $\xi$  είναι η τιμή κατωφλίου. Πρόκειται για μια απεικόνιση του πίνακα  $A$  στον  $B$ . Αν ένα pixel έχει τιμή μικρότερη της τιμής κατωφλίου  $\xi$ , απεικονίζεται στην τιμή μηδέν και σε αντίθετη περίπτωση στην τιμή 1. Η τιμή κατωφλίου καθορίζεται από το χρήστη δειγματοληπτώντας τις περιοχές των γεωμετρικών σχηματισμών. Λόγω του μεγάλου θορύβου που έχουν οι εικόνες SEM, το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή της συνάρτησης  $T(r)$  είναι μια εικόνα με πολλές νησίδες λευκές στις μαύρες περιοχές και μαύρες νησίδες στις λευκές περιοχές. Για την απομάκρυνση τους εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος με τον οποίο αναγνωρίζονται όλα τα συνδεδεμένα pixel ως ανεξάρτητες περιοχές και μετρείται το εμβαδόν τους (Matlab function). Αν το εμβαδόν τους είναι μικρότερο από μια ορισμένη τιμή, η τιμή τους μηδενίζεται ώστε να αφαιρεθούν από την εικόνα. Με τον τρόπο αυτό αφαιρούνται οι λευκές νησίδες από τις μαύρες περιοχές. Για να αφαιρεθούν οι μαύρες νησίδες από τις λευκές περιοχές εφαρμόζεται ο ίδιος αλγόριθμος στην αρνητική εικόνα.

Το επόμενο βήμα είναι η ταυτοποίηση ενός πρότυπου σχήματος με έναν από τους γεωμετρικούς σχηματισμούς της εικόνας. Το πρότυπο σχήμα είναι μια μικρότερη σε μέγεθος ασπρόμαυρη εικόνα, τμήμα του αρχικού σχεδίου (Layout). Για την ταυτοποίηση χρησιμοποιείται η συνάρτηση συσχέτισης (cross correlation function). Η συνάρτηση συσχέτισης δυο διακριτών συναρτήσεων  $f(x, y)$ ,  $h(x, y)$  μεγέθους  $M \times N$  ορίζεται από τη σχέση (Gonzalez and Woods 2007)

$$f(x, y) \circ h(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^*(m, n) h(x + m, y + n) \quad (7.1)$$

όπου  $f^*$  είναι το μιγαδικό συζυγές της συνάρτησης  $f$ . Αφού οι εικόνες είναι λογικές συναρτήσεις (ασπρόμαυρες εικόνες), θα ισχύει:  $f^* = f$ . Ο απευθείας υπολογισμός της συνάρτησης συσχέτισης πραγματοποιείται, σε επίπεδο αλγορίθμου, με επαναληπτικό βρόχο, διαδικασία η οποία απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο. Ένας τέτοιος αλγόριθμος θα ήταν δύσχρηστος και αναποτελεσματικός. Μια προσέγγιση που μπορεί να εξοικονομήσει πολύτιμο χρόνο είναι η χρήση του θεωρήματος συσχέτισης, σύμφωνα με το οποίο:

$$f(x, y) \circ h(x, y) \Leftrightarrow F^*(u, v)H(u, v) \quad (7.2)$$

όπου  $F$  και  $H$  ο Fourier μετασχηματισμός των  $f, h$  αντίστοιχα. Σύμφωνα με το παραπάνω θεώρημα, η συνάρτηση συσχέτισης μπορεί να υπολογιστεί από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier του γινομένου  $F^*(u, v)H(u, v)$ , όπου  $F^*(u, v)$  το μιγαδικό συζυγές της  $F(u, v)$ . Για το μετασχηματισμό Fourier οι συναρτήσεις  $f, h$  θεωρούνται περιοδικές. Αν οι περίοδοι των συναρτήσεων δεν επιλεγούν κατάλληλα, θα εισαχθούν τιμές στους υπολογισμούς οι οποίες δεν θα υπήρχαν αν ο υπολογισμός γινόταν κατευθείαν, χωρίς τη χρήση της ανάλυσης Fourier. Για την αποφυγή αυτού του σφάλματος, θα πρέπει οι πίνακες που περιγράφουν τις συναρτήσεις  $f, h$  να συμπληρωθούν με μηδενικά. Έτσι, αν οι διαστάσεις των συναρτήσεων  $h, f$  είναι αρχικά  $A \times B$  και  $C \times D$  αντίστοιχα, θα δημιουργηθούν δυο όμοιοι πίνακες μετά την συμπλήρωση με μηδενικά διάστασης  $M \times N$ , όπου  $M=A+C$  και  $N=B+D$ . Η συνάρτηση συσχέτισης λαμβάνεται υπολογίζοντας τον μετασχηματισμό Fourier των συμπληρωμένων συναρτήσεων, πολλαπλασιάζοντας τους μετασχηματισμούς Fourier και τέλος παίρνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier του γινομένου.

Η συνάρτηση συσχέτισης έχει μέγιστη τιμή στη θέση όπου η πρότυπη εικόνα  $f$  είναι πάνω από εκείνο το τμήμα της εικόνας  $h$  με το οποίο ταυτίζεται καλύτερα. Για το λόγο αυτό αναζητείται η θέση του μεγίστου της συνάρτησης συσχέτισης. Οι συντεταγμένες  $m, n$  του μεγίστου εκφράζουν τις συντεταγμένες του πάνω αριστερού κελιού του πίνακα  $f$  σε σχέση με το πάνω αριστερό κελί του πίνακα  $h$ .

### 7.3 Τυπικά αποτελέσματα και σύγκριση με layout, simulation

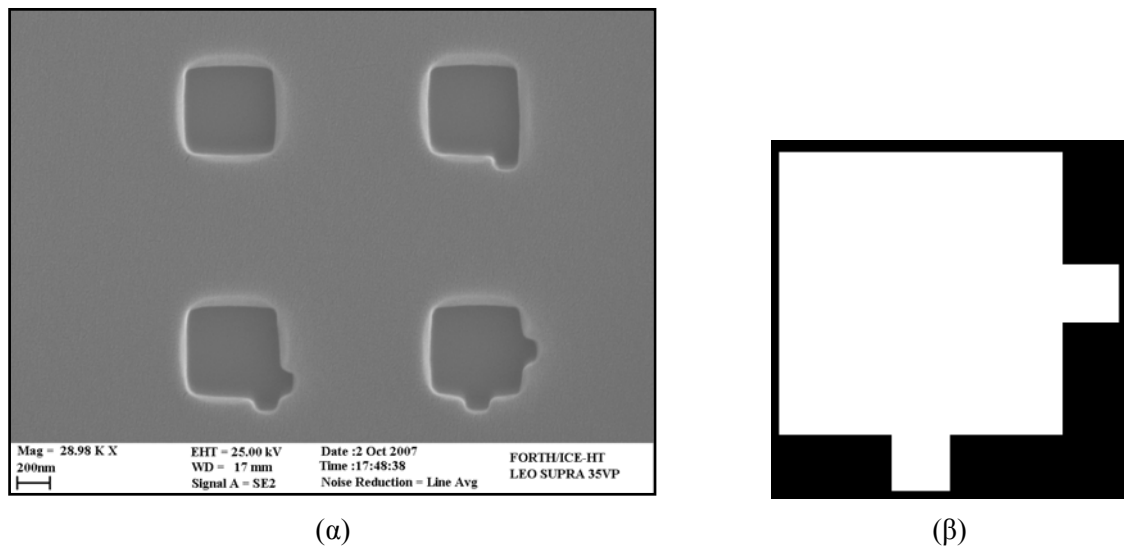
Ένα παράδειγμα του αλγορίθμου αναζήτησης δίνεται παρακάτω. Η Εικόνα 7.2(α) είναι μια εικόνα μικροσκοπίου SEM. Πρόκειται για μια εικόνα σε κλίμακα του γκρι (grayscale). Από την εικόνα αυτή επιλέγεται το τμήμα που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία.

Στην Εικόνα 7.2(β) φαίνεται τμήμα του αρχικού σχεδίου. Ζητείται να ταυτιστεί με έναν από τους γεωμετρικούς σχηματισμούς που περιέχονται στην Εικόνα 7.2(α).

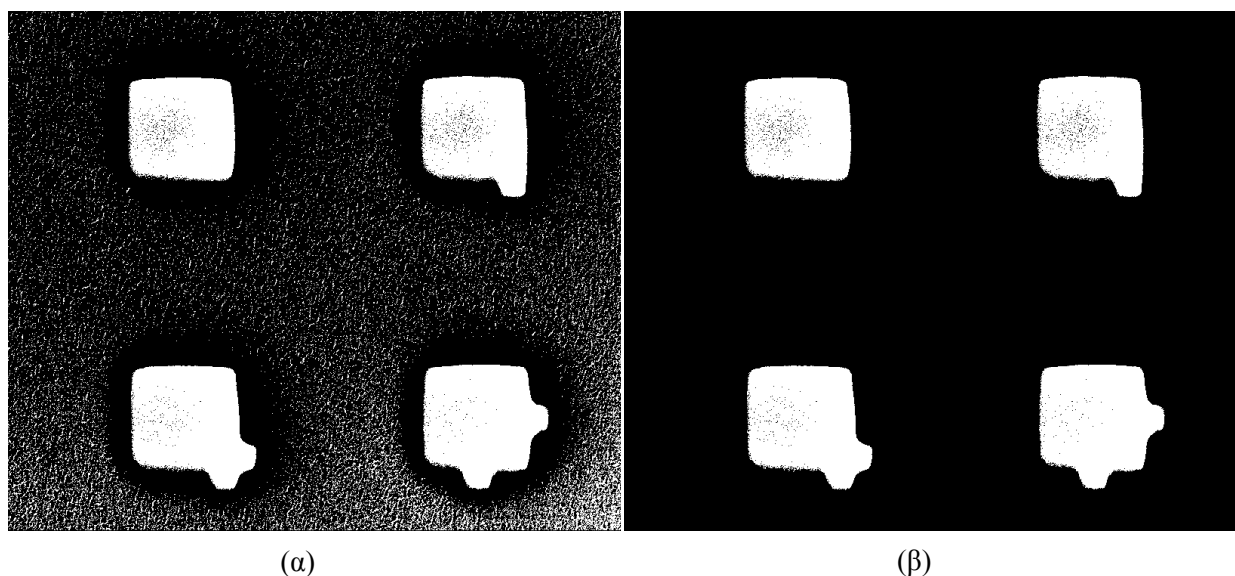
Η Εικόνα 7.2(α) μετατρέπεται από κλίμακα του γκρι σε ασπρόμαυρη δυαδική εικόνα εφαρμόζοντας μια τιμή κατωφλίου έντασης. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 7.3(α). Λόγω θορύβου απομένουν πολλές νησίδες οι οποίες πρέπει να απομακρυνθούν.

Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου απομάκρυνσης των νησίδων στην Εικόνα 7.3 προκύπτει η Εικόνα 7.3(β).

Οι νησίδες που απομένουν θα πρέπει να απομακρυνθούν. Πρόκειται για μαύρες νησίδες στις λευκές περιοχές. Για να μπορέσει να εφαρμοστεί ο ίδιος αλγόριθμος, η εικόνα μετατρέπεται στην αρνητική της, μετατρέποντας όλα τα 0 σε 1 και τα 1 σε 0. Η νέα εικόνα θα έχει και πάλι λευκές νησίδες στις περιοχές που είναι μαύρες. Μετά το βήμα αυτό προκύπτει η Εικόνα 7.4(α).



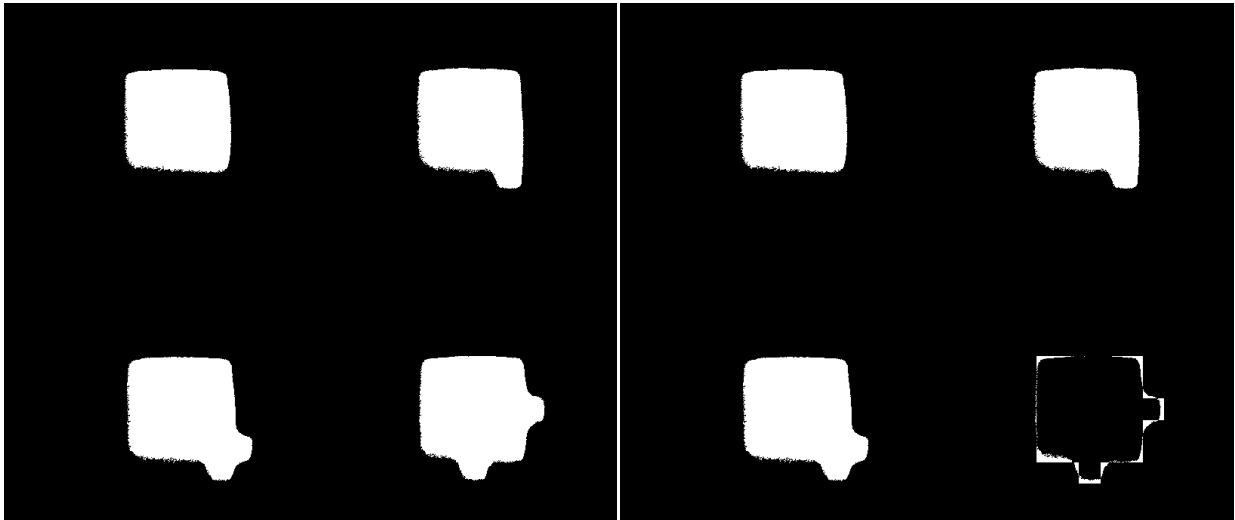
Εικόνα 7.2 (α) Φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (β) Τμήμα του αρχικού σχεδίου



Εικόνα 7.3 (α) Μετατροπή μιας εικόνας από κλίμακα του γκρι σε δυαδική (άσπρο –μαύρο) (β) Απομάκρυνση των λευκών νησίδων από τις μαύρες περιοχές

Με τη διαδικασία αυτή, από μια εικόνα κλίμακας του γκρι, έχουν απομονωθεί οι γεωμετρικές δομές που έχουν σχηματιστεί στο λιθογραφικό υλικό. Μπορούν έτσι να μετρηθούν οι δομές αυτές και να συγκριθούν με το αρχικό σχέδιο. Ζητώντας να γίνει σύγκριση του αρχικού σχεδίου (Εικόνα 7.2β) με το πειραματικό αποτέλεσμα (Εικόνα 7.4α) εφαρμόζεται ο αλγόριθμος ταυτοποίησης. Οι διαστάσεις της πειραματικής εικόνας στο παράδειγμα αυτό είναι 688x823 pixels και της εικόνας που περιέχει το πρότυπο σχήμα είναι 179x179 pixels. Η διάρκεια αναζήτησης για ένα επεξεργαστή Core2 Duo, 1.8 GHz με 32 GB μνήμη και 32bit operating system είναι 3.3 sec. Το όφελος σε χρόνο υπολογισμού με τη χρήση ανάλυσης Fourier είναι πολύ μεγάλο συγκρινόμενο με έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί σειριακή αναζήτηση με επαναληπτικές διαδικασίες όπου η διάρκεια υπολογισμών φτάνει στα 347 sec. Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου ταυτοποίησης φαίνεται στην Εικόνα 7.4(β). Για

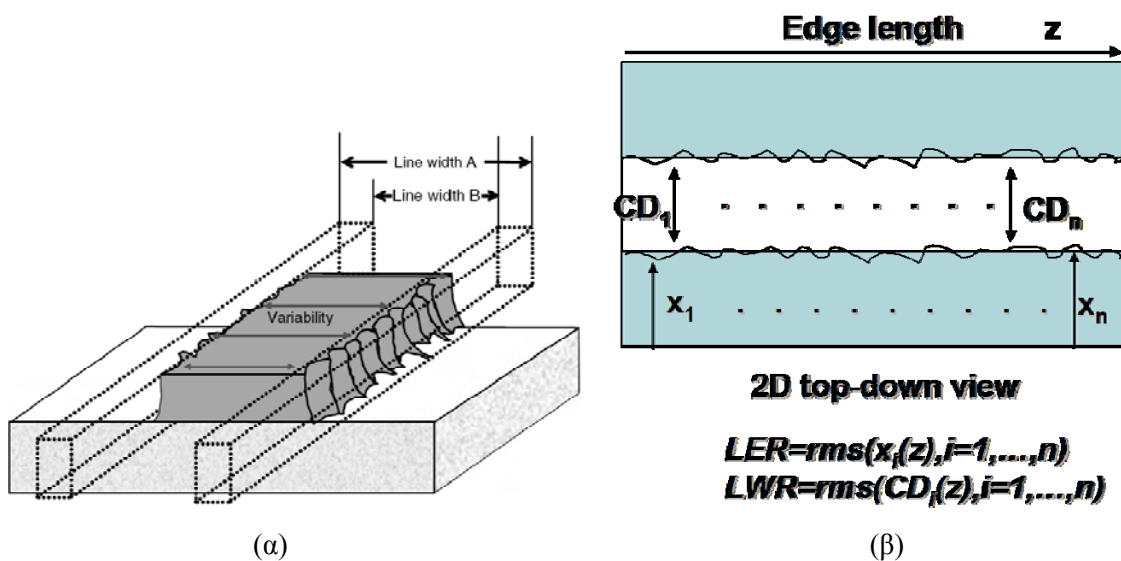
λόγους αναπαράστασης, έχει υπερτεθεί η εικόνα του πρότυπου σχήματος με την πειραματική εικόνα στη θέση όπου ο αλγόριθμος βρήκε την καλύτερη ταύτιση των σχημάτων.



Εικόνα 7.4 (α) Απομάκρυνση των μαύρων νησίδων από τις λευκές περιοχές (β) Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου αναζήτησης

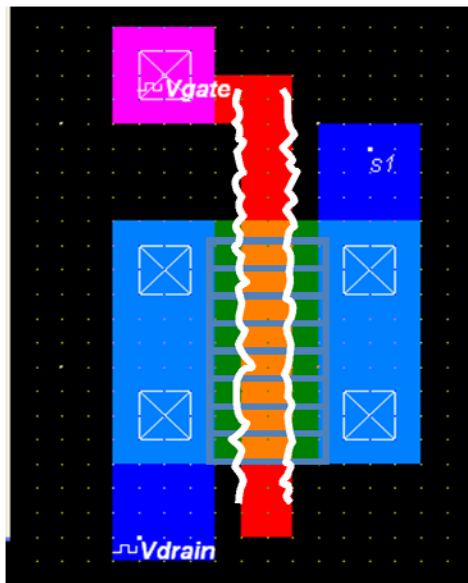
## 7.4 Τμήμα Μετρολογίας

Για τη μέτρηση του πλάτους μιας δομής θα πρέπει πρώτα να καθοριστεί ο τρόπος μέτρησής του αφού οι σχηματιζόμενες δομές δεν είναι πάντα ομοιόμορφες. Δεν έχουν ομοιόμορφο ύψος, οι πλευρές δεν είναι λείες και τα τοιχώματα δεν είναι κάθετα. Στην πραγματικότητα οι πλευρές των γραμμών δεν μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια.



Εικόνα 7.5 (α) Απεικόνιση της τραχύτητας (β) Ορισμός των LER, LWR, και CD σε μια δισδιάστατη εικόνα, κάτοψη του πολυμερούς

Η διακύμανση του πλάτους μιας δομής κατά το μήκος της ονομάζεται «διακύμανση πλάτους γραμμής» (LWR, Line width Roughness). Η «πλευρική τραχύτητα» (LER, Line Edge Roughness), αναφέρεται στη διακύμανση της γραμμής σε κατεύθυνση κάθετη σε σχέση με την μέση τιμή της ή μία γραμμική προσαρμογή της. Η τραχύτητα είναι στατιστικό φαινόμενο το οποίο μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στο μήκος καναλιού από τρανζίστορ σε τρανζίστορ οι οποίες μπορούν με τη σειρά τους να οδηγήσουν σε προβλήματα συγχρονισμού των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτές οι μεταβολές μπορούν να επηρεάσουν επίσης το ρεύμα διαρροής του τρανζίστορ (Diaz, Tao et al. 2001).



Εικόνα 7.6 Η διακύμανση πλάτους καναλιού επηρεάζει τη λειτουργία της συσκευής

Επειδή η πύλη πολυκρυσταλικού πυριτίου δρα ως μάσκα για την έγχυση προσμίξεων, η πλευρική τραχύτητα επηρεάζει την τελική κατανομή των προσμίξεων. Τραχύτητα μήκους κύματος μεγάλου σε σύγκριση με το μήκος διάχυσης επηρεάζει το συνολικό σχήμα του όγκου που έχει δεχθεί προσμίξεις. Τραχύτητα μικρότερου μήκους κύματος επηρεάζει την κατανομή των προσμίξεων. Μεταβολές στο CD από τρανζίστορ σε τρανζίστορ λογίζονται ως διακύμανση του CD, ενώ μεταβολές στο πλάτος για το ίδιο τρανζίστορ λογίζονται ως LWR (Suzuki and Smith 2007) (Εικόνα 7.6).

Στην Εικόνα 7.5(β) παριστάνεται ποιοτικά η διαδικασία μέτρησης της διακύμανσης πλάτους γραμμής (LWR) και πλευρικής τραχύτητας (LER).

Η πλευρική τραχύτητα ορίζεται ως το τριπλάσιο της δεύτερης ροπής της συνάρτησης κατανομής των σημείων της γραμμής. Αν  $\sigma$  η δεύτερη ροπή που δίνει την τυπική απόκλιση των σημείων της γραμμής από την μέση τιμή τους, προκύπτει η σχέση:

$$LER = 3\sigma = 3 * \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x_i \rangle)^2} \quad (7.3)$$

όπου  $y_i$  είναι η απόσταση του  $i$  σημείου της γραμμής από μία ευθεία αναφοράς,  $N$  ο συνολικός αριθμός των σημείων στα οποία είναι γνωστή η γραμμή και  $\langle \dots \rangle$  η μέση τιμή τους.

Ομοίως η διακύμανση πλάτους γραμμής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LWR = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (CD_i - \langle CD_i \rangle)^2} \quad (7.4)$$

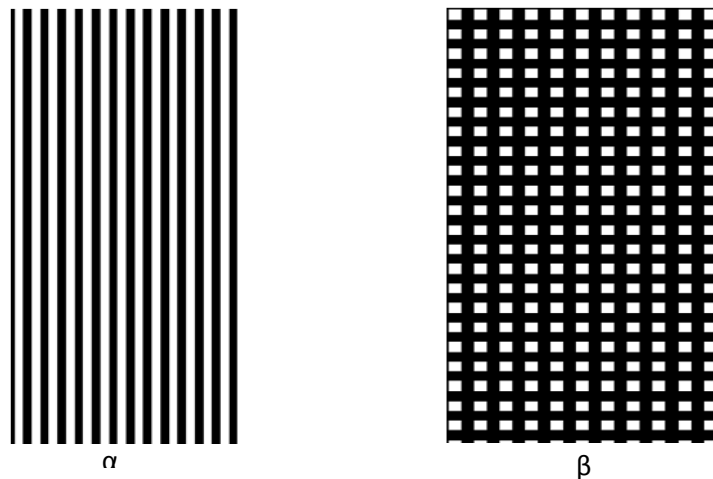




## 8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 8.1 Πειραματική επαλήθευση της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης που προκύπτει από την προσομοίωση.

Για την αξιολόγηση του αλγόριθμου υπολογισμού της ενεργειακής εναπόθεσης από πραγματική δέσμη, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων (Tsikrikas, Patsis et al. 2008(a)) ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα του με αυτά της προσομοίωσης για την περίπτωση μιας μάσκας για λιθογραφία EUV. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει κατασκευή του υποστρώματος, έκθεση με τη μέθοδο της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης και εμφάνιση. Η έκθεση επαναλήφθηκε για πολλές δόσεις ενώ οι συνθήκες εμφάνισης ήταν ίδιες για όλες τις δόσεις. Παράλληλα έγινε προσομοίωση της έκθεσης για τις ίδιες δόσεις. Στόχος αυτής της μελέτη είναι ο έλεγχος της ακρίβειας πρόβλεψης της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης που προκύπτει από την προσομοίωση.

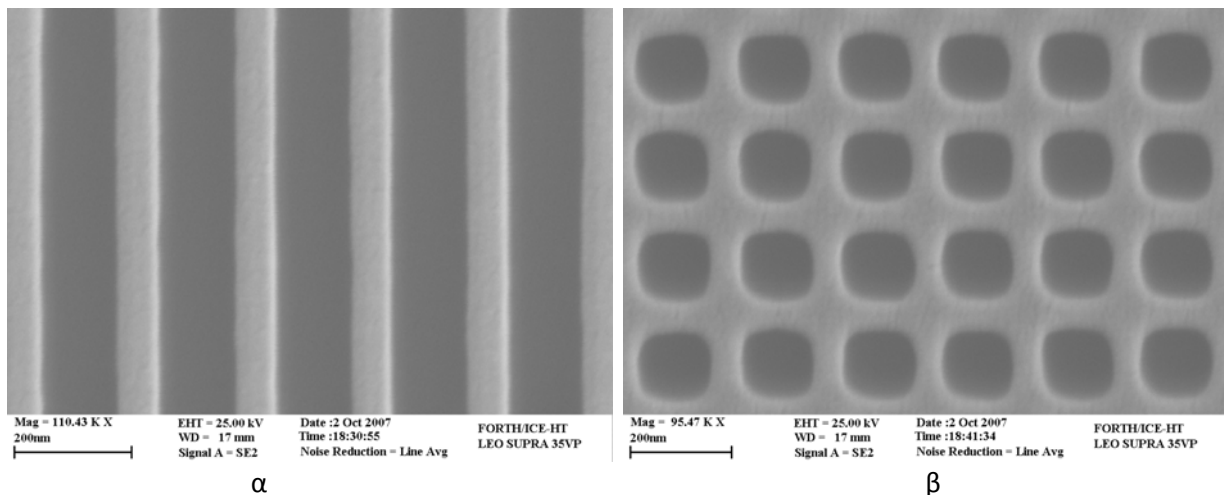


Εικόνα 8.1 Τα σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα και την προσομοίωση. (α) Γραμμές πλάτους 100 nm και pitch 100 nm. (β) τελείες 100x100 nm με pitch 100 nm.

Η δομή του υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε είναι μια τυπική δομή EUV μάσκας. Το λιθογραφικό υλικό (resist) είναι PMMA πάχους 100 nm. Το μοριακό βάρος του PMMA είναι  $600 \cdot 10^3$  (ARP 669.04) (διάλυμα 4% w/w σε γαλακτικό αιθυλεστέρα). Η επίστρωση έγινε στις 4000 rpm για 1 min. Η πολυστρωματική στοίβα είναι 40 περιόδων Mo/Si πάχους 2.8 και 4.1 nm αντίστοιχα πάνω από υπόστρωμα πυριτίου. Για την πραγματοποίηση του πειράματος, η εναπόθεση της πολυστρωματικής στοίβας Mo/Si έγινε με Ion Beam Sputtering (Quesnel, Hue et al. 2004). Πριν την έκθεση στην ηλεκτρονική δέσμη πραγματοποιήθηκε και θέρμανση του δείγματος σε θερμαινόμενη πλάκα στους 170 °C για 5 min. Η θέρμανση αυτή γίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης της PMMA ( $T_g = 105^\circ\text{C}$ ) για την απομάκρυνση του διαλύτη από το υμένιο της ρητίνης και την μείωση του ελεύθερου όγκου του υμενίου.

Τα σχήματα που εγγράφηκαν είναι γραμμές πλάτους 100 nm και περίοδο 200 nm και τετράγωνα διαστάσεων 100x100 nm και περίοδο (και στις δυο διαστάσεις) 200 nm. Το Layout αποτελείται από 100 γραμμές μήκους 50 μm η καθεμία και από ένα πίνακα 100x200 τετραγώνων κατανεμημένων σε μια περιοχή 20x40μm. Λόγω του μικρού πλάτους των σχημάτων (100 nm), η εγγραφή των τετραγώνων με τη δέσμη γίνεται με μία έκθεση για κάθε τετράγωνο (single shot) και αντίστοιχα κάθε γραμμή δημιουργείται από μια γραμμική διαδοχή εκθέσεων. Η έκθεση πραγματοποιήθηκε με δέσμη ηλεκτρονίων (σύστημα VISTEC EBPG 5HR) με τάση επιτάχυνσης 100 kV, ρεύμα 0.4 nA και δόσεις από 200 έως 1600 μC/cm<sup>2</sup> με βήμα 100 μC/cm<sup>2</sup>. Η δέσμη των ηλεκτρονίων είναι γκαουσιανή με τυπική απόκλιση 75 nm (FWHM= 177 nm). Οι εκθέσεις για όλες τις δόσεις πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο δείγμα, ώστε οι συνθήκες εμφάνισης να είναι ίδιες. Η εμφάνιση έγινε σε διάλυμα ισοπροπανόλης-απιονισμένου νερού 7:3 v/v για 1 min σε θερμοκρασία 22°C.

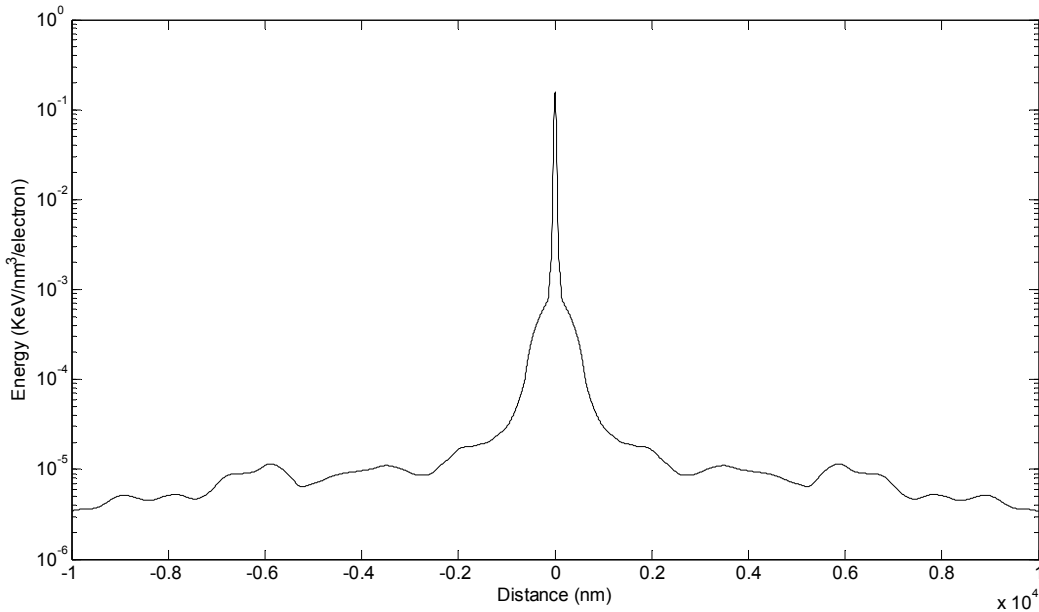
Μετά την εμφάνιση, τα δείγματα μελετήθηκαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) ώστε να μετρηθούν τα πλάτη των γραμμών και των τελειών για τις διάφορες δόσεις. Για να γίνει αυτό οι φωτογραφίες SEM κλίμακας του γκρι μετατράπηκαν σε ασπρόμαυρες δυαδικές όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.2. Στην Εικόνα 8.2 οι φωτογραφίες SEM δίνουν μια εικόνα του αποτελέσματος για μια από τις δόσεις εγγραφής.



Εικόνα 8.2 Εικόνες SEM με τυπικά αποτελέσματα του πειράματος μετά την εμφάνιση του λιθογραφικού υλικού για γραμμές (α) και τελείες (β).

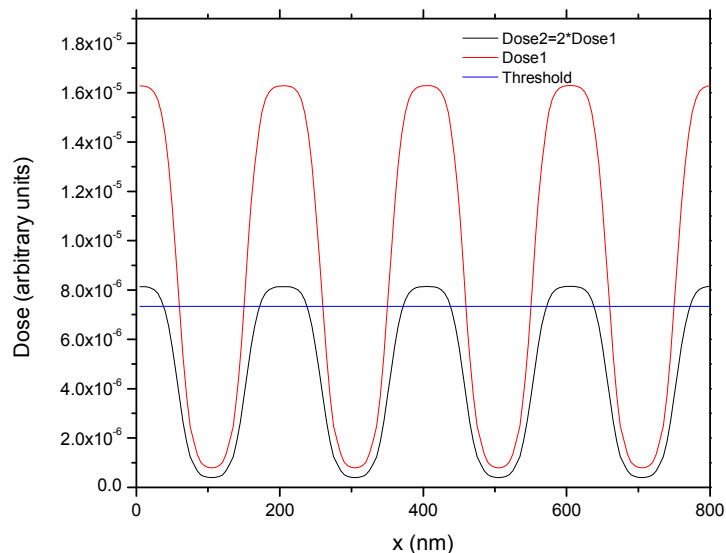
Χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα εισόδου με αυτά του πειράματος (δομή υποστρώματος, τάση επιτάχυνσης) έγινε προσομοίωση, υπολογίστηκε δηλαδή η ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό για τα ίδια σχέδια εγγραφής. Αρχικά υπολογίστηκε η ενεργειακή εναπόθεση από σημειακή δέσμη με τη μέθοδο Monte Carlo (Κεφ. 1), και στη συνέχεια έγινε συνέλιξη αυτής με το γκαουσιανό προφίλ της δέσμης από όπου προέκυψε η ενεργειακή εναπόθεση από την πραγματική δέσμη ηλεκτρονίων (Εικόνα 8.3).

## Αποτελέσματα



Εικόνα 8.3 Η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης γκαουσιανής δέσμης FWHM=176 nm δέσμης

Στο επόμενο βήμα υπολογίζεται η συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο PMMA με συνέλιξη της ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέσμη με το εγγραφόμενο σχέδιο. Επειδή η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης εκτείνεται σε μεγάλη ακτινική απόσταση, για την προσομοίωση ενός τμήματος του εγγραφόμενου σχεδίου πρέπει να ληφθούν υπόψη τα γειτονικά σχήματα (φαινόμενο γειτνίασης). Για το λόγο αυτό γίνεται συνέλιξη της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης με ένα τμήμα του σχεδίου μεγαλύτερο από αυτό που πρέπει να προσομοιωθεί (παράθυρο προσομοίωσης).

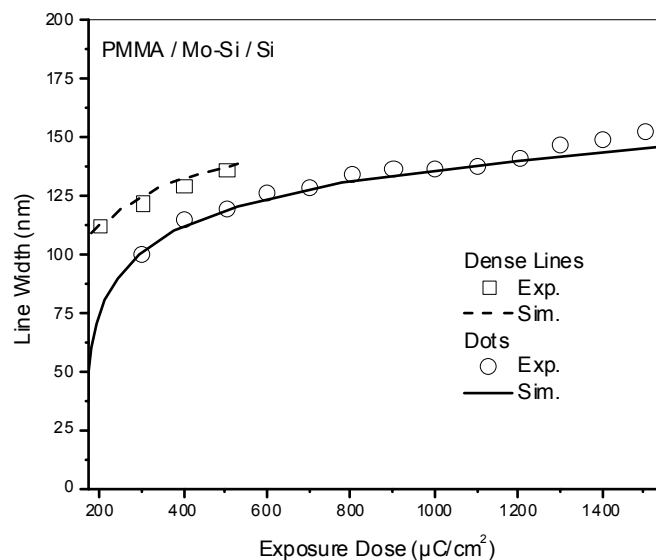


Εικόνα 8.4 Μια διατομή της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης για τις γραμμές σε δύο διαφορετικές δόσεις οι οποίες έχουν σχέση διπλασίου μεταξύ τους.

Η ενέργεια που υπολογίστηκε με τον τρόπο αυτό αντιστοιχεί στην εγγραφή με μια δόση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις υπόλοιπες δόσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Από την ενεργειακή εναπόθεση με την εφαρμογή μιας τιμής κατωφλίου προκύπτει το αποτέλεσμα μετά την εμφάνιση του λιθογραφικού υλικού. Μετρήθηκε έτσι το πλάτος των σχημάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση για τις διάφορες δόσεις.

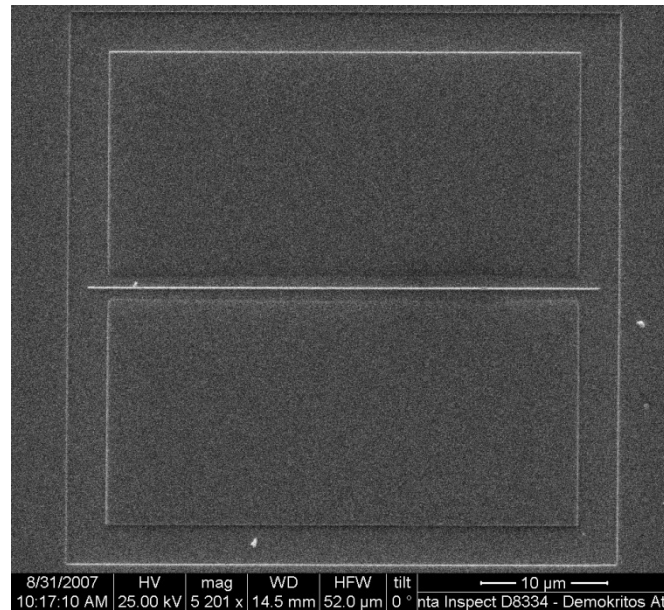
Στην Εικόνα 8.4 φαίνεται η διατομή της ενεργειακής εναπόθεσης για τις γραμμές, για δύο διαφορετικές δόσεις καθώς και μια τιμή δόσης κατωφλίου. Οι περιοχές του PMMA που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου θα διαλυθούν. Το μετρούμενο πλάτος σχήματος είναι το πλάτος της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης στο ύψος της τιμής κατωφλίου. Μετρώντας το πλάτος σε διάφορες δόσεις, μετράμε το πλάτος της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης στις αντίστοιχες δόσεις.

Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η απόλυτη τιμή της δόσης κατωφλίου, αλλά αν επιλεγεί μια τιμή κατωφλίου η οποία θα δίνει διαστάσεις ταυτόσημες με τα πειραματικά δεδομένα, θα πρέπει για την ίδια τιμή κατωφλίου να συμφωνούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πειραματικά για κάθε δόση. Η παραπάνω μέθοδος ελέγχου των αποτελεσμάτων μπορεί να εφαρμοστεί σε συμβατικά λιθογραφικά υλικά όπως το PMMA αλλά όχι σε υλικά χημικής ενίσχυσης όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα διάχυσης του οξέως. Στην περίπτωση των υλικών χημικής ενίσχυσης το φαινόμενο είναι μη γραμμικό, αφού αύξηση της δόσης έχει σαν αποτέλεσμα ενεργοποίηση περισσότερων μορίων φωτοευαισθητοποιητή και αύξηση της συγκέντρωσης του παραγόμενου οξέως.



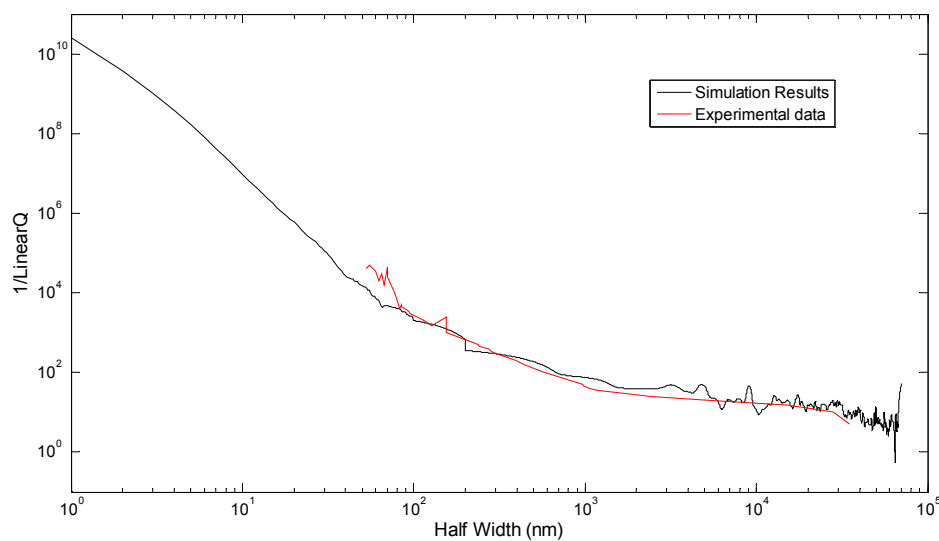
Εικόνα 8.5 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών της προσομοίωσης για τις γραμμές και τις τελείες πλάτους 100 nm.

Στην Εικόνα 8.5 φαίνεται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι σε πολύ καλή συμφωνία σε σύγκριση με αυτά της προσομοίωσης για τις δύο περιπτώσεις σχημάτων. Άρα η ενεργειακή εναπόθεση που προέκυψε από τη μέθοδο Monte Carlo είναι πολύ κοντά στην πραγματική. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, με τον τρόπο αυτό δεν πιστοποιούνται οι τιμές της ενεργειακής εναπόθεσης αφού από το πείραμα δεν γνωρίζουμε την ενέργεια κατωφλίου, αλλά μόνο η μορφή της καμπύλης. Επίσης, η προσομοίωση της εμφάνισης έγινε με το απλό μοντέλο κατωφλίου το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη του τις αλυσίδες του πολυμερούς και τη διαμόρφωσή τους. Τέτοια φαινόμενα όμως έχουν επίδραση μόνο στην τραχύτητα και τη στατιστική διακύμανση του πλάτους και δεν επηρεάζουν την συνάρτηση του μετρούμενου πλάτους με τη δόση εγγραφής.



Εικόνα 8.6 Εικόνα SEM μιας απομονωμένης γραμμής

Με τις ίδιες συνθήκες εγγράφηκαν απομονωμένες γραμμές (Εικόνα 8.6) με γραμμική σάρωση της δέσμης ηλεκτρονίων (Single Pixel Lines). Η εγγραφή έγινε και πάλι σε διαφορετικές δόσεις στο ίδιο δισκίδιο ώστε να είναι ίδιες οι συνθήκες εμφάνισης. Από τις φωτογραφίες που λήφθηκαν με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μετρήθηκε το πλάτος της γραμμής για κάθε δόση.



Εικόνα 8.7 Πειραματικά αποτελέσματα απομονωμένων γραμμών σε σύγκριση με τη ενεργειακή εναπόθεση που προκύπτει από την προσομοίωση

Η γραφική παράσταση στην Εικόνα 8.7 παριστάνει το αντίστροφο του γραμμικού εναποτιθέμενου φορτίου σε συνάρτηση με το μισό του πλάτους της γραμμής. Το γραμμικό φορτίο, το φορτίο ανά μονάδα μήκους με το οποίο γίνεται η έκθεση έχει προκύψει από τη σχέση:

$$I=Q/t \Rightarrow I=Q*f \Rightarrow Q=I/f$$

$$\text{LinearQ}=Q/l \Rightarrow \text{LinearQ}=Q/\text{beamstepsize} \Rightarrow \text{LinearQ}=Q/10\text{nm} \Rightarrow \text{LinearQ}=I/(f*10\text{nm})$$

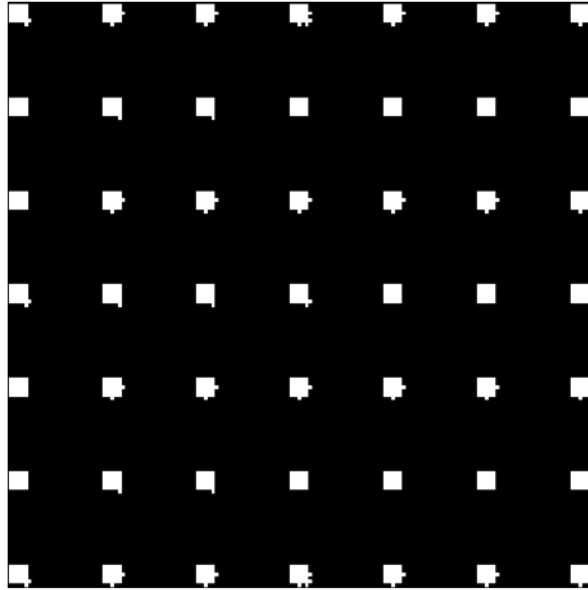
Στην Εικόνα 8.7 παρουσιάζεται σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα η ενεργειακή εναπόθεση όπως προέκυψε από την προσομοίωση. Παρατηρούμε ότι ο υπολογισμός της ενεργειακής εναπόθεσης σε μεγάλη ακτινική απόσταση είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

## 8.2 Μέτρηση τραχύτητας σε πειραματικά αποτελέσματα και σύγκρισή τους με αυτά της προσομοίωσης. Εφαρμογή του αλγορίθμου αναζήτησης σχήματος.

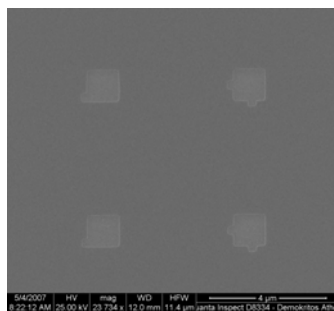
Για τη μέτρηση της πλευρικής τραχύτητας εγγράφηκαν τα σχήματα (Tsikrikas, Drygiannakis et al. 2007(b)) που φαίνονται στην Εικόνα 8.8. Πρόκειται για τετράγωνα πλευράς 1  $\mu\text{m}$  τα οποία φέρουν τετραγωνικές προεξοχές πλευράς 200 nm. Το pitch μεταξύ των σχημάτων είναι 10  $\mu\text{m}$ . Επιλέχθηκαν τα σχήματα αυτά ώστε να μετρηθεί η τραχύτητα των πλευρών σε μικρές διαστάσεις και να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τέτοια ακρίβεια. Οι προεξοχές των σχημάτων προστέθηκαν για να παρατηρηθεί το αποτέλεσμα του φαινομένου γειννίας στη μικρή προεξοχή από την εγγραφή του υπόλοιπου σχήματος (inter-proximity effect). Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα του ανοίγματος της δέσμης λόγω εμπροσθοσκεδάσης κατά κύριο λόγο των ηλεκτρονίων. Οι αποστάσεις των σχημάτων μεταξύ τους είναι στα 10  $\mu\text{m}$ , άρα και φαινόμενα γειννίας μεταξύ των σχημάτων (inter-proximity effects) λαμβάνουν χώρα, τα οποία οφείλονται στη συνεισφορά των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων.

Οι έκθεση πραγματοποιήθηκε με σύστημα λιθογραφίας Vistec EBPG 5 HR του CNR-IFN (Ιταλία) με τάση επιτάχυνσης 100kV. Το λιθογραφικό υλικό είναι PMMA πάχους 100 nm και το υπόστρωμα πολυστρωματική στοίβα Si/Mo 40 περιόδων με πάχη 2.8 και 4.1 nm αντίστοιχα. Στην Εικόνα 8.9(α) φαίνεται ένα τμήμα του αποτελέσματος της εγγραφής. Κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε 2 nm. Η εμφάνιση του πολυμερούς και η λήψη φωτογραφιών με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης έγινε στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής.

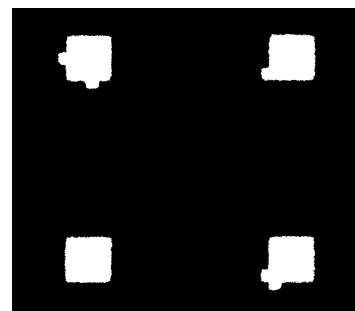
Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στις πειραματικές εικόνες, σε πρώτο στάδιο κάθε εικόνα SEM μετατρέπεται σε ασπρόμαυρη δυαδική εικόνα με την εφαρμογή κατάλληλης τιμής κατωφλίου και απάλειψη του θορύβου (κεφ. **Error! Reference source not found.**). Η επιλογή τιμής κατωφλίου για την μετατροπή της εικόνας είναι κρίσιμη για την ακριβή μέτρηση των διαστάσεων των σχημάτων και είναι τόσο ευκολότερη όσο μεγαλύτερη είναι η αντίθεση της εικόνας. Το αποτέλεσμα της μετατροπής φαίνεται στην Εικόνα 8.9(β). Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου αναζήτησης σχήματος ώστε να ταυτιστεί το πρότυπο σχήμα, τις πλευρές του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε, με ένα τμήμα της εικόνας SEM. Στην Εικόνα 8.9(γ) φαίνεται ένα τμήμα του αρχικού σχεδίου του οποίου αναζητείται η ταυτοποίηση με ένα τμήμα της πειραματικής εικόνας.



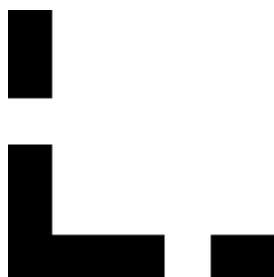
Εικόνα 8.8 Εικόνα του αρχικού σχεδίου



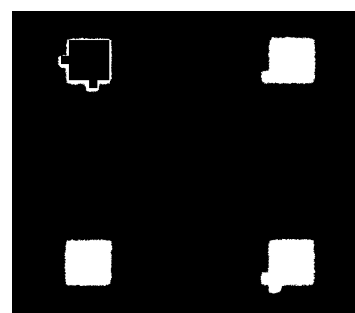
(α)



(β)



(γ)



(δ)

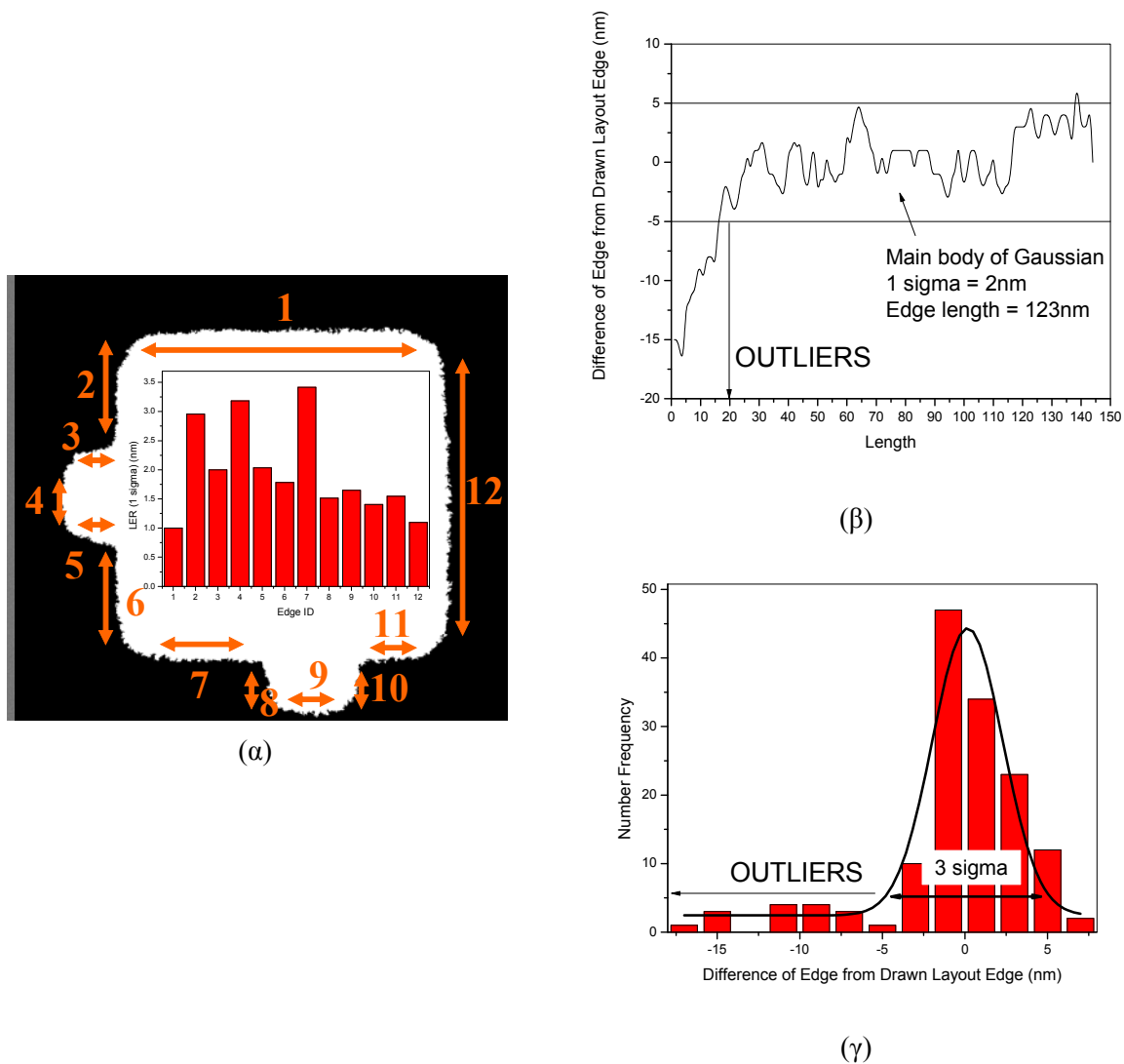
Εικόνα 8.9 (α) Εικόνα SEM (β) Μετατροπή της εικόνας SEM σε ασπρόμαυρη δυαδική (γ) Τμήμα του αρχικού σχεδίου (δ) Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου προσομοίωσης

Για την επίτευξη της ταυτοποίησης θα πρέπει οι κλίμακες των δύο εικόνων να συμπίπτουν. Ο αλγόριθμος ταυτοποίησης επιστρέφει τις συντεταγμένες της εικόνας του σχεδίου σε σχέση με την πειραματική. Με τις συντεταγμένες που προκύπτουν μπορούν να μετρηθούν οι αποστάσεις, σε πίκσελ, των πλευρών της πειραματικής εικόνας σε σχέση με την εικόνα του σχεδίου. Η ίδια διεργασία ακολουθείται για την ταυτοποίηση των εικόνων που προκύπτουν από την προσομοίωση. Ο

## Αποτελέσματα

απαιτούμενος χρόνος εξαρτάται από το μέγεθος των εικόνων και την πυκνότητα των περιεχόμενων σχημάτων. Για παράδειγμα, η Εικόνα 8.9(β) έχει διαστάσεις 977x848 pixels και η Εικόνα 8.9(γ) 134x134 pixels. Ο απαιτούμενος χρόνος αναζήτησης είναι περίπου 10 min σε ένα σύστημα Intel Pentium 4 3.2GHz με 1GB μνήμης RAM.

Για τη διευκόλυνση των μετρήσεων οι πλευρές απαριθμούνται ανθρωπολογικά από 1 έως 12 (Εικόνα 8.10). Στην Εικόνα 8.10(β) φαίνονται ως ενδεικτικό παράδειγμα οι αποστάσεις των πλευρών του πειραματικού αποτελέσματος από το αρχικό σχήμα σε εικονοστοιχεία για την πλευρά 3.

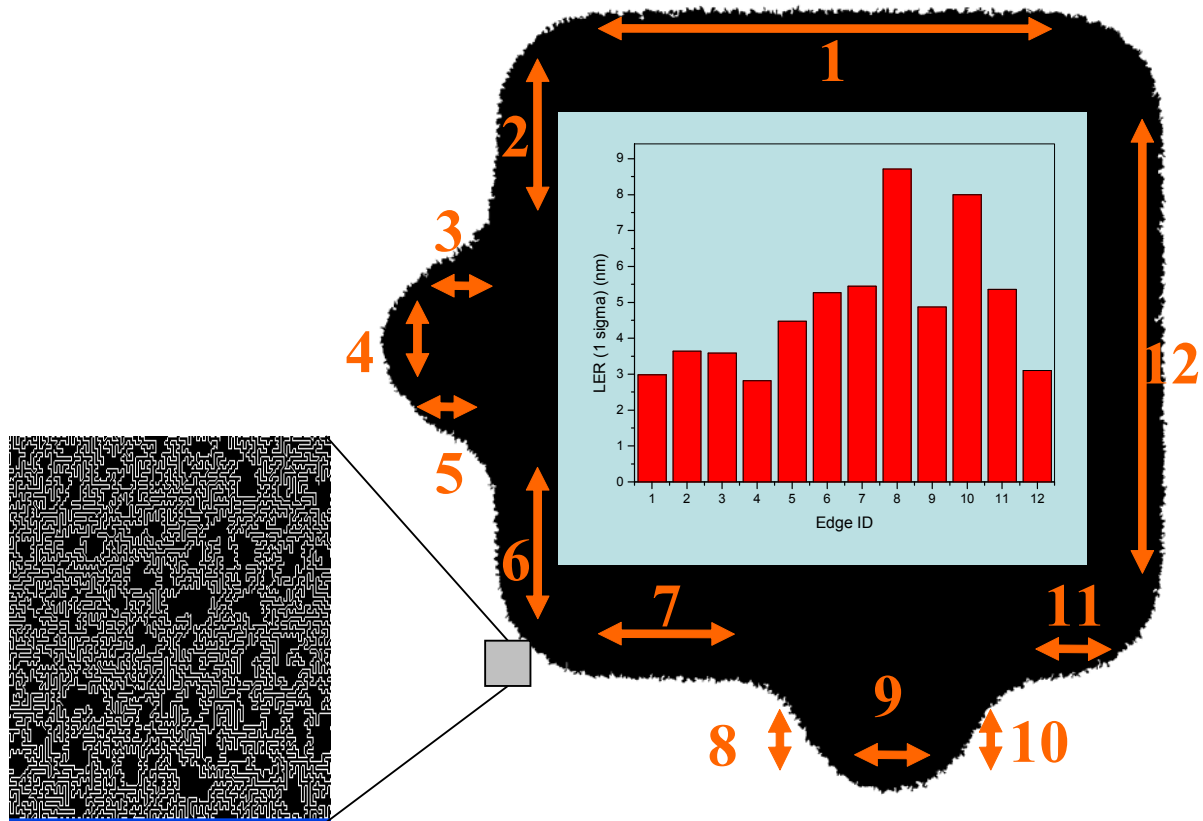


Εικόνα 8.10 Μετρολογία σε εικόνα SEM (α) Η αρίθμηση των πλευρών και η μέτρηση του LER κάθε πλευράς (β) Οι αποστάσεις των πλευράς 3 του πειραματικού σχήματος από το Layout (γ) Διαδικασία μέτρησης του 3σ κάθε πλευράς

Όπως προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα (Patsis, Constantoudis et al. 2003), (Constantoudis, Patsis et al. 2004) και επαληθεύεται από τις προσομοιώσεις, οι αποστάσεις αυτές υπακούουν σε γκαουσιανή κατανομή. Αυτό που μετράται κάθε φορά είναι το 3σ της κατανομής (Εικόνα 8.10(γ)). Τα αποτελέσματα από τη μέτρηση του LER φαίνονται στην Εικόνα 8.10(α) για κάθε μία από τις 12 πλευρές.

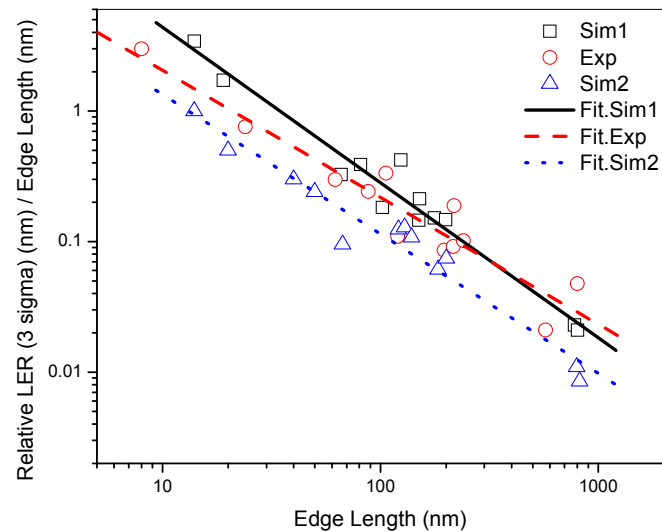


Η εγγραφή των ίδιων σχημάτων προσομοιώθηκε σύμφωνα με τις πειραματικές συνθήκες εγγραφής. Στην Εικόνα 8.11 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για ένα από τα σχήματα αυτά. Μετά τον υπολογισμό της ενεργειακής εναπόθεσης εφαρμόστηκε ο στοχαστικός αλγόριθμος διάλυσης. Μετά την προσομοίωση ενεργειακής εναπόθεσης ακολουθεί προσομοίωση της θέρμανσης μετά την έκθεση και της εμφάνισης.



Εικόνα 8.11 Μετρολογία στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης

Στην Εικόνα 8.11 φαίνονται επίσης οι μετρήσεις της πλευρικής τραχύτητας (LER) για τις 12 πλευρές του σχήματος αριθμημένες όπως περιγράφηκε παραπάνω. Στο μεγεθυμένο τμήμα φαίνεται η μοριακή δομή που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

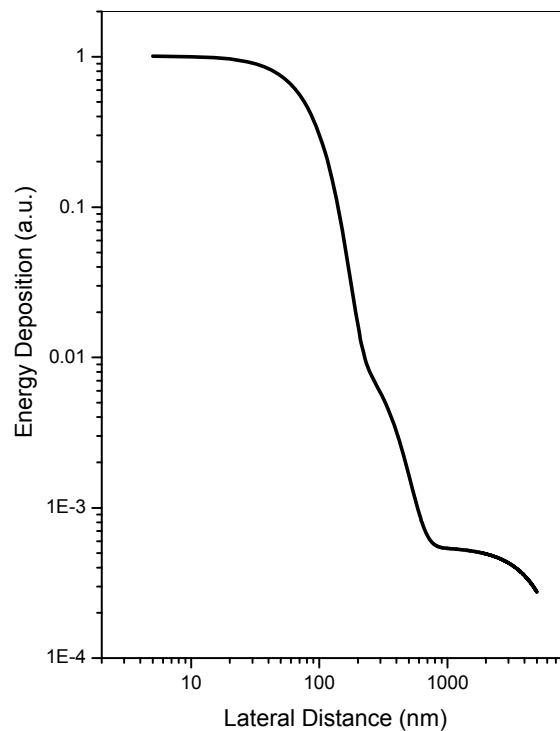


Εικόνα 8.12 Σχετικές τιμές του LER. Exp είναι τα πειραματικά αποτελέσματα, Sim1 και Sim2 αποτελέσματα προσομοιώσεων που αντιστοιχούν σε διαφορετικές συγκεντρώσεις PAG.

Στην Εικόνα 8.12 παριστάνονται οι σχετικές τιμές του LER (LER ανά μονάδα μήκους της πλευράς) όπως μετρήθηκαν παραπάνω για τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Οι δύο σειρές αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αντιστοιχούν σε δύο συγκεντρώσεις φωτοευαισθητοποιητή (PAG). Για το Sim2 χρησιμοποιήθηκε μικρότερη συγκέντρωση PAG, άρα μικρότερο deprotection fraction (0.8 στο Sim2 αντί του 0.9 για το Sim1). Προκύπτουν έτσι δύο σειρές αποτελεσμάτων μικρότερες και μεγαλύτερες από τις πειραματικές τιμές. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να εκτιμηθεί η συγκέντρωση του φωτοευαισθητοποιητή.

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια ακόμη φορά την εξάρτηση της πλευρικής τραχύτητας από το μήκος τα πλευράς. Στα μικρά μήκη πλευρών η τραχύτητα θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση. Απομένει ακόμη να κατανοηθεί η επίδρασή της στη λειτουργία της συσκευής για τις πολύ μικρές διαστάσεις αλλά και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να ελεγχθεί και να μειωθεί.

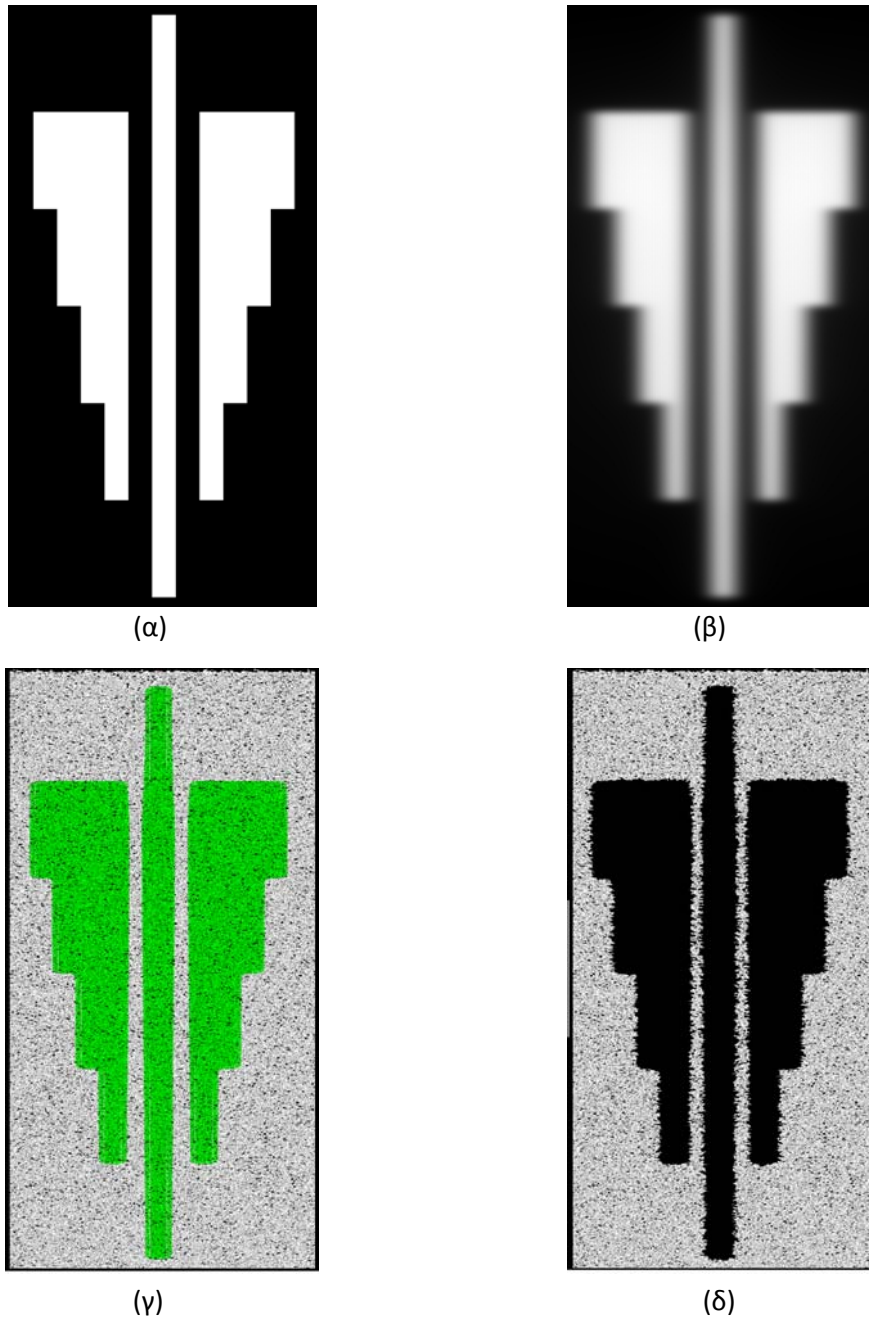
Ένα ακόμη παράδειγμα προσομοίωσης της εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων, εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού και μέτρησης της τραχύτητας δίνεται παρακάτω (Tsirikas, Drygiannakis et al. 2007(a)). Έγινε προσαρμογή του αποτελέσματος της προσομοίωσης σημειακής δέσμης (PSF) με δύο γκαουσιανές καμπύλες. Η καμπύλη είναι ομαλή αφού λόγω προσαρμογής έχουν αφαιρεθεί οι στατιστικές διακυμάνσεις. Θεωρώντας γκαουσιανή δέσμη, η συνάρτηση εναποτιθέμενης ενέργειας από τη δέσμη ηλεκτρονίων προκύπτει από τη συνέλιξη μιας γκαουσιανής με την PSF(r). Στην Εικόνα 8.13 παριστάνεται η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης από δέσμη των 50 KeV σε ένα στρώμα πάχους 10 nm του λιθογραφικού υλικού το οποίο είναι σε επαφή με το υπόστρωμα.



Εικόνα 8.13 Συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης από δέσμη 50 KeV σε ένα στρώμα πάχους 10 nm του λιθογραφικού υλικού το οποίο είναι σε επαφή με το υπόστρωμα όπως προκύπτει από Monte Carlo υπολογισμούς και προσαρμογή με δυο γκαουσιανές

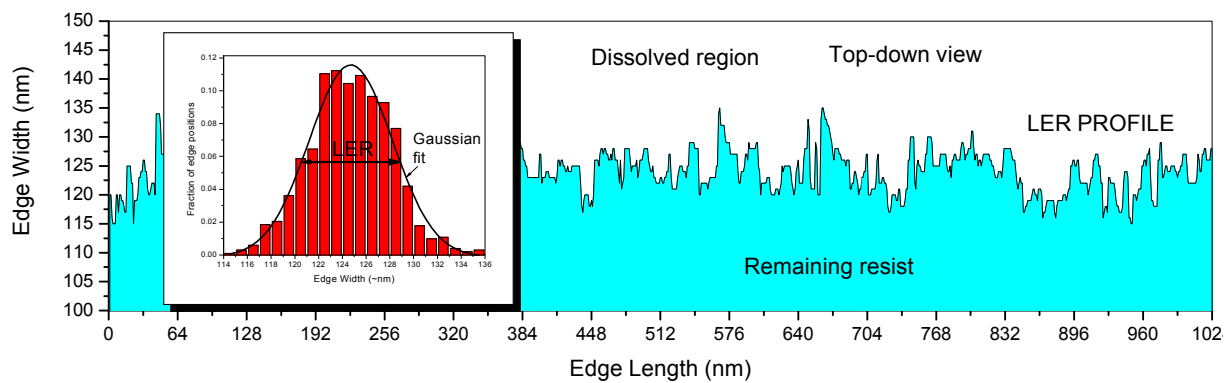
Από τη συνέλιξη της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης με το εγγραφόμενο σχέδιο προκύπτει η ενέργεια που έχει εναποτεθεί στο λιθογραφικό υλικό. Το σχέδιο που προσομοιώθηκε φαίνεται στην Εικόνα 8.14α και στην εικόνα Εικόνα 8.14β παριστάνεται σαν εικόνα σε κλίμακα του γκρι η συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό. Αυτός ο πίνακας ενέργειας κανονικοποιείται και χρησιμοποιείται σαν δεδομένο εισόδου στον στοχαστικό αλγόριθμο προσομοίωσης της εμφάνισης.

Για τον στοχαστικό αλγόριθμο προσομοίωσης της εμφάνισης δημιουργείται αρχικά ένα πλέγμα αλυσίδων τυχαίας διάταξης λαμβάνοντας ως δεδομένα τον ελεύθερο όγκο, το μέσο μήκος πολυμερισμού, το είδος των αλυσίδων (γραμμικών ή διακλαδισμένων) και τις διαστάσεις του πλέγματος. Σε κάθε πλεγματο σημείο αντιστοιχεί ένα μονομερές. Ακολουθεί το στάδιο της αποπροστασίας (Εικόνα 8.14γ) κάνοντας χρήση του αλγόριθμου διάχυσης του PAG (PAG diffusion). Τα πιο χρονοβόρα τμήματα της παραπάνω προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός της συνολικής ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό και η δημιουργία του πλέγματος των πολυμερικών αλυσίδων. Ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους του εγγραφόμενου σχήματος και τη μείωση του pixel size (nm ανά pixel). Στην Εικόνα 8.14δ φαίνεται το λιθογραφικό υλικό μετά τη φάση της διάλυσης βασισμένη στο critical ionization model (CIM). Μετά και την προσομοίωση της διάλυσης το λογισμικό μπορεί να αναζητήσει τις πλευρές των παραγόμενων σχημάτων για τη μέτρηση των LER και LWR στις περιοχές ενδιαφέροντος.



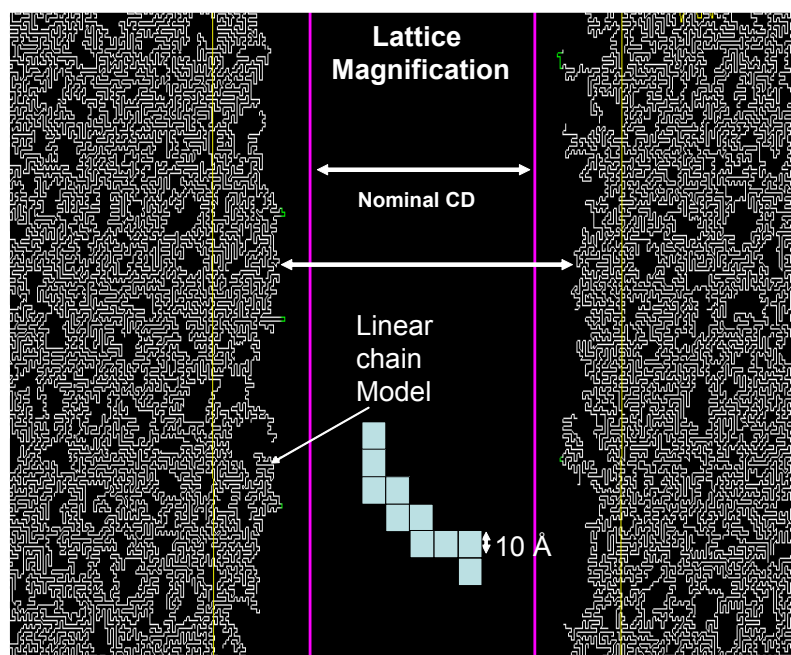
Εικόνα 8.14 Αποτελέσματα προσομοίωσης (α) Το προς εγγραφή σχέδιο. Η κεντρική γραμμή έχει διαστάσεις 1200x200 nm. (β) Η συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό (γ) αποπροστασία μετά την έκθεση και θέρμανση (δ) Το λιθογραφικό υλικό μετά την διάλυση

Στην εικόνα 4(β) φαίνεται η πλευρά μιας δομής που έχει δημιουργηθεί στο λιθογραφικό υλικό και η τραχύτητά της. Η κατανομή των σημείων της πλευράς που προέκυψε από την προσομοίωση είναι γκαουσιανή γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 8.15 Λεπτομέρεια κάτωψης του λιθογραφικού υλικού όπου φαίνεται ο τρόπος μέτρησης της πλευρικής τραχύτητας στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στην ένθετη εικόνα παριστάνεται η κατανομή των αποστάσεων της πλευράς από μια ευθεία αναφοράς

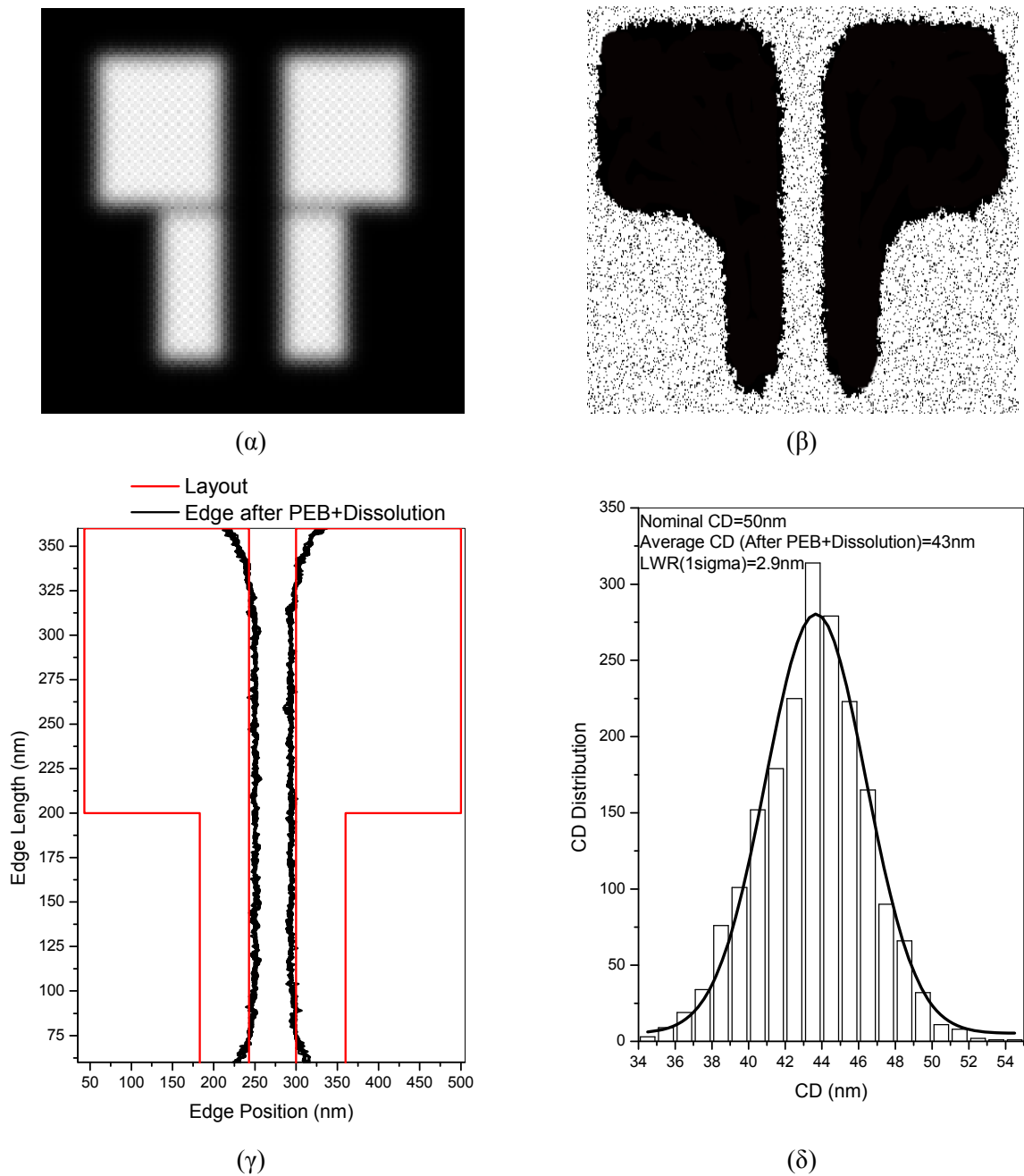
Στην Εικόνα 8.16 φαίνεται σε μεγέθυνση και σε κάτωψη ένα τμήμα του διαλυμένου πολυμερούς. Οι πολυμερικές αλυσίδες είναι γραμμικές, τυχαίοι περίπατοι αμοιβαία αποκλειόμενοι και αυτοαποκλειόμενοι. Ο βαθμός πολυμερισμού είναι 10, το μέγεθος του μονομερούς είναι 1 nm. Ο ελεύθερος όγκος είναι 10% και η κρίσιμη διάσταση (nominal) 45 nm. Η μορφή και το μέγεθος των αλυσίδων καθορίζουν την τραχύτητα των πλευρών και τη διακύμανση του πλάτους γραμμής.



Εικόνα 8.16 Κάτωψη τμήματος του διαλυμένου πολυμερούς σε μεγέθυνση όπου φαίνονται οι πολυμερικές αλυσίδες καθώς και η πλευρική τραχύτητα. Οι πολυμερικές αλυσίδες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την προσομοίωση είναι γραμμικές με 10 μονομερή η καθεμία. Το μέγεθος κάθε μονομερούς είναι 1 nm. Η συγκέντρωση του PAG είναι  $C_{PAG}=10\%$ , acid diffusion range  $DR=4nm$ , το οποίο αντιστοιχεί σε deprotection fraction  $DF=0.7$

Στην Εικόνα 8.17(a) παριστάνεται η ενεργειακή εναπόθεση για ένα σχήμα αποτελούμενο από τέσσερα παραλληλόγραμμα και κρίσιμη διάσταση 50 nm. Για την προσομοίωση της εγγραφής θεωρήθηκε δέσμη ηλεκτρονίων 40 KeV. Για την προσομοίωση της διάλυσης θεωρήθηκε πολυμερές με γραμμικές αλυσίδες, βαθμό πολυμερισμού 10, 10% ελεύθερο όγκο, 10% PAG και μήκος διάχυσης

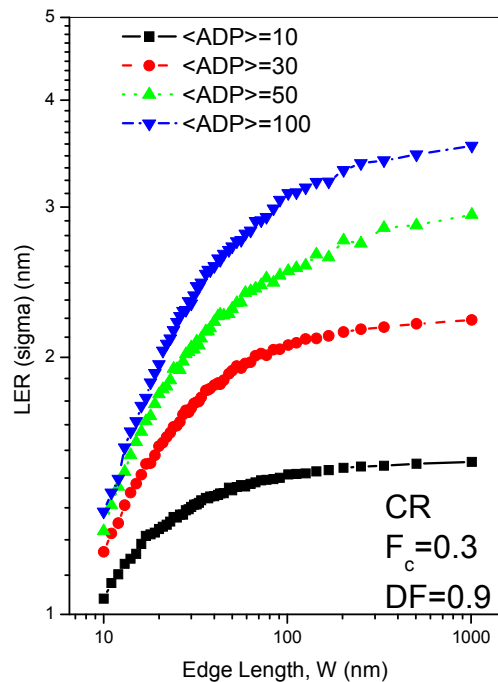
5 nm. Στην Εικόνα 8.17(β) φαίνεται το πολυμερές μετά την εμφάνιση, Εικόνα 8.17(γ) οι πλευρές σε σύγκριση με το αρχικό σχέδιο και στην Εικόνα 8.17(δ) η κατανομή του πλάτους κενού μεταξύ των δύο σχημάτων η οποία προσεγγίζει γκαουσιανή κατανομή. Το μέσο πλάτος του κενού είναι 45 nm και η τιμή του σίγμα της κατανομής που αποτελεί το LWR είναι 3 nm.



Εικόνα 8.17 Προσομοίωση για τη μέτρηση της κρίσιμης διάστασης. (α) Ενεργειακή εναπόθεση (β) το λιθογραφικό υλικό μετά την εμφάνιση (γ) Σύγκριση του αρχικού σχεδίου με το αποτέλεσμα. Παρατηρείται το στρογγύλεμα των άκρων και η τραχύτητα του εμφανισμένου πολυμερούς. Η προσομοίωση της εγγραφής έγινε για δέσμη 40 keV Η διαστάσεις της εικόνας είναι 700x700pixels με 5nm ανά pixel (d) Κατανομή του πλάτους (CD).

Στην Εικόνα 8.18 παριστάνεται το LER σε συνάρτηση με το μήκος της πλευράς. Πρόκειται για την πλευρική τραχύτητα όπως έχει προκύψει από αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικούς βαθμούς πολυμερισμού του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς ως λιθογραφικού υλικού. Όπως προκύπτει, το LER φτάνει σε τιμή κόρου για μεγάλα μήκη πλευρών. Για ένα πολύπλοκο σχέδιο, όπου

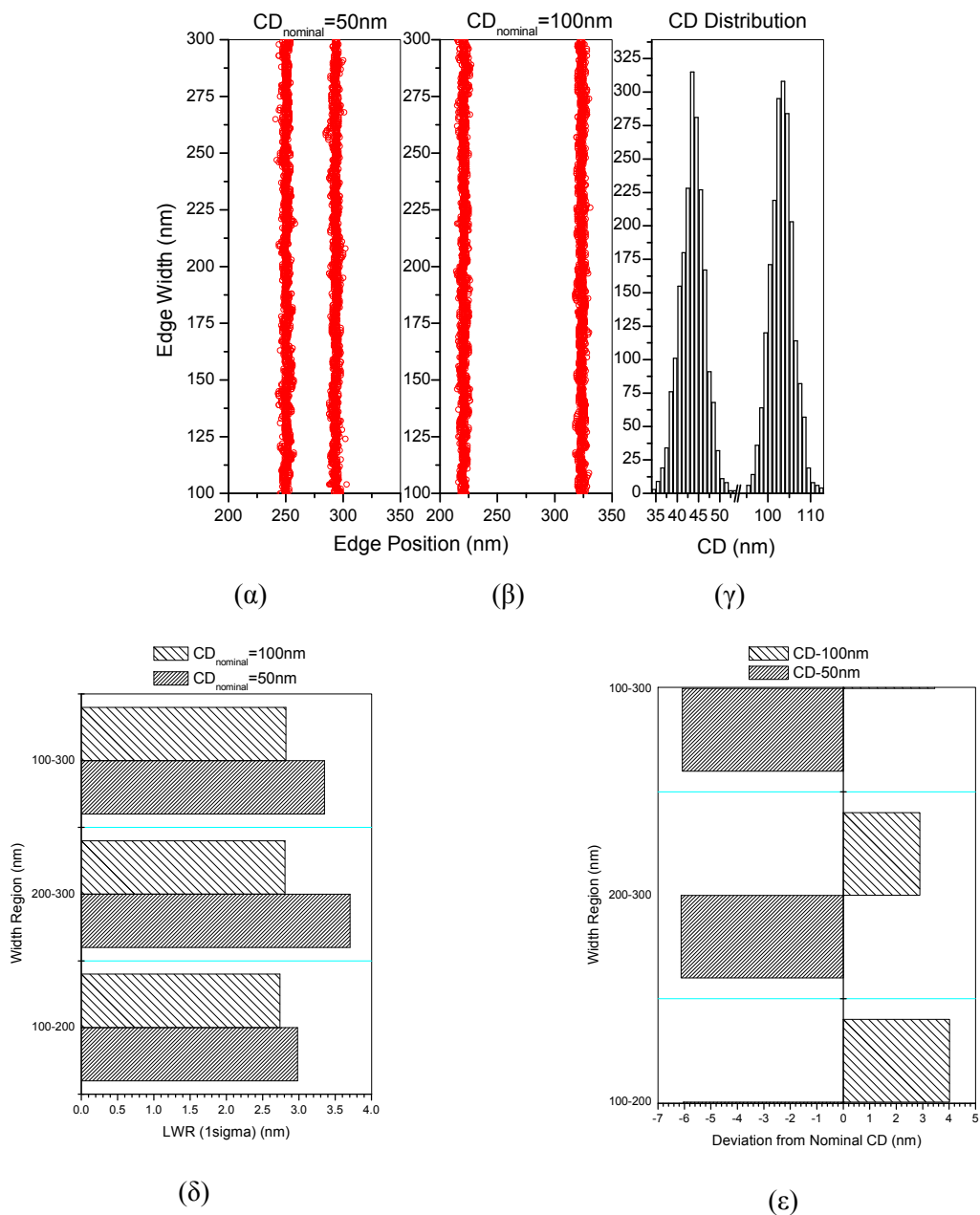
υπάρχουν πλευρές διαφόρων μηκών, μετρήσεις των LER και LWR δεν είναι αντιπροσωπευτικές για ολόκληρο το εγγραφόμενο σχέδιο.



Εικόνα 8.18 LER σε συνάρτηση με το μήκος της πλευράς για διάφορους μέσους βαθμούς πολυμερισμού. Προκύπτει ότι το LER εξαρτάται από το μήκος της μετρούμενης πλευράς

### 8.3 Μελέτη της διακύμανσης πλάτους γραμμής σε σχέση με την κρίσιμη διάσταση

Για τη μελέτη της επίδρασης της κρίσιμης διάστασης στο LWR πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε για πολυμερικό υλικό πάχους 100 nm όπου εγγράφηκαν γραμμές πλάτους 200 nm για δύο περιπτώσεις διάκενου, 50 nm και 100 nm. Κατόψεις του πολυμερούς μετά την εμφάνιση φαίνονται στην Εικόνα 8.19(α, β) και οι κατανομές της κρίσιμης διάστασης για κάθε περίπτωση στην Εικόνα 8.19(γ). Στην Εικόνα 8.19(δ) φαίνονται οι μετρήσεις της πλευρικής τραχύτητας μετρημένη κατά μήκος της γραμμής από 100-200nm, από 200-300nm και από 100-300nm. Αντίστοιχα αποτελέσματα για την κρίσιμη διάσταση (CD) φαίνονται στην Εικόνα 8.19(ε). Όπως προκύπτει, όσο μικρότερη είναι η κρίσιμη διάσταση, τόσο μεγαλύτερο το LWR. Επίσης, το LWR εξαρτάται και από το μήκος της γραμμής όπως παρατηρήθηκε και για το LER.



Εικόνα 8.19 (α,β) Το λιθογραφικό υλικό μετά την εμφάνιση για κρίσιμη διάσταση στο αρχικό σχέδιο 50 και 100nm (nominal CD). (γ) Κατανομή του CD για τις δυο αυτές περιπτώσεις (δ) LWR μετρημένο κατά μήκος της γραμμής από 100-200 nm, 200-300 nm και 100-300 nm για τις δύο περιπτώσεις CD (ε) Απόκλιση από την κρίσιμη διάσταση του αρχικού σχεδίου για 100-200 nm, 200-300 nm και 100-300 nm.

## 8.4 Μελέτη των φαινομένων γειτνίασης

Η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξέταση των φαινομένων γειτνίασης κατά την εγγραφή με ηλεκτρονική δέσμη. Για το σκοπό αυτό προσομοιώθηκε το σχήμα που φαίνεται στην Εικόνα 8.20(α). Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι η μη ομοιόμορφη κατανομή ενέργειας στο πολυμερές όταν η δόση είναι ομοιόμορφη. Στην Εικόνα 8.20(b) φαίνεται η ενεργειακή εναπόθεση

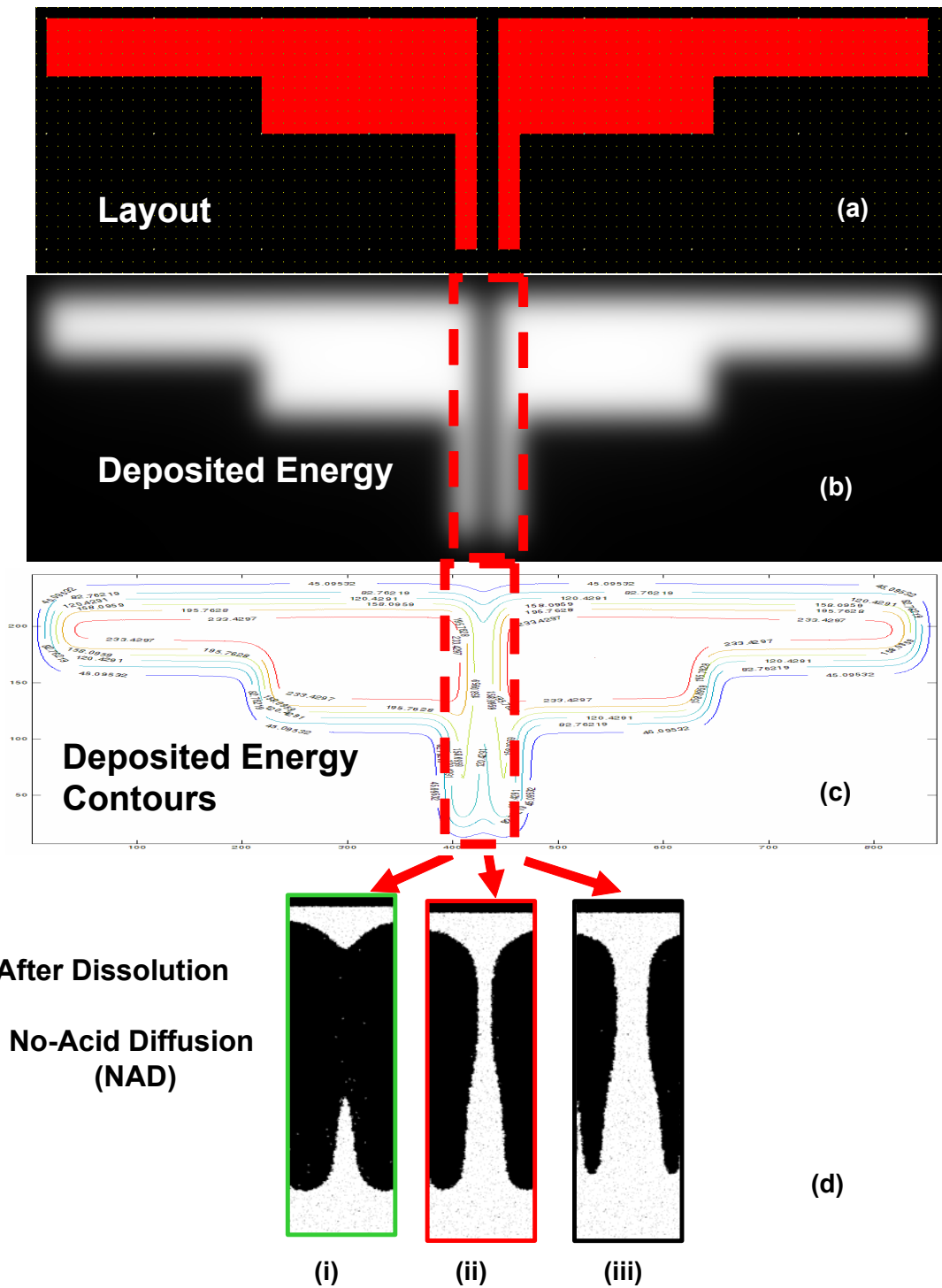


στο πολυμερές και στην Εικόνα 8.20(c) φαίνονται ισοενεργειακές καμπύλες οι οποίες δίνουν μια εικόνα του αποτελέσματος για διάφορες τιμές κατωφλίου. Όμοια, στην Εικόνα 8.20(d) φαίνονται τα αποτελέσματα μετά την προσομοίωση της εμφάνισης, για τρεις τιμές κατωφλίου, 0.6, 0.5, 0.45 (όταν  $I$  είναι το μέγιστο της ενέργειας).

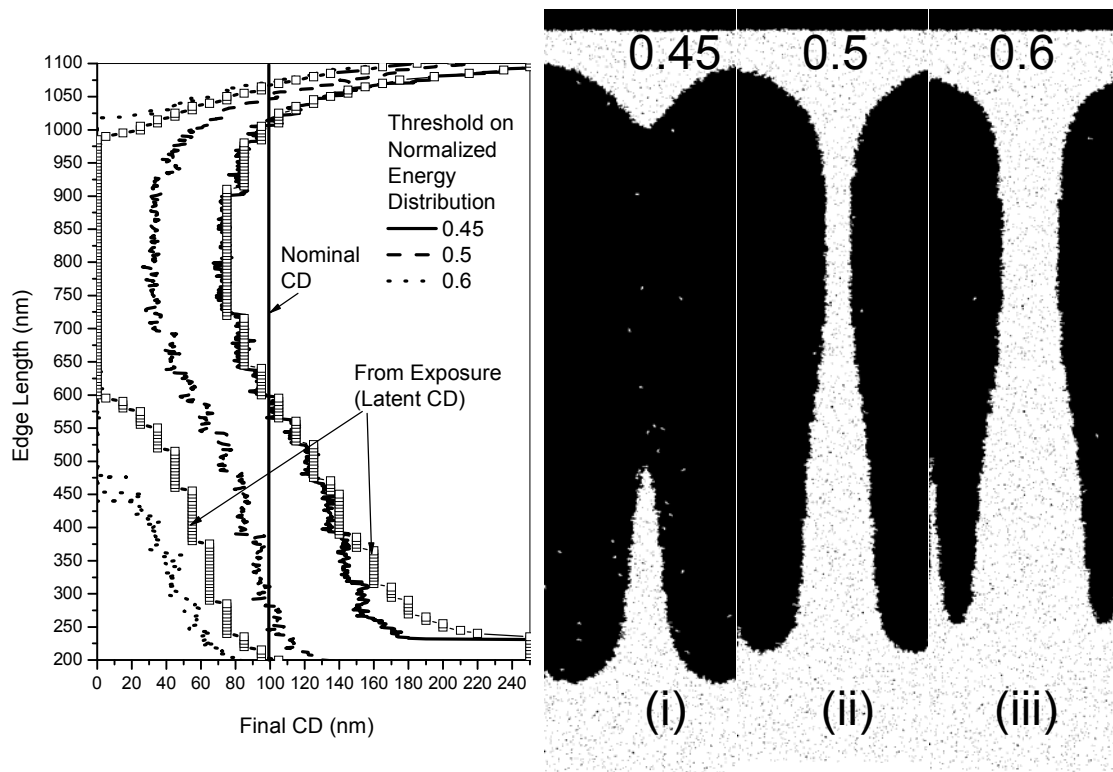
Στην Εικόνα 8.21 παριστάνεται το πλάτος του διάκενου (CD) σε συνάρτηση με το μήκος για διάφορες τιμές κατωφλίου του φωτοευαισθητοποιητή (PAG). Παριστάνεται για σύγκριση το CD υπολογισμένο με δύο τρόπους: από την εναποτιθέμενη ενέργεια με τη μέθοδο εφαρμογής μιας τιμής κατωφλίου (για τιμές κατωφλίου 0.45 και 0.6) και το CD που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο προσομοίωσης της εμφάνισης. Στον αλγόριθμο εμφάνισης δεν έχει ληφθεί υπόψη διάχυση του οξέως.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους είναι πολύ κοντινά. Φαινόμενα γειτνίασης παρατηρούνται στο πάνω τμήμα του διάκενου το οποίο γειτονεύει με μεγάλες περιοχές εγγραφής. Το μεγάλο άνοιγμα της ενεργειακής εναπόθεσης σε σύγκριση με τη μικρή διάμετρο της δέσμης, που οφείλεται κυρίως στην οπισθοσκέδαση των ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα, έχει σαν αποτέλεσμα την πλεονάζουσα εναπόθεση ενέργειας στο πολυμερές. Τέλος, παρατηρείται το φαινόμενο καμπύλωσης των γωνιών στις εικόνες ισοενεργειακών καμπυλών.

Η μεθοδολογία αυτή δίνει τη δυνατότητα να προβλεφτούν τα CD, LER, LWR κατά την εγγραφή ενός σχήματος με σκοπό να ελεγχθεί η δόση και τα χρησιμοποιούμενα υλικά αλλά και να βελτιωθούν τα εγγραφόμενα σχήματα. Στις μικρότερες διαστάσεις σημαντικός παράγοντας δεν είναι μόνο το CD αλλά και το LWR το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη. Δίνεται η δυνατότητα να εξεταστεί η επίδραση του υποστρώματος στην ενεργειακή εναπόθεση, το προφίλ της δέσμης και η ενέργεια εγγραφής όσον αφορά στην προσομοίωση της έκθεσης αλλά και το είδος και η διαμόρφωση των αλυσίδων του πολυμερούς και η συγκέντρωση του PAG και η διάχυση στην προσομοίωση της διαδικασίας εμφάνισης



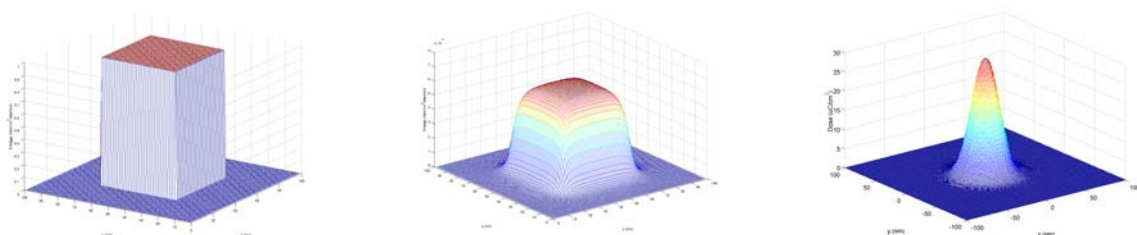
Εικόνα 8.20 (α) Το σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση του φαινομένου γειτνίασης (β) ενεργειακή εναπόθεση στο lithογραφικό υλικό (γ) ισοενεργειακές καμπύλες στο lithογραφικό υλικό (δ) Κατόψεις του πολυμερούς μετά την εμφάνιση για διαφορετικές τιμές ενέργειας κατωφλίου. Τα φαινόμενα γειτνίασης είναι εντονότερα στο πάνω μέρος των εικόνων (δ) λόγω των μεγάλων παραλληλογράμμων τα οποία γειτνιάζουν. Και προκαλούν μεγάλη ανομοιομορφία στην κρίσιμη διάσταση. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε δέσμη ηλεκτρονίων 40KeV. Στο αρχικό σχέδιο διακρίνονται τρία μεγέθη παραλληλογράμμων οι διαστάσεις των οποίων είναι: 2000x250 nm, 1000x250 nm 100x500 nm και το πλάτος του διάκενου είναι στα 100 nm.



Εικόνα 8.21 Η κρίσιμη διάσταση (CD) κατά το μήκος του διάκενου. Στην εικόνα φαίνονται δυο σειρές αποτελεσμάτων για την κρίσιμη διάσταση: Η μία προκύπτει από την κανονικοποιημένη συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης εφαρμόζοντας τιμές κατωφλίου για την ενέργεια (0.45, 0.5, 0.6) και η άλλη από τον αλγόριθμο διάλυσης για διάφορες τιμές κατωφλίου του PAG. Το πλάτος του διάκενου (nominal CD) στο αρχικό σχέδιο είναι 100 nm.

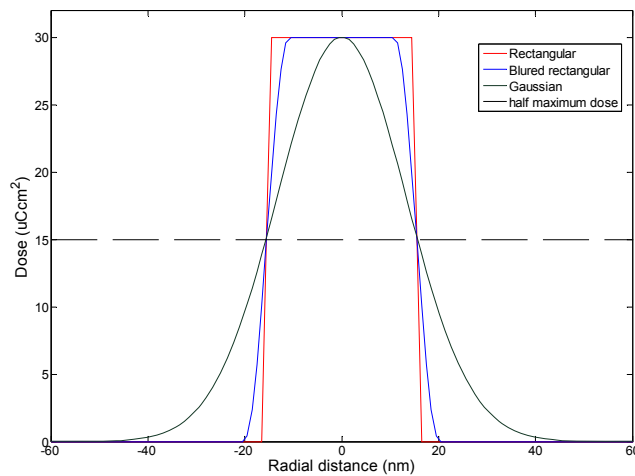
### 8.5 Συγκριτική μελέτη τριών διαφορετικών προφίλ δέσμης

Στη Εικόνα 8.22 φαίνονται δέσμες τριών διαφορετικών προφίλ. Οι τρεις αυτές μορφές είναι οι πλέον αντιπροσωπευτικές των συστημάτων λιθογραφίας. Στόχος της προσομοίωσης εγγραφής με τις δέσμες αυτές είναι η κατανόηση της επίδρασης του προφίλ της δέσμης στην κρίσιμη διάσταση του εγγραφόμενου σχήματος. Σε όλες τις περιπτώσεις η δόση φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας είναι η ίδια και χρησιμοποιούνται ηλεκτρόνια της ίδιας ενέργειας.



Εικόνα 8.22 Τρία διαφορετικά προφίλ δέσμης: τετραγωνικό, τραπεζοειδές και γκαουσιανό.

Το κρίσιμο χαρακτηριστικό για το αποτέλεσμα είναι η κλίση του προφίλ κάθε δέσμης στο FWHM. Για την αναπαράσταση του προφίλ της δέσμης χρησιμοποιήθηκε η στατιστική μέθοδος (παράγραφος 5.2.1).

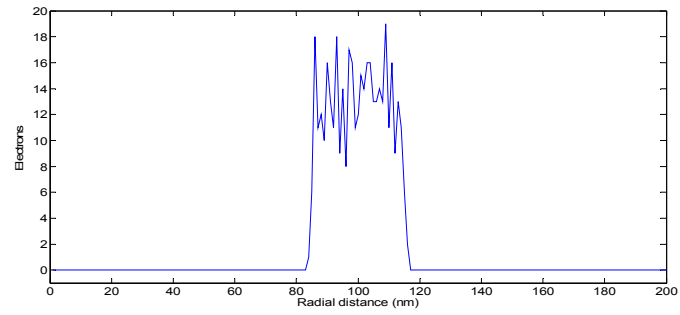


Εικόνα 8.23 Συγκριτική απεικόνιση των τριών προφίλ. Αντιστοιχούν σε δέσμες ίδιας δόσης με το ίδιο μέγιστο και ίδιο FWHM.

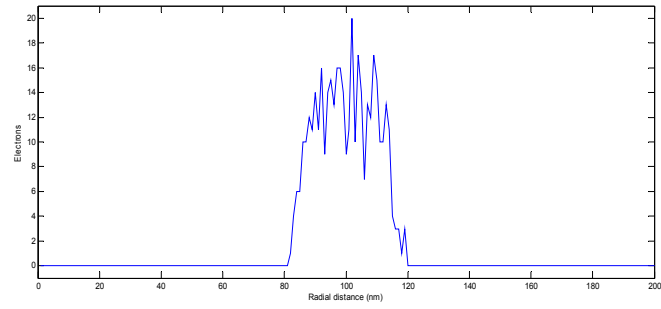
Στην Εικόνα 8.23 παριστάνονται σε διδιάστατη απεικόνιση τα τρία διαφορετικά προφίλ  $I(r)$  δέσμης, παραλληλόγραμμο, τετραγωνικό και γκαουσιανό. Και οι τρεις δέσμες έχουν την ίδια μέγιστη ένταση και το ίδιο  $FWHM=32\text{nm}$ . Στην τετραγωνική δέσμη τα ηλεκτρόνια κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιοχή  $\left(-\frac{FWHM}{2}, \frac{FWHM}{2}\right)$ , ενώ στις άλλες δύο σε μια ευρύτερη περιοχή ώστε το συνολικό πλήθος των ηλεκτρονίων να παραμένει το ίδιο. Η δόση που χρησιμοποιήθηκε ήταν  $30\mu\text{C}/\text{cm}^2$  από την οποία προκύπτει σε περιοχή εμβαδού  $32 \times 32\text{nm}^2$  προσπέφτουν 1920 ηλεκτρόνια.

Από τα παραπάνω προφίλ κάθε δέσμης προκύπτει η κατανομή των ηλεκτρονίων γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Η Εικόνα 8.24 παριστάνει μια διατομή κάθε δέσμης ενώ στην Εικόνα 8.25(α,β,γ) παριστάνονται οι κατανομές ηλεκτρονίων σε εικόνα κλίμακας του γκρι.

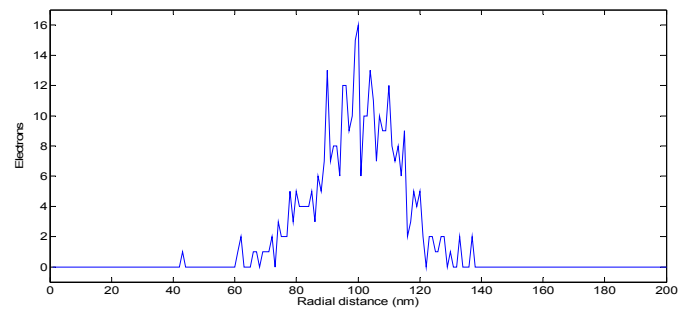
## Αποτελέσματα



α

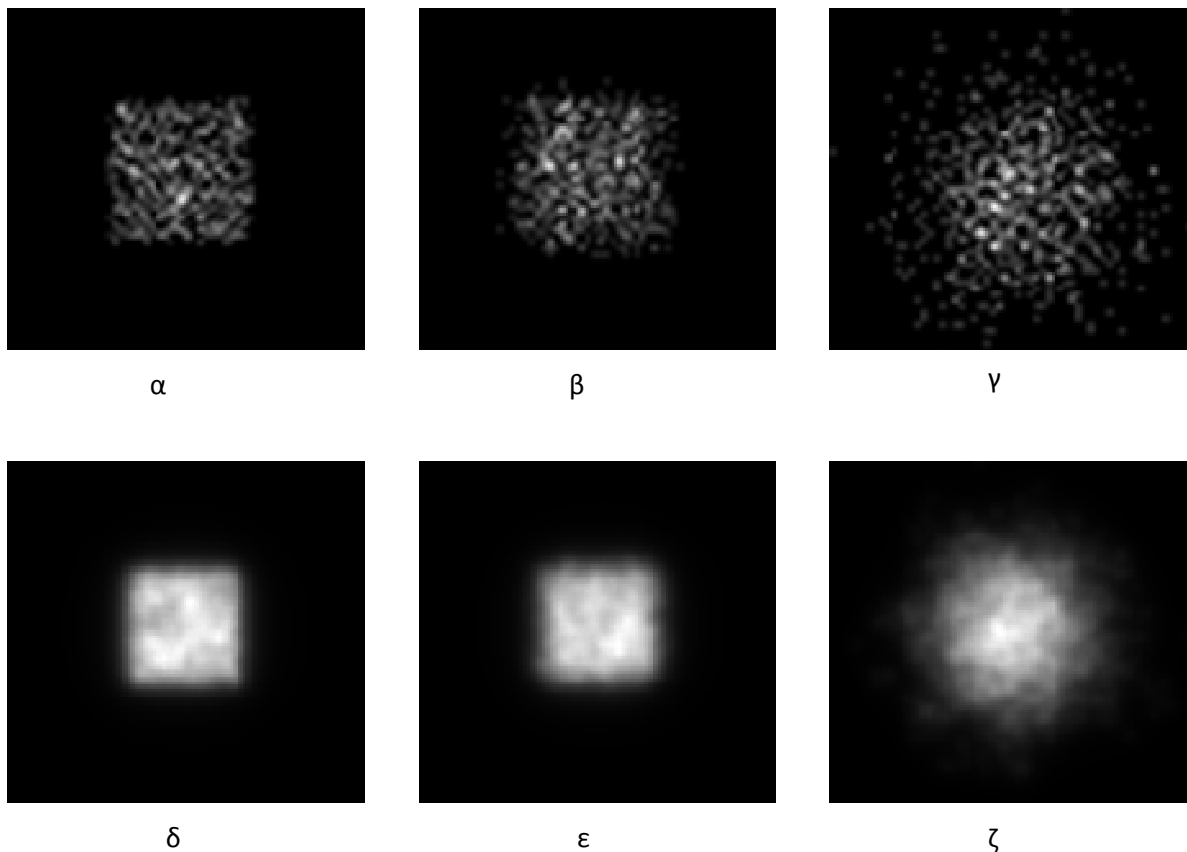


β



γ

Εικόνα 8.24 Κατανομές ηλεκτρονίων που προέκυψαν από τις παραπάνω δέσμες (α) τετραγωνική (β) τραπεζοειδής (γ) γκαουσιανή



Εικόνα 8.25 (α, β, γ) Κατανομές των ηλεκτρονίων γύρω από το σημείο πρόσπτωσης σε εικόνα κλίμακας του γκρι, τετραγωνική, τραπεζοειδής και γκαουσιανή αντίστοιχα. (δ, ε, ζ) Συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης από τις τρεις δέσμες.

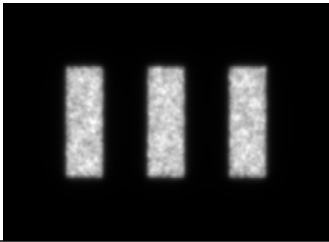
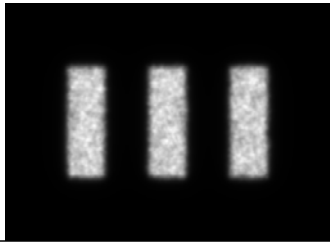
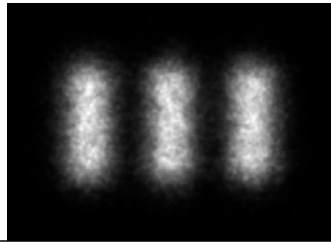

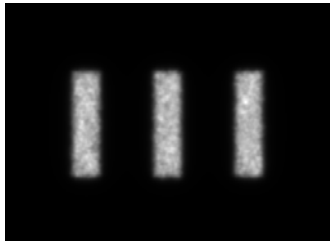
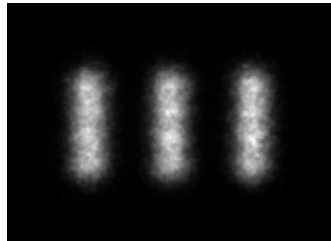


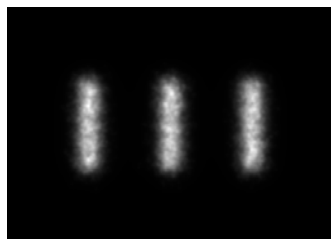
Από τη συνέλιξη της συνάρτησης εναποτιθέμενης ενέργειας από σημειακή δέσμη και την κατανομή των ηλεκτρονίων της δέσμης προκύπτει η συνάρτηση εναποτιθέμενης ενέργειας από πραγματική δέσμη (Εικόνα 8.25δ,ε,ζ). Με τις συναρτήσεις αυτές εγγράφηκαν γραμμές πλάτους 45nm, 32nm και 22nm σύμφωνα με το σχήμα που φαίνεται στην Εικόνα 8.26.



Εικόνα 8.26 Το σχέδιο για την εγγραφή με διαφορετικά προφίλ δέσμης

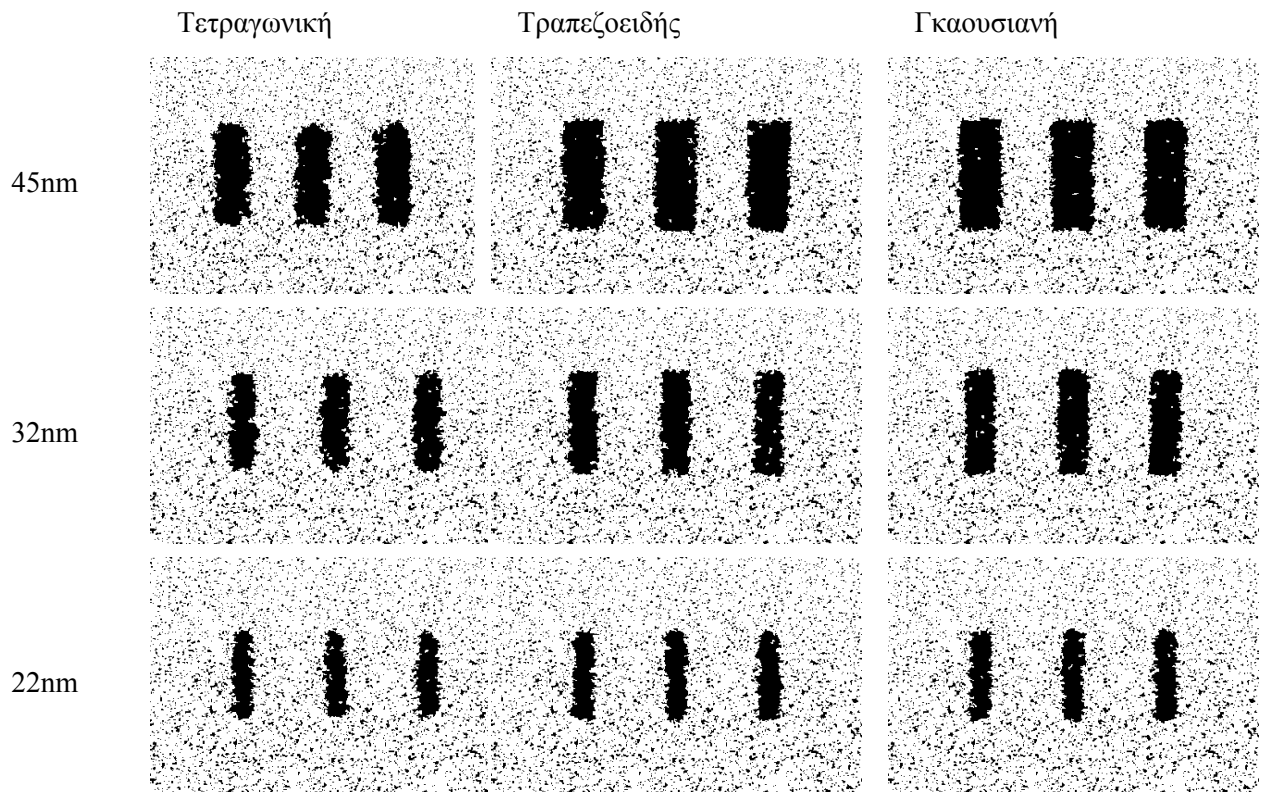
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της συνολικής ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό για τις τρεις δέσμες και τα τρία διαφορετικά πλάτη γραμμών (Εικόνα 8.27)

Αποτελέσματα

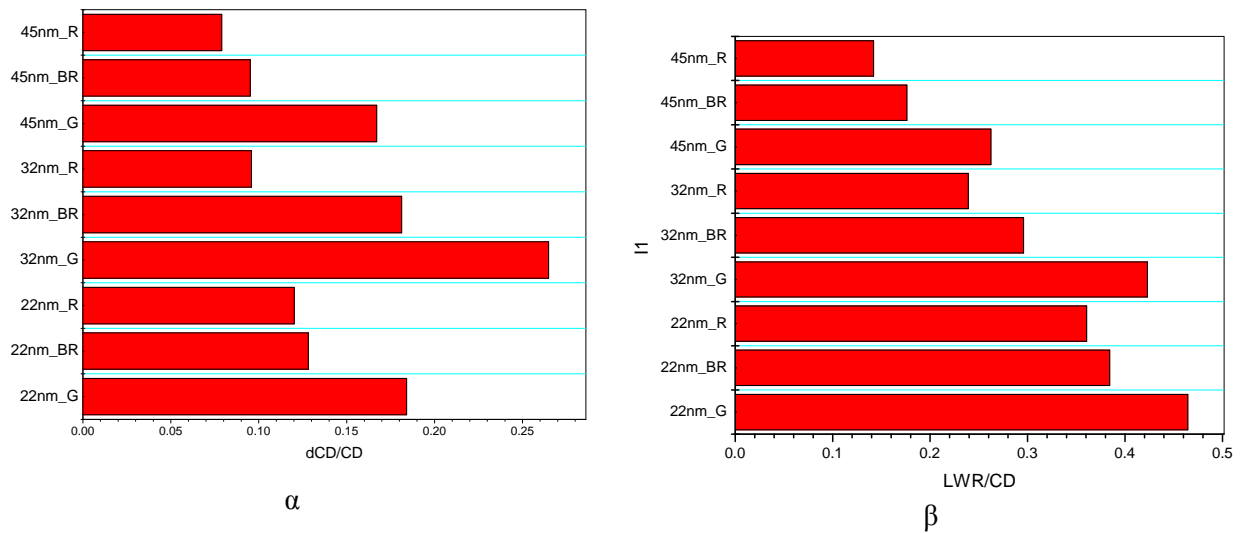
	Τετραγωνική	Τραπεζοειδής	Γκαουσιανή
45nm			
32nm			
22nm			

Εικόνα 8.27 Συγκριτικά αποτελέσματα εγγραφής με τρεις διαφορετικές δέσμες και για τρία διαφορετικά πλάτη γραμμών

Τα δεδομένα της ενεργειακής εναπόθεσης χρησιμοποιούνται στο στοχαστικό αλγόριθμο προσομοίωσης της εμφάνισης ώστε να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα 8.28). Στις τελικές εικόνες μετρήθηκε το τελικό πλάτος κάθε γραμμής (CD) μετά την εμφάνιση και η διακύμανση του πλάτους γραμμής (LWR) (Εικόνα 8.29).



Εικόνα 8.28 Συγκριτικά αποτελέσματα μετά την εμφάνιση για τις τρεις διαφορετικές δέσμες και για τα τρία πλάτη γραμμών



Εικόνα 8.29 Αποτελέσματα μέτρησης του CD ( $\alpha$ ) και του LWR ( $\beta$ )

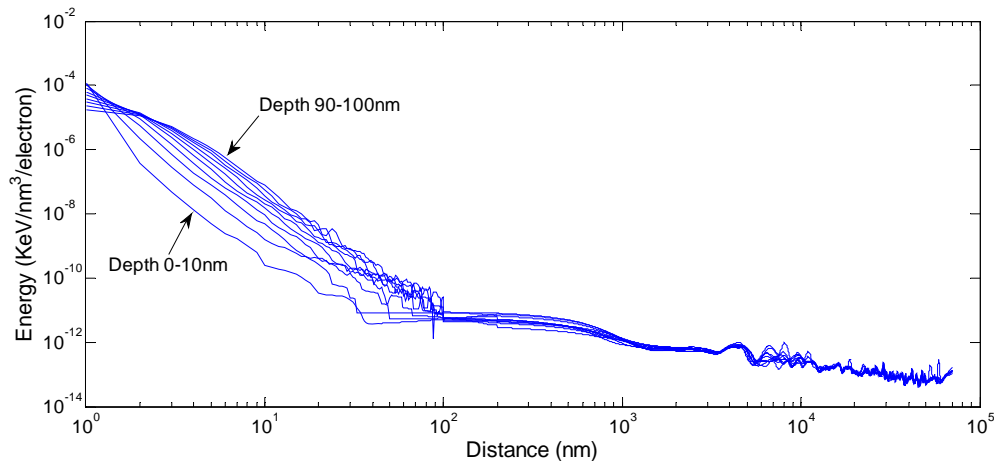
## 8.6 Μελέτη της ενεργειακής εναπόθεσης σε συνάρτηση με το βάθος

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της ενεργειακής εναπόθεσης με τη μέθοδο Monte Carlo δίνει όπως προαναφέρθηκε την ενέργεια που εναποτίθεται στο lithογραφικό υλικό σε συνάρτηση με το βάθος. Ένα τέτοι παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 8.30 όπου παριστάνεται η εναποτιθέμενη ενέργεια σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εστίασης της δέσμης. Πρόκειται για την ενεργειακή



## Αποτελέσματα

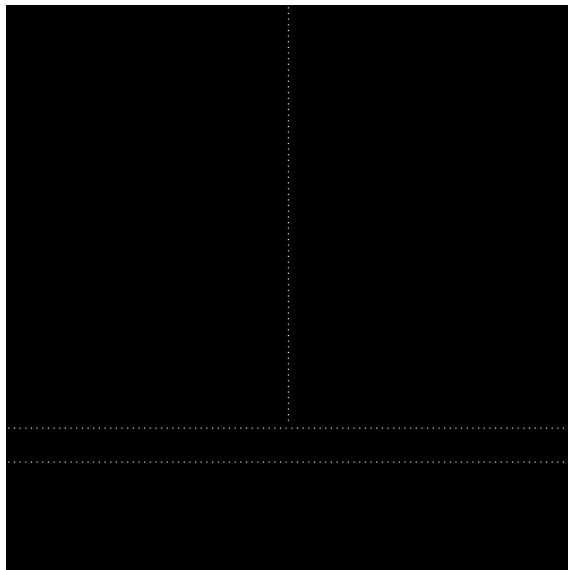
εναπόθεση σημειακής δέσμης ηλεκτρονίων ενέργειας 100KeV η οποία προσπίπτει σε PMMA πάχους 100nm πάνω από δισκίο πυριτίου. Για την Monte Carlo προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν  $10^4$  ηλεκτρόνια. Για την αποθήκευση της ενέργειας σε όλο τον όγκο του υλικού χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατος πίνακας κάθε κελί του οποίου αντιστοιχεί σε ακτινική απόσταση  $dr=1\text{nm}$  και σε πάχος κατά τον άξονα  $z$  σε  $dz=10\text{nm}$ . Υπολογίζεται με τον τρόπο αυτό η ενέργεια σε 10 υποστρώματα του λιθογραφικού υλικού με το πρώτο υπόστρωμα από 0 έως 10nm και το δέκατο από 90 έως 100nm. Στην Εικόνα 8.30 παριστάνονται οι δέκα αυτές συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης.



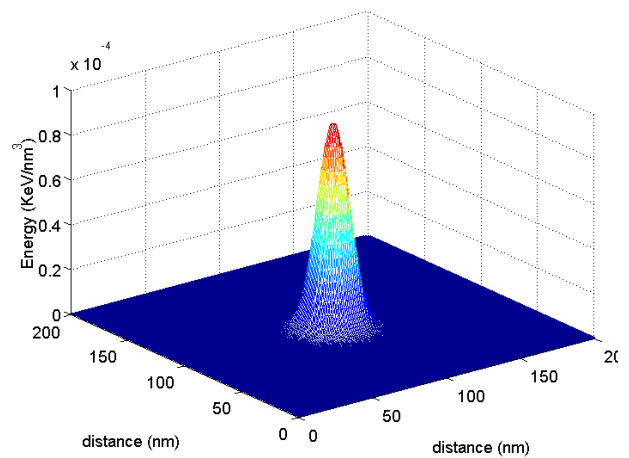
Εικόνα 8.30 Συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης για 10 διαδοχικά βάθη σε 100nm PMMA από δέσμη 100KeV

Παρατηρούμε ότι η συνεισφορά των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων είναι η ίδια στα διαφορετικά βάθη όπως προκύπτει από την ταύτιση των συναρτήσεων σε μεγάλες ακτινικές αποστάσεις ενώ σε μικρές ακτινικές αποστάσεις οι διαφορές δεν είναι αμελητέες. Για μια εκτίμηση του αποτελέσματος αυτών των διαφορών έγινε προσομοίωση της εγγραφής ενός σχήματος. Εγγράφηκαν γραμμές με διαδοχικές εκθέσεις βήματος 5nm. Στην Εικόνα 8.31(α) παριστάνονται οι διαδοχικές θέσεις έκθεσης του λιθογραφικού υλικού από το e-Beam.

Για την εγγραφή υπολογίζεται αρχικά η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέσμη. Ο υπολογισμός έγινε για γκαουσιανή δέσμη με  $\text{FWHM}=20\text{nm}$  και δόση  $30\mu\text{C}/\text{cm}^2$ . Ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται 10 φορές για τις συναρτήσεις που αντιστοιχούν στα διάφορα βάθη. Στην Εικόνα 8.31(β) φαίνεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση η ενεργειακή εναπόθεση από πραγματική δέσμη για τα πρώτα 10nm του υλικού. Στην Εικόνα 8.32 παριστάνονται συγκριτικά συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέσμη σε διδιάστατη απεικόνιση για τα βάθη 0-10nm και 90-100nm και για μικρές ακτινικές αποστάσεις (0-500nm από το σημείο εστίασης) όπου είναι σημαντικές οι διαφορές.

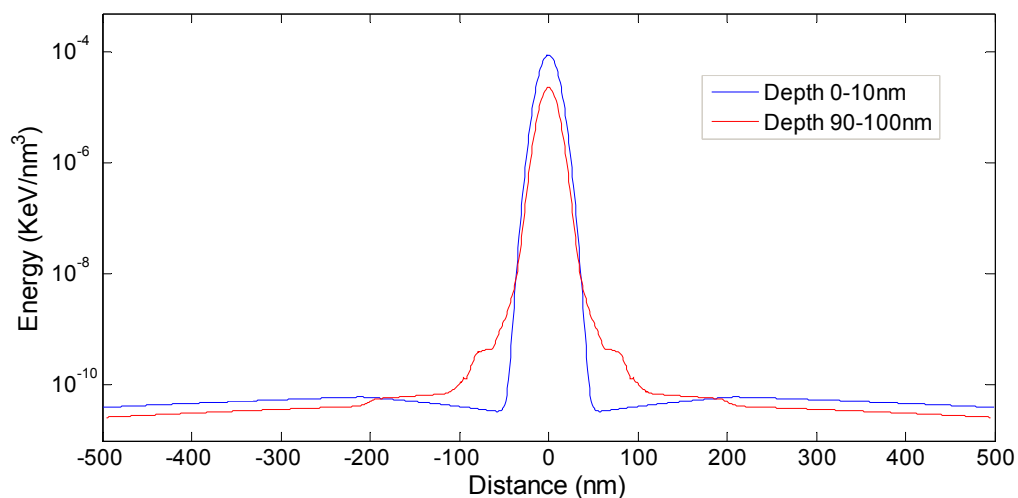


(α)



(β)

Εικόνα 8.31 (α) Το προς εγγραφή σχήμα στο οποίο διακρίνονται οι θέσεις έκθεσης του e-Beam. (β) Η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης μετά την συνέλιξη με το γκαουσιανό προφίλ της δέσμης με FWHM=20nm



Εικόνα 8.32 Οι συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέση γκαουσιανού προφίλ με FWHM=20nm για τα βάθη 0-10nm και 90-100nm.

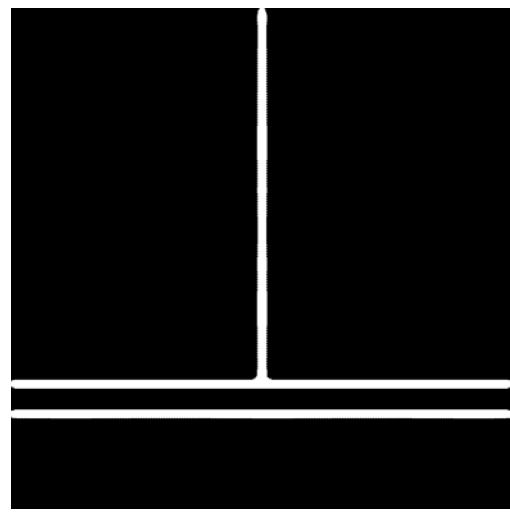
Οι συναρτήσεις ενεργειακής εναπόθεσης της πραγματικής δέσμης μετά τη συνέλιξη τους με το εγγραφόμενο σχέδιο δίνουν την συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό στα 10 διαδοχικά υποστρώματα. Στην Εικόνα 8.33(α) παριστάνεται ενδεικτικά σε εικόνα κλίμακας του γκρί η ενεργειακή εναπόθεση στο τελευταίο στρώμα (90-100nm). Για την εκτίμηση του αποτελέσματος μετά την εμφάνιση στην Εικόνα 8.33(β) έως (ε) φαίνεται η μορφή αυτού του στρώματος λιθογραφικού υλικού μετά την εφαρμογή διαφορετικών τιμών της τιμής κατωφλίου.

Στην Εικόνα 8.34 φαίνεται μια διατομή της συνολικής ενεργειακής εναπόθεσης για τα διάφορα βάρη και δύο διαφορετικές τιμές της τιμής κατωφλίου για την ανάδειξη της σημασίας της. Υψηλή τιμή της ενέργειας κατωφλίου θα έχει σαν αποτέλεσμα την διάλυση μόνο των ανώτερων στρωμάτων του λιθογραφικού υλικού. Σε κάθε περίπτωση το πλάτος κάθε γραμμής μετά τη διάλυση δεν θα είναι το ίδιο για τα διάφορα βάρη. Τα τοιχώματα δηλαδή της δημιουργούμενης δομής δεν θα είναι κάθετα ως προς το υπόστρωμα. Ποσοτικά, οι παρατηρήσεις αυτές φαίνονται στα ιστογράμματα που ακολουθούν (Εικόνα 8.35).

Από το πρώτο ιστόγραμμα (Εικόνα 8.35(α)) προκύπτει ότι για την τιμή κατωφλίου  $1.5 \cdot 10^{-4}$  KeV το λιθογραφικό υλικό διαλύεται μόνο μέχρι βάθους 70nm. Παρατηρούμε επίσης από τα ιστογράμματα ότι η διαφορά στο πλάτος γραμμής κατά το βάθος είναι μεγαλύτερη όσο μικρότερη η τιμή κατωφλίου.



(α)



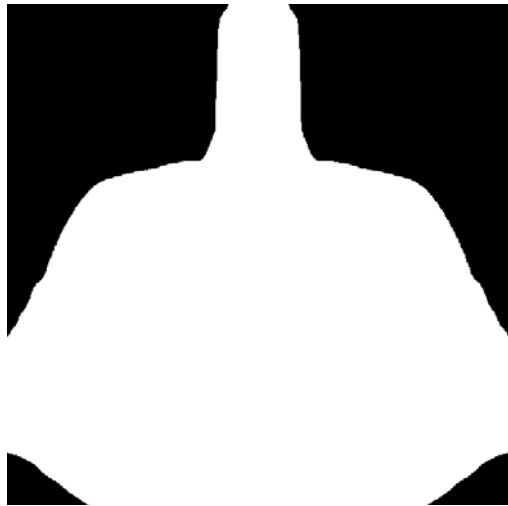
(β)



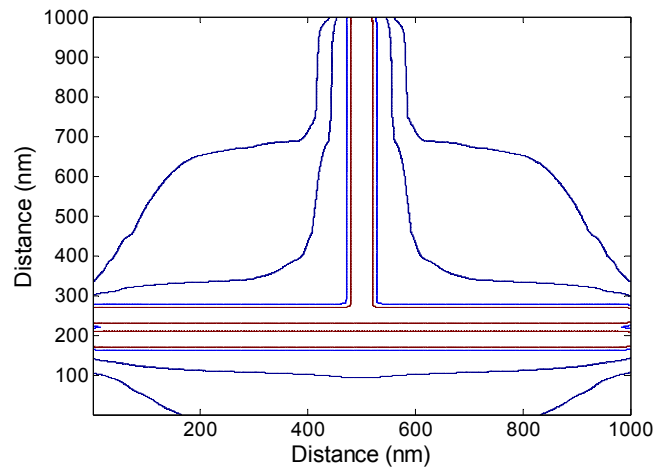
(γ)



(δ)

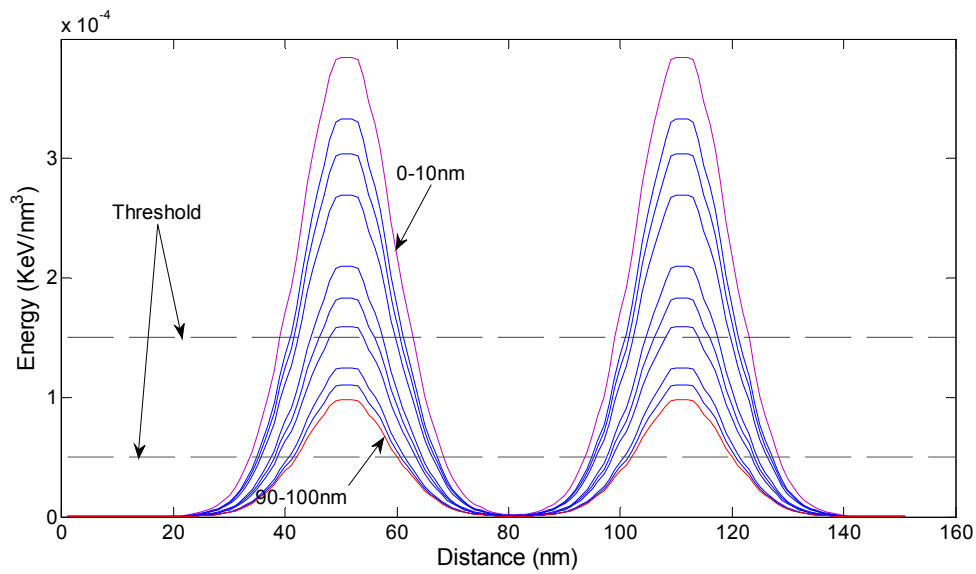


(ε) Threshold  $10^{-8}$

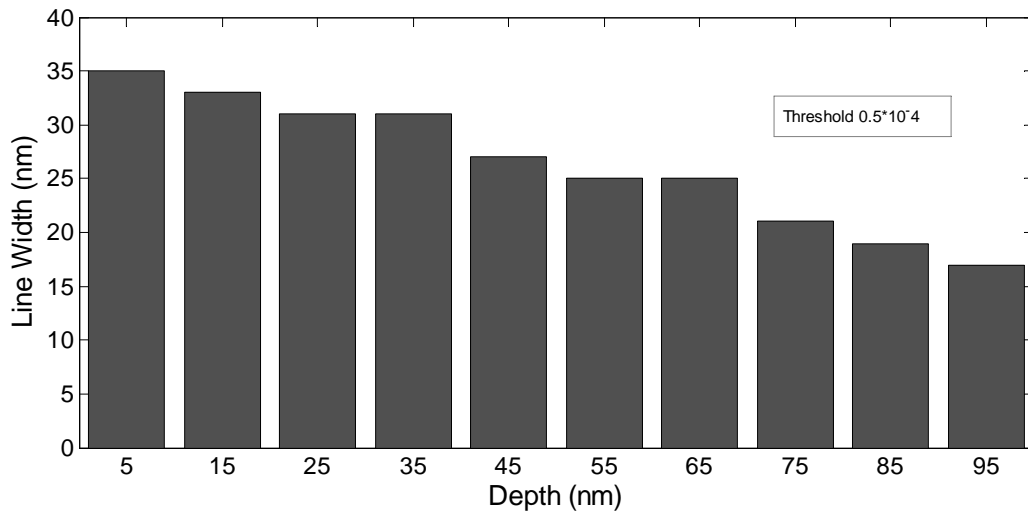


(ζ)

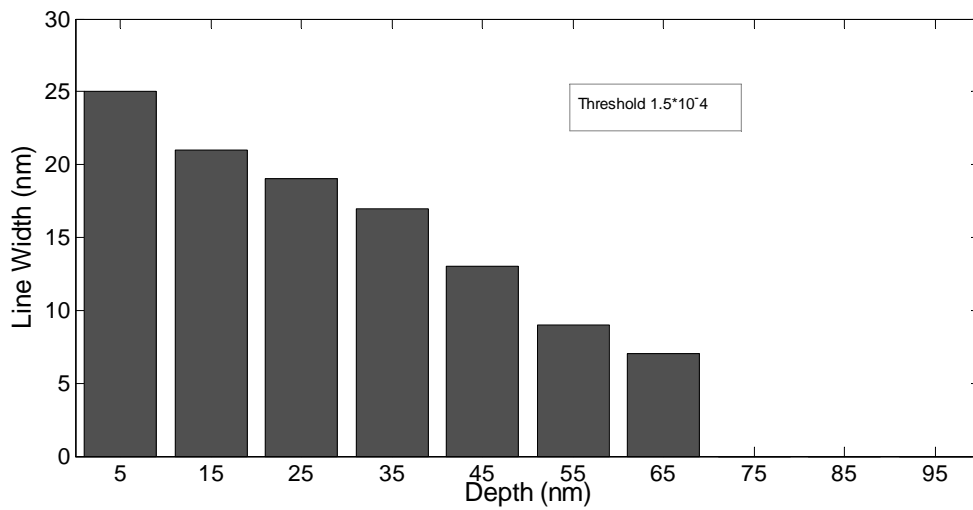
Εικόνα 8.33 (α) Η συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο τελευταίο στρώμα σε κλίμακα του γκρι (β) έως (ε) εμφάνιση με τιμή κατωφλίου (ζ) ισοενεργειακές καμπύλες



Εικόνα 8.34 Διατομή της συνολικής ενεργειακής εναπόθεσης για τα διάφορα βάθη.



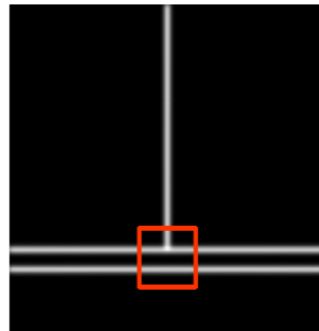
(α)



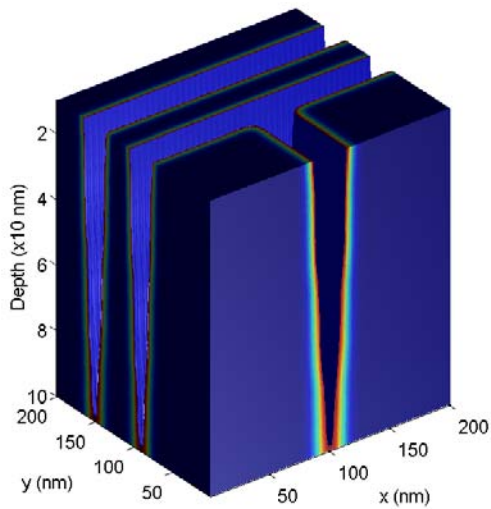
(β)

Εικόνα 8.35 (α) Το πλάτος γραμμής για τα διαφορετικά βάθη PMMA. (α) Τιμή κατωφλίου  $5 \cdot 10^{-5}$ . (β) Τιμή κατωφλίου  $1.5 \cdot 10^{-5}$

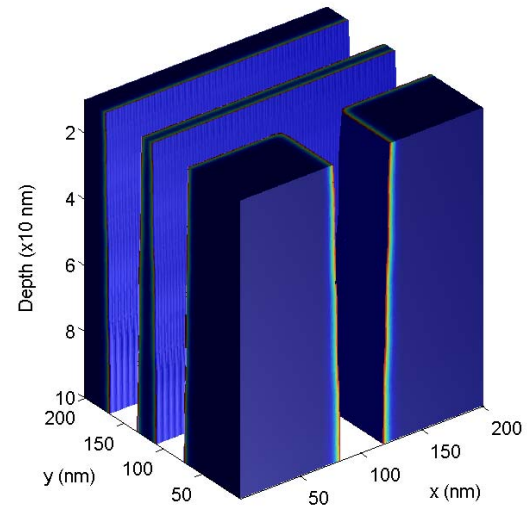
Στις εικόνες 8.36 φαίνεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση το λιθογραφικό υλικό για τέσσερις τιμές της ενέργειας κατωφλίου.



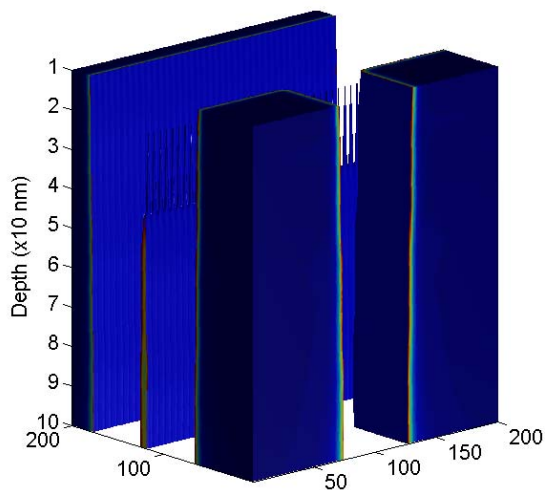
α



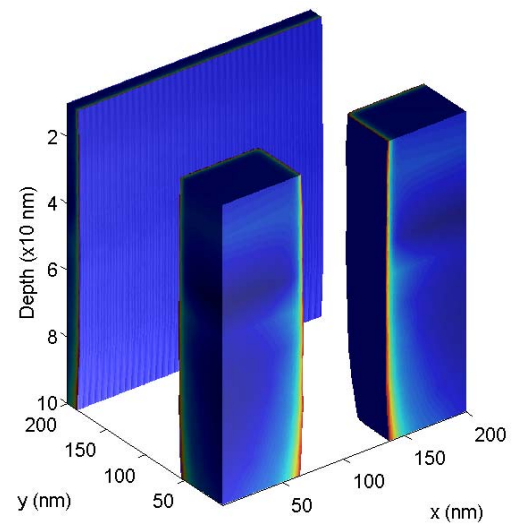
β



γ



δ



ε

Εικόνα 8.36 Τρισδιάστατη απεικόνιση του τμήματος του λιθογραφικού υλικού που υποδεικνύεται στην εικόνα (α) μετά την εφαρμογή τεσσάρων τιμών κατωφλίου ενέργειας ( $\xi_0$ ,  $10^{-1}\xi_0$ ,  $10^{-2}\xi_0$ ,  $10^{-3}\xi_0$  αντίστοιχα για τις εικόνες β,γ,δ,ε).

## 9 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η ανάπτυξη λογισμικού για την προσομοίωση της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης την αναζήτηση σχήματος σε εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και την αυτοματοποιημένη διεξαγωγή μετρήσεων. Στα κεφάλαια 1 και 2 παρουσιάστηκε η λιθογραφική διαδικασία ώστε να φωτιστεί ο ρόλος της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης στην απευθείας εγγραφή και στη διαδικασία κατασκευής μασκών. Παρουσιάστηκαν τα βασικά βήματα αυτών των διαδικασιών, τα εργαλεία και τα υλικά που χρησιμοποιούνται αλλά και οι στόχοι της τεχνολογίας σήμερα. Από τη μελέτη όλων αυτών των παραγόντων έγινε προσπάθεια να κατανοηθεί στο σύνολό της η διαδικασία. Το πρόβλημα της προσομοίωσης αναλύθηκε σε απλούστερα υποπροβλήματα η λύση των οποίων είναι ευκολότερη ενώ ταυτόχρονα παρέχει ευελιξία, ευκολία στην ανάπτυξη, τη συντήρηση και την βελτίωση του κώδικα. Προσομοιώθηκε η έκθεση του λιθογραφικού υλικού σε ηλεκτρόνια και η εμφάνισή του με τη χρήση του μοντέλου καταωφλίου ενέργειας. Αναπτύχθηκαν επίσης αλγόριθμοι για την επεξεργασία εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, αναζήτησης σχημάτων σε μια εικόνα και αλγόριθμοι υπολογισμού της κρίσιμης διάστασης, της διακύμανσης πλάτους γραμμής και της πλευρικής τραχύτητας. Η προσέγγιση του προβλήματος παρουσιάστηκε αναλυτικά στα κεφάλαια 3 έως 7 και στο κεφάλαιο 8 δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση του αλγορίθμου.

Ο συνολικός αλγόριθμος χωρίστηκε σε τμήματα καθένα από το οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα αλλά και να τροποποιηθεί. Τα πρώτο τμήμα αποτελεί ο υπολογισμός της ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό από σημειακή δέσμη. Θεωρήθηκε δηλαδή ανεξάρτητα μια ιδανική μονοενεργειακή δέσμη, της οποίας τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στο ίδιο σημείο. Για τη δέσμη αυτή υπολογίζεται η ενέργεια που εναποτίθεται στο λιθογραφικό υλικό. Το αποτέλεσμα εξαρτάται μόνο από την ενέργεια της δέσμης και όχι από το προφίλ της. Επειδή ο χρόνος υπολογισμού είναι αρκετά μεγάλος, της τάξης των δύο ωρών για τον υπολογισμό  $10^4$  τροχιών ηλεκτρονίων, τα αποτελέσματα για τη σημειακή δέσμη αποθηκεύονται ως βάση δεδομένων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με διαφορετικά προφίλ δέσμης. Για τον υπολογισμό της εναποτιθέμενης ενέργειας χρησιμοποιήθηκε στατιστικό μοντέλο. Τα ηλεκτρόνια θεωρούνται σημειακές μάζες των οποίων οι τροχιές μέσα στο υλικό είναι ευθύγραμμες. Ελαστικές κρούσεις με το ατομικό δυναμικό αλλάζουν την κατεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου και ανελαστικές κρούσεις προκαλούν την απώλεια της ενέργειά τους. Από τις ενεργές διατομές των ελαστικών και ανελαστικών κρούσεων υπολογίζονται οι γωνίες σκέδασης και το μήκος ελεύθερης διαδρομής με τη χρήση τυχαίων αριθμών (Monte Carlo προσέγγιση). Για τον υπολογισμό της απώλειας ενέργειας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του continuous slowing down approximation (CSDA) του Bethe. Οι τροχιές των ηλεκτρονίων θεωρούνται στις τρεις διαστάσεις και υπολογίζεται η ενέργεια στο λιθογραφικό υλικό σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση και το βάθος. Το αποτέλεσμα εξαρτάται επίσης από τα υλικά που αποτελούν το υπόστρωμα και τα πάχη τους. Ο χρήστης του λογισμικού έχει

πλήρη ελευθερία επιλογής της σύστασης και δομής του υποστρώματος αφού για τις νέες μάσκες το υπόστρωμα αποτελείται από πολλά και διαφορετικά στρώματα υλικών.

Το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου αποτελεί ο υπολογισμός της ενεργειακής εναπόθεσης από την πραγματική δέσμη. Χρησιμοποιήθηκε η συνέλιξη συναρτήσεων για τον υπολογισμό, της συνάρτησης ενεργειακής εναπόθεσης από τη σημειακή δέσμη και της συνάρτησης κατανομής της έντασης της δέσμης. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης που προκύπτει από την παρούσα προσομοίωση ή συναρτήσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία από πειραματικές μετρήσεις. Στο τρίτο τμήμα, και πάλι από τη συνέλιξη συναρτήσεων, υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που έχει εναποθεθεί στο λιθογραφικό υλικό. Για τον υπολογισμό αυτό, απαιτείται ως δεδομένο εισόδου το εγγραφόμενο σχέδιο. Η συνάρτηση που περιγράφει το σχέδιο δημιουργείται μετά την ανάγνωση αρχείων (CIF ή GDSII) τα οποία παράγονται από αυτοματοποιημένα περιβάλλοντα σχεδίασης. Ένα τέταρτο ανεξάρτητο τμήμα του αλγορίθμου είναι υπεύθυνο για την ανάγνωση τέτοιων αρχείων.

Από την συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό, με τη χρήση μιας τιμής κατωφλίου για την ενέργεια, στο πέμπτο τμήμα του αλγορίθμου, προκύπτει η μορφή των σχηματιζόμενων δομών στο λιθογραφικό υλικό. Εφόσον η ενέργεια υπολογίζεται όχι μόνο σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση αλλά και το βάθος, προβλέπεται η διαφοροποίηση της μορφής τους με το βάθος του υλικού. Η προσέγγιση αυτή προσομοίωσης της εμφάνισης με τη χρήση ενέργειας κατωφλίου αποτελεί ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης της εμφάνισης χωρίς να λαμβάνει υπόψη του το είδος του λιθογραφικού υλικού, το μέγεθος και τη μορφή των αλυσίδων στην περίπτωση των πολυμερικών υλικών, φαινόμενα αποπροστασίας και διάσπασης αλυσίδων που λαμβάνουν χώρα κατά την είσοδο σε αυτό των ηλεκτρονίων, την ύπαρξη ή όχι φωτοευαίσθητοποιητή και τη διαδικασία διάλυσης. Η υπολογιζόμενη συνάρτηση εναποτιθέμενης ενέργειας στο λιθογραφικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο εισόδου σε άλλο αλγόριθμο προσομοίωσης της διαδικασίας εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής του Δημόκριτου.

Το τμήμα της μετρολογίας πραγματοποιεί μετρήσεις της κρίσιμης διάστασης στις σχηματιζόμενες δομές, της διακύμανσης του πλάτους γραμμής και της πλευρικής τραχύτητας. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων αυτών σε πειραματικά δεδομένα, ο αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης μετατρέπει τις εικόνες αυτές από εικόνες κλίμακας του γκρι σε δυαδικές ασπρόμαυρες εικόνες. Ένα άλλο τμήμα του λογισμικού, ο αλγόριθμος αναζήτησης σχημάτων, αναζητά και ταυτίζει το επιθυμητό τμήμα του αρχικού σχεδίου με το αντίστοιχο τμήμα της ασπρόμαυρης δυαδικής εικόνας SEM.

Από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά την ανάπτυξη του αλγορίθμου ήταν η εξεύρεση του κατάλληλου μοντέλου περιγραφής της κίνησης των ηλεκτρονίων στην ύλη. Η ακρίβεια ενός τέτοιου μοντέλου είναι βασικός παράγοντας για την ακριβή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφορες τροποποιήσεις του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην προσπάθεια να επιτευχθούν πιο ακριβή αποτελέσματα. Παρότι η βελτίωση που έχει γίνει είναι μεγάλη, το πρόβλημα παραμένει ανοιχτό, και όσο οι ανάγκες σε ακρίβεια μεγαλώνουν, τόσο μεγαλώνει και η ανάγκη για βελτίωση των μοντέλων. Είναι εύκολα κατανοητό ότι προσεγγιστικά μοντέλα μπορεί να δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα για δομές κρίσιμης διάστασης της τάξης των μικρόμετρων, αλλά όταν οι σημερινές τεχνολογικές απαιτήσεις φτάνουν σε κρίσιμες διαστάσεις 22 nm και κάτω, η ακρίβεια των μοντέλων πρέπει να είναι πολύ μεγάλη. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε με τρόπο ώστε οι συναρτήσεις υπολογισμού του μέσου μήκους ελεύθερης διαδρομής, των γωνιών



σκέδασης και της απώλειας ενέργειας να μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν ή να επιλεγούν άλλες από το χρήστη. Δόθηκε δηλαδή βάρος στην επίλυση του προβλήματος προσομοίωσης και υλοποίησης του αλγόριθμου στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab που χρησιμοποιήθηκε με τρόπο ώστε αυτός να είναι ανεξάρτητος από τις χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις οι οποίες μπορούν να επιλεγούν κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Δίνεται έτσι η δυνατότητα αξιολόγησης των διαφόρων μοντέλων και βελτίωσης τους μέσα από τη σύγκρισή τους με πειραματικά αποτελέσματα. Η διαδικασία δηλαδή ανάπτυξης και βελτίωσης του λογισμικού είναι αμφίδρομη και ανατροφοδοτούμενη. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά, ελέγχονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, βελτιώνονται αν χρειαστεί και παράγονται νέα αποτελέσματα. Σημαντικό ρόλο βέβαια στον υπολογισμό της ενεργειακής εναπόθεσης παίζει η γνώση με ακρίβεια του προφίλ της δέσμης, της συνάρτησης δηλαδή κατανομής των ηλεκτρονίων της δέσμης γύρω από το σημείο εστίασής της.

Κατά την ανάπτυξη του λογισμικού δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη διατήρηση κατά το δυνατόν μικρών χρόνων υπολογισμού και περιορισμό της απαιτούμενης μνήμης, ώστε το λογισμικό να χρησιμοποιείται με ευκολία σε ένα απλό προσωπικό υπολογιστή και οι προσομοιώσεις να μπορούν να υλοποιηθούν σε εύλογο χρόνο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν διανυσματικές προγραμματιστικές τεχνικές ελάττωσης του χρόνου υπολογισμού, χρήση πινάκων και παράλληλης επεξεργασίας όπου είναι δυνατό. Για το ίδιο λόγο επιλέχθηκαν φυσικά μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης των ηλεκτρονίων που με απλές σχέσεις και τη χρήση γεννητριών τυχαίων αριθμών μπορούν να δώσουν πολύ καλά αποτελέσματα. Η προσομοίωση της εγγραφής είναι επίσης μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία που κυμαίνεται από μερικά λεπτά ως αρκετές ώρες ανάλογα με το μέγεθος των εγγραφόμενων σχημάτων. Για την υλοποίηση της προγραμματιστικά χρησιμοποιήθηκαν δυο μέθοδοι, η συνέλιξη συναρτήσεων με τη χρήση ανάλυσης Fourier και η επαναληπτική πρόσθεση πινάκων. Η πρώτη μέθοδος είναι ταχύτερη, αλλά απαιτεί την εισαγωγή του εγγραφόμενου σχεδίου με τη μορφή πίνακα. Αυτό, μεγάλα αρχεία σχεδίου εγγραφής δεν είναι εφικτό γιατί τα μεγέθη των πινάκων ξεπερνούν τις δυνατότητες σε μνήμη του υπολογιστή. Η επαναληπτική μέθοδος άθροισης πινάκων αποδεικνύεται αποτελεσματικότερη σε τέτοιες περιπτώσεις, ειδικότερα αν ληφθούν υπόψη συμμετρίες των σχημάτων για την επιτάχυνση των υπολογισμών.

Ζητήματα επεξεργασίας εικόνας αντιμετωπίστηκαν για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε εικόνες και αναζήτηση σχημάτων. Θέματα όπως η αναγνώριση σχημάτων, η μετατροπή εικόνων σε ασπρόμαυρες δυαδικές, η απάλειψη του θορύβου, η εύρεση του περιγράμματος ενός σχήματος σε μια εικόνα και η ταύτιση σχημάτων αποτελούν κομβικά σημεία για την μετρολογία, όχι μόνο στην προσομοίωση της λιθογραφίας αλλά σε κάθε περίπτωση χρήσης εικόνων για πραγματοποίηση μετρήσεων.

Η πραγματοποίηση υπολογισμών και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα πειραματικά παρέχει ένα μεγάλο όφελος. Την βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων που εμπλέκονται στη διαδικασία και του βαθμού επίδρασης κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα. Δίνεται έτσι η δυνατότητα μελέτης της επίδρασης της ενέργειας των ηλεκτρονίων της χρησιμοποιούμενης δέσμης και του προφίλ της. Δέσμες ηλεκτρονίων μεγάλης ενέργειας δίνουν συναρτήσεις κατανομής ενέργειας πιο λεπτές αφού τα ηλεκτρόνια εισχωρούν στο υλικό χωρίς μεγάλες σκεδάσεις, αλλά η εναπόθεση ενέργειας είναι μικρότερη άρα και ο χρόνος εγγραφής πολύ μεγαλύτερος αφού απαιτούνται πολύ μεγαλύτερες δόσεις. Στις μεγάλες ενέργειες, τα φαινόμενα οπισθοσκέδασης ηλεκτρονίων είναι εντονότερα με αποτέλεσμα να αποθηκεύεται ενέργεια στο λιθογραφικό υλικό σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις γύρω από το σημείο ρίψης της δέσμης. Στις μεγάλες ενέργειες μειώνονται τα φαινόμενα γειτνίασης λόγω γειτονικών ρίψεων κατά την εγγραφή ενός σχήματος (intra-proximity effects) αλλά

αυξάνονται τα φαινόμενα αυτά κατά την εγγραφή γειτονικών σχημάτων (inter-proximity effects) τόσο περισσότερο όσο μεγαλύτερες και πιο πυκνές είναι οι εγγραφόμενες περιοχές. Έτσι η μορφή ενός σχήματος δεν θα είναι ίδια αν αυτό είναι απομονωμένο σε σχέση με την περίπτωση εγγραφής του σε γειτονία με άλλα πολύ μεγαλύτερα σχήματα. Για το λόγο αυτό είναι κρίσιμη η πρόβλεψη της ομοιομορφίας της κρίσιμης διάστασης.

Ένας άλλος παράγοντας στου οποίου την κατανόηση συμβάλλει η προσομοίωση είναι το είδος του λιθογραφικού υλικού και κυρίως του υποστρώματος που χρησιμοποιείται. Στις πολύ μικρές τιμές της απαιτούμενης κρίσιμης διάστασης σήμερα, η πυκνότητα και το μοριακό βάρος του υποστρώματος έχουν επίδραση στην ενεργειακή εναπόθεση που δεν μπορεί να αγνοηθεί. Εκτός από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υποστρώματα πυριτίου για απευθείας εγγραφή με ηλεκτρονική δέσμη ή για κατασκευή μασκών, στις μάσκες λιθογραφίας ακραίου υπεριώδους τα υποστρώματα είναι σύνθετα πολυστρωματικά υλικά με κύρια συστατικά το πυρίτιο και το μολυβδένιο. Οι ανάγκες πρόβλεψης σε τέτοιες περιπτώσεις είναι μεγάλες αφού οι διαδικασίες κατασκευής τέτοιων μασκών είναι χρονοβόρες και πολυέξοδες. Αύξηση του ατομικού αριθμού του υποστρώματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συνεισφοράς των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων κάνοντας εντονότερα τα φαινόμενα γειτνίασης.

Ο υπολογισμός της συνολικής ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό είναι πολύ βασικός για την σωστή εκτίμηση της τελικής μορφής των εγγραφόμενων σχημάτων. Από τις μετρήσεις της κρίσιμης διάστασης προκύπτουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για τη κατάλληλη δόση εγγραφής και τις διορθώσεις που πρέπει να γίνουν κατά την εγγραφή γειτονικών σχημάτων.

Ένα άλλο πολύ βασικό αποτέλεσμα των προσομοιώσεων είναι η πρόβλεψη της πλευρικής τραχύτητας και της διακύμανσης του πλάτους γραμμής. Στις πολύ μικρές διαστάσεις η τραχύτητα εμφανίζει μεγάλη επίδραση στη λειτουργία των συσκευών. Το αποτέλεσμά της δεν έχει ακόμη κατανοηθεί με ακρίβεια και αναμένεται να μελετηθεί καθώς η κρίσιμη διάσταση θα πέφτει στα 22 nm και στα 16 nm. Έχει παρατηρηθεί από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ότι η τραχύτητα εξαρτάται από το μήκος της μετρούμενης πλευράς. Για το λόγο αυτό δεν αποτελεί ένα μέγεθος που μπορεί να χαρακτηρίσει τις δομές που έχουν εγγραφεί. Έως σήμερα, τα πρότυπα SEMI προτείνουν τη μέτρηση της τραχύτητας σε πολύ μεγάλα μήκη γραμμών όπου η τιμή της τραχύτητας φτάνει σε τιμή κόρου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αντικειμενική μέτρηση. Προσπάθειες γίνονται για την εύρεση άλλων παραγόντων για τον αντικειμενικότερο χαρακτηρισμό της (Constantoudis, Patsis et al. 2003). Η προσομοίωση και οι υπολογισμοί καταδεικνύουν την επίδραση της ενέργειας της δέσμης και του προφίλ της στην τραχύτητα. Περαιτέρω προσομοιώσεις της εμφάνισης του λιθογραφικού υλικού έδωσαν με καλή προσέγγιση την τελική τραχύτητα.

Όπως προαναφέρθηκε, δόθηκε βαρύτητα στην ανάπτυξη λογισμικού που θα αντιμετωπίζει συνολικά το πρόβλημα προσομοίωσης της λιθογραφίας με ηλεκτρονική δέσμη. Η εύρεση δηλαδή του τρόπου προσέγγισης του προβλήματος και ανάδειξης των βασικών τμημάτων που πρέπει να επιλυθούν. Το λογισμικό μπορεί να τρέξει σε απλό προσωπικό υπολογιστή, έχει υλοποιηθεί με τη μορφή συναρτήσεων σε Matlab, ανεξάρτητων μεταξύ τους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση της εγγραφής και πραγματοποίηση μετρήσεων.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### *A. Μορφοποίηση αρχείου CIF*

Κάθε δήλωση του CIF αποτελείται από μια λέξη κλειδί ή ένα γράμμα ακολουθούμενο από παραμέτρους και το σύμβολο του ερωτηματικού (;) στο κλείσιμο της πρότασης. Σχόλια γράφονται σε παρενθέσεις. Οι λίγες δηλώσεις του CIF συστήματος μορφοποίησης ανήκουν σε δύο κατηγορίες: γεωμετρικές δηλώσεις και δηλώσεις ελέγχου. Οι γεωμετρικές δηλώσεις είναι: LAYER για επιλογή μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων, BOX για το σχεδιασμό παραλληλογράμμων σχημάτων, WIRE για μια τεθλασμένη γραμμή, ROUNDFLASH για κύκλους, POLYGON για τυχαία πολύγωνα και CALL για το σχεδιασμό μιας άλλης υπορουτίνας. Δηλώσεις ελέγχου είναι οι DS για την έναρξη ορισμού υπορουτίνας, DF για το κλείσιμο του ορισμού της υπορουτίνας, DD για την διαγραφή του ορισμού των υπορουτινών, οι αριθμοί 0 έως 9 για πρόσθετες πληροφορίες καθοριζόμενες από το χρήστη και END για το κλείσιμο του CIF αρχείου. Όλες οι παραπάνω λέξεις-κλειδιά είναι συνήθως συντεταγμένες σε ένα ή δύο γράμματα (Rubin 1987).

Η δήλωση LAYER (ή μόνο το γράμμα L) καθορίζει το Layer στο οποίο ανήκουν όλα τα επακόλουθα σχήματα μέχρι την δήλωση του επόμενου Layer. Τη δήλωση Layer ακολουθεί το όνομα του στρώματος. Για παράδειγμα, η δήλωση: L NC; ορίζει ότι το layer θα είναι το nMOS contact. Ο ΠΙΝΑΚΑΣ Α.1 παρουσιάζει τα πιο τυπικά MOS layer ονόματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.1

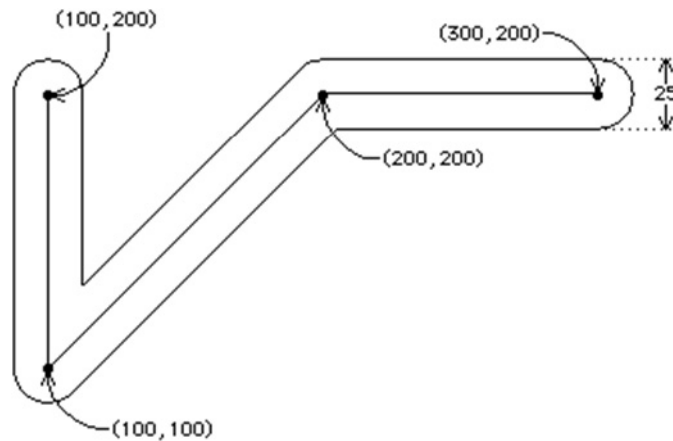
NM	nMOS metal	CMF	CMOS metal 1
NP	nMOS polysilicon	CMS	CMOS metal 2
ND	nMOS diffusion	CPG	CMOS polysilicon
NC	nMOS contact	CAA	CMOS active
NI	nMOS implant	CSG	CMOS select
NB	nMOS buried	CWG	CMOS well
NG	nMOS overglass	CC	CMOS contact
		CVA	CMOS via
		COG	CMOS overglass

Η δήλωση BOX (ή μόνο το γράμμα B) είναι η πιο συνήθης για τον καθορισμό γεωμετρικού σχήματος. Περιγράφει ένα παραλληλόγραμμο δίνοντας το μήκος, πλάτος, θέση του κέντρου και προαιρετικά την περιστροφή του. Η μορφή μιας τέτοιας δήλωσης έχει ως εξής:

B length width xpos ypos [rotation] ;

## Παράρτημα Α: Μορφοποίηση αρχείου CIF

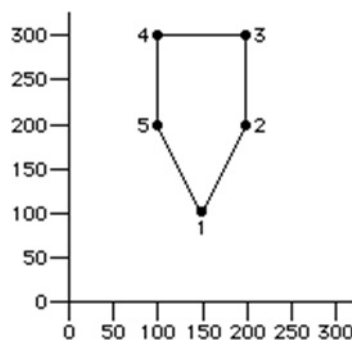
Χωρίς τη δήλωση *rotation*, οι τέσσερις αριθμοί που ακολουθούν το γράμμα *B* καθορίζουν ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με κέντρο στη θέση (*xpos*, *ypos*), μήκους *length* κατά τον άξονα *x* και πλάτους *width* κατά τον άξονα *y*. Όλοι οι αριθμοί στο CIF αρχείο είναι ακέραιοι και αναφέρονται σε centimicrons (0.01 μm) εκτός αν ορίζεται διαφορετικά σε κάποια υπορουτίνα. Το προαιρετικό πεδίο *rotation* περιέχει δύο αριθμούς που καθορίζουν το τέλος του διανύσματος στροφής η αρχή του οποίου ταυτίζεται με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Εξ' ορισμού, η τιμή του πεδίου *rotation* είναι (1,0), που σημαίνει γωνία στροφής μηδέν. Αν για παράδειγμα είναι (10,5) η γωνία στροφής είναι 30 μοίρες ανθρωπολογική. Το μήκος του διανύσματος αυτού δεν έχει καμία σημασία.



Εικόνα Α.1 Ένα παράδειγμα δήλωσης "WIRE". Η σύνταξη της δήλωσης είναι: W25 100 200 100 100 200 200 300 200;

Η δήλωση *WIRE* (ή το γράμμα *W*) χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός «μονοπατιού» οριζόμενου από μια σειρά σημείων. Μετά τη λέξη-κλειδί *WIRE* ακολουθεί η τιμή του πλάτους και ένα σύνολο ζευγών συντεταγμένων που αντιστοιχούν στα κομβικά σημεία όπως φαίνεται στην Εικόνα Α.1.

Η δήλωση *ROUNDFLASH* (ή το γράμμα *R*) περιγράφει ένα κυκλικό δίσκο δοσμένης διαμέτρου και συντεταγμένων κέντρου. Για παράδειγμα, η δήλωση: R 20 30 40; περιγράφει κύκλο ακτίνας 10 με κέντρο το σημείο (20, 40).



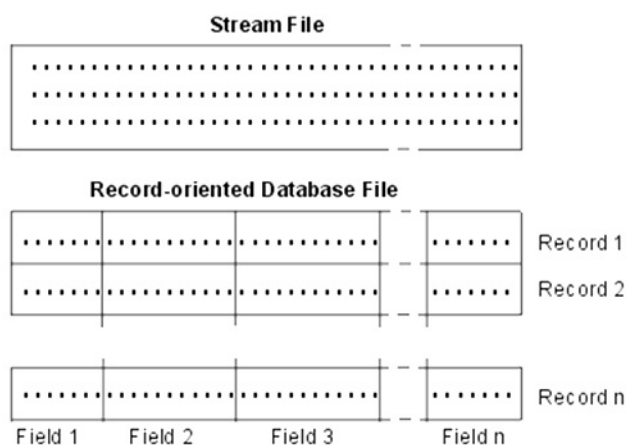
Εικόνα Α.2 Ένα παράδειγμα δήλωσης "POLYGON". Η σύνταξη της δήλωσης είναι: P 150 100 200 200 200 300 100 300 100 200;

## Παράρτημα Α: Μορφοποίηση αρχείου CIF

Η δήλωση POLYGON (ή το γράμμα P) περιγράφει ένα κλειστό πολύγωνο με μια σειρά ζευγών συντεταγμένων. Το πρώτο και τελευταίο ζεύγος συντεταγμένων θεωρούνται συνδεδεμένα εξορισμού και γι' αυτό και δεν είναι απαραίτητο να είναι τα ίδια. Η Εικόνα Α.2 δείχνει ένα παράδειγμα δήλωσης POLYGON.

## B. Μορφοποίηση αρχείου GDSII

Ένα αρχείο ροής (stream file) αποτελείται από εγγραφές (records) (Εικόνα B.1). Οι εγγραφές αποτελούνται από λέξεις των 16 bits (δύο χαρακτήρες). Αυτό σημαίνει ότι ένα τέτοιο αρχείο θα έχει πάντα άρτιο αριθμό λέξεων.



Εικόνα B.1 Οι εγγραφές ενός αρχείου ροής GDSII

Οι πρώτες δύο λέξεις καλούνται Επικεφαλίδα (Record Header). Μια εγγραφή μπορεί να αποτελείται το λιγότερο από τέσσερις χαρακτήρες (4 bytes). Οι δύο πρώτοι χαρακτήρες της Επικεφαλίδας (2 bytes) είναι ένας μη προσημασμένος ακέραιος ο οποίος καθορίζει το μήκος της εγγραφής. Έτσι το μέγιστο μήκος μιας εγγραφής φτάνει στα  $2^{16} - 1 = 65535$  bytes. Ο τρίτος χαρακτήρας αποτελεί τον τύπο της εγγραφής και δηλώνει το τμήμα της βιβλιοθήκης το οποίο περιγράφει. Τέτοιου τύπου μπορεί να είναι η αρχή μιας δομής, η αρχή ενός ορίου, το τέλος μιας δομής κ.λπ. Στον πίνακα (Να μπει στο παράρτημα?) παρατίθεται η λίστα των διαφόρων τύπων εγγραφών, οι δεκαεξαδικοί αριθμοί που αντιστοιχούν στον κάθε τύπο καθώς και μια σύντομη περιγραφή κάθε τύπου.

Ο τέταρτος και τελευταίος χαρακτήρας της Επικεφαλίδας δηλώνει τον τύπο δεδομένων που περιέχονται στην εγγραφή. Στο GDSII Stream Format Manual v6.0 περιέχονται επτά τύποι δεδομένων.

Ο πρώτος τύπος δεδομένων είναι «Κανένα Δεδομένο» με κωδικό 0x00. Αυτό σημαίνει ότι πρόκειται για εγγραφή με μήκος μόνο τέσσερα bytes.

Ο δεύτερος τύπος δεδομένων καλείται «Διάνυσμα Δυαδικών Ψηφίων». Ο κωδικός του είναι 0x01. Αποτελείται από 2 bytes και το νόημα κάθε δυαδικού ψηφίου αυτών των byte εξαρτάται από τον τύπο της εγγραφής στην οποία βρίσκεται.

Ο τρίτος τύπος δεδομένων καλείται «Προσημασμένος Ακέραιος δύο χαρακτήρων». Ο κωδικός του είναι 0x02. Είναι ένας ακέραιος από  $-2^{15} = -32768$  έως  $2^{15} = 32767$ . Αποθηκεύεται ως συμπλήρωμα του δύο με πρώτο σε σειρά τον πιο σημαντικό χαρακτήρα.

## Παράρτημα Β: Μορφοποίηση αρχείου GDSII

Ο τέταρτος τύπος δεδομένων καλείται «Προσημασμένος Ακέραιος τεσσάρων χαρακτήρων». Ισχύουν τα ίδια με τον παραπάνω τύπο με τη διαφορά ότι το μήκος του είναι 4 bytes.

Ο πέμπτος τύπος δεδομένων καλείται «Πραγματικός τεσσάρων χαρακτήρων» με κωδικό 0x04. Το πρώτο δυαδικό ψηφίο σε αυτό τον αριθμό αποτελεί το πρόσημο. Τα επόμενα επτά δυαδικά ψηφία δίνουν τον εκθέτη αν από τον αριθμό που προκύπτει αφαιρεθεί το 64. Οι επόμενοι τρεις χαρακτήρες δίνουν το mantissa το οποίο θα διαιρεθεί με  $2^{24}$ .

$$\text{τιμή} = \frac{\text{mantissa}}{2^{24}} * 16^{\text{εκθέτης}-64}$$

Ο έκτος τύπος δεδομένων καλείται «Πραγματικός οκτώ χαρακτήρων» με κωδικό 0x05. Το πρώτο δυαδικό ψηφίο και εδώ αποτελεί το πρόσημο. Τα επόμενα επτά δυαδικά ψηφία δίνουν τον εκθέτη αν από τον αριθμό που προκύπτει αφαιρεθεί το 64. Οι επόμενοι επτά χαρακτήρες δίνουν το mantissa το οποίο θα διαιρεθεί με  $2^{56}$ .

$$\text{τιμή} = \frac{\text{mantissa}}{2^{56}} * 16^{\text{εκθέτης}-64}$$

Ο έβδομος και τελευταίος τύπος δεδομένων είναι «Αλφαριθμητικό ASCII» με κωδικό 0x06. Το μήκος του αλφαριθμητικού είναι ίσο με το μήκος της εγγραφής μειωμένο κατά τέσσερις χαρακτήρες που αποτελούν την επικεφαλίδα της εγγραφής. Αν ο αριθμός που προκύπτει δεν είναι άρτιος προστίθεται στο τέλος ένα μηδενικό ώστε να προκύπτουν πάντα λέξεις των δεκαέξι δυαδικών ψηφίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ Β.1

Record type	Data type	Description
0x00 HEADER	0x02 INTEGER_2	Start of stream, contains version number of stream file.
0x01 BGNLIB	0x02 INTEGER_2	Beginning of library, plus mod and access dates. Modification: year, month, day, hour, minute, second Last access: year, month, day, hour, minute, second
0x02 LIBNAME	0x06 STRING	The name of the library, supposedly following Calma DOS conventions. Using later tools, such as ISS LTL-100, it seems more flexible than that, but it won't allow any old thing you want. If memory serves, Calma DOS allowed 6 characters in a file name, with a 2 character extension.
0x03 UNITS	0x05 REAL_8	Size of db unit in user units, size of db unit in meters. To calculate the size of a user unit in meters, divide the second number by the first.
0x04 ENDLIB	0x00 NO_DATA	End of the library
0x05 BGNSTR	0x02 INTEGER_2	Begin structure, plus create and mod dates in the same format as the BGNLIB record.
0x06 STRNAME	0x06 STRING	Name of a structure. Up to 32 characters in GDSII, A-Z, a-z, 0-9, _, ?, and \$ are all legal characters.
0x07 ENDSTR	0x00 NO_DATA	End of a structure.
0x08 BOUNDARY	0x00 NO_DATA	The beginning of a BOUNDARY element.
0x09 PATH	0x00 NO_DATA	The beginning of a PATH element.
0x0a SREF	0x00 NO_DATA	The beginning of an SREF element
0x0b AREF	0x00 NO_DATA	The beginning of an AREF element.
0x0c TEXT	0x00 NO_DATA	The beginning of a TEXT element.
0x0d LAYER	0x02 INTEGER_2	Layer specification. On GDSII this could be 0 to 63, LTL allows 0 to 255. Of course a 3 byte integer allows up to 65535...
0x0e DATATYPE	0x02 INTEGER_2	Datatype specification. On GDSII this could be 0 to 63, LTL allows 0 to 255. Of course a 3 byte integer allows up to 65535...
0x0f WIDTH	0x03 INTEGER_4	Width specification, negative means absolute In data base units.

Παράρτημα Β: Μορφοποίηση αρχείου GDSII

0x10 XY	0x03 INTEGER_4	An array of XY coordinates. An array of coordinates in data base units. Path: 2 to 200 pairs in GDSII Boundary: 4 to 200 pairs in GDSII Text: Exactly 1 pair SREF: Exactly 1 pair AREF: Exactly 3 pairs 1: Array reference point 2: column_space*columns+reference_x 3: row_space*rows+reference_y Node: 1 to 50 pairs in GDSII Box: Exactly 5 pairs
0x11 ENDEL	0x00 NO_DATA	The end of an element.
0x12 SNAME	0x06 STRING	The name of a referenced structure.
0x13 COLROW	0x02 INTEGER_2	Columns and rows for an AREF. Two 2 byte integers. The first is the number of columns. The second is the number of rows. In an AREF of course. Neither may exceed 32767
0x14 TEXTNODE	0x00 NO_DATA	"Not currently used" per GDSII Stream Format Manual, v6.0. Would be the beginning of a TEXTNODE element if it were.
0x15 NODE	0x00 NO_DATA	The beginning of a NODE element.
0x16 TEXTTYPE	0x02 INTEGER_2	Texttype specification. On GDSII this could be 0 to 63, LTL allows 0 to 255. Of course a 3 byte integer allows up to 65535...
0x17 PRESENTATION	0x01 BIT_ARRAY	Text origin and font specification. bits 15 to 0, l to r bits 0 and 1: 00 left, 01 center, 10 right bits 2 and 3: 00 top 01, middle, 10 bottom bits 4 and 5: 00 font 0, 01 font 1, 10 font 2, 11 font 3,
0x18 SPACING	UNKNOWN	"Discontinued" per GDSII Stream Format Manual, v6.0.
0x19 STRING	0x06 STRING	Character string. Up to 512 char in GDSII
0x1a STRANS	0x01 BIT_ARRAY	Bits 15 to 0, l to r 15=refl, 2=absmag, 1=absangle, others reserved for future use.
0x1b MAG	0x05 REAL_8	Magnification, 1 is the default if omitted.
0x1c ANGLE	0x05 REAL_8	Angular rotation factor in ccw direction. If omitted, the default is 0.
0x1d UINTEGER	UNKNOWN	User integer, used only in V2.0, when instreamed, should be converted to property attribute 126.
0x1e USTRING	UNKNOWN	User string, used only in V2.0, when instreamed, should be converted to property attribute 127.
0x1f REFLIBS	0x06 STRING	Names of the reference libraries. Starts with name of the first library and is followed by the second. There are 44 bytes in each, NULLS are used for padding, including filling in an entire unused field.
0x20 FONTS	0x06 STRING	Names of the textfont definition files. 4 44 byte fields, padded with NULLS if a field is unused or less than 44 bytes.
0x21 PATHTYPE	0x02 INTEGER_2	Type of path ends. 0: Square ended paths 1: Round ended 2: Square ended, extended 1/2 width 4: Variable length extensions, CustomPlus The default is 0
0x22 GENERATIONS	0x02 INTEGER_2	Number of deleted or backed up structures to retain. Seems a bit odd in an archive. From 2-99, default is 3.
0x23 ATTRTABLE	0x06 STRING	Name of the attribute definition file. Max size 44 bytes.
0x24 STYPTABLE	0x06 STRING	"Unreleased feature" per GDSII Stream Format Manual, v6.0.
0x25 STRTYPE	0x02 INTEGER_2	"Unreleased feature" per GDSII Stream Format Manual, v6.0
0x26 ELFLAGS	0x01 BIT_ARRAY	Flags for template and exterior data. bits 15 to 0, l to r0=template, 1=external data, others unused
0x27 ELKEY	0x03 INTEGER_4	"Unreleased feature" per GDSII Stream Format Manual, v6.0.
0x28 LINKTYPE	UNKNOWN	"Unreleased feature" per GDSII Stream Format Manual, v6.0.
0x29 LINKKEYS	UNKNOWN	"Unreleased feature" per GDSII Stream Format Manual, v6.0.



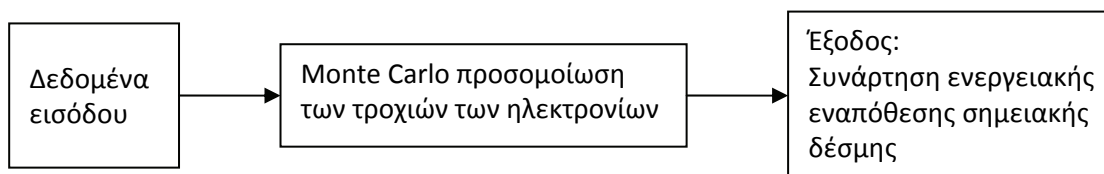
Παράρτημα Β: Μορφοποίηση αρχείου GDSII

0x2a NODETYPE	0x02 INTEGER_2	Nodetype specification. On GDSII this could be 0 to 63, LTL allows 0 to 255. Of course a 3 byte integer allows up to 65535.
0x2b PROPATTR	0x02 INTEGER_2	Property number.
0x2c PROPVALUE	0x06 STRING	Property value. On GDSII, 128 characters max, unless an SREF, AREF, or NODE, which may have 512 characters.
0x2d BOX	0x00 NO_DATA	The beginning of a BOX element.
0x2e BOXTYPE	0x02 INTEGER_2	Boxtype specification. On GDSII this could be 0 to 63, LTL allows 0 to 255. Of course a 3 byte integer allows up to 65535.
0x2f PLEX	0x03 INTEGER_4	Plex number and plexhead flag. The least significant bit of the most significant byte is the plexhead flag. Because of this, you can "only" have 2 <sup>24</sup> plex groups. Or is that 2 <sup>24</sup> -1? I'm not sure if 0 is a valid plex group in a stream file.
0x30 BGNEXTN	0x03 INTEGER_4	Path extension beginning for pathtype 4 in CustomPlus. In database units, may be negative.
0x31 ENDTEXTN	0x03 INTEGER_4	Path extension end for pathtype 4 in CustomPlus. In database units, may be negative.
0x32 TAPENUM	0x02 INTEGER_2	Tape number for multi-reel stream file.
0x33 TAPECODE	0x02 INTEGER_2	Tape code to verify that the reel is from the proper set. 12 bytes that are supposed to form a unique tape code.
0x34 STRCLASS	0x01 BIT_ARRAY	Calma use only. In stream files created by non-Calma programs, this should be missing or all field should be 0.
0x35 RESERVED	0x03 INTEGER_4	Used to be NUMTYPES per GDSII Stream Format Manual, v6.0.
0x36 FORMAT	0x02 INTEGER_2	Archive or Filtered flag. 0: Archive 1: filtered
0x37 MASK	0x06 STRING	Only in filtered streams. Layers and datatypes used for mask in a filtered stream file. A string giving ranges of layers and datatypes separated by a semicolon. There may be more than one mask in a stream file.
0x38 ENDMASKS	0x00 NO_DATA	The end of mask descriptions.
0x39 LIBDIRSIZE	0x02 INTEGER_2	Number of pages in library director, a GDSII thing, it seems to have only been used when Calma INFORM was creating a new library.
0x3a SRFNAME	0x06 STRING	Sticks rule file name.
0x3b LIBSECUR	0x02 INTEGER_2	Access control list stuff for CalmaDOS, ancient. INFORM used this when creating a new library. Had 1 to 32 entries with group numbers, user numbers and access rights.



## Γ. ΚΩΔΙΚΕΣ

### Συνάρτηση υπολογισμού ενεργειακής εναπόθεσης σημειακής δέσμης



Η συνάρτηση `zoro` υπολογίζει την ενεργειακή εναπόθεση από σημειακή δέσμη ηλεκτρονίων.

Τα Δεδομένα εισόδου είναι:

1. Σύσταση υποστρωμάτων
2. Πάχη υποστρωμάτων
3. Πλήθος ηλεκτρονίων
4. Ενέργεια ηλεκτρονίων
5. Βάθος έναρξης καταγραφής ενέργειας
6. Μέγιστο βάθος καταγραφής ενέργειας
7. Πάχος κυψελίδας καταγραφής ενέργειας
8. Πλάτος κυψελίδας καταγραφής ενέργειας

```
function [nrgmat positions] = zoro(user_elemorder, user_widthorder,
user_multelems, user_multiwidths, user_multiperiod, groupN, inrg, depo_zin,
depo_zfin, depo_dz, depo_dr)
%This is the main function of electron scattering code
%Revised to be flexible in stack composition. The user determines the
%element order and their widths. Using the word 'multi' the user can
determine a multilayer.
%Example:
    user_elemorder = {'PMMA' 'Cr' 'SiO2' 'Si' 'multi' 'Si'};
    user_widthorder = [100 70 70 10 10^5];
    user_multelems = {'Mo' 'Si'};
    user_multiwidths = [2.8 4.1];
    user_multiperiod = 40;

%Choose save positions or not
savepos=true;
%Choose true to save results in files
savetofile=false;

numel_pos=100; %number of electron's positions to be saved
maxstep_pos=2*10^5;
if ~savepos
    positions=[];
else
    positions=zeros(numel_pos,maxstep_pos*3);
end

tic;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% INITIALIZATIONS
%Type of data to work
datatype = @single;
%Calculate in groups of N electrons
groupN = uint16(10000);
%Initial Kinetic Energy (KeV)
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
inrg = datatype(50);
%Energy Deposition
%All dimensions in nm
depo_zin = datatype(0);
depo_zfin = datatype(125);
depo_dz = datatype(125);
depo_dr = datatype(1);
maxrad = datatype(6*10^4);
nrgmat = datatype(zeros(ceil((depo_zfin - depo_zin)/depo_dz),
ceil(maxrad/depo_dr )) ));

%Choose functions for calculations
    %mean free path
    h_calcmfp = @mfp_Salvat;
    %Energy loss
    h_calcnrgloss = @nrgloss_Salvat;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Data are structured in matrices
%The File contains 3 matrices:
%  data
%  material
%  elemorder
%Create the matrix of values to be calculated
data = datatype(zeros(groupN, 17));
    % Assign a pointer to every column of "data"
    %Starting position
    i=1;
    p_i = uint8(i);
    p_xa = uint8(i+1);
    p_ya = uint8(i+2);
    p_za = uint8(i+3);
    %Next position
    p_xb = uint8(i+4);
    p_yb = uint8(i+5);
    p_zb = uint8(i+6);
    %Scattering angles
    p_theta = uint8(i+7);
    p_phi = uint8(i+8);
    %Kinetic Energy
    p_nrga = uint8(i+9);
    p_nrgb = uint8(i+10);
    %Layer
    p_laya = uint8(i+11);
    p_layb = uint8(i+12);
    %Free Path
    p_freepath = uint8(i+13);
    %dE/ds
    p_nrgloss = uint8(i+14);
    %electrons to be scattered
    p_scatt = uint8(i+15);
    %Backscattered electrons
    p_backscatt = uint8(i+16);
data(:,p_i)=1:1:groupN;

%Number of stored materials
numofmater = uint8(6);
%Create the matrix of materials stored in memory (DataBase)
material = datatype(zeros( numofmater, 4 ));
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
%Assign pointers to the Columns of material matrix
p_density = uint8(1);          %gr/nm^3
p_atomnum = uint8(2);
p_atomass = uint8(3);        %amu
p_ionrg = uint8(4);          %KeV
%Assign pointers to the Rows of material matrix
point_mater = uint8(1:numofmater);
p_pmma = point_mater(1);
p_Si = point_mater(2);
p_Mo = point_mater(3);
p_Cr = point_mater(4);
p_Au = point_mater(5);
p_SiO2 = point_mater(6);
%Assign values to material matrix
material(p_Si, 1:4) = [ 2.33*10^-21 14 28.09 0.1723];
material(p_pmma, 1:4) = [1.22*10^(-21) 3.6 6.66 0.049];
material(p_Mo, 1:4) = [10.22*10^(-21) 42 95.95 0.4388];
material(p_Cr, 1:4) = [7.14*10^-21 24 51.9961 0.2664];
material(p_Au, 1:4) = [19.32*10^-21 79 196.96655 0.7967];
material(p_SiO2, 1:4) = [2.1977*10^-21 10 20.03 0.1356];

%Stored Material names
mater_names={};
mater_names(p_Si)={'Si'};
mater_names(p_pmma)={'PMMA'};
mater_names(p_Mo)={'Mo'};
mater_names(p_Cr)={'Cr'};
mater_names(p_Au)={'Au'};
mater_names(p_SiO2)={'SiO2'};

%Create elemorder
elemorder=[];
multelems=[];
multiposition=[];
for i=1:length(user_elemorder)
    if strcmp(cell2mat(user_elemorder(i)), 'multi')
        multiposition=i;
        for k=1:length(user_multelems)
            for ck=1:length(mater_names)
                if strcmp(cell2mat(user_multelems(k)), mater_names(ck))
                    multelems = [multelems ck];
                end
            end
        end
    end
    elemorder=[elemorder repmat(multelems, [1 user_multiperiod])];
end
for g=1:length(mater_names)
    if strcmp(cell2mat(user_elemorder(i)), mater_names(g))
        elemorder=[elemorder g];
    end
end
end
clear i k ck g;
stacklength=length(elemorder);

%Create widthorder
if ~isempty(multiposition)
    bilaywidths = zeros(1, 2*user_multiperiod);
    bilaywidths(1:2:end)=user_multiwidths(1);
    bilaywidths(2:2:end)=user_multiwidths(2);
end
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
widthorder=[user_widthorder(1:multiposition-1) bilaywidths
user_widthorder(multiposition:end)];
else
widthorder = user_widthorder;
end

for k=2:length(widthorder)
widthorder(k) = widthorder(k) + widthorder(k-1);
end
widthorder=[0 widthorder];

%Initial Energy
data(:, p_nrga) = inrg;
%Initial layer
data(:, p_laya) = datatype(1);
%Initial random phi
data(:, p_phi) = rand(groupN,1);
%Electrons to be scattered in first step
data(:, p_scatt) = 1;

%Minimum Energy
nrglimit = datatype(0.4);
%Maximum steps number
maxsteps = datatype(10^5);

%Flags and internal parameters
backscatt = datatype(0);
reflected = datatype(0);
%notreflectflag = uint32(1:groupN);
% samelay = ( 1:length(data(:,1)) )' ;
matmatrix = [];
#####
%% Choose destination folder
if savetofile
pathname = uigetdir('C:\', 'Select destination folder');
end
%% Calculating constants
R = 0.0136; %Rydberg Constant (KeV)
a0 = 52.9177 * 10^-3; %Bohr radius (nm)
NA = 6.023*10^23; %Avogadro number
ca=4*pi*a0^2*R; %to be used in lamda elastic
cb=4/R;
ct=8*pi*a0^2*R^2*NA;
ck=(1-log(2))/2;
cm=(2/exp(1))^0.75;
%% START
disp('Start calculating...')
step = datatype(1);
trash_nrg = 0;
while step < maxsteps
if mod(step, datatype(1000))==0
disp(['Step: ' num2str(step)])
end
%Construct the matrix of materials according to the current layer
matmatrix = material(elemorder(data(:,p_laya)), :);
%Calculate the free path
h_calcmfp()
%Calculate the Energy loss ( de/ds )
h_calcnrgloss()
%Calculate the Scattering Angles
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```

        scatangle
        %Calculate the new position
        [shiftx, shifty, shiftz] = sph2cart(data(:,p_phi), pi/2 -
data(:,p_theta), data(:,p_freepath));
        data(:,[p_xb p_yb p_zb]) = data(:,[p_xa p_ya p_za]) + [shiftx
shifty shiftz];
        clear shiftx shifty shiftz
        %Detect the new layer and update data(:,p_layb)
        layer_detect
        bs = ( data(:, p_za) > widthorder(2) & data(:, p_zb) <
widthorder(2) & data(:, p_backscatt)==0 );
        backscatt = backscatt + sum( bs );
        data(bs, p_backscatt)=1;
        clear bs;
        %-----
-----
        %Detect which electrons crosses a new layer
        data(:, p_scatt)=1;
        changelay = ( data(:, p_laya) ~= data(:, p_layb) );
        data(changelay, p_scatt) = 0;
        %If cross a new layer set zb to be the limit of the current layer
        % (up or down limit depending on its step direction)
        data(changelay, p_zb) = widthorder(data(changelay, p_laya)+...
(1+( data(changelay, p_layb) - data(changelay, p_laya) ) ./
abs(data(changelay,p_layb)-data(changelay,p_laya) ) ./2 );
        %If cross a new layer set layb the following or previous of laya
        data(changelay, p_layb) = data(changelay, p_laya) +...
( data(changelay, p_layb) - data(changelay, p_laya) ) ./ abs (
data(changelay, p_layb) - data(changelay, p_laya) );
        %If cross a new layer re-set free path
        data(changelay, p_freepath) = (data(changelay, p_zb) -
data(changelay, p_za))...
./ cos( data(changelay, p_theta) );
        %If cross a new layer re-set x y
        [shiftx, shifty, shiftz] = sph2cart(data(changelay,p_phi), pi/2 -
data(changelay,p_theta), data(changelay,p_freepath));
        data(changelay,[p_xb p_yb]) = data(changelay,[p_xa p_ya]) +
[shiftx shifty];
        %Save positions
        if savepos && step<maxstep_pos
            positions(data(data(:,p_i)<=numel_pos,p_i), (step-1)*3+(1:1:3))
= data(data(:,p_i)<=numel_pos,p_xb:1:p_zb);
        end
        %% Calculate final energy
        nega=(data(:,p_nrgloss).* data(:, p_freepath))>data(:,p_nrga);
        data(nega,p_nrgloss)=data(nega,p_nrga)./data(nega, p_freepath);
        data(:, p_nrgb) = data(:,p_nrga) - data(:,p_nrgloss) .* data(:,
p_freepath);
        %% Energy Deposition
        tobeposited=~(data(:,p_za) <= depo_zin & data(:,p_zb) <=
depo_zin | data(:,p_za) >= depo_zfin & data(:,p_zb) >= depo_zfin);
        if logical(sum(tobeposited))
            %Call energy deposition function
            nrgmat = nrgdepo(...
                data( tobeposited , [p_xa:p_zb p_freepath p_nrgloss]
),...
                depo_zin, depo_zfin, depo_dz, depo_dr , nrgmat, maxrad);
        end
        %Delete reflected electrons
        cur_reflect=data(:,p_zb)<=0;
        data(cur_reflect,:)=[];

```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```

    reflected = reflected + sum(cur_reflect);
    %Delete transmitted electrons
    data(data(:, p_zb)>10^8,:)=[];
    %Clear data matrix from very low energy electrons
    low_nrg = data(:,p_nrgb) <= nrglimit;
    trash_nrg = trash_nrg + sum(data( low_nrg, p_nrgb));
    data(low_nrg,:)=[];
    %Renew matrix data
    data(:,p_xa : p_za) = data(:,p_xb : p_zb);
    data(:, p_nrga) = data( :, p_nrgb);
    data(:, p_laya) = data(:, p_layb);
    step = step + 1;
    if isempty( data )
        break
    end
%END WHILE
end

%Total time
totaltime=toc;
totaltime=totaltime/60; %Convert time to minutes
%Find Energy per unit volume per electron
nrgmat = nrgmat ./ repmat(pi * ((1:ceil(maxrad/depo_dr)).^2-...
    (0:ceil(maxrad/depo_dr)-1).^2)*depo_dr^2 * depo_dz,
length(nrgmat(:,1)),1) ./ datatype(groupN) ;
%% Save results and info
if savetofile
    %mkdir(pathname, ['Lines' mat2str(bsize)])
    %pathname=[pathname '\' 'Lines' mat2str(bsize)];
    fid=fopen([pathname 'info.txt'],'wt');
    time=clock;
    fprintf(fid,[date num2str(time(4)) ':' num2str(time(5)) '\n']);
    fprintf(fid,['mfp function:' '\n']);
    fprintf(fid,['Elapsed time: ' num2str(totaltime) 'minutes\n']);
    fclose(fid)
end
%% Free path (NESTED)
function mfp_Salvat
    %mfp Salvat 1983
    mt=matmatrix(:,p_atomnum).^-(2/3).*matmatrix(:,p_ionrg).^-
2.*16.*data(:,p_nrga).*R;
    %Total free path using both elastic and inelastic cross section
    data(:,p_freepath) = matmatrix(:,p_atomass) .* ...
    (NA.*matmatrix(:,p_density).*ca .* data(:,p_nrga).^-1 ...
    .* (1- ( matmatrix(:,p_atomnum).^-(4/3+ cb.* data(:,p_nrga).*
matmatrix(:,p_atomnum).^-(2).^-1 ...
    +matmatrix(:,p_atomnum).^(1/3).* (2*log(mt+1)-(1+mt.^-1).^-1)
).^-1;

    data(:,p_freepath) = - ( data(:,p_freepath) .* log( rand(
length(data(:,1)), 1 ) ) );
end
%% Energy loss (Nested)
function nrgloss_Salvat
    ksi = data( :, p_nrga) ./ matmatrix( :,p_ionrg );
    a = ct.*matmatrix(:,p_atomnum) .* (matmatrix(:,p_atomass) .*
matmatrix(:,p_ionrg)).^-1.* matmatrix(:,p_density);

    data(:,p_nrgloss) = (ksi > 6.338).*a.* (ksi.^-1) .* ( log(ksi) -
ck) ...
    + ( ksi <= 6.638 ).*a.*cm.* ksi.^(-0.5);

```



## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
end
%% Scattering angles (Nested)
function scatangle
%elastic scattering (Salvat 1983)
%Select electrons to be scattered
tobescatt =( data(:, p_scatt) == 1);
rndtheta =(rand( sum(tobescatt), 1 )).^-1;
costheta =1 - 2*matmatrix(tobescatt,p_atomnum).^ (2/3)...
.*(rndtheta.*(matmatrix(tobescatt,p_atomnum).^ (2/3)+cb.*data(tobescatt,p_nrga))-cb.*data(tobescatt,p_nrga)).^-1;
%The random scattering angle phi in the interval (0 , 2*pi)
rphi = 2 * pi * rand(sum(tobescatt), 1);
%Calculate the absolute polar angle (in referense to the z axes)
cospolar = cos(data(tobescatt,p_theta)) .* costheta -...
sin(data(tobescatt,p_theta)) .* sqrt(1 - costheta.^2)
.* cos(rphi);
%Calculate and store the absolute azimuthal
deltaphi = atan( sin(data(tobescatt,p_theta)) .* sqrt(1 - costheta
.^2) .* sin(rphi) ./ ...
(costheta - cos(data(tobescatt,p_theta)) .* cospolar) );
deltaphi(isnan(deltaphi)) = pi/2;
data(tobescatt, p_phi) = data(tobescatt, p_phi) + deltaphi;
%Store the absolute polar angle
data(tobescatt,p_theta) = acos(cospolar);
clear rndtheta beta costheta rphi cospolar deltaphi
end
%% Detect layer (Nested)
function layer_detect
for kk=1:stacklength
data( data(:, p_zb) >= widthorder(kk) & data(:, p_zb) <
widthorder(kk+1), p_layb ) = kk;
end
data( data(:, p_zb) <0 , p_layb ) = 0;
end
%END main function zoro
end

%Subfunctions
function M = create_multarr(A,B,n)
%create an array M by padding (n-1)-times B after A
if n==0
M=[];
return
end
M=[A; B];
n=n-1;
if n>1
M = create_multarr(M, B, n);
end
end
```

Η συνάρτηση **nrgdepo** καλείται εσωτερικά από τη συνάρτηση **zoro**. Με δεδομένο το ρυθμό απώλειας ενέργειας, το μήκος ελεύθερης διαδρομής και τις συντεταγμένες θέσης των ηλεκτρονίων υπολογίζει την εναπόθεση ενέργειας σε κάθε κυψελίδα.

```
function nrgmat = nrgdepo(data, zin, zfin, dz, dr, nrgmat, maxrad)
%The function nrgdepo calculates the energy deposition
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```

%pointers to data matrix
p = uint8(1:length(data(1,:)));
p_xa = p(1);
p_ya = p(2);
p_za = p(3);
p_xb = p(4);
p_yb = p(5);
p_zb = p(6);
p_length = p(7);
p_nrgloss = p(8);
%CHOOSE data type for calculations
datatype = @single;
%Unit vector in z axis
uniz = datatype([0; 0; 1]);
%The sublayers
sublays = datatype([zin : dz : zfin]);
sublays = repmat( sublays, length(data(:,1)),1 );
sublays = [sublays data(:,p_za) data(:,p_zb)];
sublays = sort(sublays,2);
%The unit vector
unir = ( data(:,p_xb:p_zb) - data(:,p_xa:p_za) ) ./
repmat(data(:,p_length),1,3);
%Intersection points with the given sublayers + starting end final points
lamda = zeros( size(sublays) );
lamda = (sublays - repmat(data(:,p_za),1,length(sublays(1,:)))) ./ ...
repmat(unir(:,p_za),1,length(sublays(1,:)));
%Determine which values of lamda are valid
lamda(find(lamda < 0 | lamda > repmat(data(:,p_length), [1
length(lamda(1,:))]) | sublays < zin | sublays > zfin ==1)) = NaN;
%Determine the maximum and minimum radiuses
Rmin = ceil( min([sqrt( sum([data(:,p_xa) data(:,p_ya)] .^2, 2) ) ; ...
sqrt( sum([data(:,p_xb) data(:,p_yb)] .^2, 2) ) ] ) ./ dr )
* dr;
Rmin = (Rmin>0) *Rmin + (Rmin==0)*dr;
Rmax = ceil( max([sqrt( sum([data(:,p_xa) data(:,p_ya)] .^2, 2) ) ; ...
sqrt( sum([data(:,p_xb) data(:,p_yb)] .^2, 2) ) ] ) ./ dr )
* dr;
%This is the matrix of cylinders
cylin = repmat([Rmin:dr:Rmax], length(data(:,1)), 1);
%Unit vector of xy projection
unir_xy = ([data(:,p_xb) data(:,p_yb)] - [data(:,p_xa) data(:,p_ya)]) ./
...
repmat( sqrt( sum( ( [data(:,p_xb) data(:,p_yb)] - [data(:,p_xa)
data(:,p_ya)] ) .^2, 2) ), 1, 2);
%Intersection points with circles in xy-plane
c_lamdaxy = [[- repmat( dot([data(:,p_xa) data(:,p_ya)], unir_xy, 2),1,
length(cylin(1,:))) + cylin] ...
[- repmat( dot([data(:,p_xa) data(:,p_ya)], unir_xy, 2),1,
length(cylin(1,:))) - cylin]];
%Intersection points with circles
c_lamda = c_lamdaxy ./ repmat( dot(unir(:,1:2),unir_xy,2),1,
length(c_lamdaxy(1,:)));
%Determine which values of c_lamda are valid
c_lamda(find( c_lamda <= 0 | c_lamda >= repmat(data(:,p_length), 1,
length(c_lamda(1,:))) )) = NaN;
%Points of intersection with cylinders and sublayers
lamda = sort( [lamda c_lamda], 2);
[lamda, m, n] = unique(lamda','rows');
lamda = lamda';
% the pointers of layers

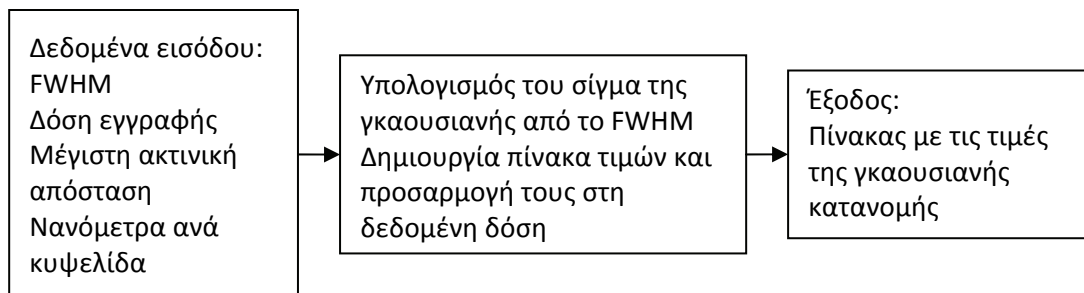
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
p_lay = repmat(data(:,p_za),1,length(lamda(1,:))-1) + ...
    ((lamda(:,2:end)+ lamda(:,1:end-1))./2).*
repmat(unir(:,3),1,length(lamda(1,:))-1);
p_lay = ceil((p_lay - zin)./dz) ;
%Pointers of cylinders
p_cyl = ceil(sqrt((repmat(data(:,p_xa),1,length(lamda(1,:))-1) + ...
    ((lamda(:,2:end)+ lamda(:,1:end-1))./2).*
repmat(unir(:,1),1,length(lamda(1,:))-1) ).^2 + ...
    (repmat(data(:,p_ya),1,length(lamda(1,:))-1) + ...
    ((lamda(:,2:end)+ lamda(:,1:end-1))./2).*
repmat(unir(:,2),1,length(lamda(1,:))-1) ).^2) ./ dr);
p_cyl(find(p_cyl==0))=1;
%The matrix of segments
lamda = ( lamda(:, 2:end) - lamda(:,1:end-1) ) .* repmat(data(:,p_nrgloss),
1, length(lamda(1,:)) -1 );
for iter_lay = 1 : ceil( (zfin-zin)/dz )
    curr_seg = lamda(find(p_lay == iter_lay) );
    curr_cyl = p_cyl( find(p_lay == iter_lay) );
    if ~isempty(curr_cyl)
        for iter_cyl = min(min(curr_cyl)) : min( max(max(curr_cyl)) ,
ceil(maxrad/dr) )
            nrgmat( iter_lay, iter_cyl) = nrgmat( iter_lay, iter_cyl) +
sum( curr_seg( find(curr_cyl == iter_cyl) ) );
        end
    end
end
end
```

### Συναρτήσεις δημιουργίας γκαουσιανού προφίλ δέσμης

Η συνάρτηση **gaussbeam** παράγει πίνακα που αναπαριστά το γκαουσιανό προφίλ μιας δέσμης ηλεκτρονίων δεδομένου Full Width Half Maximum (FWHM) και της δόσης εγγραφής.



```
function S = gaussbeam(FWHM,Dose,max_r,lamda)
%Produces a lxn gaussian matrix given the FWHM and the Dose
%FWHM in nm
%Dose in uC/cm^2
%max_r in nm is the maximum radial distance
%lamda in nm/pixel

%% Calculation of sigma. In a gaussian sigma=FWHM/2.3548
sigma=FWHM/2.3548; %in nm
%% Calculation of number of electrons given the Dose
%Qe=1.6*10^-19; %in Coulombs
Nel=round( (Dose*FWHM^2*10^-1)/1.6); %Electrons
%% Gaussian
r = 0:lamda:max_r;
%Normalized Gaussian
S = ((sigma*sqrt(2*pi))^(-1))*exp( -( r .^2 ./ (2*sigma^2) ) );
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

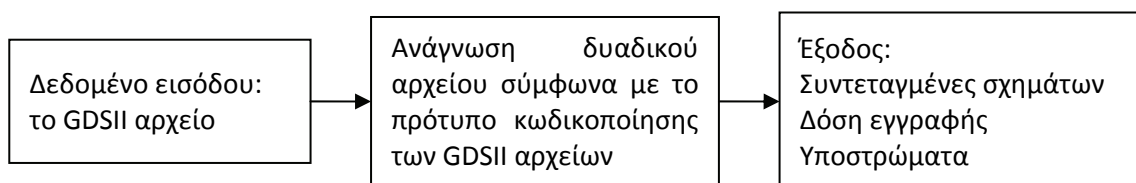
```
r=[r(end:-1:2)*(-1) r];  
S=[S(end:-1:2) S];  
S=S*0.021*Nel;  
figure; plot(r,S,'r'); hold on;
```

Η συνάρτηση **gaussbeam\_stat** παράγει πίνακα με τη στατιστική αναπαράσταση του γκαουσιανού προφίλ μιας δέσμης ηλεκτρονίων δεδομένου Full Width Half Maximum (FWHM) και της δόσης εγγραφής.

```
function M=gaussbeam_stat(FWHM,N,dim)  
%Creates a beam with gaussian profile  
%Creates a dimXdim matrix, randomly putting N electrons using the  
%normal distribution with given sigma.  
  
% Create N x-coordinates and N y-coordinates  
%Calculation of sigma. Because in a gaussian sigma=FWHM/2.3548  
sigma=FWHM/2.3548;  
x=round(normrnd(round(dim/2),sigma,[1 N]));  
y=round(normrnd(round(dim/2),sigma,[1 N]));  
% Convert x,y coordinates to Linear matrix indexing  
%L is a 1xN array. x and y represents the subscripts of the NxN matrix and  
%L is the linear indexing of the same matrix.  
%Each of N elements-electrons of L contains the position of the  
%corresponding electron in M matrix using linear indexing  
L=(x-1).*dim + y;  
% Create dimxdim matrix  
%distribute the N electrons as given by the linear indexing L  
M=zeros(dim,dim);  
M(:)=hist(L,1:1:dim*dim);
```

### Συναρτήσεις ανάγνωσης GDSII και CIF αρχείων

Η συνάρτηση **rgds** διαβάζει GDSII αρχεία. Επιστρέφει πίνακες με τις συντεταγμένες των σχημάτων που περιέχονται στο GDSII αρχείο καθώς και πληροφορίες για τις δόσεις εγγραφής αν υπάρχουν και το στρώμα στο οποίο βρίσκεται το κάθε σχήμα.



```
function [bricksx bricksy layinfo doses] = rgds(varargin)  
%Read GDSII files. This function returns the boundary coordinates of a  
%GDSII file  
%varargin could be the path of GDS file to be open  
%ATTENTION: Pointers to datatypes and record types start from 0 according  
to GDSII file format  
%Data base of data types  
datatypes = {'No data present', 'uint8', 'int16', 'int32', 'Four byte  
real', 'Eight byte real', 'uchar'};  
%datatypes(2) is a bin array  
%Size in Bytes for different datatypes  
szofdatatype = [0;1;2;4;4;8;1];
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
%%Data base of record types
recordtypes = {'HEADER', 'BGNLIB', 'LIBNAME', 'UNITS', 'ENDLIB', 'BGNSTR',
'STRNAME',...
    'ENDSTR', 'BOUNDARY', 'PATH', 'SREF', 'AREF', 'TEXT', 'LAYER',
'DATATYPE', 'WIDTH',...
    'XY', 'ENDEL', 'SNAME', 'COLROW', 'TEXTNODE', 'NODE', 'TEXTTYPE',
'PRESENTATION',...
    'SPACING', 'STRING', 'STRANS', 'MAG', 'ANGLE', 'UINTEGER', 'USTRING',
'REFLIBS',...
    'FONTS', 'PATHTYPE', 'GENERATIONS', 'ATTRTABLE', 'TYPTABLE', 'STRTYPE',
'ELFLAGS',...
    'ELKEY', 'LINKTYPE', 'LINKKEYS', 'NODETYPE', 'PROPATTR', 'PROPVALUE',
'BOX', 'BOXTYPE',...
    'PLEX', 'BGNEXTN', 'ENDTEXTN', 'TAPENUM', 'TAPECODE', 'STRCLASS',
'RESERVED', 'FORMAT',...
    'MASK', 'ENDMASKS', 'LIBDIRSIZE', 'SRFNAME', 'LIBSECURE'};
%Pointers to recordtypes
    boundary = 8;
    path = 9;
    sref = 10;
    aref = 11;
    text = 12;
    layer = 13;
    node = 21;
    box = 45;
    xy = 16;
bricksx = [];
bricksy = [];
layinfo = [];
doses=[];
units=[];
%Serial number of record
sn=0;
%Boundary Flag
flagB=0;
%Open GDS file
if isempty(varargin)
    [filename,pathname]=uigetfile('*.gds','Choose GDS
file','C:\MATLAB7\Tsik_Matlab\GDSII\');
    if filename == 0
        return
    end
    file2open=[pathname filename];
else
    file2open=cell2mat(varargin);
end
fid = fopen(file2open,'r');
eofstat = 0;
%READ CONTINUESLY SUCCESSIVE RECORDS UNTIL THE END OF THE FILE
%Many files are padded with zeros!!!
while eofstat==0
    sn=sn+1;
    content = [];
    %READ HEADER (Length 2 bytes, Record type 1 byte, Datatype 1 byte)
    %Length of record in bytes (2 bytes)
    len = fread(fid,1,'uint16','b');
    %Look for EOF
    eofstat = feof(fid);
    if eofstat==1
        disp('EOF')
        break
    end
end
```

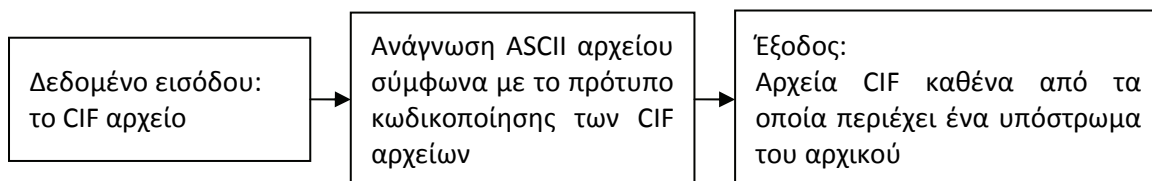
## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
end
%Record type (1 byte)
rec_type = fread(fid,1,'uint8');
%Data type (1 byte)
dat_type = fread(fid,1,'uint8');
if isempty(len)
    disp('Empty len ???')
    break
end
if len == 0
    disp('len = 0 ???');
    break
end
%flagB indicates the struction
switch rec_type
    case boundary
        flagB = boundary;
    case path
        flagB = path;
    case text
        flagB = text;
    case sref
        flagB = sref;
    case aref
        flagB = aref;
    case node
        flagB = node;
    case box
        flagB = box;
end
%READ CONTENTS OF THE RECORD (It can be special 4-bytes or 8-bytes real
numbers or one of the common types datatypes)
if ( dat_type ~= 0 && len > uint16(4) )
    if (dat_type == 4)
        %Read special Four Byte Real numbers
        numofbytes =(len-4)/4;
        for k=1:numofbytes
            prosimo = fread( fid, 1, 'ubit1' );
            prosimo = (proximo==0) + (-1)*(proximo==1);
            exponent = fread( fid, 1, 'ubit7' );
            mantissa = fread(fid,1,'ubit24');
            value = prosimo*(mantissa/2^24) * 16^(exponent-64);
            content = [content; value];
        end
    elseif (dat_type == 5)
        %Read special Eight Byte Real numbers
        numofbytes =(len-4)/8;
        for k=1:numofbytes
            prosimo = fread( fid, 1, 'ubit1','b' );
            prosimo = (proximo==0) + (-1)*(proximo==1);
            exponent = fread( fid, 1, 'ubit7','b' );
            mantissa = fread(fid,1,'ubit56','b');
            value = [proximo*(mantissa/2^56) * 16^(exponent-64)];
            content = [content; value];
        end
    else
        content = fread( fid, (len-4)/szofdatatype(dat_type+1),
cell2mat(datatypes(dat_type+1)), 'b' );
    end
end
%Read Layer
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
if rec_type == layer
    currentlay=content;
end
%Define units
if rec_type == 3
    units = content;
    unit_conv = units(2)/units(1);
    disp(['Unit conversion: ' num2str(unit_conv)])
end
%Read Coordinates
if rec_type == xy
    if flagB == boundary
        xcoord = content(1:2:end);
        ycoord = content(2:2:end);
        bricksx = [bricksx; min(xcoord(:)) max(xcoord(:))] ;
        bricksy = [bricksy; min(ycoord(:)) max(ycoord(:))] ;
        layinfo = [layinfo; currentlay];
    else
        disp(content)
    end
elseif rec_type == 0
    disp(['Version: ' num2str(content)])
elseif rec_type == 1 || rec_type == 5
    disp('Modification')
    j=0; disp(['year: ' num2str(content(j+1)) ', month: '
num2str(content(j+2)) ', day: ' num2str(content(j+3)) ', time: '
num2str(content(j+4)) ':' num2str(content(j+5)) ':'
num2str(content(j+6))]);
    disp('Last access')
    j=6; disp(['year: ' num2str(content(j+1)) ', month: '
num2str(content(j+2)) ', day: ' num2str(content(j+3)) ', time: '
num2str(content(j+4)) ':' num2str(content(j+5)) ':'
num2str(content(j+6))]);
    elseif rec_type==14
        doses=[doses; content];
    end
    currpos = ftell(fid);
    eofstat = feof(fid);
end
%End while
disp(['Current position: ' num2str(currpos)])
fclose(fid);
disp(['Total number of records: ' num2str(sn)])
doses=doses*10^-3;
```

Η κλήση της συνάρτησης διαβάζει ένα αρχείο CIF, βρίσκει τα στρώματα (layers) από τα οποία αποτελείται και δημιουργεί ισάριθμα αρχεία CIF καθένα από τα οποία περιέχει ένα μόνο στρώμα.



```
function rcif_multilayer(varargin)
%Syntax: rcif_multilayer(varargin)
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
%
%The function rcif_multilayer reads a *.cif file and creates *.cif
%files each one containing only one layer of the parent file.

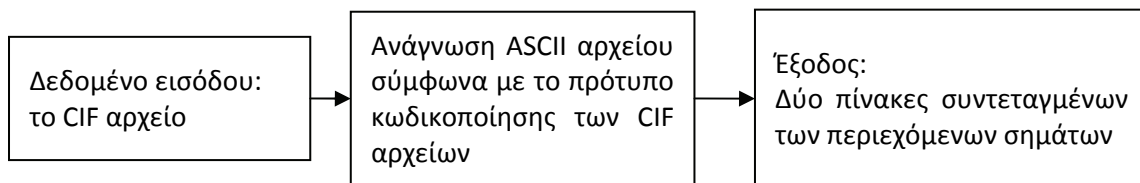
%Determine the *.cif file to be opened
if isempty(varargin)
    [filename,pathname] = uigetfile('*.cif','Choose CIF file','F:\');
    file2open = [pathname '\\' filename];
    if filename == 0
        return
    end
else
    cell2mat( varargin );
    file2open = cell2mat( varargin );
end
[spath,fname,fext,fversn] = fileparts( file2open );
%Create a new folder to save in there the new files
newfolder=['Layers_of_' fname];
mkdir(spath,newfolder);
%Open the *.cif file
cif_id = fopen(file2open,'r');
numoflayers = 0;
intro = [];
layers = 0;
while 1
    newline = fgetl( cif_id );
    %Save first lines as "introduction" until find a new layer
    if ~isempty(newline) & newline(1) == 'L', break, end
    if ~isempty(newline)
        intro = [intro '\n' newline];
    end
end
while 1
    if newline(1) == 'L'
        laynum = newline( find( newline ~= ' ' ) );
        laynum = str2num(laynum(2:end-1));
        %Detect if its a new layer or not
        if isempty( find(laynum == layers) )
            %In case of a new layer open a new file and write introduction
            layers = [layers laynum];
            lay_fname = [spath '\\' newfolder '\\' fname '_' 'L'
num2str(laynum) '.cif'];
            lay_id = fopen( lay_fname,'a');
            fprintf( lay_id,'%s\n', intro);
            fprintf( lay_id, '%s\n', newline );
        end
        %Open the corresponding layer
        lay_fname = [spath '\\' newfolder '\\' fname '_' 'L' num2str(laynum)
'.cif'];
        lay_id = fopen( lay_fname,'a');
        newline = fgetl( cif_id );
        while ( newline(1) == 'P' )
            fprintf( lay_id, '%s\n', newline);
            newline = fgetl(cif_id);
        end
        elseif newline(1) ~= 'P' && newline(1) ~= 'L'
            while 1
                for i=2:length(layers)
                    lay_fname = [spath '\\' newfolder '\\' fname '_' 'L'
num2str(layers(i)) '.cif'];
                    lay_id = fopen( lay_fname,'a');
```



## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
        fprintf( lay_id, '%s\n', newline);
    end
    newline = fgetl(cif_id);
    if ~ischar(newline), break, end
end
break
end
end
fclose('all');
```

Η συνάρτηση `rcif_mat` διαβάζει CIF αρχεία και επιστρέφει τις συντεταγμένες των περιεχόμενων σχημάτων.



```
function [bricksx bricksy] = rcif_mat(varargin)
%Syntax: [bricksx bricksy] = rcif(varargin)
%The function rcif reads *.cif files.
%varargin: could be the path of the cif file
%The output are two matrices 2xn where n is the number of polygons
%bricksx contains the x-coordinates and bricksy the y-coordinates.
%Each polygon is represented by 2 points

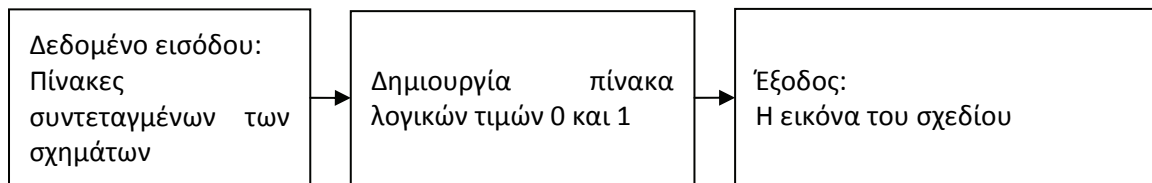
bricksx = [];
bricksy = [];
if isempty(varargin)
    [filename,pathname]=uigetfile('*.cif','Choose CIF file','F:\');
    if filename == 0
        return
    end
    file2open=[pathname filename];
else
    file2open=cell2mat(varargin);
end
fid = fopen(file2open,'r');
numofpol=0;
while 1
    strpolyg = fgetl(fid);
    if( ~isempty(strpolyg) )
        if( strpolyg(1)=='P' )
            numofpol=numofpol+1;
            p = getpolygon(strpolyg);
            [A B]=par2brick(p);
            clear p
            bricksx=[bricksx ; [A(1) B(1)] ];
            bricksy=[bricksy ; [A(2) B(2)] ];
        end
    end
    if ~ischar(strpolyg), break, end
end
fclose('all');
%Subfunction
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
function p=getpolygon(strpolyg)
    if (strpolyg(end)==';')
        strpolyg=strpolyg(1:end-1);
    end
    spaces=find(strpolyg == ' ');
    spaces=[spaces length(strpolyg)+1];
    for (i=1:length(spaces)-1)
        g=strpolyg(spaces(i)+1:spaces(i+1)-1);
        comma=find(g==' ');
        x=g(1:comma-1);
        y=g(comma+1:end);
        x=str2num(x);
        y=str2num(y);
        if (exist('p'))
            p=[p; [x y]];
        else
            p=[x y];
        end
    end
    end
    p=[p; [p(1,1) p(1,2)]];
end
```

### Συνάρτηση δημιουργίας της εικόνας του εγγραφόμενου σχεδίου

Η συνάρτηση `bricks2bw` δημιουργεί ένα λογικό πίνακα με τιμές 1 στις περιοχές των σχημάτων με δεδομένα τις συντεταγμένες τους. Οι συντεταγμένες περιέχονται στους πίνακες `bricksx`, `bricksy` οι οποίοι έχουν προκύψει από την ανάγνωση αρχείων GDSII ή CIF. Οι τιμές τους είναι σε νανόμετρα. Η τυπική παράμετρος `lamda` έχει μονάδες nm/pixel και εκφράζει το μήκος σε νανόμετρα που αντιστοιχεί σε ένα pixel.



```
function M=bricks2bw(bricksx, bricksy, lamda, plaisio)
%Create a black and white matrix from bricks

datatype = @logical;
plaisio = round(plaisio/lamda);
if size(plaisio)==1
    plaisio_x=plaisio;
    plaisio_y=plaisio;
elseif size(plaisio)==[1 2]
    plaisio_x=plaisio(1);
    plaisio_y=plaisio(2);
end
%Convert coordinates of polygons to pixels
bricksx = floor(bricksx / lamda);
bricksy = floor(bricksy / lamda);
%Define the cartesian coordinates of the first cell of the canvas
%matrix ( org )
A(1) = min(min(bricksx));
A(2) = min(min(bricksy));
B(1) = max(max(bricksx));
B(2) = max(max(bricksy));
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
org(1) = min(min(bricksx)) - plaisio_x;
org(2) = max(max(bricksy)) + plaisio_y;
%Convert coordinates of polygons to the new point of origin
bricksx = bricksx - org(1) +1;
bricksy = org(2) - bricksy +1;
%Sort Coordinates
bricksx = sort(bricksx, 2);
bricksy = sort(bricksy, 2);
%Create the canvas
m = abs(B(2)-A(2)) + 2*plaisio;
n = abs(B(1)-A(1)) + 2*plaisio;
M = datatype(zeros(m,n));
%Set ones to the polygons position
for p=1:length(bricksx(:,1))
    M(bricksy(p,1):bricksy(p,2),bricksx(p,1):bricksx(p,2))=1;
end
figure;
imshow(M);
%Subfunction
function savedges(pathname, filename, bricksx, bricksy)

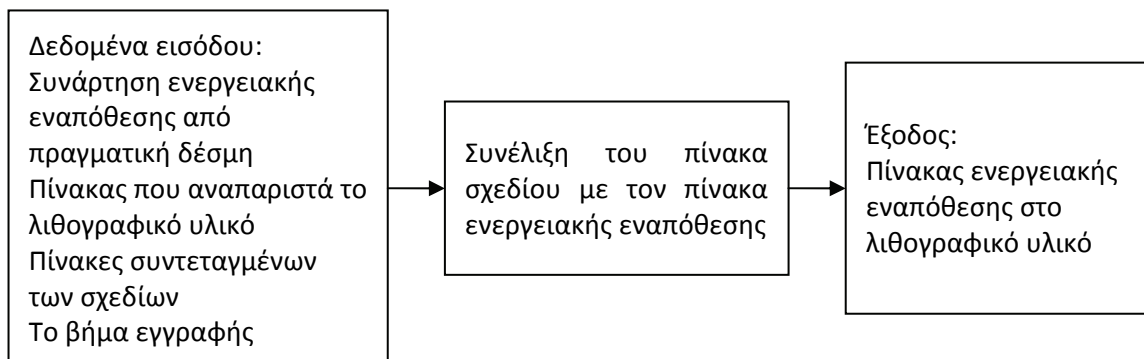
%Save coordinates in pixels in relation to the origin of the matrix
proposename = filename(1:(find(filename=='.')-1));
proposename = [proposename '_cif2bw_coord.txt'];
fid = fopen([pathname proposename], 'w')

for m=1:length(bricksx(:,1))
    M=[bricksx(m,1) bricksy(m,1) bricksx(m,2) bricksy(m,1);
        bricksx(m,2) bricksy(m,1) bricksx(m,2) bricksy(m,2);
        bricksx(m,2) bricksy(m,2) bricksx(m,1) bricksy(m,2)
        bricksx(m,1) bricksy(m,2) bricksx(m,1) bricksy(m,1)];
    fprintf(fid, '%d %d %d %d\n', M);
end

fclose(fid);
```

### Συνάρτηση υπολογισμού της συνολικής ενεργειακής εναπόθεσης

Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί την εγγραφή ενός σχεδίου. Υπολογίζει δηλαδή την συνολική ενεργειακή εναπόθεση στο λιθογραφικό υλικό



```
function M=LithoWriter(S,M,bricksx,bricksy,step)
%This function reads a cif file and "writes" it in a matrix with
%an electron beam
%S is 1xN matrix representing the energy deposition of the real beam
%M is the canvas
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```

%Create 2D energy deposition matrix
Tsf = arr2mat(S);
datatype = @single;
%Deside whether to use beam margins or not
beam_marg=1;
if beam_marg==1
    %Leave a margin in rectangles before start writing
    startmargin = round(step/2); %Determine the margin to start writing
    bricksx(:,1)=bricksx(:,1)+startmargin;
    bricksx(:,2)=bricksx(:,2)-startmargin;
    bricksy(:,1)=bricksy(:,1)+startmargin;
    bricksy(:,2)=bricksy(:,2)-startmargin;
end
%Deside whether to create a second brush or not
min_dx = min( bricksx(:,2) - bricksx(:,1) +1);
min_dy = min( bricksy(:,2) - bricksy(:,1) +1);
multx = max([1 floor( (min_dx-1)/step )+1]);
multy = max([1 floor( (min_dy-1)/step )+1]);
if multx~=1 || multy~=1
    %Create a second brush
    disp('Creating the second brush...')
    tic;
    NS = create_EDFbrush(Tsf, multx, multy, step, datatype);
    %Start writing with the second (big) brush with step multx*step in x
    %axes and multy*step in y axes
    tic;
    startmargin_x = round((multx-1)*step/2);
    startmargin_y = round((multy-1)*step/2);
    for i = 1 : length(bricksx(:,1))
        stepx=max([1 (multx-1)*step]);
        stepy=max([1 (multy-1)*step]);
        startx=bricksx(i,1)+ startmargin_x;
        endx=max([startx bricksx(i,2)- startmargin_x]);
        starty=bricksy(i,1)+ startmargin_y;
        endy=max([starty bricksy(i,2)- startmargin_y]);
        for k = starty : stepy : endy
            for j = startx : stepx : endx
                M = shoot(M,NS,k,j);
            end
        end
        bricksy(i,1)=k+floor((multy-1)*step/2)+1;
        bricksx(i,1)=j+floor((multx-1)*step/2)+1;
    end
    disp(['Time spend to write with the big brush: ' mat2str(toc)])
end
%Determine the not written areas
ix = ( bricksx(:,2)-bricksx(:,1) -2*startmargin_x )/(multx*step);
iy = ( bricksy(:,2)-bricksy(:,1) -2*startmargin_y )/(multy*step);
bricksy(:,1) = bricksy(:,1) + startmargin_y + iy*multy*step;
bricksx(:,1) = bricksx(:,1) + startmargin_x + ix*multx*step;
tic;
for i = 1:length(bricksx(:,1))
    for k = bricksy(i,1) : step : bricksy(i,2)
        for j = bricksx(i,1) : step : bricksx(i,2)
            M = shoot(M,Tsf,floor(k),floor(j));
        end
    end
end
disp(['time spend to write the rest with the first brush' num2str(toc)] )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

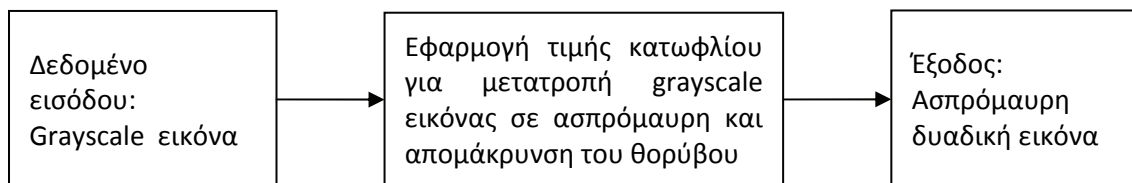
## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
function NS = create_EDFbrush(Tsf, multx, multy, step, datatype)
%Creates an EDF brick using shoot function writing a polygon with
%dimensions dx, dy using step = 'step'
multx=round(multx);
multy=round(multy);
if multx==0 || multy==0
    error('multx and multy must be non zero positive integers')
end
dx = multx*step;    %pixels
dy = multy*step;    %pixels
szS = size(Tsf);
m = szS(2) + (multx-1)*step;
n = szS(1) + (multy-1)*step;
NS = datatype(zeros(n,m));
for iy = round(szS(1)/2) : step : round(szS(1)/2) + dy-1
    for ix = round(szS(2)/2) : step : round(szS(2)/2) + dx-1
        NS = shoot(NS,Tsf,iy,ix);
    end
end

function Tsf = arr2mat(S)
%Syntax: M=arr2mat(S)
%S is an 1xn array
%M is a mxm matrix where m = floor(n/sqrt(2))
%This function Uses an array S as a 'Radius' to create a matrix
%It is used to create the energy deposition matrix

x = 1: length(S);
[X,Y] = meshgrid(x,x);
clear x
Tsf = floor(sqrt(X.^2 + Y.^2));
newlenS = max(Tsf(:));
S(end+1 : newlenS) = 0;
Tsf = S(Tsf);
clear X Y
Tsf = [flipdim( Tsf(2:end,:), 1 ); Tsf ];
Tsf = [flipdim( Tsf(:,2:end), 2 ) Tsf];
```

**Συνάρτηση (gr2bw) μετατρέπει μια εικόνα κλίμακας του γκρι σε ασπρόμαυρη με τιμές 0 και 1**



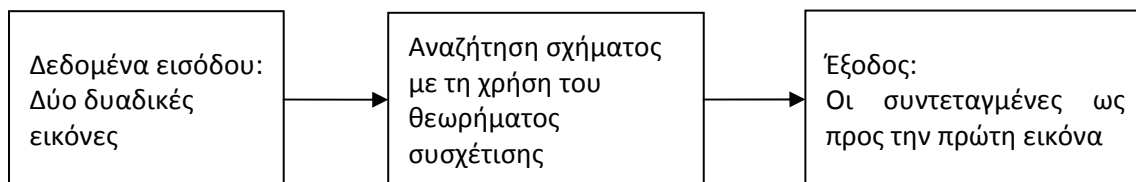
```
function M = gr2bw(M)
%Convert a grayscale SEM image to black and white filled objects
%
%Convert RGB image to grayscale
if ndims(M)==3
    M = rgb2gray(M);
end
%Crop the Image
figure;
M = imcrop(M);
%Increase the contrast of the image
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
M = imadjust(M);
figure;
imshow(M)
%Convert to black and white image
M = im2bw(M);
figure; imshow(M)
%Remove small objects
M = bwareaopen(M, 1500, 8 );
%Remove small objects from the negative image
M = ~M;
M = bwareaopen(M, 2500, 4 );
M = ~M;
%Remove small objects
M = bwareaopen(M, 3000, 4 );
figure;
imshow(M)
```

### Συνάρτηση αναζήτησης σχημάτων

Η συνάρτηση `im_match_corr` βρίσκει τη σχετική θέση της  $T$  ως προς την  $A$  για την οποία επιτυγχάνεται η καλύτερη ταύτιση.



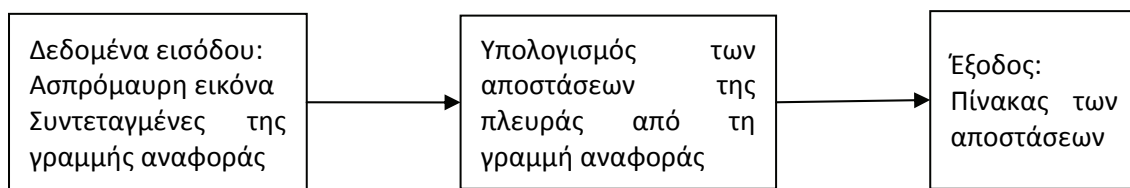
```
function [xi, yi]=im_match_corr(A,T)
%Matching algorithm using correlation theorem
%f(x,y)oh(x,y)<=>F*(u,v)H(u,v)
%Correlation in the spatial domain can be obtained by taking the inverse
%fourier transform
%By Gonzalez Prentice Hall, 2nd Edition 2002
%
%% Find size of zero padding
tic;
sizeT=size(T);
sizeA=size(A);
if mod((sizeA(1)+sizeT(1)),2)~= 0
    A=padarray(A,[1 0],'post');
    sizeA(1)=sizeA(1)+1;
end
if mod((sizeA(2)+sizeT(2)),2)~= 0
    A=padarray(A,[0 1],'post');
    sizeA(2)=sizeA(2)+1;
end
%padding size of each matrix
padszA=sizeT;
padszT=(sizeA+sizeT)/2;
%% Obtain cross correlation
%multiplying fourier transforms
R=ifft2( conj(fft2( padarray(T,padszT,'both') ))).*fft2(
padarray(A,padszA,'both') ) );
figure; plot(R(:),'k')
figure; imshow(mat2gray(R))
%% Find matching position
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
%The maximum coordinates gives the displacement of the top left corner of
%template T with respect to the top left corner of image A
[yi,xi]=find( R==max(R(:)) );
toc
k=[yi xi]+sizeT;
yi=k(1);
xi=k(2);
%% Display result
A(yi:yi+sizeT(1)-1,xi:xi+sizeT(2)-1)=xor(A(yi:yi+sizeT(1)-1,xi:xi+sizeT(2)-
1),T);
figure; imshow(A)
```

### Συνάρτηση μετρολογίας

Η συνάρτηση `cmpedges` υπολογίζει την πλευρική τραχύτητα.



```
function stat = cmpedges(filename, coord)
%Compare a line with the edge of a binary image given a line AB in pixels
%in the coordinate system of the image
%coord: coordinates of AB in pixels in the form [Ax Bx; Ay By]

tic;
coord = sort(coord,2);
M = imread(filename);
myline = M(coord(2,1):coord(2,2), coord(1,1):coord(1,2));
%Arrays for saving sattistical data
stat_top = zeros(length(myline),1);
stat_bottom = zeros(length(myline),1);
stat = zeros(length(myline),1);
%Crop a part of the image
if coord(1,1) == coord(1,2)
    %Line AB lies along y axes
    Mtop = ( M(coord(2,1):coord(2,2),1:coord(1,1)-1) )';
    Mbottom = ( M(coord(2,1):coord(2,2), coord(1,1)+1:end) )';
    testcross = ( conv(myline,[1; 1; 1]) )';
elseif coord(2,1) == coord(2,2)
    %Line AB lies along x axes
    Mtop = M(1:coord(2,1)-1, coord(1,1):coord(1,2) );
    Mbottom = M(coord(2,1)+1:end, coord(1,1):coord(1,2) );
    testcross = conv(myline,[1 1 1]);
end
Mtop = Mtop(end:-1:1, :);
%Find cross points between line and schema
testcross = testcross(2:end-1);
crosspoint = find(testcross == 1);
%Cut matrix M in submatrices according to cross points and
%repeat the same process for each submatrix
crosspoint = unique([1 crosspoint length(myline)]);
endpoint = 0;
%Repeat for all all segments between cross points
for k=1:(length(crosspoint)-1)
    startpoint = (endpoint + 1) * (crosspoint(k)~=1) + (crosspoint(k)==1);
```

## Παράρτημα Γ: Κώδικες

```
    endpoint = (crosspoint(k+1)- logical(myline(crosspoint(k+1) -1)) );
    if ~all(myline(startpoint:endpoint) )
        Mtop(:, startpoint : endpoint ) = ~Mtop(:, startpoint : endpoint );
        Mbottom(:, startpoint :endpoint) = ~Mbottom(:, startpoint
:endpoint);
    end
    for m = startpoint:endpoint
        vola = find(Mtop(:,m)==0,1,'first');
        if isempty(vola)
            vola = length(Mtop(:,1));
        end
        stat_top(m,1) = vola;
        vola2 = (-1)*find(Mbottom(:,m)==0,1,'first');
        if isempty(vola2)
            vola2 = (-1)*length(Mbottom(:,1));
        end
        stat_bottom(m,1) = vola2;
        stat(m,1) = (abs(vola)<=abs(vola2))*vola +
(abs(vola2)<abs(vola))*vola2;
    end
end
toc
path=filename(1:find(filename=='\ ',1,'last') );
[filename, pathname] = uiputfile('*.txt','Save results as...', path);
if filename ~=0
    fid = fopen([pathname filename], 'w');
    fprintf(fid, '%f\n', stat);
    fclose(fid);
end
figure;
plot(stat, 'k');
```



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε λογισμικό για την προσομοίωση της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης και την πραγματοποίηση μετρήσεων μέσα από την επεξεργασία εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας SEM. Στόχος ήταν η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου λογισμικού το οποίο προσομοιώνει πλήρως τη διαδικασία έκθεσης του λιθογραφικού υλικού με δέσμη ηλεκτρονίων σε όλα της τα στάδια και δίνει ως αποτέλεσμα την ενέργεια που εναποθέτουν τα ηλεκτρόνια στο λιθογραφικό υλικό. Η συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον ίδιο αλγόριθμο για πρόβλεψη της μορφής των εγγραφόμενων δομών μετά την εμφάνιση, ή ως δεδομένο εισόδου σε αλγόριθμο προσομοίωσης της διάλυσης και επεξεργασίας του πολυμερούς που αναπτύχθηκε στο ινστιτούτο μικροηλεκτρονικής του Δημόκριτου ολοκληρώνοντας έτσι την πλήρη προσομοίωση της διαδικασίας έκθεσης και εμφάνισης. Το λογισμικό συγκρίνει το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με το αρχικό σχέδιο και μετρά την κρίσιμη διάσταση των σχηματιζόμενων δομών, την πλευρική τραχύτητα και τη διακύμανση πλάτους γραμμής. Έχει επίσης τη δυνατότητα επεξεργασίας εικόνων κλίμακας του γκρι που προέρχονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης στις οποίες ταυτίζει ένα δοσμένο σχέδιο με το αντίστοιχο τμήμα της εικόνας και μετρά την τραχύτητα των πλευρών του, το πλάτος και τη διακύμανση πλάτους γραμμής.

Το πρόβλημα διακρίθηκε σε επιμέρους υποπροβλήματα καθένα από τα οποία αντιμετωπίστηκε ανεξάρτητα αυξάνοντας έτσι την χρηστικότητα και την ευελιξία του λογισμικού. Η υλοποίηση των αλγορίθμων έγινε σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, τα προγράμματα γράφτηκαν με τη μορφή ανεξάρτητων συναρτήσεων τις οποίες ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει με την σειρά που επιθυμεί ελέγχοντας τις παραμέτρους εισόδου. Τα επιμέρους τμήματα στα οποία χωρίστηκε το πρόβλημα είναι: υπολογισμός της ενεργειακής εναπόθεσης από σημειακή δέσμη, υπολογισμός ενεργειακής εναπόθεσης από πραγματική δέσμη, ανάγνωση αρχείων CIF και GDSII, υπολογισμός της συνολικής ενεργειακής εναπόθεσης στο λιθογραφικό υλικό, εμφάνιση, αναζήτηση σχήματος σε εικόνα, μετρολογία.

Η προσομοίωση ξεκινά με την μοντελοποίηση της τροχιάς των ηλεκτρονίων μέσα σε κάποιο στερεό για τον υπολογισμό της ενεργειακής εναπόθεσης σε αυτό. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η ενέργεια που αποθηκεύεται στο λιθογραφικό υλικό κατά την εγγραφή με δέσμη ηλεκτρονίων. Η ενέργεια αυτή είναι υπεύθυνη για την αλλαγή διαλυτότητας του λιθογραφικού υλικού με το σπάσιμο των αλυσίδων του πολυμερούς ή τη δημιουργία σταυροδεσμών σε αυτό. Το λιθογραφικό υλικό μετατρέπεται σε διαλυτό ή αδιάλυτο στα σημεία που η ενέργεια έχει ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σε αυτό δομές μετά τη διάλυσή του, στις περιοχές που έχει δεχθεί κατάλληλα ποσά ενέργειας. Για τη μοντελοποίηση της διείσδυσης των ηλεκτρονίων στην ύλη τα ηλεκτρόνια θεωρούνται ως σημειακές μάζες που κινούνται ελεύθερα και η ευθύγραμμη κίνησή τους διακόπτεται από ελαστικές και ανελαστικές συγκρούσεις με τα άτομα του υλικού. Οι ελαστικές συγκρούσεις ευθύνονται κυρίως για την αλλαγή τη κατεύθυνσής του ενώ οι ανελαστικές για την απώλεια ενέργειας. Από τις ενεργές διατομές σκέδασης υπολογίζεται η μέση ελεύθερη διαδρομή και οι γωνίες σκέδασης με τη χρήση τυχαίων αριθμών, πρόκειται δηλαδή για Monte Carlo προσέγγιση του προβλήματος. Η απώλεια ενέργειας υπολογίζεται από το μέσο ρυθμό απώλειας ενέργειας του Bethe (continuous slowing down approximation model). Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η εναποτιθέμενη ενέργεια στο λιθογραφικό υλικό από ιδεατή σημειακή και μονοενεργειακή δέσμη, μια δέσμη δηλαδή της οποίας τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν όλα στο ίδιο σημείο με την ίδια ακριβώς ενέργεια. Οι παράμετροι εισόδου για τον υπολογισμό αυτό είναι η ενέργεια των ηλεκτρονίων της δέσμης και η σύσταση και δομή του υποστρώματος. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει οποιαδήποτε δομή

υποστρώματος συμπεριλαμβανομένης και πολυστρωματικής στοίβας που χρησιμοποιείται στις μάσκες λιθογραφίας ακραίου υπεριώδους. Οι τροχιές των ηλεκτρονίων θεωρούνται στις τρεις διαστάσεις και υπολογίζεται η ενέργεια σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση και το βάθος.

Από τη συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης σημειακής δέσμης ένα άλλο τμήμα του λογισμικού υπολογίζει την ενεργειακή εναπόθεση από την πραγματική δέσμη με συνέλιξη δύο συναρτήσεων, αυτή της ενέργειας σημειακής δέσμης και της συνάρτησης κατανομής των ηλεκτρονίων γύρω από το σημείο εστίασης της δέσμης. Η κατανομή των ηλεκτρονίων μπορεί να είναι γκαουσιανή ή οποιαδήποτε άλλη ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο εργαλείο εγγραφής. Στη συνέχεια καλείται η συνάρτηση ανάγνωσης του αρχείου που περιέχει το σχέδιο από την οποίο διαβάζονται οι συντεταγμένες των πλευρών των σχημάτων που πρόκειται να εγγραφούν. Ο χρήστης καθορίζει το βήμα εγγραφής και υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που εναποτίθεται στο λιθογραφικό υλικό με βάση την συνάρτηση ενεργειακής εναπόθεσης της πραγματικής δέσμης και τα δεδομένα του σχεδίου.

Η τελική μορφή των δομών που εγγράφονται στο λιθογραφικό υλικό προκύπτει από τη συνολική ενεργειακή εναπόθεση με τη χρήση μιας τιμής κατωφλίου για την ενέργεια. Περιοχές του υλικού με ενέργεια μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου καθίστανται διαλυτές για την περίπτωση θετικού τόνου λιθογραφικού υλικού και αδιάλυτες για λιθογραφικό υλικό αρνητικού τόνου. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας δυαδικός πίνακας με τιμές μηδέν για τις περιοχές στις οποίες το λιθογραφικό υλικό έχει διαλυθεί και ένα για τις αδιάλυτες περιοχές. Κάθε κελί του πίνακα αντιστοιχεί σε μια κυψελίδα  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  του χώρου, οι διαστάσεις της οποίας καθορίζονται από το χρήστη. Ένα τέτοιος τρισδιάστατος πίνακας αναπαριστά ολόκληρο το πάχος του λιθογραφικού υλικού. Ελάττωση των διαστάσεων της κυψελίδας έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς αλλά και μεγαλύτερες απαιτήσεις σε μνήμη και υπολογιστικό χρόνο. Στον τελικό αυτό δυαδικό πίνακα το λογισμικό επιτελεί μετρήσεις της κρίσιμης διάστασης, της διακύμανσης του πλάτους γραμμής και της τραχύτητας. Μετρήσεις των ίδιων χαρακτηριστικών μπορούν να γίνουν σε εικόνες SEM. Το λογισμικό μετατρέπει την αρχική εικόνα από κλίμακα του γκρι σε ασπρόμαυρη δυαδική ώστε να εξαχθούν οι πλευρές των φερόμενων σχημάτων. Στη συνέχεια ειδικός αλγόριθμος αναζήτησης σχήματος, εντοπίζει στην εικόνα SEM το τμήμα που ταυτίζεται καλύτερα με το τμήμα του αρχικού σχεδίου που ενδιαφέρει. Πρόκειται για το τμήμα επεξεργασίας εικόνων του λογισμικού.

Η εφαρμογή του λογισμικού έδωσε αποτελέσματα ενεργειακής εναπόθεσης με σημειακή δέσμη σε πολύ καλή συμφωνία με πειράματα που διενεργήθηκαν στο ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής και με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Σε ενδεικτικές εφαρμογές, έγινε επεξεργασία εικόνων SEM, εφαρμογή του αλγόριθμου αναζήτησης και μέτρηση της τραχύτητας των σχημάτων. Επίσης, έγιναν προσομοιώσεις εγγραφής για την εξέταση των φαινομένων γειννίας και εξάρτησης της τραχύτητας από την ενέργεια της δέσμης, το πλάτος και το μήκος της γραμμής.

Το λογισμικό μοντελοποίησης της λιθογραφίας με ηλεκτρονική δέσμη προσφέρει τη δυνατότητα εξερεύνησης και κατανόησης της διαδικασίας εγγραφής και εμφάνισης, εξέτασης της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων που εμπλέκονται στη διαδικασία. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για την διόρθωση των φαινομένων γειννίας, τον έλεγχο της κρίσιμης διάστασης, την ελάττωση της ανεπιθύμητης τραχύτητας και να συμβάλουν στη βελτίωση των κανόνων σχεδίασης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

## ***SUMMARY***

In this PhD thesis was developed a software tool for the simulation of electron beam lithography and realization of metrology measurements using image processing techniques of SEM images.

The objective was the development of a complete simulation tool that models the entire electron beam exposure process and returns the total energy deposited in the resist. The energy deposition function that results can be used by the same tool for the prediction of the final shape of the structures created in the resist but also can be used as input data in a resist development simulation algorithm that was developed in the Institute of Microelectronics of NCSR Demokritos. After comparison of the simulated results with the layout the software achieves measurements of critical dimension (CD), line width roughness (LWR) and line edge roughness (LER). Another feature of the software is the capacity of automated metrology measurements on grayscale SEM images. In a first step the grayscale image is converted to a binary black and white image in order to be determined the edges of the structures. A pattern matching algorithm finds the part of the image witch best fits with the layout and returns the CD, LWR and LER.

The followed approach is the division of the main problem into sub-problems that could be resolved independently making the software more effective and utilitarian. It was written as independent functions in Matlab that can be called by the user defining only the input parameters and taking advantage of the enormous possibilities of the Matlab environment. The resulting modules are: calculation of the energy deposition of a point beam, calculation of the energy deposition of a real beam, opening and reading CIF and GDSII files, calculation of the total deposited energy on the resist, resist development, pattern matching and metrology.

In the first module is calculated the point beam energy deposition in the resist modeling the electron trajectories into the matter. Electrons are considered as point particles that penetrate the surface and undergo a complicated scattering process. It is assumed that the electron trajectory can be simulated as a zigzag path consisting of a free flight of definite length corresponding to the mean free path and is interrupted by either elastic or inelastic scattering. Using random numbers in a Monte Carlo approach and differential cross sections of elastic and inelastic scattering are calculated the scattering angles and the free path. Energy loss is calculated using Bethe stopping power in a continuous slowing down approximation model. The input parameters to that module are the initial electron energy, the architecture and composition of the substrate and the resist. Multilayer substrate structure is also available, as is the case for EUV mask making. The output parameter of that module is the energy deposited in the resist as a function of the radial distance and the depth. This is the energy from an ideal point beam where the electrons have the same energy and are impinging in the same point.

The convolution module calculates the energy deposition of a real beam given the beam profile and the point beam energy deposition. The beam profile represents the distribution of the beam electrons around the impinging point which can be Gaussian or any other depending of the writing tool.

The module that opens and reads CIF and GDSII files gets the data for the layout to be written. Total energy deposition gives the aerial image on the resist and is calculated by convolution of the real beam energy deposition function and the layout. The beam writing step and the dose are determined by the user.

A representation of the resist pattern remaining after development is given by the total energy deposition function after applying a threshold function. Parts of the resist with energy above the threshold value are considered removed for positive tone resists or below the threshold value for negative tone resists. The output of this module is a three dimensional binary matrix representing the resist where zero represents dissolved areas and one represents undissolved areas. Each matrix cell corresponds to a volume element whose dimensions  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  in nanometers are determined by the user. Smaller dimensions of the unit cell results in accuracy increase but also in calculation time increase and memory requirements.

The metrology module achieves measurements of CD, LWR and LER in the final binary matrix of the simulation results. The same measurements can be obtained in grayscale SEM images. After image conversion to binary black and white, the pattern matching algorithm finds the part of the SEM image that best fits to the part of the layout under investigation.

Results of the point beam energy deposition of the present simulator software are in very good agreement with published experimental results and with results of experiments carried out in the Institute of Microelectronics of NCSR Demokritos. In demonstrative examples are presented image processing results, application of pattern matching algorithm and metrology measurements. Through e-Beam writing simulation were investigated the influences to LER and LWR of beam profile, the substrate and electron energy. Different layouts were also simulated for the investigation of proximity effects and the dependence of LER with the width and length of a line.

The simulation software of electron beam lithography is a mean to understand the writing procedure and the effect of different factors to the result. Simulation results are indispensable in critical dimension control, decrease of undesired roughness and can also serve in design rules improvement.

## Αναφορές

---

- Amdahl, G. (1967). Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities.
- Antoniadis, D., S. Hansen, et al. (1978). SUPREM II--A Program for IC Process Modeling and Simulation, Stanford University, Integrated Circuits Laboratory.
- Argitis, P., S. Boyatzis, et al. (1998). LITHOGRAPHIC MATERIALS AND PROCESSES-26-Post-Exposure Bake Kinetics in Epoxy Novolac-Based Chemically Amplified Resists, Washington, DC: American Chemical Society,[1974]-.
- Argitis, P., I. Raptis, et al. (1995). "An advanced epoxy novolac resist for fast high-resolution electron-beam lithography." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **13**: 3030.
- Auzelyte, V., M. Elfman, et al. (2006). "Exposure parameters for MeV proton beam writing on SU-8." Microelectronic Engineering **83**(10): 2015-2020.
- Baba, H., S. Denda, et al. (1969). "Electron beam exposure system for integrated circuits(Electron beam exposure system to photoetch integrated circuit patterns without photomasks, using electronic computer for automatic pattern generation and registration)." MICROELECTRONICS AND RELIABILITY **8**: 101-111.
- Babin, S. (2004). "Papers from the 48th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication-Sources and Optics-Writing strategy and electron-beam system with an arbitrarily." Journal of Vacuum Science and Technology-Section B **22**(6): 3543-3546.
- Babin, S. and I. Kuzmin (2006). EBL resist heating error and its correction. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Balslev, S., B. Bilenberg, et al. (2005). Fully integrated optical systems for lab-on-a-chip applications. Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE.
- Balslev, S. and F. Romanato (2005). "Functionalized SU-8 patterned with x-ray lithography." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **23**: 2910.
- Bilenberg, B., S. Jacobsen, et al. (2006). "High resolution 100kV electron beam lithography in SU-8." Microelectronic Engineering **83**(4-9): 1609-1612.
- Bishop, H. (1965). "A Monte Carlo calculation on the scattering of electrons in copper." Proceedings of the Physical Society **85**(5): 855-866.
- Bohan, M., H. Hamaker, et al. (2002). Implementation and characterization of a DUV raster-scanned mask pattern generation system.
- Bowden, M., L. Thompson, et al. (1975). "Poly (butene-1 sulfone)?A highly sensitive positive resist." Journal of Vacuum Science and Technology **12**: 1294.

- Brunton, A., J. Cashmore, et al. (2004). High-resolution EUV Microstepper tool for resist testing & technology evaluation. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Buck, P., A. Buxbaum, et al. (1998). Performance of the ALTA 3500 scanned-laser mask lithography system.
- Chang, T. (1975). "Proximity effect in electron-beam lithography." Journal of Vacuum Science and Technology **12**: 1271.
- Chang, T., M. Thomson, et al. (1996). "Electron-beam microcolumns for lithography and related applications." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **14**: 3774.
- Chen, F. T. (2003). Asymmetry and thickness effects in reflective EUV masks. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Chen, W. and H. Ahmed (1993). "Fabrication of 5-7nm wide etched lines in silicon using 100keV electron-beam lithography and polymethylmethacrylate resist." Appl. Phys. Lett **62**: 1499-1501.
- Chou, S. Y., P. R. Krauss, et al. (1996). "Nanoimprint lithography." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **14**(6): 4129-4133.
- Chou, S. Y., P. R. Krauss, et al. (1997). "Sub-10 nm imprint lithography and applications." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **15**(6): 2897-2904.
- Constantoudis, V., G. Patsis, et al. (2004). "Photoresist line-edge roughness analysis using scaling concepts." Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems **3**: 429.
- Constantoudis, V., G. Patsis, et al. (2003). "Quantification of line-edge roughness of photoresists. II. Scaling and fractal analysis and the best roughness descriptors." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **21**: 1019.
- Crewe, A. (1978). "Some space charge effects in electron probe devices." Optik **52**: 337-346.
- Dapor, M. (1992). "Monte Carlo simulation of backscattered electrons and energy from thick targets and surface films." Physical review. B, Condensed matter **46**(2): 618-625.
- Diaz, C., H. Tao, et al. (2001). "An experimentally validated analytical model for gate line-edge roughness (LER) effects on technology scaling." IEEE electron device letters **22**(6): 287-289.
- Dill, F., A. Neureuther, et al. (1975). "Modeling projection printing of positive photoresists." IEEE Transactions on Electron Devices **22**(7): 456-464.

- Eisenmann, H., T. Waas, et al. (1993). "PROXECCO-Proximity effect correction by convolution." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **11**: 2741.
- Ekinci, Y., H. H. Solak, et al. (2007). "20 nm Line/space patterns in HSQ fabricated by EUV interference lithography." Microelectronic Engineering **84**(5-8): 700-704.
- Eschbaumer, C., N. Heusinger, et al. (2003). "Chemically Amplified Main Chain Scission: Chopping the Influence of Polymer Dimensions on Line Edge Roughness." Journal of Photopolymer Science and Technology **16**(1): 13-18.
- Everett, J. P., D. L. Schmidt, et al. (1997). "Synthesis of some onium salts and their comparison as cationic photoinitiators in an epoxy resist." Polymer **38**(7): 1719-1723.
- Franssila, S. (2004). Introduction to Microfabrication, Wiley.
- Fujita, J., Y. Ohnishi, et al. (1998). "Resolution of calixarene resist under low energy electron irradiation." Microelectronic Engineering **41-42**: 323-326.
- Fujita, J., Y. Ohnishi, et al. (1996). "Ultrahigh resolution of calixarene negative resist in electron beam lithography." Applied Physics Letters **68**(9): 1297-1299.
- Gonzalez, R. and R. Woods (2007). Digital image processing, Prentice Hall.
- Goto, E., T. Soma, et al. (1978). "DESIGN OF A VARIABLE-APERTURE PROJECTION AND SCANNING SYSTEM FOR ELECTRON BEAM." J Vac Sci Technol **15**(3): 883-886.
- Green, A. and R. Leckey (1976). "Scattering of 2-20 keV electrons in aluminium." Journal of Physics D: Applied Physics **9**(14): 2123-2139.
- Grivet, P., M. Bernard, et al. (1965). Electron Optics, Pergamon Press New York.
- Gustafson, J. (1988). "Reevaluating Amdahl's law." Communications of the ACM **31**(5): 532-533.
- Handique, J. G. and J. B. Baruah (2002). "Polyphenolic compounds: An overview." Reactive and Functional Polymers **52**(3): 163-188.
- Hattori, K., R. Yoshikawa, et al. (1993). "Electron-beam direct writing system EX-8D employing character projection exposure method." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **11**: 2346.
- Henke, B. L., J. A. Smith, et al. (1977). "0.1-10-keV x-ray-induced electron emissions from solids - Models and secondary electron measurements." Journal of Applied Physics **48**(5): 1852-1866.
- Hovington, P., D. Drouin, et al. (1997). "CASINO: A new Monte Carlo code in C language for electron beam interaction-Part I: Description of the program." Scanning **19**(1).
- Hudek, P., U. Denker, et al. (2007). "Fogging effect correction method in high-resolution electron beam lithography." Microelectronic Engineering **84**(5-8): 814-817.

## Αναφορές

- Ishii, T., H. Nozawa, et al. (1997). "C60-incorporated nanocomposite resist system for practical nanometer pattern fabrication." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **15**(6): 2570-2574.
- Ito, H. and C. Willson (1983). "Chemical amplification in the design of dry developing resist materials." Polym. Eng. Sci **23**(18): 1012-1018.
- ITRS. (2008). "[www.itrs.net/](http://www.itrs.net/)."
- Jeyakumar, A. and C. L. Henderson (2004). Enhancing the electron beam sensitivity of hydrogen silsesquioxane (HSQ). Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Kalus, C., W. Roessler, et al. (2002). Generic hierarchical engine for mask data preparation, SPIE.
- Ki, W. T., B. S. Ahn, et al. (2005). Simulation of resist heating effect with E-beam lithography using Distributed Processing (DP). Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Kim, E. J., W. Chang, et al. (2006). EUV lithography simulation for the 32 nm node. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Komori, H., G. Soumagne, et al. (2004). Ion damage analysis on EUV collector mirrors. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Kotsugi, T., T. Fuse, et al. (2008). Shaped beam technique using a novel 3rd-order imaging approach.
- Kozawa, T., S. Nagahara, et al. (1997). "Radiation-induced reactions of chemically amplified x-ray and electron-beam resists based on deprotection of t-butoxycarbonyl groups." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **15**(6): 2582-2586.
- Kozawa, T., A. Saeki, et al. (2004). "Modeling and simulation of chemically amplified electron beam, x-ray, and EUV resist processes." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **22**(6): 3489-3492.
- Lai, K., S. Burns, et al. (2008). 32 NM Logic patterning options with immersion lithography. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Liljequist, D. (1978). "Simplified Models for the Monte Carlo Simulation of Energy Distributions of keV Electrons Transmitted or Back-scattered in Various Solids." Journal of Physics D: Applied Physics **11**(6): 839-858.
- Lin, B. J. (1987). "The future of subhalf-micrometer optical lithography." Microelectronic Engineering **6**(1-4): 31-51.
- Love, G., M. Cox, et al. (1977). "Simple Monte Carlo method for simulating electron-solid interactions and its application to electron probe microanalysis." Journal of Physics D: Applied Physics **10**(1): 7-23.



- Madou, M. (2002). Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, CRC Press.
- McDonald, I., A. Lamki, et al. (1971). "The attenuation and backscattering of electron beams by thin films." Journal of Physics D: Applied Physics **4**: 1210-1217.
- Medeiros, D., A. Aviram, et al. (2001). "progress in electron-beam resists for advanced mask-making."
- Menzel, F., D. Spemann, et al. (2006). "Proton beam writing of microstructures at the ion nanoprobe LIPSION." Nuclear instruments & methods in physics research. Section B, Beam interactions with materials and atoms **250**: 66-70.
- Mirkin, C. and J. Rogers (2001). "Emerging methods for micro-and nanofabrication." MRS Bull **26**(7): 506-509.
- Miura, K., M. Fujita, et al. (2005). "Pattern matching between a scanning electron microscopy exposed pattern image of large-scale integrated fine structures and computer-aided design layout data by using the relaxation method." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **23**(6): 3065-3068.
- Moreau, W. (1988). Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials, Plenum Press.
- Muraki, M. and S. Gotoh (2000). "New concept for high-throughput multielectron beam direct write system." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **18**: 3061.
- Murray, L., J. Spallas, et al. (2000). "Advances in arrayed microcolumn lithography." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **18**: 3099.
- Nakayama, Y., S. Okazaki, et al. (1990). "Electron-beam cell projection lithography: A new high-throughput electron-beam direct-writing technology using a specially tailored Si aperture." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **8**: 1836.
- Namatsu, H., Y. Takahashi, et al. (1998a). "Three-dimensional siloxane resist for the formation of nanopatterns with minimum linewidth fluctuations." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **16**(1): 69-76.
- Namatsu, H., T. Yamaguchi, et al. (1998b). "Nano-patterning of a hydrogen silsesquioxane resist with reduced linewidth fluctuations." Microelectronic Engineering **41-42**: 331-334.
- Owen, G. and P. Rissman (1983). "Proximity effect correction for electron beam lithography by equalization of background dose." Journal of Applied Physics **54**: 3573.
- Patsis, G., V. Constantoudis, et al. (2003). "Quantification of line-edge roughness of photoresists. I. A comparison between off-line and on-line analysis of top-down

- scanning electron microscopy images." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **21**: 1008.
- Pfeiffer, H. (1978). "BVariable spot shaping for electron-beam lithography,[J. Vac." Sci. Technol **15**: 887?890.
- Quesnel, E., J. Hue, et al. (2004). "Investigation of nodule growth in ion beam sputtered Mo? Si multilayers." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **22**: 2353.
- Rai-Choudhury, P. (1997). "Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication, Volume 1: Microlithography SPIE Optical Engineering Press." Bellingham, Wash.
- Rao-Sahib, T. and D. Wittry (1974). "X-ray continuum from thick elemental targets for 10?50-keV electrons." Journal of Applied Physics **45**: 5060.
- Raptis, I. (1995). Μελέτη και κατασκευή ημιαγωγικών δομών και διατάξεων υπομικρονικών διαστάσεων. Τμήμα Φυσικής. Αθήνα, Πανεπιστήμιο Αθηνών. **Διδακτορική Διατριβή**.
- Raptis, I., D. Velessiotis, et al. (2000). "Development mechanism study by dissolution monitoring of positive methacrylate photoresists." Microelectronic Engineering **53**(1-4): 489-492.
- Rishton, S. and D. Kern (1987). "Point exposure distribution measurements for proximity correction in electron beam lithography on a sub-100 nm scale." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **5**: 135.
- Rizvi, S. (2005). Handbook of Photomask Manufacturing Technology, CRC Press.
- Robinson, A. P. G., R. E. Palmer, et al. (1999). "Exposure mechanism of fullerene derivative electron beam resists." Chemical Physics Letters **312**(5-6): 469-474.
- Robinson, A. P. G., H. M. Zaid, et al. (2006). "Chemically amplified molecular resists for electron beam lithography." Microelectronic Engineering **83**(4-9 SPEC. ISS.): 1115-1118.
- ROSENBUSCH, A., C. KALUS, et al. On the way to the 1 gigabit: Demonstration of E-beam proximity effect correction for mask making, SPIE.
- Rotting, O., W. Ropke, et al. (2002). "Polymer microfabrication technologies." Microsystem Technologies **8**(1): 32-36.
- Rubin, S. (1987). Computer aids for VLSI design, Addison-Wesley.
- Sakamizu, T. and H. Shiraishi (2004). "Acid-Breakable Resin-Based Chemical Amplification Positive Resist for Electron-Beam Mastering: Design and Lithographic Performance." Japanese Journal of Applied Physics **43**(no. 7 b): 5053-5060.
- Salvat, F., J. D. Martinez, et al. (1985). "A simple model for electron scattering: Inelastic collisions." Journal of Physics D: Applied Physics **18**(2): 299-315.

- Salvat, F. and J. Parellada (1984). "A simple Monte Carlo calculation of kilovolt electron transport." Journal of Physics D: Applied Physics **17**(1): 185-201.
- SEMI. (2007). "SEMI Standards." from <http://www.semi.org/en/P001204>.
- Semiconductor International. (2008). "Intel: 'EUV Facts Don't Add Up' for 22 nm in 2011." from <http://www.semiconductor.net/article/CA6553758.html>.
- Seo, Y., K. Lee, et al. (1999). "Evaluation of advanced epoxy novolac resist, EPR, for sub 100nm synchrotron x-ray proximity lithography." Microelectronic Engineering **46**(1-4): 461-464.
- Shimizu, N. and H. Sato (1996). Process in PE free-volume preceding electrical tree initiation. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report.
- Shimizu, R. (2005). "Monte Carlo simulation studies in Japan on interaction of charged particles with solids during those early days in 1960s-1970s." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **232**(1-4): 117-124.
- Shimizu, R. and Z. Ding (1992). "Monte Carlo modelling of electron-solid interactions." Rep. Prog. Phys **55**(4): 487-531.
- Shimizu, R., T. Ikuta, et al. (1975). "Experimental and theoretical study of energy dissipation profiles of keV electrons in polymethylmethacrylate." Journal of Applied Physics **46**: 1581.
- Shimizu, R., T. Ikuta, et al. (1972). "The Monte Carlo technique as applied to the fundamentals of EPMA and SEM." Journal of Applied Physics **43**: 4233.
- Shimizu, R., Y. Kataoka, et al. (1976). "A Monte Carlo approach to the direct simulation of electron penetration in solids." Journal of Physics D: Applied Physics **9**: 101-113.
- Solak, H., C. David, et al. (2003). "Sub-50 nm period patterns with EUV interference lithography." Microelectronic Engineering **67**: 56-62.
- Solak, H. H., C. David, et al. (2003). "Sub-50 nm period patterns with EUV interference lithography." Microelectronic Engineering **67-68**: 56-62.
- Sugawara, M., A. Chiba, et al. (2003). "Effect of incident angle of off-axis illumination on pattern printability in extreme ultraviolet lithography." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **21**: 2701.
- SUGITA, K. (1997). "Application of photodegradable polymers to imaging and microfabrication technologies: a review of recent research papers in the last 4 years." Progress in organic coatings **31**(1-2): 87-95.
- Suzuki, K. and B. Smith (2007). Microlithography: Science and Technology, CRC Press.
- Tada, T. and T. Kanayama (1996). "Nanolithography using fullerene films as an electron beam resist." Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters **35**(1 A): L63-L65.

## Αναφορές

- Tsikrikas, N., D. Drygiannakis, et al. (2007(b)). "Pattern matching, simulation, and metrology of complex layouts fabricated by electron beam lithography." Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **25**(6): 2307-2311.
- Tsikrikas, N., G. P. Patsis, et al. (2008(a)). High resolution patterning and simulation on Mo/Si multilayer for EUV masks. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Wallraff, G. M. and W. D. Hinsberg (1999). "Lithographic Imaging Techniques for the Formation of Nanoscopic Features." Chemical Reviews **99**(7): 1801-1821.
- Xia, Y., J. A. Rogers, et al. (1999). "Unconventional Methods for Fabricating and Patterning Nanostructures." Chemical Reviews **99**(7): 1823-1848.
- Yasuda, H., S. Arai, et al. (1996). "Multielectron beam blanking aperture array system SYNAPSE-2000." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures **14**: 3813.
- Αργεΐτης, Π. (2002). Πολυμερή στη Μικροηλεκτρονική, Σημειώσεις του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών:Επιστήμη Πολυμερών και Εφαρμογές της.
- Τσουκαλάς, Δ. (2005). Τεχνολογία μικροσυστημάτων. Αθήνα, Τομέας φυσικής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.