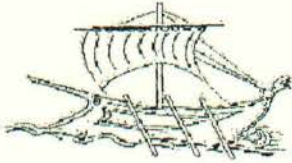
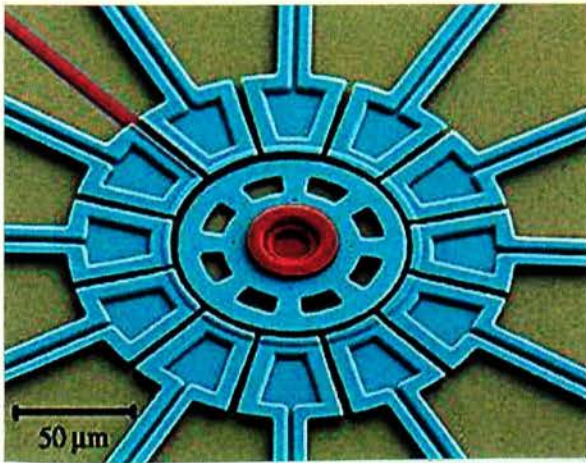


H/Γ  
576



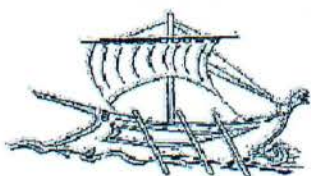
**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**  
Επιβλέπων: ΠΕΤΡΟΣ Γ. ΒΕΡΝΑΛΟΣ, Καθηγητής

**MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)**  
**Μικρο - Ηλεκτρο - Μηχανικά Συστήματα**



**Πτυχιακή Εργασία:**  
**Δημητρίου Α. Γεωργίου (Α.Μ. 35031)**

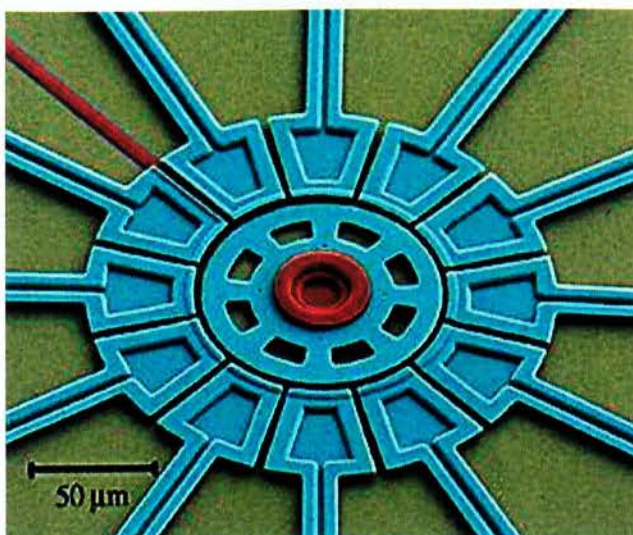
**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΪΟΣ 2011**



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**  
*Επιβλέπων: ΠΕΤΡΟΣ Γ. ΒΕΡΝΑΔΟΣ, Καθηγητής*

**MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)**

**Μικρο - Ηλεκτρο - Μηχανικά Συστήματα**



**Πτυχιακή Εργασία:**  
**Δημητρίου Α. Γεωργίου (Α.Μ. 35031)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΪΟΣ 2011**

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Γενικές πληροφορίες για τα MEMS

Τι είναι τα MEMS;.....σελ.	3
Διάφορες ονομασίες για τα MEMS.....σελ.	4
Γιατί MEMS;.....σελ.	4
Γιατί χρησιμοποιούμε την τεχνολογία των MEMS;.....σελ.	6
Λειτουργία των MEMS.....σελ.	9
Μικροσύστημα (Microsystem).....σελ.	10
Κατηγορίες των MEMS.....σελ.	11
Αισθητήρες (Sensors).....σελ.	11
Εφαρμογές των αισθητήρων MEMS.....σελ.	11
Ενεργοποιητές (actuators).....σελ.	12
Παραδείγματα εφαρμογών των ενεργοποιητών.....σελ.	14
RF - MEMS (Radio Frequency).....σελ.	15
Παραδείγματα εφαρμογών των RF – MEMS.....σελ.	16
Οπτικά MEMS (Optical MEMS ή MOEMS).....σελ.	16
Παραδείγματα εφαρμογών των MOEMS.....σελ.	17
MEMS ελέγχου ροής.....σελ.	20
Εφαρμογές των MEMS ελέγχου ροής.....σελ.	20
Βιολογικά MEMS (Bio – MEMS).....σελ.	22
Βιολογικοί αισθητήρες.....σελ.	22
Βιολογικές συσκευές δράσης.....σελ.	23
Μικροκινητήρες (micromotors).....σελ.	23
Παραδείγματα εφαρμογών των μικροκινητήρων.....σελ.	23
Τα MEMS στην Ιατρική (medical MEMS).....σελ.	24



## 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Διεργασίες κατασκευής των MEMS

Εισαγωγή.....σελ	28
Μικρομηχανική (micromachining).....σελ	29
Μικρομηχανική Επιφάνειας (Surface micromachining).....σελ	30
Μικρομηχανική Όγκου (Bulk micromachining).....σελ	31
Κατασκευαστικά βήματα διεργασιών για την δημιουργία ενός MEMS.....σελ	32
Εναπόθεση (Deposition).....σελ	33
Εναπόθεση χημικού ατμού CVD (Chemical Vapor Deposition).....σελ	34
Ηλεκτροεναπόθεση (Electrodeposition).....σελ	35
Εναπόθεση μετάλλου (metal deposition).....σελ	36
Επιταξία από αέρια φάση (vapor phase epitaxy).....σελ	37
Οξειδωση.....σελ	38
Μέθοδοι παρασκευής SiO <sub>2</sub> .....σελ	41
Διαδικασίες οξειδωσης (oxidation process).....σελ	41
Θερμική οξειδωση (Thermal Oxidation).....σελ	41
Ξηρή Οξειδωση (Dry Oxidation or Oxidation in Dry Oxygen).....σελ	42
Υγρή Οξειδωση (Wet Oxidation or Oxidation in Water Vapor).....σελ	43
Πυρογενική Οξειδωση (Oxidation in Pyrogenic Steam).....σελ	44
Ανοδική οξειδωση (Anodic Oxidation).....σελ	44
Οξειδωση με Πλάσμα (Plasma oxidation).....σελ	44
Διαδικασία εναπόθεσης (deposition process).....σελ	45
Επιλογή Τεχνικής.....σελ	45
Λιθογραφία (Lithography).....σελ	46
Φωτολιθογραφία (Photolithography).....σελ	46
Καθαρισμός υποστρώματος (δισκίων).....σελ	48

Απομάκρυνση σωματιδίων (μηχανικός καθαρισμός).....σελ	49
Χημικός καθαρισμός δισκίων.....σελ	49
Φωτορητίνη.....σελ	49
Επίστρωση της φωτορητίνης με φυγοκέντρωση.....σελ	50
Θέρμανση (ψήσιμο) της φωτορητίνης.....σελ	51
Έκθεση της φωτορητίνης.....σελ	51
Εμφάνιση φωτορητίνης.....σελ	54
Επαναθέρμανση φωτορητίνης.....σελ	54
Εγχάραξη (Etching).....σελ	54
Διεργασίες εγχάραξης.....σελ	54
Υγρή εγχάραξη (wet etching).....σελ	56
Εγχάραξη με Πλάσμα.....σελ	57
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εγχάραξης με Πλάσμα.....σελ	57
<b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο:Καθαροί χώροι</b>	
Εισαγωγή.....σελ	62
Ταξινόμηση των καθαρών χώρων.....σελ	64
Η εξέλιξη στον σχεδιασμό των καθαρών χώρων.....σελ	69
Χαρακτηριστικά των καθαρών χώρων.....σελ	71
Η καθαρότητα.....σελ	72
Η ποιότητα του αέρα.....σελ	73
Η εξαέρωση.....σελ	74
Η υπερπίεση.....σελ	74
Ο ακουστικός θόρυβος.....σελ	74
Το επίπεδο των κραδασμών.....σελ	74
Η αντίσταση της γείωσης.....σελ	75

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.....σελ	75
Η ηλεκτροστατική εκκένωση.....σελ	75
Λειτουργία των καθαρών χώρων.....σελ	76
Σύστημα παραγωγής και τροφοδοσίας με απιονισμένο νερό.....σελ	79
Συστήματα τροφοδοσίας με χημικά.....σελ	83
Τεχνολογία καθαρισμού δισκιδίων Si.....σελ	87
Μηχανισμοί προσρόφησης και απομάκρυνσης ρύπων.....σελ	88
Εισαγωγή.....σελ	88
Σωματίδια.....σελ	88
Μεταλλικοί ρύποι.....σελ	90
Ρύπανση με οργανικές ουσίες.....σελ	91
Μικροτραχύτητα της επιφάνειας.....σελ	92
Αυτογενές οξειδίο (Native oxide).....σελ	93
Τεχνολογία υγρού καθαρισμού.....σελ	95
Τεχνολογία ξηρού καθαρισμού.....σελ	95
<b>4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο: Υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των MEMS</b>	
Εισαγωγή.....σελ	99
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.....σελ	99
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.....σελ	104
Διοξείδιο του πυριτίου.....σελ	105
Καρβίδιο του πυριτίου SiC (Silicon Carbide).....σελ	107
Νιτρίδιο του πυριτίου (SiN <sub>3</sub> ).....σελ	109
Γάλλιο – Αρσενικό.....σελ	111
Μέταλλα.....σελ	116



Αλουμίνιο (Aluminium).....σελ	117
Χρυσός (Gold).....σελ	118
Χαλκός (Cooper).....σελ	119
Βολφράμιο.....σελ	120
Ιστορικά στοιχεία για το Βολφράμιο.....σελ	120
Περιγραφή και ιδιότητες του Βολφραμίου.....σελ	121
Πεδία χρήσης του Βολφραμίου.....σελ	123
Πολυαμίδη (Polyimides).....σελ	124



## Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η τεχνολογία, η κατασκευή των MEMS και η εφαρμογή αυτών σε διάφορες εφαρμογές.

Η ύπαρξη βέβαια των μικροκατασκευών δεν θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί αν η Μικροηλεκτρονική δεν είχε δανείσει την τεχνολογία της στα Μικρο – Ηλεκτρό – Μηχανικά Συστήματα και σαφέστατα αν δεν είχε προοδεύσει και η τεχνολογία της επιστήμης των υλικών. Τα MEMS είναι 2D και 3D δομές που κατασκευάζονται με την επεξεργασία διαφόρων υλικών (δομικά και θυσιαζόμενα) σύμφωνα με την μικρομηχανική τεχνολογία.

Είναι προφανές ότι ένα μικρο - ηλεκτρομηχανικό σύστημα δεν μπορεί να συγκριθεί από την πλευρά της παρεχόμενης μηχανικής ενέργειας με μια κλασσική διάταξη, αλλά τα μοναδικά πλεονεκτήματα που παρέχουν τα MEMS όπως την μειωμένη ισχύ κατανάλωσης, την βελτιωμένη απόδοση, τον μειωμένο όγκο και κατά επέκταση και το βάρος (μείωση του μεγέθους και του βάρους με συνέπεια τη μείωση της ισχύος κατανάλωσης και την αύξηση της συμπίκνωσης του σχεδίου του συστήματος) την υψηλή αξιοπιστία, το χαμηλό κόστος σε σχέση με τις ισοδύναμες συσκευές, την μαζική παραγωγή (η οποία μειώνει το κόστος κατασκευής και συναρμολόγησης) θα τα καταστήσουν τον <<πράσινο σύντροφο και σωματοφύλακα του σύγχρονου ανθρώπου και των σύγχρονων εγκαταστάσεων>>.

Αναλυτικότερα, στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύχθηκε η τεχνολογία των MEMS και οι διάφορες εφαρμογές στους στην καθημερινή ζωή μας. MEMS είναι τα αρχικά των λέξεων, Micro Electro Mechanical Systems και είναι ένας όρος που επινοήθηκε από τον Καθηγητή R. Howe και άλλους επιστήμονες για να περιγράψει ένα ανερχόμενο πεδίο έρευνας, όπου μηχανικά στοιχεία, όπως υποστηρίγματα ή μεμβράνες κατασκευάζονται σε κλίμακα πιο κοντινή σε αυτή των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων παρά σε αυτήν των μηχανημάτων που κατασκευάζονται με την κλασσική μηχανουργική τεχνολογία, πχ. σε ένα τόρνο.

Τα MEMS είναι η ολοκλήρωση των μηχανικών, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (αισθητήρων, συστημάτων δραστηριοποιητών κλπ.) (εικόνα 1.1) σε ένα

κοινό υπόστρωμα με την χρησιμοποίηση της μικροκατασκευαστικής τεχνολογίας ή “μικροτεχνολογίας” [1].

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα MEMS τα οποία αποτελούν ένα ευρύ πεδίο έρευνας για συσκευές που ποικίλουν σε μέγεθος από μερικά μm έως μερικά mm. Πολλές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην έρευνα των MEMS είναι δανεισμένες από την βιομηχανία της Μικροηλεκτρονικής. Έτσι το πεδίο των MEMS εκμεταλλεύεται τέσσερις δεκαετίες εκτεταμένης και καλά χρηματοδοτούμενης έρευνας στις ιδιότητες του Si, την εναπόθεση λεπτών φιλμ, τη φωτολιθογραφία και άλλες σχετικές τεχνολογίες. Επομένως, η έρευνα στα MEMS εμπεριέχει την υπόσχεση για μαζική κατασκευή μικρομηχανών που μπορούν εύκολα να ολοκληρωθούν μαζί με ηλεκτρονικά.

Η μικρομηχανική είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται σαν βάση για άλλες, όπως και η κλασική μηχανική και γι’ αυτό δεν εστιάζει σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Αντίθετα εφαρμόζεται σε προβλήματα από ένα ευρύ φάσμα πεδίων, που περιλαμβάνουν την βιοϊατρική, διατάξεις απεικόνισης και αεροδιαστημικούς αισθητήρες.

Μικρομηχανικές διατάξεις έχουν κατασκευαστεί με ένα ευρύ φάσμα από τεχνολογίες κατασκευής, αλλά όλες οι τεχνολογίες αυτές εξαρτώνται κατά κάποιο τρόπο από τα όρια της φωτολιθογραφίας, για τον ορισμό των πολύ μικρών χαρακτηριστικών δομών. Ασχέτως με το πως κατασκευάζονται, όλες οι συσκευές σχηματίζονται από δύο βασικές κατηγορίες υλικών, τα υλικά δόμησης, τα οποία αποτελούν την συσκευή και τα θυσιαζόμενα υλικά, τα οποία αφαιρούνται για να απελευθερώσουν – να αποκαλύψουν την συσκευή (εικόνα 2.1) [1].

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσεται η συμβολή των εργαστηρίων της Μικροηλεκτρονικής στην συνεχή μείωση των χαρακτηριστικών διαστάσεων των μικροηλεκτρονικών διατάξεων σε συνδυασμό με την αύξηση της πυκνότητας των διατάξεων ανά ψηφίδα, τα οποία απαιτούν όλο και πιο αυστηρό έλεγχο του επιπέδου ρύπανσης κατά την εκτέλεση των τεχνολογικών διαδικασιών. Οι απαιτήσεις αυτές προσφέρονται μέσω των Καθαρών Χώρων.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσεται η συμβολή της τεχνολογίας των υλικών στην υλοποίηση των MEMS. Τα MEMS κατασκευάζονται από υλικά κάθε ένα από τα οποία έχει



διαφορετική επίπτωση στην αξιοπιστία τους. Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετική απόκριση σε μηχανισμούς που οδηγούν σε λάθη και οι οποίοι πρέπει να γίνουν κατανοητοί προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία των κατασκευών. Προκειμένου να αποσαφηνιστούν οι σκοποί των πολυάριθμων υλικών των MEMS, το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια συνοπτική επισκόπηση των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους, καθώς επίσης και λίστα με τις ιδιότητες των υλικών αυτών. Μια από τις μεγαλύτερες διαμάχες στην κοινότητα αυτών που ασχολούνται με τα MEMS έχει να κάνει με το εάν πρέπει να εξετασθούν οι ιδιότητες των λεπτών φιλμ ή των συμπαγών (bulk) κατά τη διάρκεια της δομικής ανάλυσης. Το πρόβλημα βρίσκεται στο ότι εάν τα υλικά αυτά εξετασθούν υπό το πρίσμα των ιδιοτήτων των συμπαγών υλικών, τότε όταν οι διαστάσεις τους γίνουν τόσο μικρές όσο αυτές των MEMS, η έκταση των ατελειών στο κρυσταλλικό τους πλέγμα δεν είναι πια μικρή σε σχέση με το μέγεθος της δομής που πρόκειται να αναλυθεί. Ενώ το μεγαλύτερο μέρος της εξέτασης γίνεται σε δείγματα με μακροσκοπικές διαστάσεις, οι ιδιότητες των συμπαγών υλικών δεν είναι κατάλληλες όσον αφορά τα MEMS, ωστόσο υιοθετούνται ελλείψει καλύτερων στοιχείων. Προκειμένου να ελεγχθεί στατιστικά η αξιοπιστία, ενός υλικού που κατασκευάζεται με συγκεκριμένη τεχνοτροπία, οι ιδιότητες του υλικού αυτού πρέπει να χαρακτηριστούν. Προς το σκοπό αυτό και με τα υπάρχοντα δεδομένα μπορούν να γίνουν προσεγγίσεις. Το κεφάλαιο αυτό προσφέρει τις ιδιότητες των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων υλικών που είναι γενικά αποδεκτά. Για τα λεπτά φιλμ η εφαρμοσιμότητα των ιδιοτήτων αυτών βρίσκεται υπό συζήτηση [1].

Τέλος, θα πρέπει να ευχαριστήσω πρώτα από όλους τον Πανάγαθο Θεό που με αξιώνει να τελειώσω τις Σπουδές μου στο Τμήμα Ηλεκτρολογίας του Α.Τ.Ε.Ι – ΠΕΙΡΑΙΑ. Στην συνέχεια τους Καθηγητές μου και ιδιαίτερως τον Καθηγητή κ. Πέτρο Βερνάδο, τον Καθηγητή κ. Παντελή Μαλατέστα και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Ιωαννίδη.

Ιδιαίτερως ευχαριστώ τους Γονείς μου για την συμπαράστασή τους στον αγώνα μου αυτό.

Εύχομαι όπως ο Πανάγαθος Θεός να χαρίζει σε όλους Χρόνια Πολλά και Καλά!

Με τιμή!

Δημήτριος Α. Γεωργίου

# 1

## ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ MEMS



Τι είναι τα MEMS;.....σελ.	3
Διάφορες ονομασίες για τα MEMS.....σελ.	4
Γιατί MEMS;.....σελ.	4
Γιατί χρησιμοποιούμε την τεχνολογία των MEMS;.....σελ.	6
Λειτουργία των MEMS.....σελ.	9
Μικροσύστημα (Microsystem).....σελ.	10
Κατηγορίες των MEMS.....σελ.	11
Αισθητήρες (Sensors).....σελ.	11
Εφαρμογές των αισθητήρων MEMS.....σελ.	11
Ενεργοποιητές (actuators).....σελ.	12
Παραδείγματα εφαρμογών των ενεργοποιητών.....σελ.	14
RF - MEMS (Radio Frequency).....σελ.	15
Παραδείγματα εφαρμογών των RF – MEMS.....σελ.	16
Οπτικά MEMS (Optical MEMS ή MOEMS).....σελ.	16
Παραδείγματα εφαρμογών των MOEMS.....σελ.	17
MEMS ελέγχου ροής.....σελ.	20
Εφαρμογές των MEMS ελέγχου ροής.....σελ.	20
Βιολογικά MEMS (Bio – MEMS).....σελ.	22
Βιολογικοί αισθητήρες.....σελ.	22
Βιολογικές συσκευές δράσης.....σελ.	23
Μικροκινητήρες (micromotors).....σελ.	23
Παραδείγματα εφαρμογών των μικροκινητήρων.....σελ.	23
Τα MEMS στην Ιατρική (medical MEMS).....σελ.	24

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ MEMS

## 1.1 Τι είναι τα MEMS;

**MEMS** είναι τα αρχικά των λέξεων, **Micro Electro Mechanical Systems** και είναι ένας όρος που επινοήθηκε από τον Καθηγητή R. Howe και άλλους επιστήμονες για να περιγράψει ένα ανερχόμενο πεδίο έρευνας, όπου μηχανικά στοιχεία, όπως υποστηρίγματα ή μεμβράνες κατασκευάζονται σε κλίμακα πιο κοντινή σε αυτή των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων παρά σε αυτήν των μηχανημάτων που κατασκευάζονται με την κλασική μηχανουργική τεχνολογία, πχ. σε ένα τόρνο.

- **Micro** – μικρό μέγεθος, μικροκατασκευασμένες δομές.
- **Electro** – ηλεκτρικά σήματα, έλεγχος (In / Out).
- **Mechanical** – μηχανική λειτουργία (In / Out).
- **Systems** – δομές, συσκευές, συστήματα, έλεγχος.

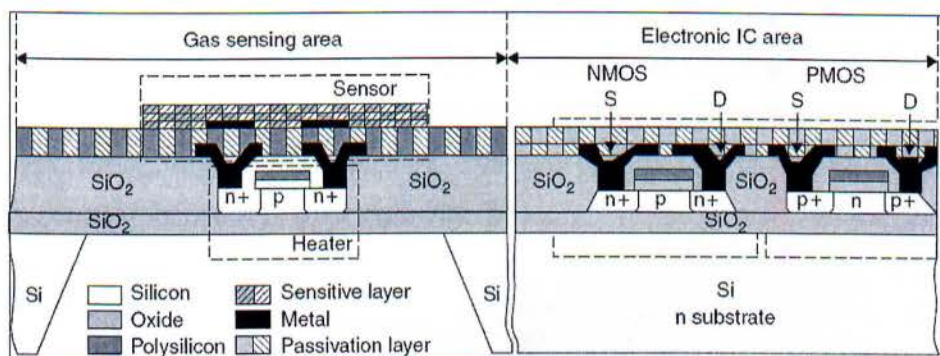
Τα MEMS είναι η ολοκλήρωση των μηχανικών, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (αισθητήρων, συστημάτων δραστηριοποιητών κλπ.) (εικόνα 1.1) σε ένα κοινό υπόστρωμα με την χρησιμοποίηση της μικροκατασκευαστικής τεχνολογίας ή “μικροτεχνολογίας” [1].

Πίνακας 1.1: Σύγκριση διαστάσεων μιας διεργασίας της Μικροηλεκτρονικής σε σχέση με μια των MEMS [1].

Device Type	Film Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Critical Dimension ( $\mu\text{m}$ )	Aspect Ratio	Topography ( $\mu\text{m}$ )	Device Size ( $\mu\text{m}$ )
ICs	<1	0.35	2:1	<1	1
MEMS	2–6	1.00	6:1	4–10	100

Στον πίνακα 1.1 μπορούμε να δούμε τις διαφορές που παρουσιάζουν μεταξύ τους η τεχνολογία των Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (ICs) (Integrated Circuits) και η τεχνολογία των Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (MEMS) για τη δημιουργία μιας κατασκευής (process) όσον αφορά τις διαστάσεις του πάχους των επιστρώσεων (Film

Thickness), των κρίσιμων διαστάσεων (Critical Dimension), του λόγου των διαστάσεων μήκους και πλάτους στις δομές (Aspect Ratio), της τοπογραφίας (Topography) και του μεγέθους της συσκευής (Device Size),



Εικόνα 1.1: MEMS και Μικροηλεκτρονική σε κοινό υπόστρωμα. Ολοκληρωμένος με τεχνολογία SOI – CMOS μικροαισθητήρας αερίου θερμής επιφανείας. Το τρανζίστορ τύπου MOS, κάτω από τον αισθητήρα, είναι για τη θέρμανση του [4].

## 1.2 Διάφορες ονομασίες για τα MEMS

Το συγκεκριμένο πεδίο έχει διαφορετικά ονόματα ανά τον κόσμο, όπως:

- **MEMS** Micro Electro Mechanical Systems  
(Μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα)
- **MST** Micro System Technology.  
(Τεχνολογία μικροσυστημάτων)
- **μ – TAS** micro Total Analysis Systems.  
(Μικροσυστήματα ανάλυσης) [1].

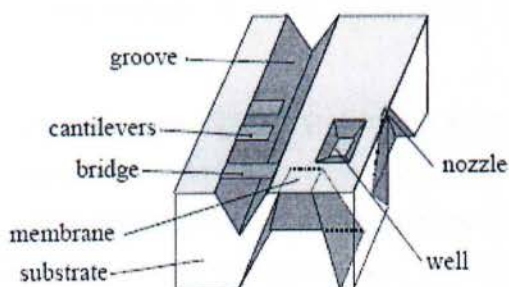
## 1.3 Γιατί MEMS;

Παρότι η ετοιμολογία της λέξης MEMS είναι λίγο πολύ γνωστή, τα λεξικά σιωπούν, σχετικά με τον ακριβή ορισμό της. Στην ουσία, τι θα μπορούσε να συνδέει την κεφαλή ενός εκτυπωτή μελάνης, έναν βιντεοπροβολέα (σύστημα DLP), ένα αναλώσιμο βιοτσίπ και τον αισθητήρα ενός αερόσακου; Όλα τα παραπάνω είναι MEMS, τι όμως πραγματικά είναι τα MEMS;



Οι συσκευές αυτές έχουν τις ιδιότητες διατάξεων με διαστάσεις μικρότερες των 100 μm και η τεχνική παραγωγής τους αποκαλείται παγκοσμίως <μικρο – κατασκευαστική τεχνολογία>.

Ο απλοϊκός αυτός ορισμός, φυσικά περιλαμβάνει και τις μικροηλεκτρονικές διατάξεις, υπάρχει ωστόσο ένα χαρακτηριστικό, που τα ηλεκτρονικά κυκλώματα δεν έχουν κάτι κοινό με τα MEMS. Ενώ τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι συνεχείς, στέρεες και συμπαγείς δομές, τα MEMS έχουν οπές, κοιλώματα, υποστηρίγματα, μεμβράνες κ.τ.λ. εμφανίζουν τρόπον τινά μηχανικά μέρη (εικ. 1.2).



**Εικόνα 1.2: Μηχανικά μέρη των MEMS [1].**

Αυτό έχει άμεση επίδραση στην κατασκευαστική διαδικασία των MEMS. Ακόμα και για τα MEMS που χρησιμοποιούν το πυρίτιο, η μικροηλεκτρονική διαδικασία χρειάζεται να προσαρμοστεί στην υποστήριξή τους με λεπτότερα στρώματα (thicker layer deposition), βαθύτερη εγχάραξη και την εισαγωγή ειδικών βημάτων που θα απελευθερώσουν τα μηχανικά μέρη (εικόνα 2.1). Πολλές διατάξεις MEMS δεν βασίζονται στο πυρίτιο και μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά, όπως πολυμερές, γυαλί, χαλαζία (quartz) ή ακόμα και από μέταλλα.

Αν και υφίστανται ομοιότητες μεταξύ των MEMS και των μικροηλεκτρονικών διατάξεων, οι δύο τους αποτελούν ξεχωριστούς τομείς. Ουσιαστικά τα MEMS απαιτούν έναν εντελώς διαφορετικό τρόπο σκέψης, όπου δίπλα στην ηλεκτρονική γνώση υπάρχει η μηχανική γνώση αλλά και η γνώση των υλικών τα οποία παίζουν έναν θεμελιώδη ρόλο [1].



#### 1.4 Γιατί χρησιμοποιούμε την τεχνολογία των MEMS;

Η ανάπτυξη των διατάξεων των MEMS έχει ένα υπολογίσιμο κόστος, ωστόσο η τεχνολογία τους έχει την δυνατότητα να επιφέρει μοναδικά οφέλη. Οι λόγοι που προωθούν την χρήση της τεχνολογίας των MEMS μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κλάσεις:

- Σμίκρυνση των υπαρχόντων συσκευών, όπως για παράδειγμα την παραγωγή ενός γυροσκοπίου βασισμένου στη χρήση πυριτίου, που μειώνει αρκετά το βάρος των υπαρχόντων γυροσκοπίων, με τον όγκο των  $1000 \text{ cm}^3$  να χωρά σε ένα τσιπ μερικών γραμμαρίων, τα οποία με τη σειρά τους περιέχονται σε ένα πακέτο  $0,5 \text{ cm}^3$ .
- Ανάπτυξη νέων συσκευών που βασίζονται σε αρχές που δεν λειτουργούν σε μεγαλύτερες κλίμακες. Ένα τυπικό παράδειγμα αποτελεί το βίο - τσιπ στο οποίο ηλεκτρικό πεδίο χρησιμοποιείται για να αντλήσει τα αντιδρώντα γύρω από αυτό. Αυτό καλείται ηλεκτροσμωτικό φαινόμενο και βασίζεται στην ύπαρξη μιας ελκτικής δύναμης στο υγρό, που εμφανίζεται μόνο σε κανάλια διαστάσεων μικρότερα του  $1 \text{ nm}$ , εμφανίζεται δηλαδή μόνο στην μικροκλίμακα.
- Ανάπτυξη νέων οργάνων που αλληλεπιδρούν με τον μικρόκοσμο. Το 1986 απονεμήθηκε στους εργαζόμενους στην IBM, H. Rohrer και G. Bining το βραβείο Nobel της Φυσικής για την εργασία τους στο μικροσκόπιο σάρωσης. Η εργασία αυτή αποτέλεσε τον πρόδρομο για την ανάπτυξη νέας τάξης μικροσκοπίων (μικροσκόπιο ατομικών δυνάμεων, μικροσκόπιο οπτικής σάρωσης κοντινού πεδίου, κλπ.) στα οποία περιλαμβάνονται μικρομηχανικές αιχμηρές ακίδες, πολύ μικρών διαστάσεων, με ακτίνα μικρότερη των  $50 \text{ nm}$ . Το όργανο αυτό, μικροσκόπιο σάρωσης, χρησιμοποιήθηκε για την τοποθέτηση ατόμων σε περίπλοκους σχηματισμούς, την εγγραφή κινεζικών χαρακτήρων, καθώς και για την επιβεβαίωση θεωριών της κβαντικής μηχανικής. Ένα άλλο παράδειγμα αυτής της κατηγορίας διατάξεων MEMS σε λίγο μεγαλύτερη κλίμακα θα ήταν η ανάπτυξη αρπάγων για τον χειρισμό ατομικών κυψελίδων σε στερεά σώματα προς ανάλυση.

Η σμίκρυνση των υπαρχόντων συσκευών είναι, χωρίς αμφιβολία, το πιο σημαντικό κίνητρο πίσω από την ανάπτυξη των MEMS. Είναι αυτονόητο ότι η σμίκρυνση τους μειώνει το κόστος παραγωγής τους εφόσον μειώνει την κατανάλωση των υλικών που απαιτούνται για την παρασκευή τους, επιτρέποντας έτσι την μαζική παραγωγή τους, ενώ ένα παράλληλο όφελος είναι η αύξηση της εφαρμοσιμότητάς τους. Ουσιαστικά μειωμένη μάζα και μέγεθος επιτρέπουν την τοποθέτηση των MEMS σε μέρη όπου μια παραδοσιακή συσκευή δεν θα μπορούσε να χωρέσει. Οι δύο αυτοί παράγοντες, μέγεθος και μάζα, συνδράμουν ώστε να μεγαλώσει η αγορά συσκευών μικρών διαστάσεων συγκριτικά με τις πιο πολυέξοδες και ογκώδεις παραδοσιακές συσκευές. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι ο μετρητής επιτάχυνσης που κατασκευάστηκε για να αντικαταστήσει τους παραδοσιακούς αισθητήρες που ενεργοποιούν τον αερόσακο σε ένα αυτοκίνητο και τώρα πλέον χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως στις ψηφιακές κάμερες για την σταθεροποίηση της εικόνας ή ακόμα και στον ολοκληρωμένο ρυθμιστή στα ακουστικά χειρός τελευταίας τεχνολογίας, χωρίς επαφή (contact less).

Ωστόσο η σμίκρυνση μόνο δεν μπορεί να δικαιολογήσει την ανάπτυξη των MEMS. Όταν ένα ογκώδες όργανο είναι αρκετά μικρό, αρκετά αξιόπιστο και εξαιρετικά φθηνό, δεν υπάρχει λόγος περαιτέρω σμίκρυνσής του. Η μικροκατασκευαστική διαδικασία άλλωστε δεν μπορεί να ανταγωνιστεί την επεξεργασία μεταλλικών φύλλων ή άλλες συμβατικές μεθόδους μαζικής παραγωγής.

Αλλά η τεχνολογία των MEMS επιτρέπει κάτι το διαφορετικό, τη στιγμή που το όργανο γίνεται μικρότερο γίνεται ταυτόχρονα και καλύτερο. Ο αισθητήρας για την ενεργοποίηση του αερόσακου στα αυτοκίνητα μας δίνει ένα καλό παράδειγμα της αυξημένης αξίας που μπορεί να έχει η ανάπτυξη μιας συσκευής MEMS. Ορισμένοι από τους αντίστοιχους αισθητήρες που δεν βασίζονται στην τεχνολογία των MEMS χρησιμοποιούν μια μεταλλική σφαίρα που συγκρατείται από ένα ελατήριο ή ένα μαγνητικό πεδίο. Η σφαίρα αυτή κινείται, ανταποκρινόμενη στην ταχύτατη επιβράδυνση του αυτοκινήτου και έτσι διακόπτει την σύνδεση ανάμεσα σε δύο επαφές μέσα στον αισθητήρα. Μια απλή και φθηνή μέθοδος, ωστόσο η μεταλλική σφαίρα μπορεί να μπλοκαριστεί ή οι επαφές να έχουν οξειδωθεί, ώστε όταν ξεκινάει το αυτοκίνητο την κίνησή του να μην είναι εύκολο να αποφανθεί κανείς εάν ο αισθητήρας θα λειτουργήσει ή δεν θα λειτουργήσει. Οι



αισθητήρες με τεχνολογία MEMS έχουν την ιδιότητα της <αυτοεξέτασης> σύμφωνα με την οποία ένας μικρός ενεργοποιητής θα προσομοιάσει την επίδραση της επιβράδυνσης στον αισθητήρα, έτσι ώστε να επιτρέψει την ακέραιη λειτουργία του, όταν η μηχανή του αυτοκινήτου ξεκινήσει.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των διατάξεων MEMS σχετίζεται με την ακεραιότητα των διαφόρων συστημάτων. Αντί να έχουμε διατάξεις ενωμένες με μια σειρά από εξωτερικά στοιχεία (αισθητήρα, επαγωγέα κλπ.) συνδεδεμένες με καλώδια, ή με έναν πίνακα κυκλώματος, με τα MEMS που χρησιμοποιούν το πυρίτιο, τα ηλεκτρονικά μέρη τους μπορούν να ολοκληρωθούν μαζί με την υπόλοιπη διάταξη. Είτε βρίσκονται στο ίδιο τσιπ, είτε στο ίδιο πακέτο, οδηγούν σε αυξημένη αξιοπιστία και μειωμένο συνολικό κόστος δημιουργώντας έτσι νέες δυνατότητες εφαρμογών.

Με τη χρήση της τεχνολογίας των MEMS επιτυγχάνεται:

- Μειωμένη ισχύ κατανάλωσης.
- Βελτιωμένη απόδοση.
- Μειωμένο βάρος.
- Υψηλή αξιοπιστία.
- Χαμηλό κόστος σε σχέση με τις ισοδύναμες συσκευές.
- Μαζική παραγωγή η οποία μειώνει το κόστος κατασκευής και συναρμολόγησης
- Μείωση του μεγέθους και του βάρους με συνέπεια τη μείωση της ισχύος κατανάλωσης και την αύξηση της συμπίκνωσης του σχεδίου του συστήματος. Μειώνοντας το μέγεθος και το βάρος ενός κομματιού επιτρέπεται η χρήση πολλαπλών διατάξεων MEMS σε σειρά ή παράλληλα για να αυξηθεί η λειτουργικότητα, η ικανότητα και η αξιοπιστία της συσκευής.

Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα, τα MEMS παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως:

- Χρειάζονται ειδικές κατασκευαστικές μεθόδους που χρησιμοποιούν ακριβό τεχνολογικό εξοπλισμό. Τα εργαστήρια και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία κατασκευής τους, είναι αυτός των εργαστηρίων της Μικροηλεκτρονικής. Ολόκληρος ο εξοπλισμός αυτών των εργαστηρίων βρίσκεται μέσα σ' έναν Καθαρό Χώρο (Clean Room), τον οποίο θα αναπτύξουμε στο 3<sup>ο</sup>

Κεφάλαιο. Ο Καθαρός Χώρος εξασφαλίζει την αξιοπιστία των MEMS καθώς επίσης και των διαφόρων Μικροηλεκτρονικών διατάξεων και κυκλωμάτων, που και αυτά σε αυτούς τους χώρους κατασκευάζονται. Ο Καθαρός Χώρος είναι υψίστης σημασίας παράμετρος για την σωστή και αξιόπιστη κατασκευή τους.

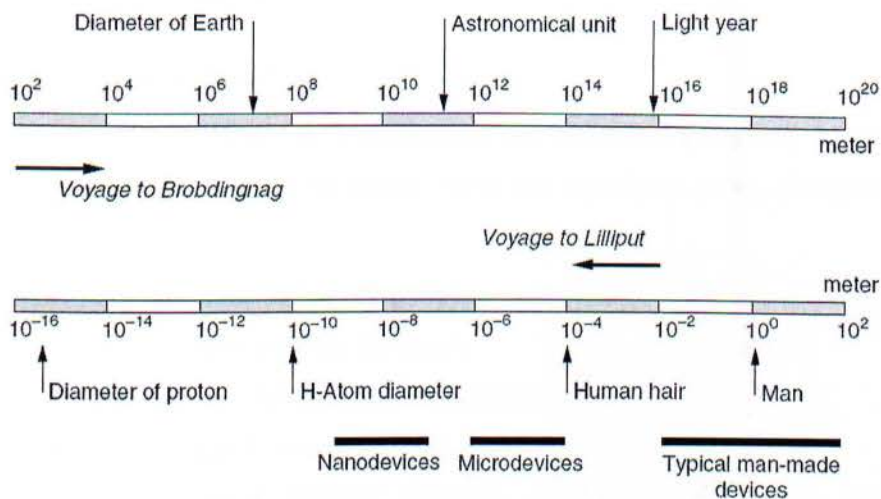
- Ο εγκιβωτισμός τους γίνεται σε κιβωτίδια με κενό ή κάποιο αδρανές αέριο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος.
- Είναι αδύνατη η επισκευή τους [1].

### 1.5 Λειτουργία των MEMS

Τα MEMS είναι κατασκευές με πολύ μικρό μέγεθος (τάξης μεγέθους μm) που μπορούν να εκτελούν διάφορες λειτουργίες οι οποίες πολλές φορές αποτελούν σμίκρυνση αντίστοιχων κατασκευών με μακροσκοπικές διαστάσεις. Έτσι υπάρχουν π.χ. μικροπηνία κατ' αντιστοιχία με τα γνωστά πηνία, μικροκινητήρες, μικροαισθητήρες κ.ο.κ. Τα MEMS εμφανίστηκαν αρχικά ως τμήματα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Integrated Circuits – IC's) υπολογιστών που για καιρό αποτελούσαν την πιο σημαντική εφαρμογή τους. Σήμερα τα MEMS έχουν πια πολλές επιπλέον χρήσεις σε διάφορους τομείς όπως στην ανίχνευση (micro - sensors), στους μηχανισμούς εφαρμογής (micro-actuators), στην μεταφορά σημάτων, στις μικρομηχανές κ.τ.λ.. Λόγω των διαστάσεων τους, τα MEMS εμφανίζουν ιδιότητες που δεν παρατηρούνται στα μακροσκοπικά συστήματα.

Έτσι σε μικροσκοπική κλίμακα (εικόνα 1.3) οι ηλεκτροστατικές και οι μαγνητικές αλληλεπιδράσεις έχουν διαφορετικές συνεισφορές και σε ακόμα μικρότερες διαστάσεις, της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων nm, όπου εμφανίζονται και κβαντικά φαινόμενα που περιπλέκουν περισσότερο την κατάσταση [1].

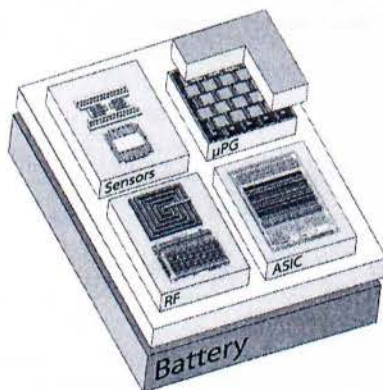




Εικόνα 1.3: Κλίμακες και μεγέθη [1].

### 1.6 Μικροσύστημα (Microsystem)

Το μικροσύστημα (εικόνα 1.4) είναι ένα έξυπνο μικροσκοπικό σύστημα που περιλαμβάνει ένα αισθητήρα ανίχνευσης, ένα κύκλωμα επεξεργασίας ή / και δυνατότητα ανάδρασης. Μπορεί να συνδυάζει δύο ή περισσότερες λειτουργίες, όπως ηλεκτρική, μαγνητική κλπ, ολοκληρωμένες στο ίδιο υπόστρωμα ή με τη μορφή υβριδικού κυκλώματος [1].



Εικόνα 1.4: Μικροσύστημα [1].

## 1.7 Κατηγορίες των MEMS

### 1.7.1 Αισθητήρες (Sensors)

Ο αισθητήρας είναι μία διάταξη η οποία μετράει μια ποσότητα μέσα στο περιβάλλον το οποίο βρίσκεται και παρέχει ένα ηλεκτρικό σήμα που σχετίζεται με τις παραμέτρους της ποσότητας που μέτρησε.

Οι αισθητήρες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Με βάση τη λειτουργία που επιτελούν.

Πίεσης, Ανίχνευσης αερίων, Αισθητήρες ακτινοβολίας κλπ.

- Με βάση την αρχή λειτουργίας τους.

Χημικοί, Κίνησης, Θερμικοί, Πίεσης, Οπτικοί, Αδρανείας, Μηχανικοί, Μαγνητικοί, Βιολογικοί.

Στον πίνακα 1.2 μπορούμε να δούμε την τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά την κατασκευή των αισθητήρων για τη μέτρηση διαφόρων μεγεθών της μηχανικής [1].

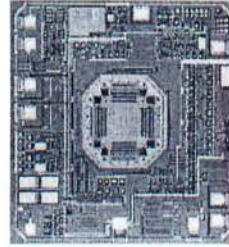
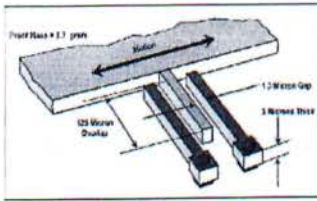
Πίνακας 1.2: Τεχνολογία αισθητήρων για την μέτρηση διαφόρων μεγεθών της μηχανικής [1].

Measurement	Typical/Common Techniques
Displacement/position	Variable reluctance, Hall effect, optoelectronic
Temperature	Thermistor, transistor base-emitter voltage (V <sub>be</sub> )
Pressure	Piezoresistive, capacitive
Velocity (linear/angular)	Variable reluctance, Hall effect, optoelectronic
Acceleration	Piezoresistive, capacitive, piezoelectric
Force	Piezoresistive
Torque	Optoelectronic
Mechanical impedance	Piezoresistive
Strain	Piezoresistive
Flow	$\Delta$ pressure, or delta pressure
Humidity	Resistive, capacitive
Proximity	Ultrasonic
Range	Radar
Liquid level	Ultrasonic
Slip	Dual torque
Imminent collision	Radar

#### 1.7.1.1 Εφαρμογές των αισθητήρων MEMS

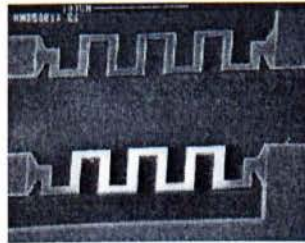
**Επιταχυνσιόμετρο.** Μια εφαρμογή των αισθητήρων αυτών είναι στα συστήματα των αερόσακων των αυτοκινήτων. Σε αυτήν την εφαρμογή ένα επιταχυνσιόμετρο

κατασκευάστηκε να αντιλαμβάνεται την απότομη μεταβολή της επιτάχυνσης και να ενεργοποιεί έναν αερόσακο (εικόνα 1.5α) Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5β ο αισθητήρας MEMS περιστοιχίζεται από στοιχεία κατασκευασμένα με **CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)** τεχνολογία ώστε να επεξεργαστούν το εξερχόμενο σήμα του επιταχυνσιόμετρου.



**Εικόνα 1.5:** α) Επιταχυνσιόμετρο αερόσακου αυτοκινήτου (αρχή λειτουργίας) β) Επιταχυνσιόμετρο αερόσακου αυτοκινήτου μονολιθικά κατασκευασμένο [1].

**Αισθητήρας αερίου καυσίμου.** Ένας αισθητήρας αερίου καυσίμου παρουσιάζεται στην εικόνα 1.6 και χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ποιότητας του αέρα και ιχνών χημικών. Αποτελείται από ένα αγωγίμο νήμα, με ένα καταλυτικό στρώμα επίστρωσης, το οποίο θερμαίνεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Τα αέρια αντιδρούν με την καταλυτική επιφάνεια, ελευθερώνοντας θερμότητα η οποία αλλάζει την αγωγιμότητα του νήματος [1].

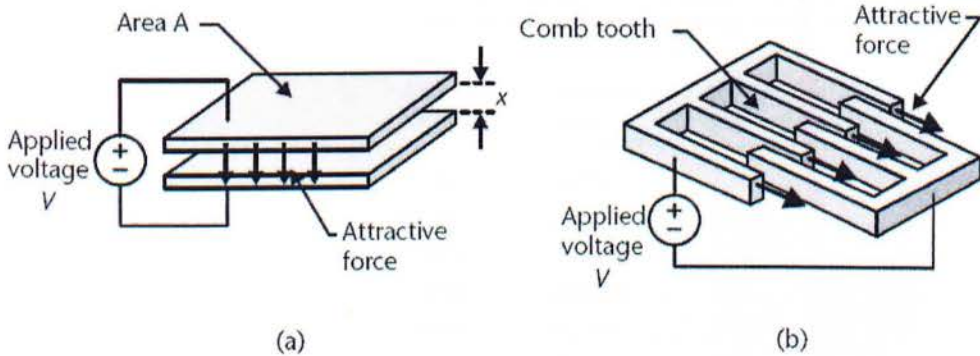


**Εικόνα 1.6:** Αισθητήρας αερίου καυσίμου κατασκευασμένος με τεχνολογία MEMS. Η πάνω εικόνα αντιστοιχεί σε έναν αισθητήρα από νήμα πολυτυριτίου. Η κάτω εικόνα είναι το ίδιο νήμα με επίστρωση του καταλυτικού στρώματος [1].

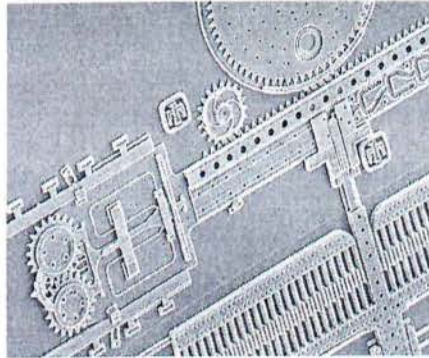
### 1.7.2 Ενεργοποιητές (actuators)

Ο ενεργοποιητής (εικόνα 1.7 & 1.8) είναι μια διάταξη που τροφοδοτείται συνήθως από ένα ηλεκτρικό σήμα και το μετατρέπει σε μια άλλη μορφή ενέργειας, εκτελώντας παράλληλα μια συγκεκριμένη ενέργεια.





Εικόνα 1.7: (α) Απεικόνιση ενός ηλεκτροστατικού ενεργοποιητή παράλληλων πλακών. (β) Απεικόνιση ενός ηλεκτροστατικού ενεργοποιητή χτενών [1].



Εικόνα 1.8: MEMS ηλεκτρομηχανική κλειδαριά [1].

Το σήμα εισόδου στον ενεργοποιητή μπορεί να είναι:

- Ηλεκτρικό.
- Μαγνητικό.
- Θερμικό.
- Ηλεκτροστατικό.
- Μαγνητοστατικό.

Στον πίνακα 1.3 μπορούμε να δούμε την χρονικά αξιοποιήσιμη ενέργεια από τον διάφορους τύπους ενεργοποιητών, σύμφωνα με τη φυσική αρχή της λειτουργίας τους και την ισχύ ενεργοποίησης που απαιτούν [1].

**Πίνακας 1.3: Αξιοποιησιμη ενέργεια από τον διάφορους τύπους ενεργοποιητών, σύμφωνα με τη φυσική αρχή της λειτουργίας τους και την ισχύ ενεργοποίησης που απαιτούν [1].**

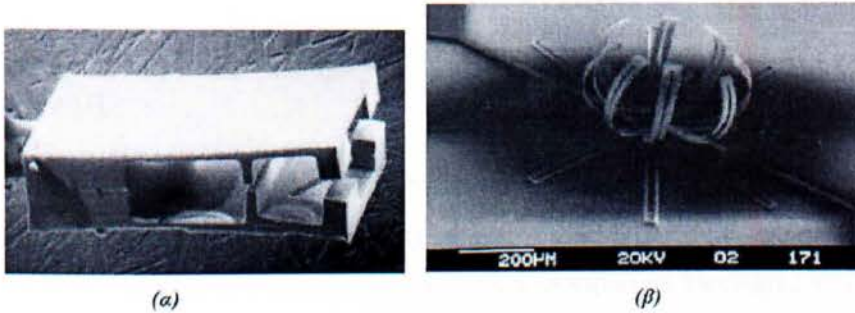
Concept	Actuation Strength	Actuation Time	Input Power Requirements
Thermopneumatic	34 kPa	0.03 sec	2.5W
Thermoresponsive polymer	437 kPa	0.05 sec	30 mW
Phase change	100 kPa	0.04 sec	1.9 mW
Thermal blocking	100 kPa	0.015 sec	3W
SMA	150 kPa	0.2 sec	0.12A
Bimetallic strip	50 kPa	1.0 sec	0.5A
Dielectric heating	4 Pa	0.02 sec	10V @ 4 MHz
Capacitive	50 kPa	md*	2700V
Piezoelectric	25 kPa	md	1000V
Electrohydrodynamic	2.5 kPa	0.0004 sec	700V
Interfacial tension	10 kPa	0.002 sec	1V
Magnetorestrictive	50 kPa	md	72A
Two coils	50 kPa	md	18A
Ferromagnetic film	50 kPa	md	1.4A
Permanent magnet	300 kPa	md	0.3A

### 1.7.2.1 Παραδείγματα εφαρμογών των ενεργοποιητών

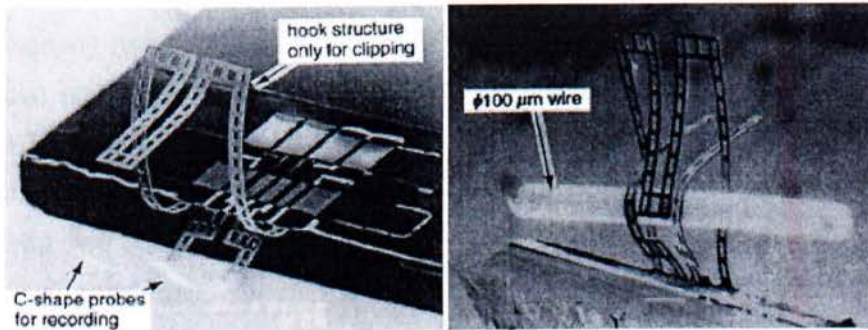
**1<sup>ο</sup>. Μικρολαβίδες.** Οι μικρολαβίδες μπορούν να συγκρατούν και να χειρίζονται μικροαντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια κάτι που είναι αναγκαίο για ένα μεγάλο εύρος σημαντικών εφαρμογών, όπως η συναρμολόγηση μικροσυστημάτων, ενδοσκόπια για μικροεπεμβάσεις και εγχύσεις φαρμάκων. Το πιο σύνηθες σχέδιο για τέτοιες μικρολαβίδες είναι ένα ζεύγος από ελάσματα με αντίθετη καμπύλωση (εικόνα 1.9α). Όταν τα ηλεκτρόδια θερμανθούν ηλεκτρικά τότε καμπυλώνονται προς τα πάνω με αποτέλεσμα η μικρολαβίδα να ανοίγει. Μια άλλη πρωτοποριακή μικρολαβίδα φαίνεται στην (εικόνα 1.9β) όπου τα άκρα της έχουν μήκος 100 μm περίπου, όσο η διάμετρος μιας ανθρώπινης τρίχας. Ένα μικρό ρεύμα την κρατάει στο επίπεδο και όταν δεν υπάρχει ροή ρεύματος, τότε τα μικρά άκρα κλείνουν προς τα πάνω σχηματίζοντας ένα κελί. Αυτή η μικρολαβίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχειρίζεται μικροοργανισμούς ή σαν χειρουργικό εργαλείο να αφαιρεί ανωμαλίες από ιστούς.



Επίσης υπάρχουν ειδικές μικρολαβίδες οι οποίες μπορούν και συγκρατούν νεύρα ή άλλους ζώντες μικροοργανισμούς (εικόνα 1.10).



Εικόνα 1.9: Μικρολαβίδες [1].



Εικόνα 1.10: Μικρολαβίδες για την συγκράτηση νεύρων [1].

**2<sup>ο</sup>. Μικρονυστέρι.** Ένα μικρονυστέρι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με έναν πιεζοηλεκτρικό μικροκινητήρα σαν χειρουργικό εργαλείο. Χρησιμοποιεί ένα πιεζοηλεκτρικό μικροκινητήρα ικανό για ακριβό χειρισμό [1].

### 1.7.3 RF - MEMS (Radio Frequency)

Τα RF - MEMS είναι μικροηλεκτρομηχανικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για RF εφαρμογές και δεν θα έπρεπε να ερμηνεύονται σαν τα κλασικά MEMS που λειτουργούν στην περιοχή των RF. Τα RF - MEMS παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως πολύ καλή μόνωση και μικρές απώλειες απόσβεσης, αρκετά μεγάλες ταχύτητες, καλή απόδοση, μικρή ισχύ κατανάλωσης και σχετικά μικρό κόστος (σχεδιασμός και κατασκευή από την μικρομηχανική τεχνολογία).

Αυτού του είδους οι διατάξεις είναι:



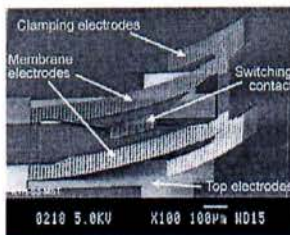
- Μεταλλικοί διακόπτες επαφής.
- Παράλληλοι διακόπτες.
- Μεταβλητοί πυκνωτές.
- Κεραίες.
- Φίλτρα [1].

### 1.7.3.1 Παραδείγματα εφαρμογών των RF - MEMS

Οι εφαρμογές των RF - MEMS μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- RF - MEMS μικροδιακόπτες (εικόνα 1.11) και μεταβλητοί πυκνωτές που μπορούν να μετακινούνται αρκετά μμ όταν ωθούνται επαγωγικά. Λειτουργούν στο D.C. στα 120 GHz και αυτήν την στιγμή είναι σχεδόν μια ολοκληρωμένη τεχνολογία.
- Μικρομηχανικές γραμμές μεταφοράς, συντονιστές, φίλτρα, και κεραίες, που είναι ικανά για τα 12 – 120 GHz, συνήθως ολοκληρώνονται πάνω σε μια μεμβράνη.
- Τα **TFBAR** (Thin Film Bulk Acoustic Resonator) και φίλτρα που χρησιμοποιούν ακουστικές δονήσεις στα λεπτά στρώματα παρουσιάζοντας καλή λειτουργία πάνω από 3GHz.
- Οι RF αντιστάτες και φίλτρα που χρησιμοποιούν μηχανικές δονήσεις για να επιτύχουν υψηλό συντονισμό στα 0.01 – 200 MHz σε κενό.

Τα RF - MEMS έχουν πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή όπως στην κινητή τηλεφωνία, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στα αυτοκίνητα, στους δορυφόρους, σε πυραύλους, κτλ [1].

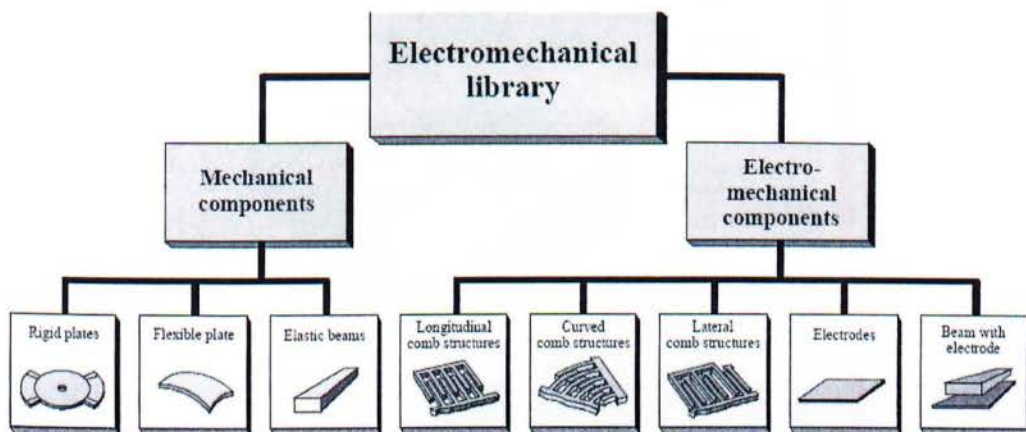


Εικόνα 1.11: RF Μικροδιακόπτης [1].

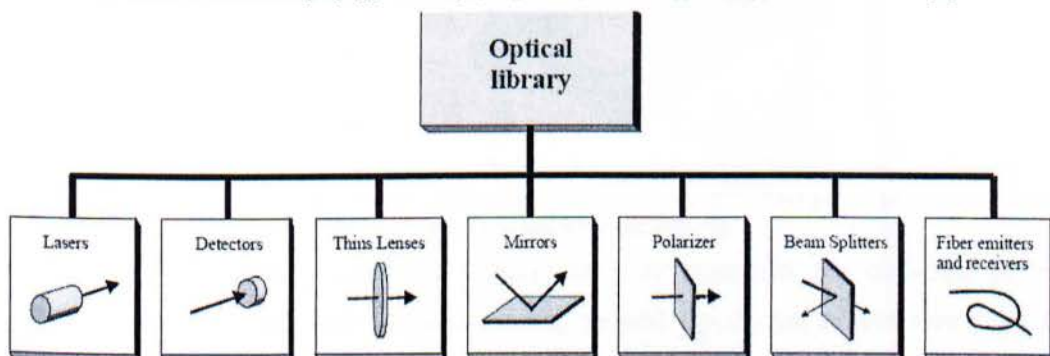
### 1.7.4 Οπτικά MEMS (Optical MEMS ή MOEMS)

Τα **MOEMS** (Micro Opto Electro Mechanical System) είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρομηχανικά, (εικόνα 1.12) και οπτικά μέρη, (εικόνα 1.13) όπως

οπτικούς διακόπτες, ανακλαστήρες κλπ. Τα MOEMS είναι μια εξαιρετική εφαρμογή και χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν, να μεταδίδουν, να φιλτράρουν και σε μερικές περιπτώσεις να ενισχύουν τα οπτικά σήματα [1].



Εικόνα 1.12: Ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα για τον σχεδιασμό των MOEMS [1].

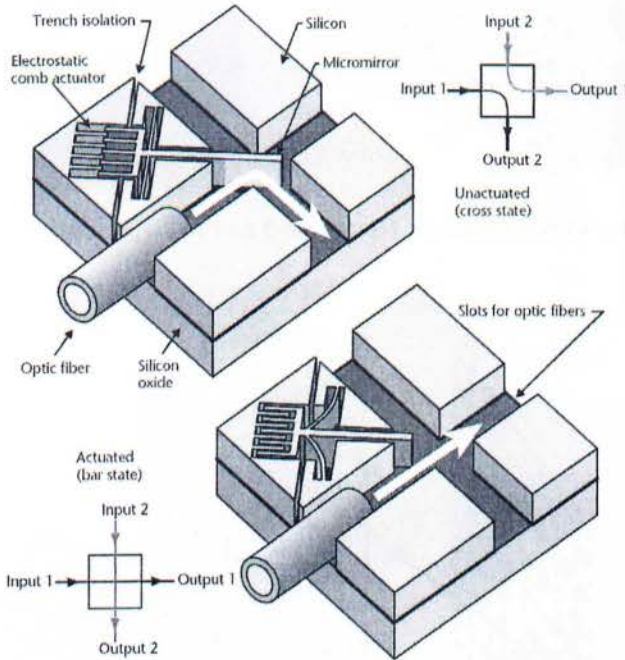


Εικόνα 1.13: Οπτικά εξαρτήματα για τον σχεδιασμό των MOEMS [1].

#### 1.7.4.1 Παραδείγματα εφαρμογών των MOEMS

Γνωστές εφαρμογές των οπτικών MEMS περιλαμβάνουν τους οπτικούς διακόπτες ψηφιακούς αναμεταδότες, μικροφράγματα, μικροσαρωτές, κτλ. Στις εφαρμογές των οπτικών διακοπών (εικόνα 1.14) μικροκαθρέπτες (εικόνα 1.15α,β) η κίνηση των οποίων ελέγχεται μέσω ενεργοποιητών (εικόνα 1.7) χρησιμοποιούνται ώστε να κατευθύνουν το φως από μια εισερχόμενη οπτική ίνα σε μια εξερχόμενη ή το αφήνουν να <περάσει>. Στην περίπτωση που δεν έχουμε έναν οπτικό διακόπτη 2 X 2, όπως

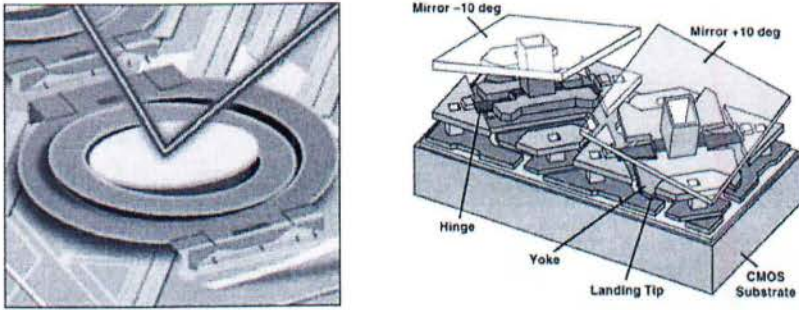
αυτός της εικόνας 1.14, αλλά έναν οπτικό διακόπτη  $N \times N$ , η λειτουργία του επιτυγχάνεται με συστοιχίες μικροκαθρεπτών, όπως φαίνεται στην 3D εικόνα 1.16.



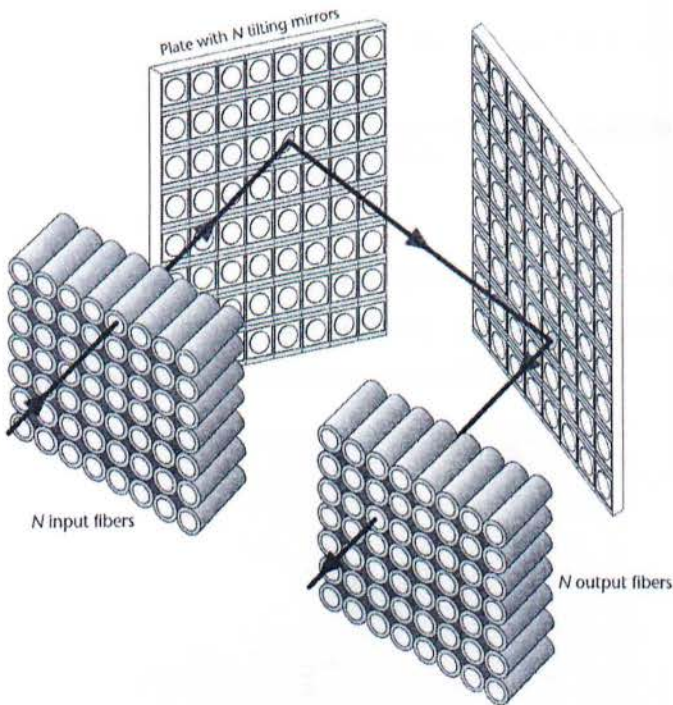
**Εικόνα 1.14: Απεικόνιση ενός 2 X 2 δυαδικού οπτικού διακόπτη. Ένας ηλεκτροστατικός ενεργοποιητής χτενών ελέγχει τη θέση ενός μικροκαθρέπτη και στη συνέχεια ο μικροκαθρέπτης ελέγχει ή όχι την φωτεινή ακτίνα [1].**

Όταν έχουμε την πρόσπτωση της δέσμης από τα αριστερά και ανάλογα με την κατάσταση του κάθε οπτικού διακόπτη, αυτός ανακλά την δέσμη σε κάποιον άλλο και εκείνος με τη σειρά του στην κατάλληλη έξοδο οπτικής ίνας. Στην τρισδιάστατη περίπτωση οι οπτικοί διακόπτες δεν έχουν μόνο δύο καταστάσεις, αλλά μπορούν να αλλάζουν την θέση τους, με τη βοήθεια μικροκαθρεπτών (εικόνα 1.15β) σε ένα συνεχές εύρος γωνιών και σε δύο διαστάσεις, που επιτρέπει σε έναν τέτοιο διακόπτη να κατευθύνει την δέσμη στο χώρο.





Εικόνα 1.15: α) Μικροκαθρέπτης σε οπτικό διακόπτη [1] β) Διάταξη με δύο μικροκαθρέπτες [1].



Εικόνα 1.16: Σχηματική απεικόνιση της τρισδιάστατης αρχιτεκτονικής για έναν διακόπτη  $N \times N$ . Για να ελαχιστοποιήσουν τη μέγιστη γωνιακή μετατόπιση των καθρεφτών, οι δύο συστοιχίες τοποθετούνται σε γωνία  $45^\circ$  σχετικά με το συναφές φως [1].

Στην εικόνα 1.17 ένας μικροκαθρέπτης οδηγεί την ακτίνα που προσπίπτει πάνω του, από την οπτική ίνα εισόδου σε κάποια από τις οπτικές ίνες εξόδου (ανάλογα με τη θέση του μικροκαθρέπτη και σύμφωνα με τους νόμους της ανακλάσεως). Στην πρώτη περίπτωση η ακτίνα οδηγείται από τον μικροκαθρέπτη στην οπτική ίνα μέσω φακών

βαθμιαίου δείκτη διάθλασης **GRIN (GRAded INdex lens)**, ενώ στη δεύτερη περίπτωση γίνεται χρήση μικροφακών [1].

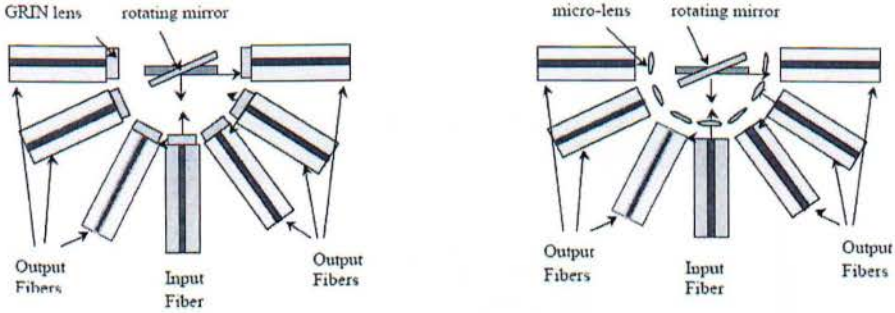


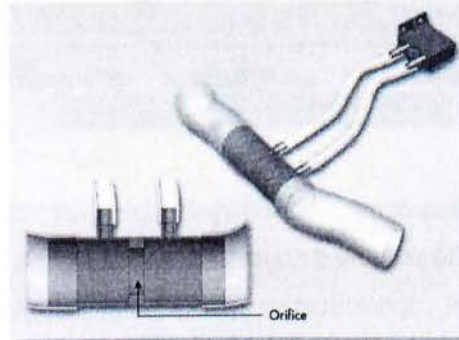
Fig.1 (a) 1xN MEMS Switch with GRIN lens

(b) 1xN MEMS Switch with micro-lens

Εικόνα 1.17: α) 1 x N MOEMS διακόπτης με χρήση φακών GRIN β) 1 x N MOEMS διακόπτης με χρήση μικροφακών [1].

### 1.7.5 MEMS ελέγχου ροής

Τα MEMS ελέγχου ροής (εικόνα 1.18) σχεδιάστηκαν για να αλληλεπιδρούν με υγρό περιβάλλον. Συσκευές όπως αντλίες και βαλβίδες έχουν σχεδιαστεί να κινούνται, να εκβάλουν και να αναμιγνύουν μικρές ποσότητες ρευστών [1].



2. To handle high flow rates, a MEMS flow sensor can be set up in a bypass configuration.

Εικόνα 1.18: MEMS μικροροής [1].

#### 1.7.5.1 Εφαρμογές των MEMS ελέγχου ροής

**1<sup>η</sup> Μικροβαλβίδες.** Έχουν κατασκευαστεί μικροβαλβίδες που ελέγχουν την ροή ή μη αερίων και υγρών. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται σε μια ποσότητα αδρανούς αερίου ή

υγρού που με έναν αντιστάτη θερμαίνεται έως ότου αλλάξει φάση και έτσι ασκεί μια τεράστια δύναμη και κλείνει η βαλβίδα (εικόνες 1.19 & 1.20).

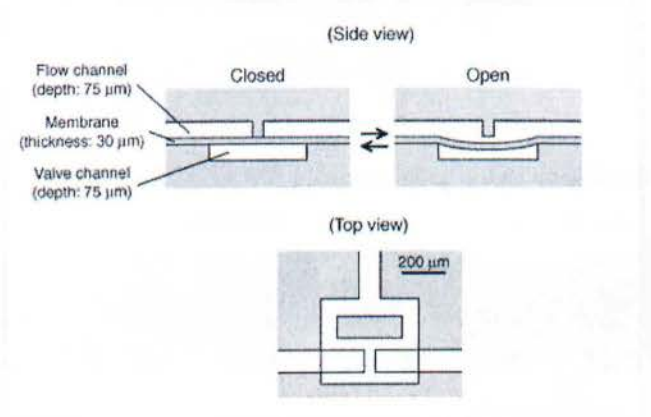
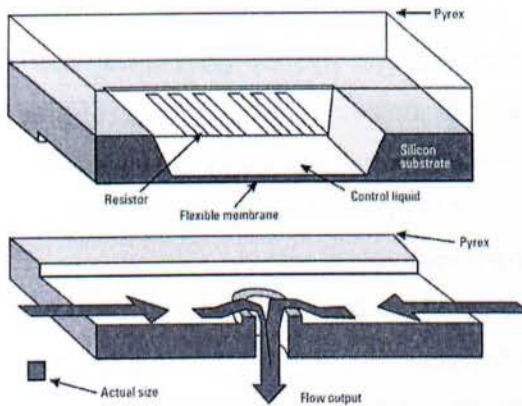


Fig. 2. Micro-valve system with diaphragm structure

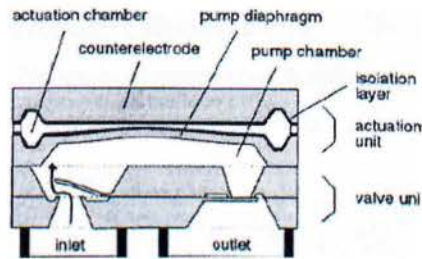
**Εικόνα 1.19: Μικροβαλβίδα [1].**



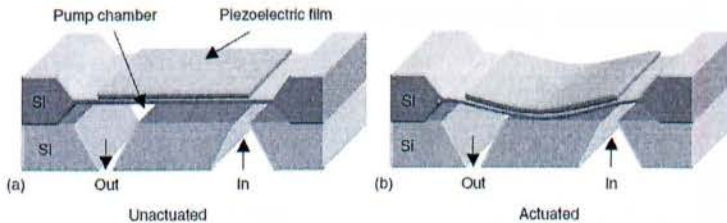
**Εικόνα 1.20: Κατασκευή Μικροβαλβίδας και πορεία ροής [1].**

**2<sup>η</sup> Μικροαντλίες.** Μια μικροαντλία αποτελείται από μια κοιλότητα που σχηματίζεται από μια μεμβράνη και δύο μικροβαλβίδες μονής κατεύθυνσης. Τα ηλεκτρόδια είναι σε μια άλλη κοιλότητα ασφαλισμένα μακριά από το υλικό που θα αντληθεί. Το ρευστό αντλείται από την μια βαλβίδα εισόδου και ελευθερώνεται από την άλλη βαλβίδα εξόδου με την βοήθεια της μεμβράνης, όπως φαίνεται στις εικόνες 1.21 & 1,22 [1].





Εικόνα 1.21: Μικροαντλία με δύο μικροβαλβίδες μονής κατεύθυνσης [1].



Εικόνα 1.22: Μικροαντλία βασισμένη στο Si, (α) απενεργοποιημένη (β) ενεργοποιημένη [1].

### 1.7.6 Βιολογικά MEMS (Bio – MEMS)

Ο τομέας των MEMS που αναμένεται να έχει την μεγαλύτερη ανάπτυξη είναι τα Βιολογικά MEMS (**Bio-MEMS**) (**B**iology **M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystems) (εικόνα 1.23) κυρίως σε τομείς όπως η ανακάλυψη νέων φαρμάκων, η απευθείας μεταφορά των φαρμάκων στους κατάλληλους ιστούς, η ανίχνευση ουσιών, η βιοτηλεμετρία και η γονιδιακή διαμόρφωση. Η κατασκευή όμως των Βιολογικών MEMS απαιτεί διαφορετικές τεχνικές απ' ότι τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αυτό οφείλεται στην ποικιλία των υλικών και των δομών που εμφανίζονται στις βιολογικές επιστήμες, οι οποίες δεν είναι πάντα συμβατές με την επικρατούσα τεχνολογία του Si. Γι' αυτό είναι σημαντική η εξέλιξη νέων μεθόδων για την κατασκευή αισθητήρων και συστημάτων με χαμηλό κόστος και με την προοπτική να χρησιμοποιούνται μόνο μια φορά σε ορισμένες περιπτώσεις.

Μπορούμε να διαιρέσουμε τα Bio - MEMS σε δύο κατηγορίες [1].

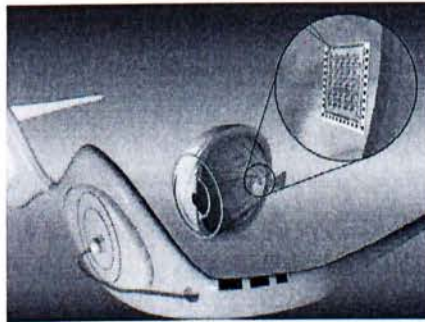
#### 1.7.6.1 Βιολογικοί αισθητήρες

- Πίεσης: Αίματος, Νωτιαίου μυελού, Κοιλότητας εγκεφάλου.
- Θερμοκρασίας.
- Γλυκόζης.
- Παράγοντες **DNA** (**D**eoxyribonucleic **A**cid).

- Δύναμης: Μυϊκός, Οργάνων, Έντασης ιστού.
- Ηλεκτρικής ώθησης: Νεύρων, Εγκεφάλου, Καρδιάς.
- Ανιχνευτών αερίων: Οξυγόνου, Διοξειδίου του άνθρακα.
- Οργάνων ελέγχου ροής αερίων.
- Χημικού ιόντος [1].

#### 1.7.6.2 Βιολογικές συσκευές δράσης

- Αντλίες Microfluidic: Κυκλοφορικού, Αποδέσμευσης φαρμάκων.
- Ρευστά φίλτρα.
- Διαχωριστών.
- Διαδερμικής διεπαφής.
- Ενίσχυσης/ανάλυσης DNA [1].



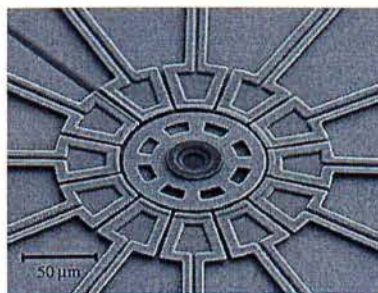
Εικόνα 1.23: Βιολογικός αισθητήρας για αποκατάσταση της όρασης [1].

#### 1.7.7 Μικροκινητήρες (micromotors)

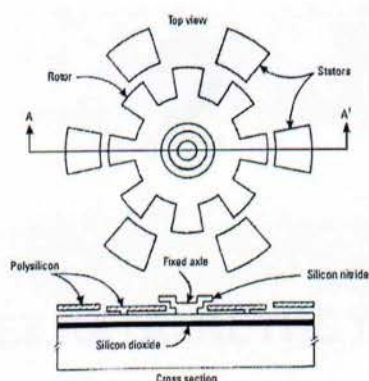
Μια ηλεκτροστατική ώθηση χρησιμοποιεί την ηλεκτροστατική δύναμη που παρέχεται από τους παράλληλους οπλισμούς δομών πυκνωτών. Οι ελκτικές και απωστικές δυνάμεις που δημιουργούνται από την κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων, χρησιμοποιούνται στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια. Έτσι μπορεί και περιστρέφεται ο μικροκινητήρας (εικόνα 1.24 & 1.25) [1].

##### 1.7.7.1 Παραδείγματα εφαρμογών των μικροκινητήρων.

Οι μικροκινητήρες χρησιμοποιούνται π.χ. για να ανοιγοκλείνουν μικροδιαφράγματα σε οπτικά συστήματα, σε κινήσεις μικροσαρωτών και διατάξεων φακών [1].



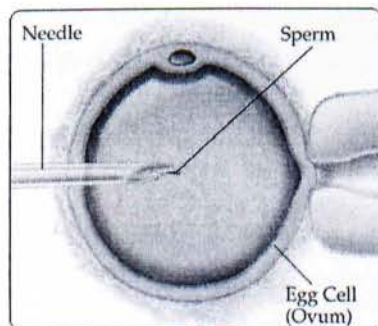
Εικόνα 1.24: MEMS Ηλεκτροστατικός μικροκινητήρας [1].



Εικόνα 1.25: Τμήματα ενός ηλεκτροστατικού μικροκινητήρα [1].

### 1.7.8 Τα MEMS στην Ιατρική (medical MEMS)

Μικροβελόνες κλπ. έχουν κατασκευαστεί ώστε να μειωθεί ο πόνος από τους ασθενείς που πρέπει να τις χρησιμοποιούν συχνά π.χ. οι διαβητικοί ή για τη λήψη και την τοποθέτηση δειγμάτων εξαιρετικά μικρών οργανισμών (εικόνα 1.26) [1].



Εικόνα 1.26: Χρήση Μικροβελόνων στη Γενετική [1].



# 2

## ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ MEMS

Εισαγωγή.....	σελ 28
Μικρομηχανική (micromachining).....	σελ 29
Μικρομηχανική Επιφάνειας (Surface micromachining).....	σελ 30
Μικρομηχανική Όγκου (Bulk micromachining).....	σελ 31
Κατασκευαστικά βήματα διεργασιών για την δημιουργία ενός MEMS.....	σελ 32
Εναπόθεση (Deposition).....	σελ 33
Εναπόθεση χημικού ατμού CVD (Chemical Vapor Deposition).....	σελ 34
Ηλεκτροεναπόθεση (Electrodeposition).....	σελ 35
Εναπόθεση μετάλλου (metal deposition).....	σελ 36
Επιταξία από αέρια φάση (vapor phase epitaxy).....	σελ 37
Οξειδωση.....	σελ 38
Μέθοδοι παρασκευής SiO <sub>2</sub> .....	σελ 41
Διαδικασίες οξειδωσης (oxidation process).....	σελ 41
Θερμική οξειδωση (Thermal Oxidation).....	σελ 41
Ξηρή Οξειδωση (Dry Oxidation or Oxidation in Dry Oxygen).....	σελ 42
Υγρή Οξειδωση (Wet Oxidation or Oxidation in Water Vapor).....	σελ 43
Πυρογενική Οξειδωση (Oxidation in Pyrogenic Steam).....	σελ 44
Ανοδική οξειδωση (Anodic Oxidation).....	σελ 44
Οξειδωση με Πλάσμα (Plasma oxidation).....	σελ 44
Διαδικασία εναπόθεσης (deposition process).....	σελ 45

Επιλογή Τεχνικής.....σελ	45
Λιθογραφία (Lithography).....σελ	46
Φωτολιθογραφία (Photolithography).....σελ	46
Καθαρισμός υποστρώματος (δισκίων).....σελ	48
Απομάκρυνση σωματιδίων (μηχανικός καθαρισμός).....σελ	49
Χημικός καθαρισμός δισκίων.....σελ	49
Φωτορητίνη.....σελ	49
Επίστρωση της φωτορητίνης με φυγοκέντριση.....σελ	50
Θέρμανση (ψήσιμο) της φωτορητίνης.....σελ	51
Έκθεση της φωτορητίνης.....σελ	51
Εμφάνιση φωτορητίνης.....σελ	54
Επαναθέρμανση φωτορητίνης.....σελ	54
Εγχάραξη (Etching).....σελ	54
Διεργασίες εγχάραξης.....σελ	54
Υγρή εγχάραξη (wet etching).....σελ	56
Εγχάραξη με Πλάσμα.....σελ	57
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εγχάραξης με Πλάσμα.....σελ	57



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

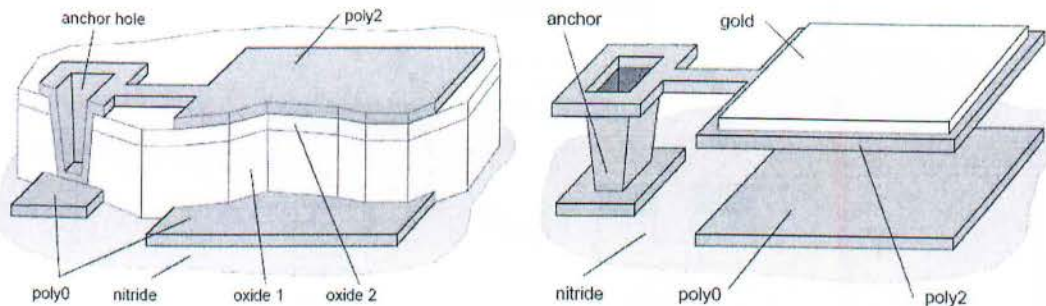
### ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ MEMS

#### 2.1 Εισαγωγή

Τα MEMS αποτελούν ένα ευρύ πεδίο έρευνας για συσκευές που ποικίλουν σε μέγεθος από μερικά μm έως μερικά mm. Πολλές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην έρευνα των MEMS είναι δανεισμένες από την βιομηχανία της Μικροηλεκτρονικής. Έτσι το πεδίο των MEMS εκμεταλλεύεται τέσσερις δεκαετίες εκτεταμένης και καλά χρηματοδοτούμενης έρευνας στις ιδιότητες του Si, την εναπόθεση λεπτών φιλμ, τη φωτολιθογραφία και άλλες σχετικές τεχνολογίες. Επομένως, η έρευνα στα MEMS εμπεριέχει την υπόσχεση για μαζική κατασκευή μικρομηχανών που μπορούν εύκολα να ολοκληρωθούν μαζί με ηλεκτρονικά.

Η **μικρομηχανική** είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται σαν βάση για άλλες, όπως και η κλασσική μηχανική και γι' αυτό δεν εστιάζει σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Αντίθετα εφαρμόζεται σε προβλήματα από ένα ευρύ φάσμα πεδίων, που περιλαμβάνουν την βιοϊατρική, διατάξεις απεικόνισης και αεροδιαστημικούς αισθητήρες.

Μικρομηχανικές διατάξεις έχουν κατασκευαστεί με ένα ευρύ φάσμα από τεχνολογίες κατασκευής, αλλά όλες οι τεχνολογίες αυτές εξαρτώνται κατά κάποιο τρόπο από τα όρια της φωτολιθογραφίας, για τον ορισμό των πολύ μικρών χαρακτηριστικών δομών. Ασχέτως με το πως κατασκευάζονται, όλες οι συσκευές σχηματίζονται από δύο βασικές κατηγορίες υλικών, τα υλικά δόμησης, τα οποία αποτελούν την συσκευή και τα θυσιαζόμενα υλικά, τα οποία αφαιρούνται για να απελευθερώσουν – να αποκαλύψουν την συσκευή (εικόνα 2.1) [1].



Εικόνα 2.1: Αριστερά βλέπουμε την δομή μαζί με τα θυσιαζόμενα υλικά και δεξιά παρατηρούμε την συσκευή μετά την εναπόθεση του μετάλλου (gold) και την απομάκρυνση των θυσιαζόμενων υλικών [1].

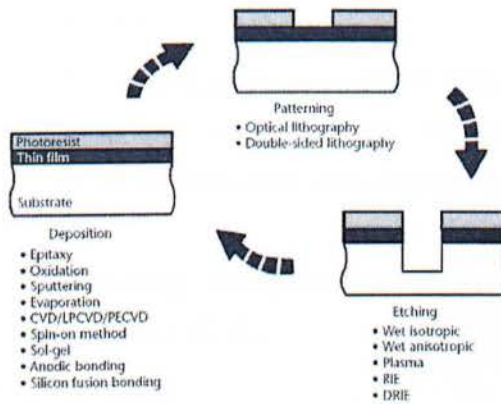
Πίνακας 2.1: Υλικά δόμησης (structural materials), θυσιαζόμενα υλικά (sacrificial materials) και το πεδίο εφαρμογών αυτών [1].

Structural film	Sacrificial film(s)	Technology/application
Polysilicon	CVD oxide, PSG	Surface micromechanics
Silicon nitride	CVD oxide	Thermal isolation
Electroplated nickel	Cu, resist	LIGA
Al	Resist, PECVD oxide	Post-CMOS processing
Au	Cu, resist	Air bridges in RF circuits
Parylene	Resist	Microfluidics
SU-8	Cu, Al	Microfluidics
Cu	Resist	Post-CMOS processing

Στον πίνακα 2.1 μπορούμε να δούμε υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως υλικά δόμησης (structural materials) και ως θυσιαζόμενα υλικά (sacrificial materials) μιας δομής, καθώς και το πεδίο εφαρμογών για κάθε ένα από αυτά. Οι διάφορες διαδικασίες κατασκευής των MEMS διαφέρουν στο πως τα υλικά αυτά εναποτίθενται και αφαιρούνται. Επομένως, η μικρομηχανική διαφέρει από την κλασσική μηχανική, στην οποία τα εξαρτήματα κατασκευάζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες και στη συνέχεια ενώνονται για να δημιουργήσουν την συσκευή [1].

## 2.2 Μικρομηχανική (micromachining)

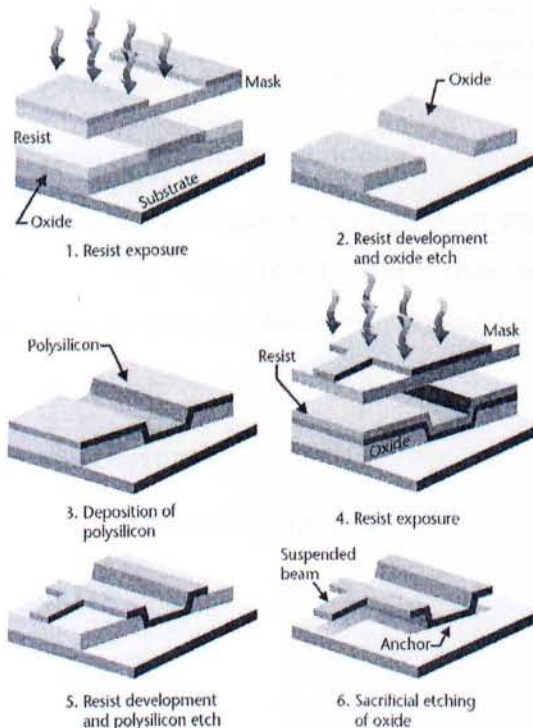
Μικρομηχανική είναι το σύνολο των τεχνολογιών (εικόνα 2.2) που χρησιμοποιούμε για την κατασκευή μικρομηχανικών δομών, όπως μετατροπείς ενέργειας, αισθητήρες, ενεργοποιητές και διάφορες μηχανικές κατασκευές [1].



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση των βασικών βημάτων της διεργασίας κατασκευής μικροδομών, τα οποία και επαναλαμβάνονται μέχρι της ολοκλήρωσης της μικροδομής [1].

### 2.2.1 Μικρομηχανική Επιφάνειας (Surface micromachining)

Η Μικρομηχανική επιφάνειας περιλαμβάνει την εναπόθεση και μορφοποίηση λεπτών υμενίων προκειμένου να υλοποιηθούν οι επιθυμητές μικροδομές στην επιφάνεια του δισκίου (εικόνα 2.3) και μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια προσθετική τεχνική (additive process).



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση των βασικών βημάτων διεργασιών επιφάνειας [1].



Τα γενικά της χαρακτηριστικά είναι:

- Υγρές ή ξηρές τεχνικές εγχάραξης. Στον πίνακα 5 μπορούμε να δούμε υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως υλικά δόμησης (structural materials) και ως θυσιαζόμενα υλικά (sacrificial materials) μιας δομής, καθώς και το μέσο για την εγχάραξή τους (etchant).
- Η φιλοσοφία της σχεδίασης βασίζεται στην τεχνολογία κατασκευής των Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (Ο.Κ.).
- Απαιτείται ακριβός εξοπλισμός.
- Συμβατότητα με Ο.Κ. [1].

**Πίνακας 2.2: Υλικά δόμησης (structural materials), θυσιαζόμενα υλικά (sacrificial materials) και το μέσο εγχάραξης (etchant) αυτών [1].**

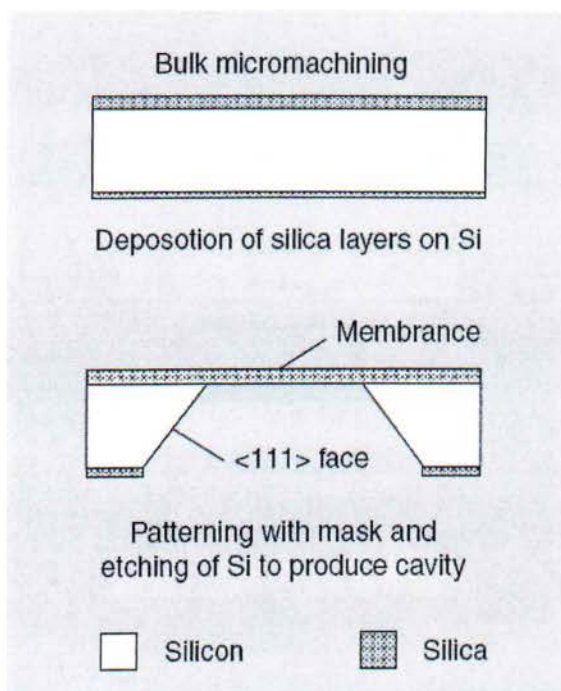
<i>Structural Material</i>	<i>Sacrificial Material</i>	<i>Etchant</i>
Polysilicon	Silicon dioxide/PSG	Hydrofluoric acid
Silicon nitride	Silicon dioxide/PSG	Hydrofluoric acid
Silicon nitride	Polysilicon	Potassium hydroxide; xenon difluoride
Gold, tungsten, molybdenum, other metals	Silicon dioxide/PSG	Hydrofluoric acid
Aluminum	Photoresist/organic	Oxygen plasma
Nickel	Copper	Ammonium persulfate
Silicon-germanium	Germanium	Hydrogen peroxide
Silicon carbide	Silicon dioxide	Hydrofluoric acid

### 2.2.2 Μικρομηχανική Όγκου (Bulk micromachining)

Η Μικρομηχανική Όγκου (εικόνα 2.4) περιλαμβάνει την αφαίρεση σημαντικών περιοχών του κρυσταλλικού υποστρώματος, π.χ. την εγχάραξη κοιλοτήτων σε υπόστρωμα πυριτίου και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι μία αφαιρετική τεχνική (subtractive process).

Τα γενικά της χαρακτηριστικά είναι:

- Υγρές ή ξηρές τεχνικές εγχάραξης.
- Παραδοσιακή βιομηχανία Μικροσυστημάτων.
- Φθηνός εξοπλισμός [1].



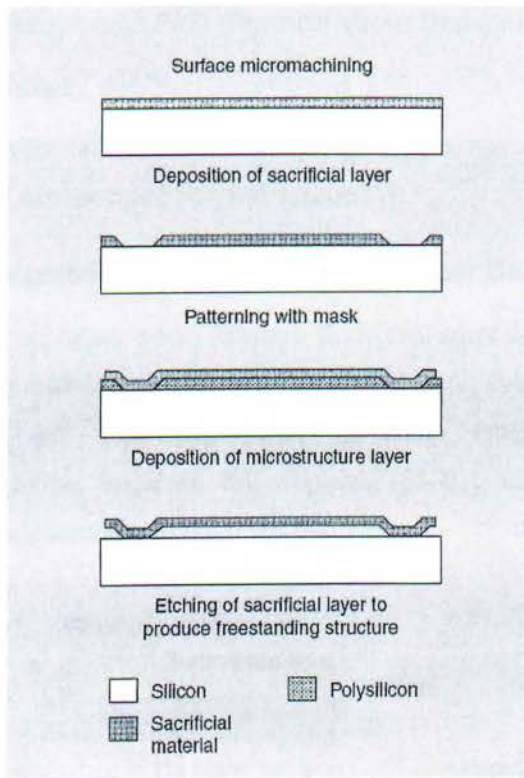
Εικόνα 2.4: Επίδειξη των βημάτων που χρησιμοποιούνται στην μικρομηχανική υποστρώματος [1].

### 2.3 Κατασκευαστικά βήματα διεργασιών για την δημιουργία ενός MEMS

Υπάρχουν τρεις βασικές ομάδες διεργασιών:

- η Εναπόθεση (Deposition).
- η Λιθογραφία (Lithography).
- η Εγχάραξη (Etching).

Κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει διάφορες φάσεις επεξεργασίας που επιλέγονται από τον σχεδιαστή κατά την σχεδίαση μιας μικρό - ηλεκτρο - μηχανικής διάταξης (εικόνα 2.5) [1].



Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων που περιλαμβάνονται στην μικρομηχανική επιφανείας [1].

### 2.3.1 Εναπόθεση (Deposition)

Η τεχνολογία της εναπόθεσης μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο ομάδες:

- Εναποθέσεις που συμβαίνουν λόγω μιας χημικής αντίδρασης, όπως:
  - Εναπόθεση χημικού ατμού **CVD (Chemical Vapor Deposition)**.
  - Ηλεκτροεναπόθεση (Electrodeposition).
  - Επιταξία από αέρια φάση (Vapor phase epitaxy).
  - Οξείδωση (Oxidation).

Οι παραπάνω διαδικασίες εκμεταλλεύονται τη δημιουργία των στερεών υλικών άμεσα από τις χημικές αντιδράσεις αερίων ή υγρών με το υλικό του υποστρώματος.

- Εναποθέσεις που πραγματοποιούνται λόγω μιας φυσικής αντίδρασης, όπως:

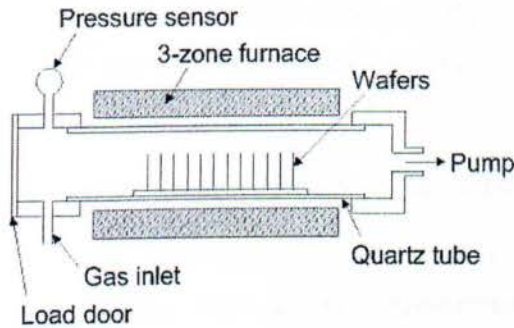


- Φυσική απόθεση ατμού **PVD (Physical Vapor Deposition)**.
- Εκτόξευση – ρίψη.

Οι παραπάνω διαδικασίες εκμεταλλεύονται τη δημιουργία των στερεών υλικών άμεσα από την φυσική κίνηση αυτών προς το υπόστρωμα [1].

### 2.3.1.1 Εναπόθεση χημικού ατμού CVD (Chemical Vapor Deposition)

Η χημική εναπόθεση από αέρια φάση (ατμού), βασίζεται στην κατάλυση αντίδρασης με αντιδραστήρα σε αέρια φάση από θερμική ή άλλης μορφής ενέργεια, όπως πλάσμα ή οπτική ακτινοβολία, για την παραγωγή υμενίων διοξειδίου του πυριτίου, οπτική ακτινοβολία, για την παραγωγή υμενίων διοξειδίου του πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, νιτριδίου του πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), καθώς και μεταλλικών ή άλλων υλικών στην επιφάνεια του δισκίου (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Τυπικός LPCVD αντιδραστήρας με θερμά τοιχώματα [1].

Η φύση της διεργασίας είναι παρόμοια με αυτή της επιταξίας από αέρια φάση, με τη διαφορά ότι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται οδηγούν στη δημιουργία πολυκρυσταλλικών ή άμορφων υλικών.

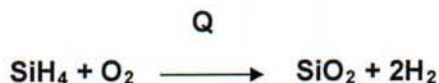
Τα κύρια υλικά που εναποτίθενται με τη μέθοδο αυτή είναι:

- Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ( poly - Si). Παρασκευάζεται συνήθως από την θερμική διάσπαση (πυρόλυση) της σιλάνης σε θερμοκρασία 575 - 650 °C.



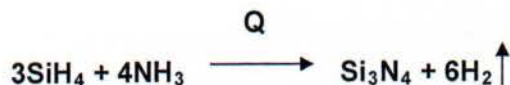
Χρησιμοποιείται σαν ηλεκτρόδιο πύλης σε διατάξεις MOS, σαν αγώγιμος σύνδεσμος μεταξύ επιπέδων μετάλλου και σαν υλικό σύνδεσης με ρηχές επαφές. Με μικρό ποσοστό οξυγόνου γίνεται ημιμονωτικό και βρίσκει εφαρμογή στην κάλυψη και την προστασία του κυκλώματος από περιβαλλοντικές επιδράσεις.

- Το διοξείδιο του πυριτίου. Δημιουργείται από την οξείδωση της σιλάνης σε θερμοκρασία μικρότερη των 500 °C.



Χρησιμοποιείται σαν μονωτικό μεταξύ αγώγιμων στρωμάτων, σαν μάσκα διάχυσης ή εμφύτευσης, σαν πηγή διάχυσης (σε νοθευμένη μορφή) καθώς και για την προστασία των διατάξεων από εξωτερικές επιδράσεις (passivation).

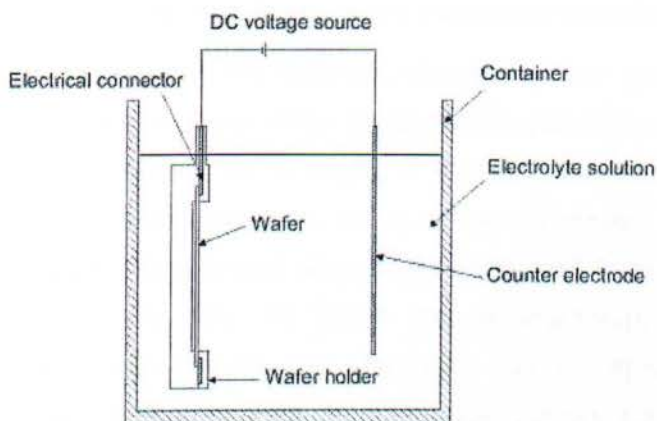
- Το νιτρίδιο του πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Είναι προϊόν αντίδρασης αερίου αμμωνίας με σιλάνη, χλωρίδιο ή υδροχλωρίδιο του πυριτίου σε θερμοκρασίες 700 - 900 °C.



Αποτελεί φράγμα στη διάχυση του νατρίου. Είναι σχεδόν αδιαπέραστο από την υγρασία. Χρησιμοποιείται επίσης σαν μάσκα, προστατεύοντας από οξείδωση επιλεγμένες περιοχές. Σε συνδυασμό με  $\text{SiO}_2$  χρησιμοποιείται σαν διηλεκτρικό πύλης σε τρανζίστορ MOS [1].

### 2.3.1.2 Ηλεκτροεναπόθεση (Electrodeposition)

Ένας άλλος τρόπος επιμετάλλωσης είναι η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης (εικόνα 2.7). Ηλεκτρόλυση καλείται η απ' ευθείας πραγματοποίηση χημικών ή φυσικών (σπανιότερα) δράσεων κατά την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από υδατικά διαλύματα. Ουσιαστικά η λέξη ηλεκτρόλυση σημαίνει ότι σπάει κάποιος δεσμός της διαλυόμενης ουσίας στα συστατικά της με την βοήθεια του ηλεκτρικού ρεύματος. Μια μέθοδος, που παρόλο την απλότητα της διάταξης μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερα πάχη επιμετάλλωσης από οποιαδήποτε άλλη τεχνική.



Εικόνα 2.7: Τυπική διάταξη ηλεκτροεναπόθεσης [1].

Δυστυχώς δεν προσφέρεται για ομοιομορφία των εναποτιθέμενων ταινιών. Η διαδικασία της ηλεκτροεναπόθεσης χρησιμοποιείται για υλικά όπως ο χαλκός, ο χρυσός και το νικέλιο [1].

### 2.3.1.3 Εναπόθεση μετάλλου (metal deposition)

Η εναπόθεση μετάλλου είναι η διεργασία κατά την οποία δημιουργούνται σχήματα λεπτού μεταλλικού υμενίου στην επιφάνεια ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος για την ηλεκτρική σύνδεση των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν τις διατάξεις. Για την πραγματοποίηση ωμικών επαφών, το μέταλλο έρχεται σε άμεση επαφή με το πυρίτιο με τη δημιουργία, τοπικά, κράματος (με θέρμανση σε 450 - 470 °C σε αδρανή ατμόσφαιρα αζώτου) έτσι ώστε να υφίσταται μια περιοχή μετάλλου - πυριτίου στην επιφάνεια. Το μέταλλο, κατά την εναπόθεση, καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του δισκίου. Οι διασυνδέσεις μεταξύ των διατάξεων πραγματοποιούνται είτε με την εγχάραξη (αφαιρετική διεργασία) του μετάλλου είτε με την προσθετική διεργασία (lift - off), (εικόνα 2.16) οπότε η αρχική εναπόθεση του μετάλλου γίνεται πάνω στην ήδη διαμορφωμένη ρητίνη.

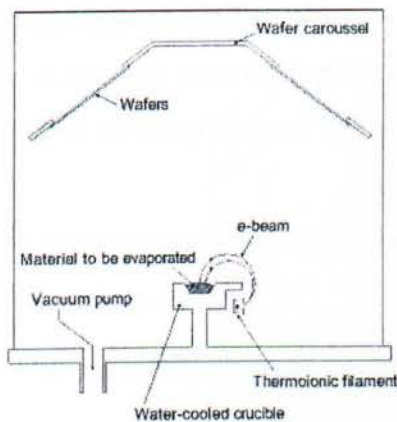
Στην επιλογή του κατάλληλου μετάλλου και της διεργασίας θα πρέπει να ικανοποιούνται δύο κριτήρια:

- Θα πρέπει να δημιουργούνται με το πυρίτιο ωμικές και όχι ανορθωτικές επαφές.



- Το μέταλλο πρέπει να προσκολλάται στο πυρίτιο και το διοξείδιο του πυριτίου.

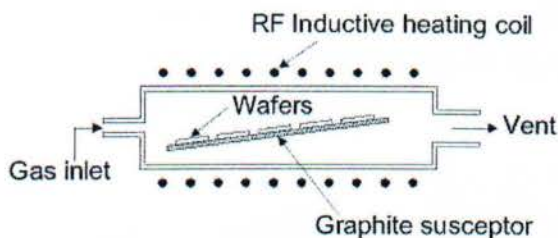
Η συνήθης μέθοδος εναπόθεσης του αγωγίμου στρώματος των μεταλλικών επαφών είναι αυτή της εναπόθεσης εν κενώ, όπου δημιουργείται ροή ατόμων μετάλλου από πηγή μετάλλου, είτε μέσω θέρμανσης της πηγής σε θερμοκρασία εξάχνωσης, είτε μέσω πρόσκρουσης ιόντων και διάβρωσης της πηγής. Στην περίπτωση εξάχνωσης αυτή πραγματοποιείται με χρήση θερμαντικού νήματος, με επαγωγική θέρμανση, ή με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων (εικόνα 2.8). Τα άτομα και τα συμπλέγματα ατόμων που αποτελούν την ροή, συναθροίζονται στις επιφάνειες του συστήματος κενού, που βρίσκονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, συμπεριλαμβανομένων και των επιφανειών των δισκίων [1].



Εικόνα 2.8: Τυπική διάταξη εξάχνωσης υλικών με δέση ηλεκτρονίων [1].

#### 2.3.1.4 Επιταξία από αέρια φάση (vapour phase epitaxy)

Η επιταξιακή ανάπτυξη, όπως χρησιμοποιείται στην κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι μια χημική διαδικασία υψηλής θερμοκρασίας με την οποία ένα μονοκρυσταλλικό στρώμα αναπτύσσεται πάνω σ' ένα υπόστρωμα παρόμοιας κρυσταλλικής δομής. Τα επιταξιακά στρώματα πυριτίου αναπτύσσονται με τη βοήθεια χημικών αντιδράσεων, των οποίων το πυρίτιο είναι το προϊόν και λαμβάνοντας μέτρα ώστε η ανάπτυξη αυτή να συμβεί στην επιφάνεια του δισκίου. Με τις κατάλληλες θερμοκρασίες και τους κατάλληλους ρυθμούς εναπόθεσης, το υμένιο που προκύπτει είναι μονοκρυσταλλικό.



Εικόνα 2.9: Τυπικός αντιδραστήρας επιταξιακής εναπόθεσης από ατμό με ψυχρά τοιχώματα [1].

Η εικόνα 2.9 παρουσιάζει έναν οριζόντιο αντιδραστήρα όπου τα δισκία θερμαίνονται με υψίσυχη (RF) επαγωγική θέρμανση μέσω του πηνίου του υποδοχέα (susceptor) από γραφίτη ο οποίος συγκρατεί τα δισκία. Πλεονέκτημα της θέρμανσης μόνο των δισκίων αντί όλου του κυλίνδρου είναι ότι το επιταξιακό πυρίτιο δημιουργείται μόνο πάνω στα δισκία / υποδοχέα και όχι σε όλα τα σημεία του αντιδραστήρα. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της επιλεκτικής θέρμανσης είναι ότι η βαθμίδα στη θερμοκρασία από τα δισκία στο κυλινδρικό δοχείο τείνει να αποτρέπει την μεταφορά ξένων προσμίξεων από το δοχείο στα δισκία.

Ο έλεγχος της διεργασίας επιτυγχάνεται με ακριβή καθορισμό των εξής:

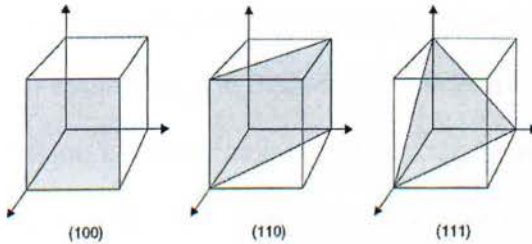
- της θερμοκρασίας του υποστρώματος.
- της μοριακής αναλογίας του αντιδραστηρίου που περιέχει πυρίτιο.
- της διάρκειας εναπόθεσης.
- του ποσοστού εισαγόμενης πρόσμιξης [1].

### 2.3.1.5 Οξείδωση

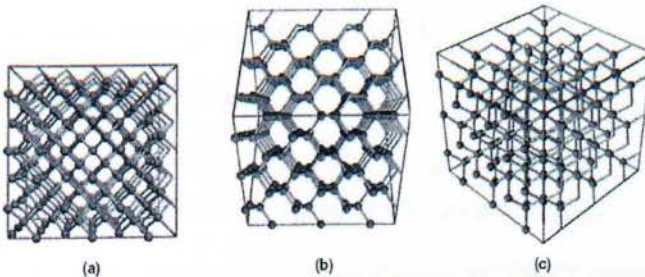
Οξείδωση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα στρώμα οξειδίου παράγεται στην επιφάνεια του πυριτίου με σκοπό να προστατέψει το πυρίτιο από χημικές επιδράσεις ή να δράσει σαν ηλεκτρικός μονωτής. Ο ρυθμός της οξείδωσης επηρεάζεται από την παρουσία προσμίξεων στο οξειδωτικό μέσο. Κατά την ανάπτυξη του οξειδίου ένα ποσοστό του υποστρώματος πυριτίου καταναλίσκεται για τη δημιουργία του οξειδίου. Ο ρυθμός οξείδωσης μπορεί να αλλάξει (να αυξηθεί) με αύξηση της πίεσης του οξειδωτικού υλικού για δεδομένη θερμοκρασία. Ο ρυθμός οξείδωσης είναι επίσης συνάρτηση του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού του πυριτίου, λόγω του αριθμού



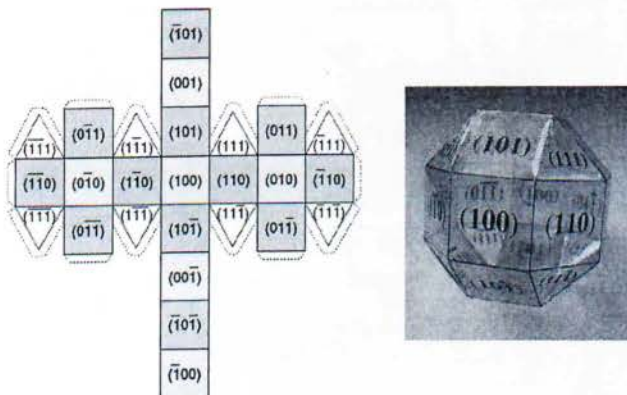
των δεσμών πυριτίου που διατίθενται για την αντίδραση. Οι ρυθμοί αντίδρασης αυξάνουν περίπου με ένα λόγο 1:2:3 για κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό πυριτίου (100), (110) και (111) (εικόνες 2.10, 2.11, 2.12) [1].



Εικόνα 2.10: Μερικά σημαντικά κρυσταλλογραφικά επίπεδα πυριτίου με τους αντίστοιχους δείκτες Miller [1].



Εικόνα 2.11: Κρύσταλλος πυριτίου που παρουσιάζεται υπό διαφορετικές γωνίες [1].



Εικόνα 2.12: Ανάπτυγμα μοντέλου επιφανείας των κρυσταλλογραφικών επιπέδων του Si [1].

Δεν πρέπει να παραβλέψουμε το γεγονός ότι η κυριαρχία του πυριτίου έναντι του γερμανίου σαν βασικό ημιαγωγικό υλικό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις πολύ καλές

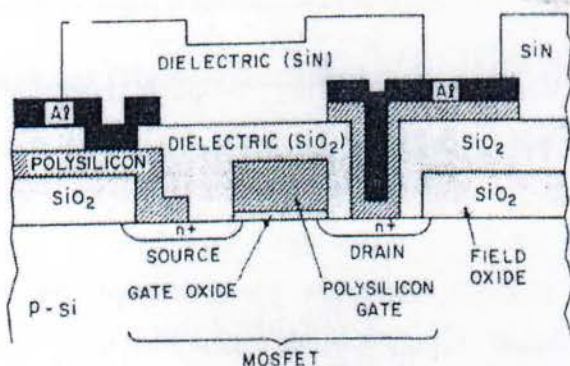


φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του οξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) συγκριτικά με το οξείδιο του γερμανίου ( $\text{GeO}_2$ ).

Το οξείδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή των Ο.Κ. σε πάχη που κυμαίνονται από 6 nm έως 1  $\mu\text{m}$ . Μερικές από τις εφαρμογές του είναι:

- Σαν μάσκα για την εμφύτευση ή τη διάχυση προσμίξεων στο Si.
- Για την αδραντοποίηση και προστασία της επιφάνειας (passivation).
- Για τη μόνωση μεταξύ των διαφόρων διατάξεων ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, π.χ. Τοπική Οξειδωση του πυριτίου **LOCOS** ( **LOC**al **O**xidation of **S**ilicon).
- Σαν συνιστώσα στις δομές **MOS** (**M**etal **O**xide **S**emiconductor), π.χ. Οξείδιο Πύλης (Gate Oxide) στο τρανζίστορ MOSFET.
- Σαν Πηγή Διάχυσης Προσμίξεων.
- Στα MEMS τα φιλμ του θερμικού οξειδίου χρησιμοποιούνται ως θυσιαζόμενα υλικά και επίσης μπορούν να παράγουν πολύ μικρές δομές.

Στην εικόνα 2.13 φαίνεται η κατατομή ενός τρανζίστορ MOSFET όπου και μπορούμε να διακρίνουμε τις διαφορετικές χρήσεις του οξειδίου του πυριτίου [1].



Εικόνα 2.13: Κάθετη τομή ενός τρανζίστορ MOSFET, απ' όπου μπορούμε να διακρίνουμε τις χρήσεις του οξειδίου του πυριτίου  $\text{SiO}_2$  [1].

### 2.3.1.6 Μέθοδοι παρασκευής SiO<sub>2</sub>

Οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη οξειδίων, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν βασίζονται σε:

- διαδικασία οξείδωσης (oxidation process).
- σε διαδικασία εναπόθεσης (deposition process) [1].

### 2.3.1.7 Διαδικασίες οξείδωσης (oxidation process)

Στις διαδικασίες οξείδωσης η ανάπτυξη του υμενίου του οξειδίου βασίζεται σε φαινόμενα έγχυσης που λαμβάνουν χώρα σε δύο επιφάνειες:

- Στη διεπιφάνεια οξειδίου / αερίου (oxide / gas interface).
- Στη διεπιφάνεια οξειδίου / υποστρώματος (oxide / substrate).

Η σύσταση και οι ιδιότητες του οξειδίου καθορίζονται από τους νόμους της θερμοδυναμικής και από το εξωτερικό περιβάλλον. Γενικά διακρίνουμε τρεις διαδικασίες οξείδωσης:

- Την Θερμική Οξείδωση (Thermal Oxidation).
- Την Ανοδική Οξείδωση (Anodic Oxidation).
- Την Οξείδωση με Πλάσμα (Plasma Oxidation) [1].

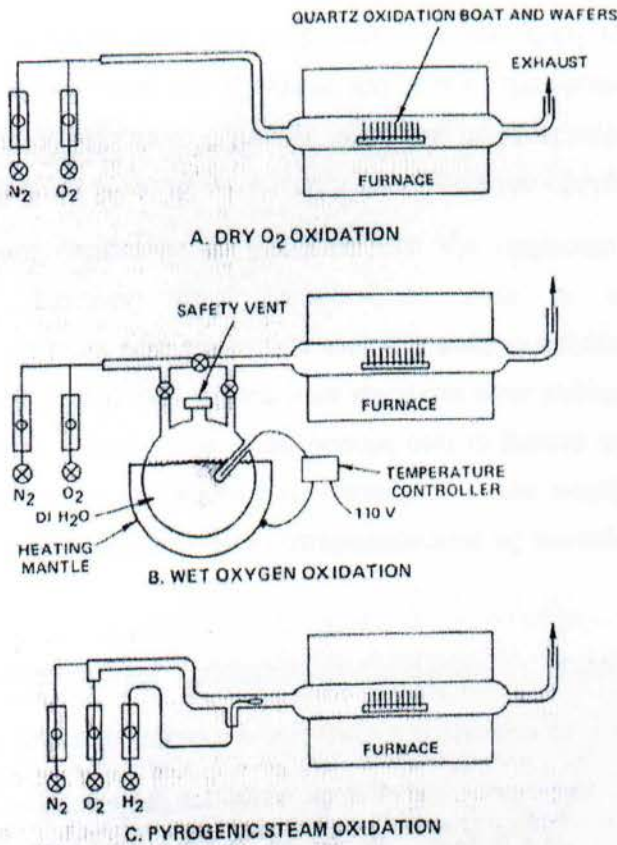
### 2.3.1.8 Θερμική οξείδωση (Thermal Oxidation)

Επειδή το πυρίτιο έχει μεγάλη συγγένεια με το οξυγόνο, ένα στρώμα οξειδίου του πυριτίου σχηματίζεται στην επιφάνεια του πυριτίου αμέσως μόλις αυτό εκτεθεί σε οξειδωτικό περιβάλλον. Το οξείδιο αυτό έχει πάχος 2 - 3 nm και ονομάζεται native oxide. Προκειμένου για την ανάπτυξη θερμικών οξειδίων με ελεγχόμενο και επαναλήψιμο τρόπο, χρησιμοποιούμε τα συστήματα θερμικής οξείδωσης που απεικονίζονται στην εικόνα 2.14. Η θερμοκρασιακή περιοχή που αναπτύσσονται τα θερμικά οξείδια είναι από 600 - 1200 °C.

Γενικά διακρίνουμε τρία είδη θερμικής οξείδωσης:

- Την Ξηρή Οξείδωση (Dry Oxidation or Oxidation in Dry Oxygen).

- Την Ξηρή Οξειδωση (Wet Oxidation or Oxidation in Water Vapor).
- Την Πυρογενική Οξειδωση (Oxidation in Pyrogenic Steam) [1].



Εικόνα 2.14: Συστήματα Θερμικής οξειδωσης [1].

### 2.3.1.9 Ξηρή Οξειδωση (Dry Oxidation or Oxidation in Dry Oxygen)

Η χημική αντίδραση που περιγράφει την ανάπτυξη του οξειδίου κατά την ξηρή οξειδωση είναι η ακόλουθη:



Η ξηρή οξειδωση λαμβάνει χώρα σε φούρνους οξειδωσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.14a. Ο φούρνος της θερμικής οξειδωσης είναι από quartz και θερμαίνεται από



αντιστάσεις που τον περιβάλλουν. Μετά το χημικό καθαρισμό τα δισκία τοποθετούνται σε μια βάση από quartz (wafer holder) και εισέρχονται στο φούρνο. Η είσοδος των δισκίων στο φούρνο γίνεται με αργό ρυθμό, προκειμένου να αποφευχθεί το θερμικό σοκ των δισκίων, εξαιτίας των θερμοκρασιακών βαθμίδων που αναπτύσσονται.

Όταν το αέριο που διέρχεται μέσα από το φούρνο είναι 100 % O<sub>2</sub> λέμε ότι η οξειδωση λαμβάνει χώρα σε μερική πίεση του οξυγόνου, ίση με την ατμοσφαιρική. Αντίθετα, όταν μέσα από το φούρνο διέρχεται ένα μίγμα O<sub>2</sub> με κάποιο αδρανές αέριο (συνήθως N<sub>2</sub>) η οξειδωση μπορεί να λάβει χώρα με μικρότερη μερική πίεση του οξυγόνου.

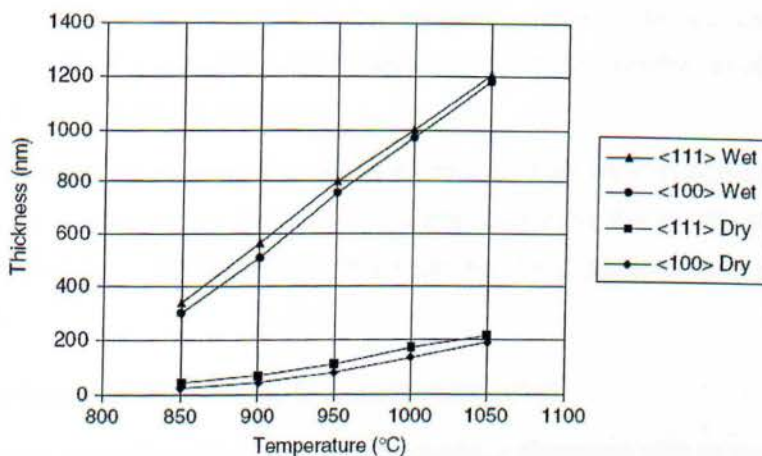
Ο ρυθμός της ξηρής οξειδωσης επηρεάζεται από την παρουσία προσμίξεων στο οξειδωτικό μέσο. Συνήθεις πηγές προσμίξεων είναι οι υδρατμοί και οι υδρογονάνθρακες, οι οποίοι κατά την είσοδό τους στο φούρνο καίγονται και δίνουν H<sub>2</sub>O και CO<sub>2</sub>. Η παρουσία αυτών των προσμίξεων οφείλεται στην καθαρότητα των αερίων που χρησιμοποιούνται. Προκειμένου να αυξήσουμε όσο το δυνατό την καθαρότητα του οξειδωτικού περιβάλλοντος χρησιμοποιούμε διαφόρων ειδών παγίδες, πριν από την είσοδο των αερίων στο φούρνο, ώστε να απομακρύνουμε τις ανεπιθύμητες προσμίξεις [1].

### 2.3.1.10 Υγρή Οξειδωση (Wet Oxidation or Oxidation in Water Vapor)

Η χημική αντίδραση που περιγράφει την ανάπτυξη του οξειδίου κατά την υγρή οξειδωση είναι η ακόλουθη:



Η υγρή οξειδωση λαμβάνει χώρα σε φούρνους οξειδωσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.14b. Το αέριο διέρχεται μέσα από ένα θερμαινόμενο δοχείο με απιονισμένο νερό και εμπλουτίζεται με υδρατμούς. Στη συνέχεια το αέριο διοχετεύεται μέσα στο φούρνο όπου πραγματοποιείται η θερμική οξειδωση. Η θερμοκρασία του νερού στο θερμαινόμενο δοχείο είναι 85 - 95 °C. Ο ρυθμός οξειδωσης είναι συνάρτηση του είδους οξειδωσης, υγρή ή ξηρή καθώς και των κρυσταλλογραφικών επιπέδων [1], διάγραμμα 2.1.



Διάγραμμα 2.1: Διαφορά πάχους οξειδωσης πυριτίου μεταξύ των κρυσταλλογραφικών επιπέδων του [1].

### 2.3.1.11 Πυρογενική Οξείδωση (Oxidation in Pyrogenic Steam)

Η πυρογενική οξείδωση είναι αντίστοιχη με την υγρή οξείδωση. Η διαφορά έγκειται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η εισαγωγή των υδρατμών στο φούρνο οξείδωσης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.11c, κατά την πυρογενική οξείδωση, η παρουσία των υδρατμών οφείλεται στην αντίδραση του  $O_2$  με το  $H_2$  κατά την εισαγωγή τους στο φούρνο. Με αυτή την τεχνική μπορούμε να βελτιώσουμε την καθαρότητα των υδρατμών [1].

### 2.3.1.12 Ανοδική οξείδωση (Anodic Oxidation)

Στην ανοδική οξείδωση, το οξείδιο αναπτύσσεται μέσα σε μια ηλεκτρολυτική κυψελίδα με την εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στο δίσκιο του πυριτίου (το οποίο παίζει το ρόλο της ανόδου) και ενός ηλεκτροδίου από Pt (το οποίο παίζει το ρόλο της καθόδου). Τα δύο αυτά ηλεκτρόδια βρίσκονται μέσα σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα [1].

### 2.3.1.13 Οξείδωση με Πλάσμα (Plasma oxidation)

Στη διαδικασία αυτή ο ηλεκτρολύτης της ανοδικής οξείδωσης αντικαθίσταται από ένα αέριο πλάσμα οξυγόνου. Η επιφάνεια του οξειδίου βομβαρδίζεται από ένα μεγάλο αριθμό φορτισμένων και ουδέτερων σωματιδίων (μορίων, ατόμων, ελευθέρων ριζών και ηλεκτρονίων) των οποίων η ηλεκτρική κατάσταση και συγκέντρωση καθορίζεται από τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά το σχηματισμό του πλάσματος. Η διαδικασία



ονομάζεται οξειδωση με πλάσμα (plasma oxidation), όταν το δισκίο είναι στον αέρα (floating) σε σχέση με το πλάσμα και ανοδίωση με πλάσμα (plasma anodization), όταν το δισκίο βρίσκεται σε θετικό δυναμικό.

Κατά την οξειδωση με πλάσμα δεν διέρχεται ρεύμα μέσα από το οξειδίο (σε αυτό το σημείο είναι παρόμοια με την θερμική οξειδωση), ενώ κατά την ανοδίωση με πλάσμα διέρχεται ρεύμα από το οξειδίο, όπως στην περίπτωση της οξειδωσης σε ηλεκτρολυτική κυψελίδα [1].

#### 2.3.1.14 Διαδικασία εναπόθεσης (deposition process)

Στις διαδικασίες εναπόθεσης η ανάπτυξη του οξειδίου εξαρτάται από τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα έξω από το οξειδίο ή στην επιφάνεια του. Το μεγαλύτερο μέρος του ήδη σχηματισμένου οξειδίου δεν συμμετέχει στην περαιτέρω ανάπτυξη του (όταν η θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή). Η σύσταση του οξειδίου εξαρτάται σημαντικά από την τεχνική που χρησιμοποιείται για την εναπόθεση. Η ανάπτυξη του οξειδίου μπορεί να γίνει με:

- Φυσικές τεχνικές εναπόθεσης (**PVD - Physical Vapor Deposition**).
  - Με εξάχνωση (evaporation).
  - Με κωνιορτοποίηση (sputtering).
- Χημικές τεχνικές εναπόθεσης από ατμό (**CVD - Chemical Vapor Deposition**) [1].

#### 2.3.1.15 Επιλογή Τεχνικής

Η επιλογή της μεθόδου παρασκευής του οξειδίου γίνεται με τα παρακάτω κριτήρια:

- Το πάχος του οξειδίου.
- Τις ιδιότητες του οξειδίου.

Σε αρκετά μεγάλο βαθμό τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθορίζονται από το που θα χρησιμοποιηθεί το οξειδίο, που θέλουμε να αναπτύξουμε. Έτσι:

- Για οξειδίο της πύλης των τρανζίστορ, που απαιτούνται καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, χρησιμοποιούμε θερμική οξειδωση με ξηρό οξυγόνο.



- Για την προστασία της επιφάνειας του δισκίου (passivation) χρησιμοποιούμε τεχνικές CVD.
- Για την ανάπτυξη οξειδίων μεγάλου πάχους, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική μόνωση των διατάξεων, χρησιμοποιούμε την υγρή οξείδωση [1].

### 2.3.2 Λιθογραφία (Lithography)

#### 2.3.2.1 Φωτολιθογραφία (Photolithography)

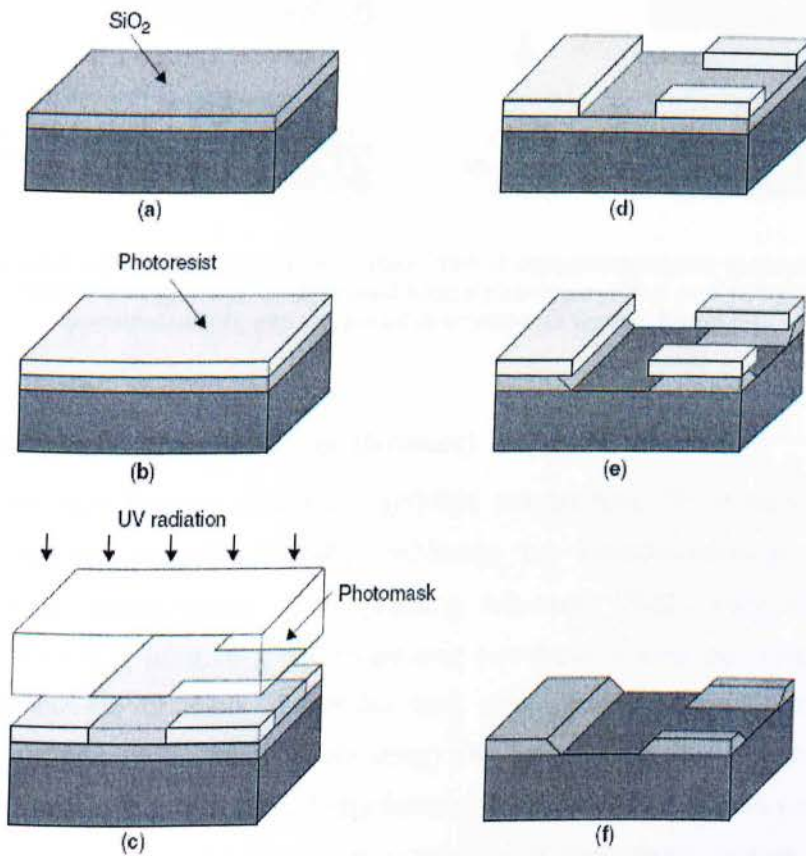
Φωτολιθογραφία στη μικροηλεκτρονική ονομάζεται η φωτογραφική διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του σχεδίου μιας μάσκας πάνω σ' ένα υπόστρωμα (εικόνα 2.15, 2.16). Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα σήμερα κατασκευάζονται με επίπεδη τεχνολογία δηλαδή με εναπόθεση διαδοχικών στρωμάτων (υμένια ή φιλμ) και σχηματοποίηση τους ώστε να δημιουργηθούν οι πύλες των τρανζίστορ, οι γραμμές των αγωγών ρεύματος και άλλα απαραίτητα στοιχεία αυτών. Για τη σχηματοποίηση των λεπτών αυτών υμενίων απαιτείται η χρήση προηγμένων τεχνολογιών αποτύπωσης σχήματος (patterning technologies). Η τεχνολογία αποτύπωσης εμπεριέχει δύο σημαντικές τεχνολογικές διεργασίες: τη λιθογραφία και την εγχάραξη με υγρά χημικά ή με ηλεκτρικές εκκενώσεις πλάσματος. Η οπτική λιθογραφία βασίζεται στην αλλοίωση με χρήση φωτεινής ακτινοβολίας (κυρίως υπεριώδους) πολυμερούς υλικού που καλύπτει την επιφάνεια του δισκίου. Η αλλοίωση αυτή αφορά κυρίως την μεταβολή της διαλυτότητας έτσι ώστε να είναι δυνατή, σε επόμενο στάδιο, αυτό της εμφάνισης, η επιλεκτική απομάκρυνση του υλικού.

Τα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται είναι γνωστά σαν φωτοαντιστατικά, φωτορητίνες ή απλώς αντιστατικά (resists). Διακρίνονται σε θετικές και αρνητικές φωτορητίνες. Η μικρότερη χαρακτηριστική διάσταση που μπορεί σήμερα να πραγματοποιηθεί είναι 0,1 μm. Ουσιαστικά το στάδιο της φωτολιθογραφίας μετατρέπει ένα δυσδιάστατο σχήμα κυκλώματος σε τρισδιάστατη δομή.

Τα βήματα που περιλαμβάνονται στη φωτολιθογραφική διαδικασία είναι:

- Καθαρισμός υποστρώματος.
- Εναπόθεση στρώματος φωτορητίνης.

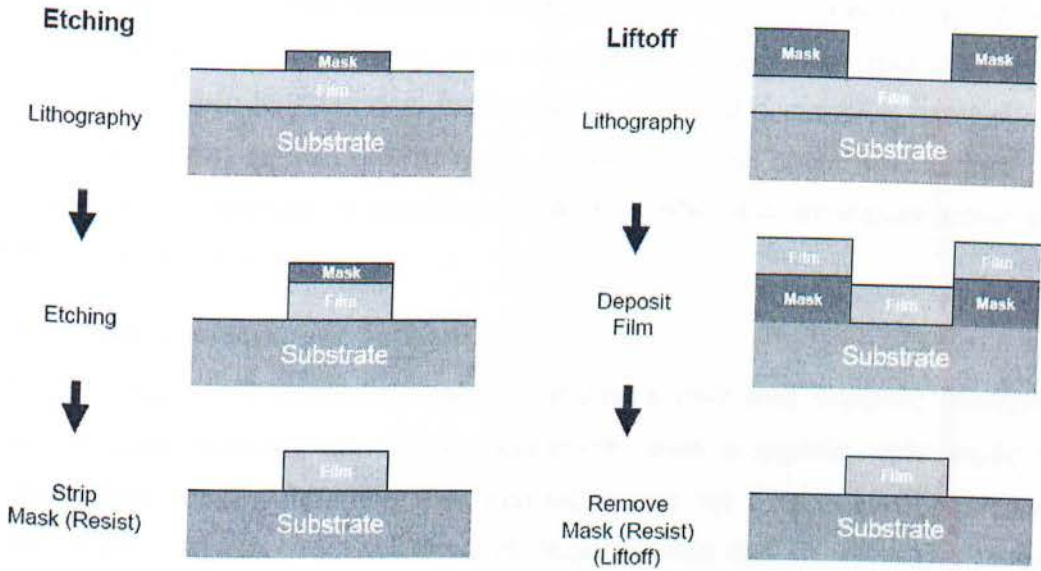
- Ψήσιμο.
- Ευθυγράμμιση μασκών.
- Έκθεση.
- Εμφάνιση.
- Ψήσιμο σκλήρυνσης [1].



Εικόνα 2.15: Λιθογραφική διαδικασία διαμόρφωσης: (α) ανάπτυξη θμενίου οξειδίου (β) εναπόθεση φωτοευαίσθητου υλικού (γ) UV έκθεση μέσω της μάσκας (δ) εμφάνιση photoresist (ε) εγχάραξη του οξειδίου και (f) αφαίρεση φωτοευαίσθητου υλικού (photoresist) [1].



Pattern Generation (Transfer): Etch vs. Liftoff



Εικόνα 2.16: α) Μεταφορά ενός σχήματος/σχεδίου από το σχηματοποιημένο φωτοπολυμερές στο υποκείμενο στρώμα με εγχάραξη, β) Μεταφορά ενός σχήματος/σχεδίου από το σχηματοποιημένο φωτοπολυμερές στο υπερκείμενο στρώμα με τεχνική lift-off [1].

2.3.2.2 Καθαρισμός υποστρώματος (δισκίων)

Η καθαρότητα των δισκίων είναι πολύ χρήσιμη παράμετρος (θα αναπτυχθεί στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο) για την επίτευξη μεγάλης απόδοσης της κατασκευαστικής διαδικασίας κυκλωμάτων με ολοκλήρωση πολύ μεγάλης κλίμακας **VLSI** (Very Large Scale Integration). Οι πηγές ρύπανσης της επιφάνειας των δισκίων είναι αφ' ενός σωματίδια (σκόνη πυριτίου και οξειδίου, σωματίδια από υπολείμματα ρητινών, ατμοσφαιρική σκόνη και σωματίδια ανθρώπινης προέλευσης) που επικάθονται στην επιφάνεια και αφ' ετέρου λεπτά υμένια που συνήθως δεσμεύονται χημικά με την επιφάνεια (υπολείμματα διαλυτών, εμφανιστών, μεταλλικών υμενίων από υγρούς εγχάρακτες, υμένια λαδιού από γραμμές αερίων). Εξ' αιτίας της διαφορετικής προέλευσης των ρύπων, ακολουθούνται δύο ξεχωριστές διαδικασίες καθαρισμού για την απομάκρυνσή τους [1].



### 2.3.2.3 Απομάκρυνση σωματιδίων (μηχανικός καθαρισμός)

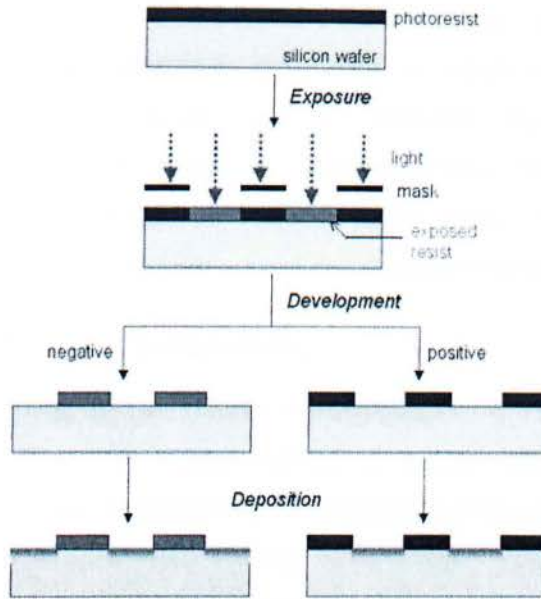
Η απομάκρυνση σωματιδίων αδιάλυτων σε χημικά μέσα από την επιφάνεια των δισκίων Si γίνεται συνήθως με υπερήχους ή σε συνδυασμό με μηχανική τριβή. Σε λουτρό υπερήχων. Τα δισκία βυθίζονται σε κατάλληλο χημικό διαλύτη, συνήθως ακετόνη, στον οποίο εφαρμόζεται ηχητική ενέργεια 20 – 50 kHz. Τα κρουστικά κύματα που δημιουργούνται μετακινούν ή χαλαρώνουν τα σωματίδια που υπάρχουν πάνω στην επιφάνεια των δισκίων [1].

### 2.3.2.4 Χημικός καθαρισμός δισκίων

Το πρώτο βήμα στην φωτολιθογραφία και ιδιαίτερα πριν από θερμικές διεργασίες, όπως οξειδωση, διάχυση, επιταξία και ανόπτηση, είναι ο χημικός καθαρισμός του υποστρώματος (δισκίων πυριτίου) που έχει ως σκοπό την απομάκρυνση οργανικών ρύπων και στη συνέχεια ανόργανα ιόντα και βαριά μέταλλα από την επιφάνεια τους και πραγματοποιείται στον καθαρό χώρο. Η διαδικασία του καθαρισμού αποτελείται από διάφορα στάδια με βάση την πιο διαδεδομένη διαδικασία, την εταιρεία RCA, που προτάθηκε το 1960 από τη γνωστή ομώνυμη εταιρεία [1].

### 2.3.2.5 Φωτορητίνη

Η φωτορητίνη είναι μια χημική ουσία ευαίσθητη σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Υπάρχουν δύο τύποι φωτορητίνης η θετικού και η αρνητικού τόνου. Η θετικού τόνου φωτορητίνη όταν εκτεθεί σε κάποιο συγκεκριμένο μήκος κύματος αλλάζει την χημική της δομή και γίνεται πιο διαλυτή σε κάποιον εμφανιστή, οπότε τα σημεία της φωτορητίνης που εκθέτονται είναι αυτά που στην συνέχεια (με κάποιο διαλύτη) θα απομακρυνθούν. Δηλαδή “ότι εκτίθεται, απομακρύνεται”. Η αρνητικού τόνου φωτορητίνη συμπεριφέρεται ακριβώς ανάποδα, όταν εκτεθεί σε κάποιο μήκος κύματος πολυμερίζεται με αποτέλεσμα γίνεται πιο ανθεκτική σε διαλύτες.

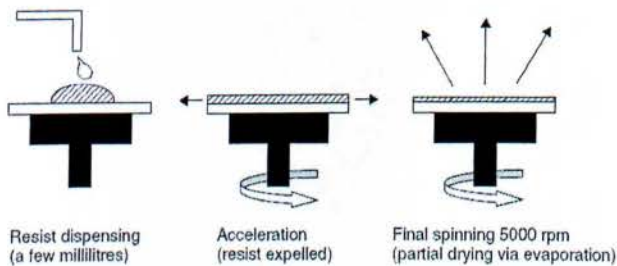


Εικόνα 2.17: Φωτορητίνη θετικού και αρνητικού τόνου μετά από την έκθεση της σε UV ακτινοβολία [1].

Γι' αυτό και η αρνητικού τόνου φωτορητίνη παραμένει στην επιφάνεια όπου έχει εκτεθεί και ο εμφανιστής (διαλύτης) αφαιρεί μόνο τα μη εκτεθειμένα σημεία όπως φαίνεται στην εικόνα 2.17, δηλαδή “ότι εκτεθεί, παραμένει”[1].

### 2.3.2.6 Επίστρωση της φωτορητίνης με φυγοκέντριση

Η επίστρωση της φωτορητίνης γίνεται με φυγοκέντριση για την εναπόθεση ομοιόπαχων στρωμάτων της πάνω σε διάφορα υποστρώματα. Η εναπόθεση της φωτορητίνης γίνεται στον καθαρό χώρο με τη βοήθεια φυγοκεντριστών (εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.18: Η διεργασία εναπόθεσης υλικού και της ομοιόμορφης επίστρωσής του (με φυγοκέντριση) η οποία χρησιμοποιείται στην επίστρωση του φωτοευαίσθητου πολυμερούς στη φωτολιθογραφία [1].



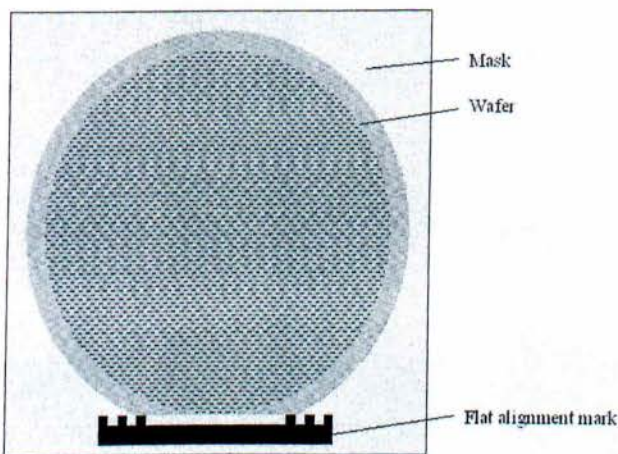
Το υπόστρωμα προς επίστρωση τοποθετείται στην κατάλληλη βάση ανάλογα με το μέγεθος του. Ανάλογα την εφαρμογή επιλέγεται η κατάλληλη φωτορητίνη και τοποθετείται πάνω στο υπόστρωμα με μια σύριγγα προσέχοντας να μην δημιουργηθούν φυσαλίδες αέρα (στην φωτορητίνη πάνω στο υπόστρωμα). Το υπόστρωμα (δισκίο) συγκρατείται με τη βοήθεια κενού πάνω στην ειδική βάση και περιστρέφεται με συγκεκριμένη ταχύτητα και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα [1].

### 2.3.2.7 Θέρμανση (ψήσιμο) της φωτορητίνης

Η θέρμανση της φωτορητίνης έχει ως σκοπό την απομάκρυνση σχεδόν ολόκληρου του διαλύτη που περιέχει. Η θέρμανση της πραγματοποιείται στον καθαρό χώρο, σε ειδικό φούρνο ή σε θερμαντική πλάκα. Η θέρμανση του υποστρώματος γίνεται ανάλογα με την εφαρμογή σε επιλεγμένη θερμοκρασία και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι επιτυγχάνεται ένα σκληρό στρώμα φωτορητίνης στο υπόστρωμά μας [1].

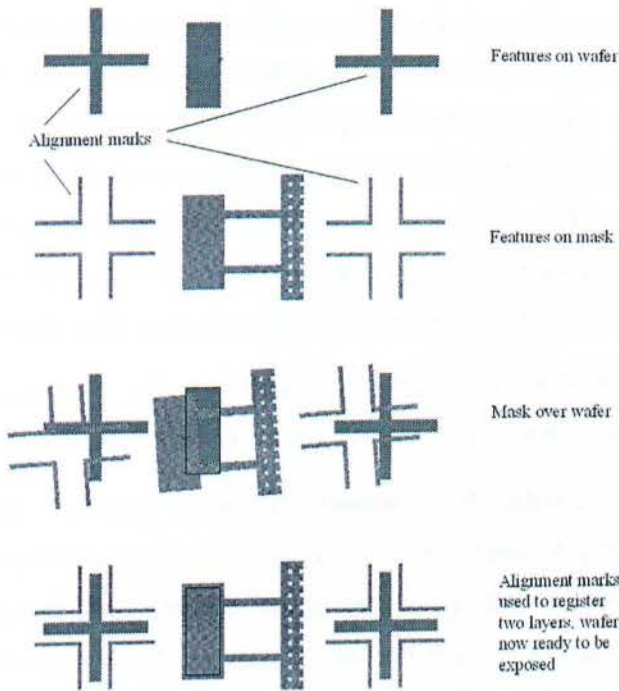
### 2.3.2.8 Έκθεση της φωτορητίνης

Σκοπό έχει την έκθεση ορισμένων περιοχών της φωτορητίνης συνήθως με ακτινοβολία από λαμπτήρες Hg ή Xe - Hg για επίτευξη ακτινοβολίας στο βαθύ υπεριώδες (100 - 300 nm) επιτυγχάνοντας την αλλαγή της χημικής της σύνθεσης. Η έκθεση της φωτορητίνης γίνεται στον καθαρό χώρο με ευθυγραμμιστές μασκών και τη βοήθεια των ειδικών οδηγών ευθυγράμμισης (εικόνα 2.19).

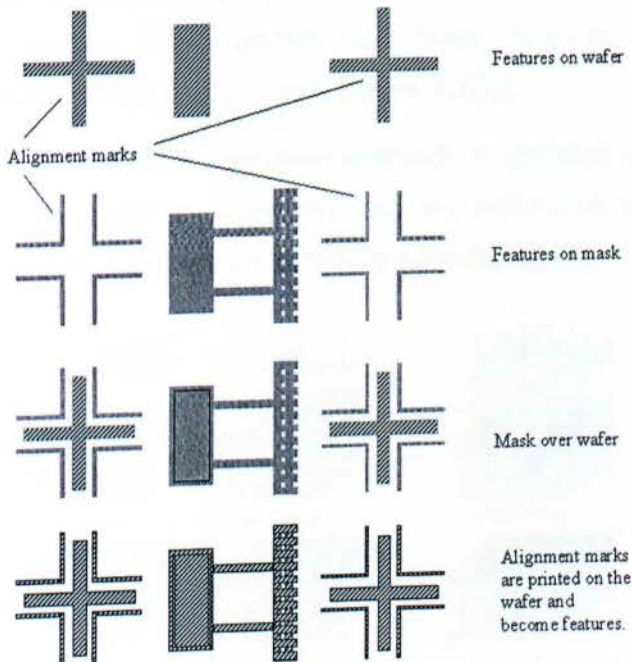


Εικόνα 2.19: Επίπεδη ευθυγράμμιση μάσκας-δισκίου [1].





Εικόνα 2.20: Σημάδια ευθυγράμμισης για την εφαρμογή διαδοχικών στρωμάτων διαφόρων υλικών [1].

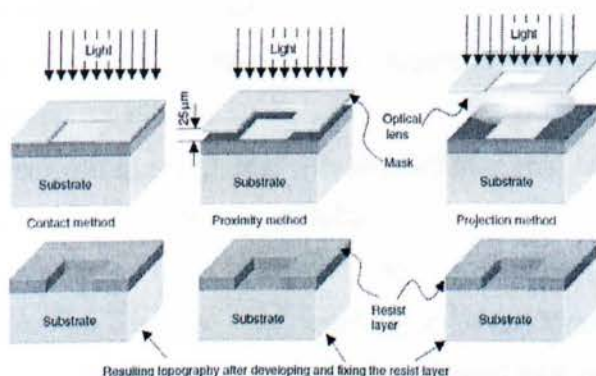


Εικόνα 2.21: Δημιουργία/Αποτύπωση σημαδιών ευθυγράμμισης (contact aligner) πάνω στο δισκίο [1].

Το υπόστρωμα τοποθετείται στην κατάλληλη θέση και η κατάλληλη μάσκα (ένα κομμάτι χαλαζία με το σχέδιο, συνήθως κατασκευασμένο από οξείδιο του χρωμίου, που επιθυμείται να μεταφερθεί στο υπόστρωμά μας. Όπου υπάρχει χρώμιο δεν περνά η ακτινοβολία άρα δεν εκτίθεται η φωτορητίνη που βρίσκεται από κάτω) τοποθετείται στην κατάλληλη θέση του ευθυγραμμιστή. Κατόπιν μάσκα και δείγμα έρχονται πολύ κοντά και με την βοήθεια μικροσκοπίου και με την χρήση μικρομετρικών ρυθμιστών, που κινούν το δείγμα (υπόστρωμα) κατά χ, ψ, θ, ευθυγραμμίζονται απολύτως (εικόνες 2.20, 2.21).

Τα οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στην οπτική λιθογραφία κατατάσσονται ανάλογα με τον διαχωρισμό (απόσταση) της μάσκας από την φωτορητίνη ως εξής:

- **Εκτύπωση επαφής (contact method).** Η μάσκα πιέζεται πάνω στη φωτορητίνη αναιρώντας έτσι στο μεγαλύτερο μέρος τα φαινόμενα περίθλασης. Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η μεγάλη διακριτική ικανότητα και η σχετική απλότητα στη σχεδίαση του οπτικού συστήματος, με κόστος την αναπόφευκτη φθορά της μάσκας. Χρησιμοποιείται ερευνητικά (εικόνα 2.22α).
- **Εκτύπωση γειννίαςης (proximity method).** Υπάρχει μικρό διάκενο, της τάξης 20 - 50 μm, μεταξύ μάσκας και ρητίνης. Η φωτεινή πηγή πρέπει να παρέχει σχεδόν παράλληλες ακτίνες (εικόνα 2.22β).
- **Εκτύπωση προβολής (projection method).** Η μέθοδος αυτή προσφέρει τη μεγαλύτερη διαχωριστική ικανότητα από την εκτύπωση γειννίαςης, μαζί με μεγάλο διαχωρισμό μάσκας και δισκίου (εικόνα 2.22γ) [1].



Εικόνα 2.22: Τρεις μέθοδοι έκθεσης φωτορητίνης. α) επαφής β) γειννίαςης γ) προβολής [1].



### 2.3.2.9 Εμφάνιση φωτορητίνης

Το ακτινοβολουμένο υπόστρωμα τοποθετείται σε γυάλινο δοχείο με διάλυμα απιονισμένου νερού και εμφανιστή με αναλογία 4:1. Οι περιοχές της φωτορητίνης που έχουν εκτεθεί διαλύονται πιο γρήγορα από τις περιοχές που δεν έχουν εκτεθεί, έτσι σύντομα (λίγα δευτερόλεπτα) υπάρχουν περιοχές με φωτορητίνη και περιοχές χωρίς φωτορητίνη πάνω στο υπόστρωμά μας. Έπειτα χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό για έκπλυση και στέγνωμα με αέριο άζωτο [1].

### 2.3.2.10 Επαναθέρμανση φωτορητίνης

Η επαναθέρμανση της φωτορητίνης στον φούρνο, στους 1100 °C για 30 περίπου λεπτά, έχει ως σκοπό την αύξηση της αντοχής της [1].

## 2.3.3 Εγχάραξη (Etching)

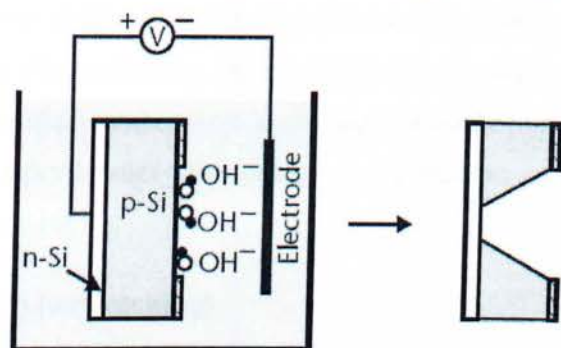
### 2.3.3.1 Διεργασίες εγχάραξης

Η έκθεση ενός κατώτερου επιπέδου σε ατμόσφαιρα προσμίξεων κατά το στάδιο της διάχυσης, η πραγματοποίηση ωμικών επαφών με στρώμα ημιαγωγού κάτω από το οξειδίο και άλλες διεργασίες προϋποθέτουν την διάνοιξη παραθύρων σε ανώτερο στρώμα με χρήση της διεργασίας της εγχάραξης. Η επιθυμητή τοπογραφία στο διοξειδίο του πυριτίου ή άλλο υλικό καθορίζεται από το προηγούμενο λιθογραφικό στάδιο, όπου η ρητίνη καλείται να προστατέψει τις περιοχές που καλύπτει από την χαρακτηριστική δράση χημικού διαλύματος ή περιβάλλοντος ενεργών ιόντων. Η διεργασία της εγχάραξης χαρακτηρίζεται από παραμέτρους όπως:

- Τον ρυθμό εγχάραξης, δηλαδή, την ταχύτητα απομάκρυνσης του προς εγχάραξη υλικού (σε nm / s).
- Την επιλεκτικότητα (μεταξύ δύο υλικών) δηλαδή τον λόγο των αντίστοιχων ρυθμών εγχάραξης με δεδομένη μέθοδο.
- Την ισοτροπικότητα ή αντιστρόφως την κατευθυντικότητα, όπου αυτές καθορίζουν αν ο ρυθμός της εγχάραξης είναι ενιαίος προς όλες τις κατευθύνσεις ή είναι μεγαλύτερος στην κατακόρυφη ή σε άλλη διεύθυνση.



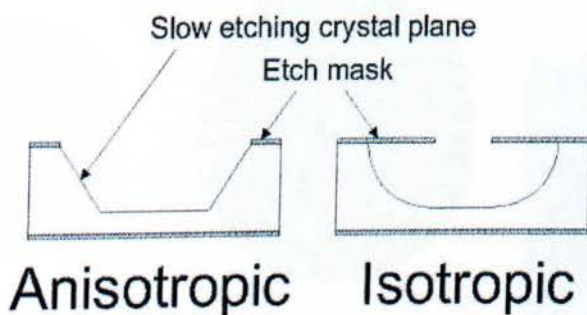
Όσον αφορά την καθ' αυτήν φυσική διεργασία, διακρίνουμε μεταξύ της υγρής εγχάραξης, εικόνα 2.23, με χρήση οξέων και συναφών διαλυμάτων και της ξηρής εγχάραξης η οποία περιλαμβάνει την χημική και μηχανική δράση των ιόντων.



Εικόνα 2.23: Απεικόνιση της διατάξεως της ηλεκτροχημικής εγχάραξης [8].

Η υγρή εγχάραξη χαρακτηρίζεται από ισοτροπικότητα ή έλλειψη κατευθυντικότητας, πλην ορισμένων περιπτώσεων που σχετίζονται με την ύπαρξη κατευθυντικότητας παράλληλα προς ορισμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις. Η εγχάραξη από ιόντα υπό ορισμένες συνθήκες προσφέρει ικανοποιητική κατευθυντικότητα, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για την επίτευξη των ελάχιστων χαρακτηριστικών διαστάσεων που απαιτεί η τεχνολογία πολύ υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης (VLSI).

Στην εικόνα 2.24 φαίνεται η διαφορά μεταξύ ισοτροπικής και ανισοτροπικής εγχάραξης.



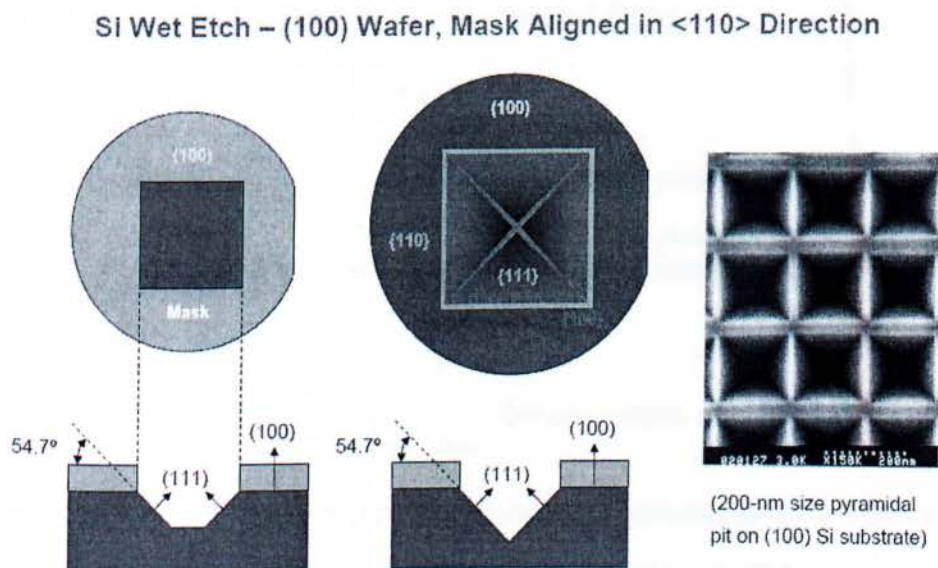
Εικόνα 2.24: Διαφορά ανισοτροπικής από ισοτροπικής υγρής εγχάραξης [32].

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η έλλειψη κατευθυντικότητας δεν είναι σοβαρό πρόβλημα εφόσον η πλευρική διάσταση στη λιθογραφία είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το πάχος του στρώματος που εγχαρασσεται. Αντιθέτως, είναι κατανοητό ότι η ύπαρξη ισοτροπικότητας είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις όπου το βάθος της εγχάραξης είναι συγκρίσιμο με τις πλευρικές διαστάσεις. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις όπου η

ισοτροπικότητα της διεργασίας είναι επιθυμητή όπως π.χ. στην περίπτωση που απαιτείται η απομάκρυνση υλικού από τα πλευρικά τοιχώματα. Αντιστρόφως, είναι δύσκολη η κάλυψη κατακόρυφου προφίλ που προέρχεται από κατευθυντική διεργασία εγχάραξης σε μετέπειτα στάδιο εναπόθεσης μετάλλου ή άλλου υλικού. Πέρα από τις παραμέτρους της κατευθυντικότητας, της επιλεκτικότητας και του ρυθμού εγχάραξης, λαμβάνονται επίσης υπόψη στην υλοποίηση μιας τεχνολογικής μονάδας εγχάραξης παράγοντες όπως περιβαλλοντικές θεωρήσεις, συμβατότητα με αυτόματη παραγωγή, κόστος, καθαρότητα κλπ [1].

### 2.3.3.2 Υγρή εγχάραξη (wet etching)

Υγρές διεργασίες εγχάραξης χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην κατασκευαστική διαδικασία μικροηλεκτρονικών διατάξεων, για την απομάκρυνση λεπτών υμενίων από την επιφάνεια των δισκίων και την αποτύπωση σχημάτων διαστάσεων μεγαλύτερων των 3 μm (εικόνα 2.25). Για την ακριβή αποτύπωση του σχεδίου από τη μάσκα στο υλικό, απαιτείται κατάλληλη επιλογή τόσο της μάσκας όσο και του χημικού εγχάραξης. Οι υγρές διαδικασίες εγχάραξης είναι γενικά ισοτροπικές, έχουν χαμηλό κόστος, μεγάλη αξιοπιστία, επιλεκτικότητα ως προς την μάσκα και το υπόστρωμα και μεγάλη απόδοση.



Εικόνα 2.25: Διαδικασία υγρής εγχάραξης Si κατά τη κρυσταλλογραφική διεύθυνση <100> με τη μάσκα να είναι ευθυγραμμισμένη στη κρυσταλλογραφική διεύθυνση <110> [1].

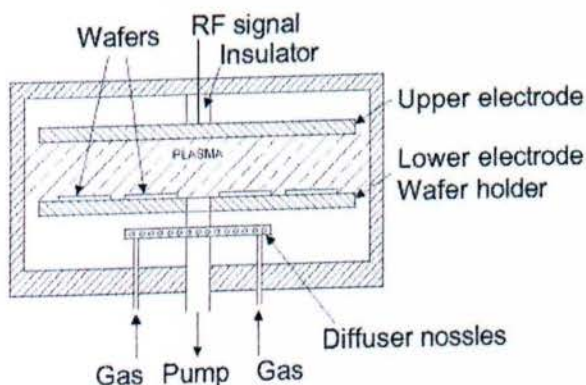


Εγκυμονούν όμως κινδύνους για το προσωπικό που τις διεξάγει, πιθανούς κινδύνους εκρήξεων, εξ αιτίας συσσώρευσης ατμών στις απαγωγές, προβλήματα αποκόλλησης των ρητινών, ανομοιομορφία στην εγχάραξη εξ αιτίας της δημιουργίας φυσαλίδων κατά την διάρκεια χημικών αντιδράσεων και τέλος είναι μη φιλικές στο περιβάλλον.

Η υγρή εγχάραξη περιλαμβάνει την εμβάπτιση των δισκίων σε διάλυμα του χαρακτηριστικού σε σταθερή θερμοκρασία για τόσο χρόνο όσο χρειάζεται για την τέλεια αφαίρεση του υλικού από τις επιθυμητές περιοχές. Τα δισκία ακολούθως μεταφέρονται σε νερό μεγάλης καθαρότητας, ακολουθεί καθαρισμός με πίδακα υπό πίεση και απομάκρυνση του νερού με φυγοκέντριση [1].

### 2.3.3.3 Εγχάραξη με Πλάσμα

Η βασική αρχή είναι απλή: Εκκένωση αίγλης χρησιμοποιείται για την παραγωγή χημικά ενεργών ιόντων (ατόμων, ριζών, ιόντων) από σχετικά αδρανές μοριακό αέριο. Το αέριο που χρησιμοποιείται επιλέγεται έτσι ώστε να παρέχει προϊόντα που αντιδρούν χημικά με το υλικό που πρόκειται να εγχαραχθεί με την παραγωγή προϊόντων που πρέπει να είναι πτητικά (κατά προτίμηση σε θερμοκρασία δωματίου) και απομακρύνονται από το σύστημα. Η βασική απαίτηση είναι η πτητικότητα του προϊόντος της εγχάραξης. Μια μονάδα εγχάραξης με πλάσμα φαίνεται στην εικόνα 2.26 [1].



Εικόνα 2.26: Τυπικό σύστημα παράλληλων πλακών για εγχάραξη με ιόντα /πλάσμα [1].

### 2.3.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εγχάραξης με Πλάσμα

Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις παρέχει εγχάραξη υψηλής κατευθυντικότητας. Άλλα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υγρές διεργασίες είναι το



μικρότερο κόστος των χημικών αντιδραστηρίων, οι μικρότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον, η μεγαλύτερη καθαρότητα και η μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε αυτοματοποίηση. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι η μη δυνατότητα, προς το παρόν, χάραξης ορισμένων σημαντικών τεχνολογικά υλικών (όπως Fe, Ni, Co), μειωμένη επιλεκτικότητα σε μερικές περιπτώσεις, μεγάλο κόστος συστημάτων, η παρατηρούμενη δημιουργία βλάβης από ακτινοβολία σε ορισμένες διατάξεις καθώς και η δυσκολία προσαρμογής σε μαζική παραγωγή. Το τελευταίο αυτό μειονέκτημα σχετίζεται με την πολυπλοκότητα των φυσικών και των χημικών φαινομένων που υπεισέρχονται σε συνδυασμό με τον μεγάλο αριθμό παραμέτρων που καθορίζουν την διεργασία. Παρά την σοβαρότητα μερικών από αυτά τα προβλήματα, η αδυναμία των ιστροπικών διεργασιών να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις κατασκευής των σημερινών μικροδιατάξεων, έχει ωθήσει την τεχνολογία να καθιερώσει την εφαρμογή της εγχάραξης με πλάσμα στις σύγχρονες γραμμές παραγωγής [1].

# 3

## ΧΩΡΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ MEMS

Καθαροί χώροι.....σελ	62
Εισαγωγή.....σελ	62
Ταξινόμηση των καθαρών χώρων.....σελ	64
Η εξέλιξη στον σχεδιασμό των καθαρών χώρων.....σελ	69
Χαρακτηριστικά των καθαρών χώρων.....σελ	71
Η καθαρότητα.....σελ	72
Η ποιότητα του αέρα.....σελ	73
Η εξαέρωση.....σελ	74
Η υπερπίεση.....σελ	74
Ο ακουστικός θόρυβος.....σελ	74
Το επίπεδο των κραδασμών.....σελ	74
Η αντίσταση της γείωσης.....σελ	75
Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.....σελ	75
Η ηλεκτροστατική εκκένωση.....σελ	75
Λειτουργία των καθαρών χώρων.....σελ	76
Σύστημα παραγωγής και τροφοδοσίας με απιονισμένο νερό.....σελ	79
Συστήματα τροφοδοσίας με χημικά.....σελ	83
Τεχνολογία καθαρισμού δισκιδίων Si.....σελ	87
Μηχανισμοί προσρόφησης και απομάκρυνσης ρύπων.....σελ	88
Εισαγωγή.....σελ	88
Σωματίδια.....σελ	88
Μεταλλικοί ρύποι.....σελ	90
Ρύπανση με οργανικές ουσίες.....σελ	91
Μικροτραχύτητα της επιφάνειας.....σελ	92



Αυτογενές οξειδίο (Native oxide).....σελ	93
Τεχνολογία υγρού καθαρισμού.....σελ	95
Τεχνολογία ξηρού καθαρισμού.....σελ	95

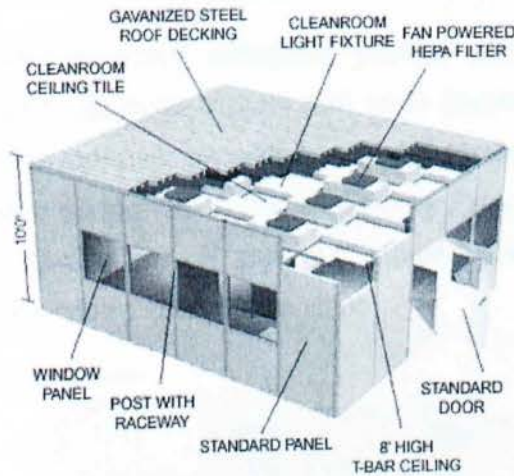
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΧΩΡΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ MEMS

#### 3.1 Καθαροί χώροι

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Η συνεχής μείωση των χαρακτηριστικών διαστάσεων των μικροηλεκτρονικών διατάξεων σε συνδυασμό με την αύξηση της πυκνότητας των διατάξεων ανά ψηφίδα, απαιτεί όλο και πιο αυστηρό έλεγχο του επιπέδου ρύπανσης κατά την εκτέλεση των τεχνολογικών διαδικασιών.



Εικόνα 3.1 Δομή ενός καθαρού χώρου [4].

Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης (yield) στην κατασκευή των μικροηλεκτρονικών διατάξεων, ο πιο σημαντικός παράγων είναι η μείωση της πυκνότητας ατελειών (defects) πάνω στο δισκίδιο Si.

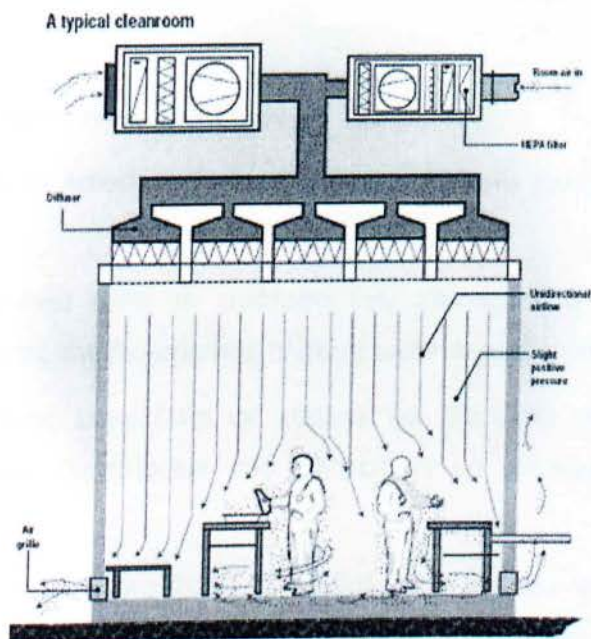
Η πυκνότητα ατελειών στο δισκίδιο ορίζεται ως ο αριθμός των ατελειών ανά cm<sup>2</sup> του δισκιδίου που μπορούν να εμφανιστούν κατά την διάρκεια των διαδικασιών και που οφείλονται σε κάποιο είδους ρύπανσης.

Η κύρια αιτία δημιουργίας ατελειών είναι η ρύπανση με σωματίδια τα οποία προκαλούν το 80% των ατελειών που εμφανίζονται κατά την κατασκευή των Ο.Κ.

Ο έλεγχος της ρύπανσης του περιβάλλοντος του καθαρού χώρου (εικόνα 3.1) περιλαμβάνει:

- τον έλεγχο του επιπέδου ρύπανσης με σωματίδια και χημικά.
- τον έλεγχο της θερμοκρασίας.
- τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας.
- τον έλεγχο των ηλεκτρικών φορτίων.
- τον έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.
- τον έλεγχο του επιπέδου των κραδασμών.

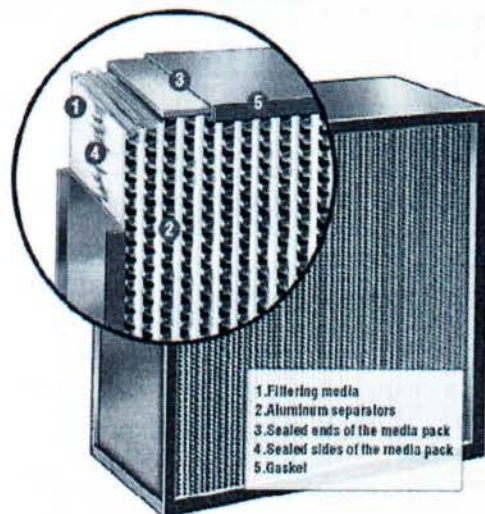
Το χαμηλό επίπεδο ρύπων στους καθαρούς χώρους επιτυγχάνεται με συνεχή, κατακόρυφη (εικόνα 3.2) ή οριζόντια στρωτή ροή αέρα (laminar flow), ο οποίος έχει περάσει από ειδική επεξεργασία για την ρύθμιση θερμοκρασίας και υγρασίας και από ειδικά φίλτρα, τα λεγόμενα φίλτρα HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) (εικόνα 3.3) για κατακράτηση σωματιδίων. Η συνεχής στρωτή ροή αέρα παρασύρει τα σωματίδια και με αυτόν τον τρόπο καθαρίζει το χώρο.



Εικόνα 3.2: Κατακόρυφη στρωτή ροή αέρα [5].



A closer look at a HEPA filter



Εικόνα 3.3: Φίλτρα HEPA [6].

Η γενική ιδέα του Καθαρού Χώρου με στρωτή ροή αέρα έχει αναπτυχθεί στο Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico το 1961 για ανάγκες ενός περιβάλλοντος χωρίς σωματίδια για εναπόθεση λεπτών υμενίων και συναρμολόγηση λεπτών μηχανισμών και η ιδέα αυτή υιοθετήθηκε από την βιομηχανία ημιαγωγών [2].

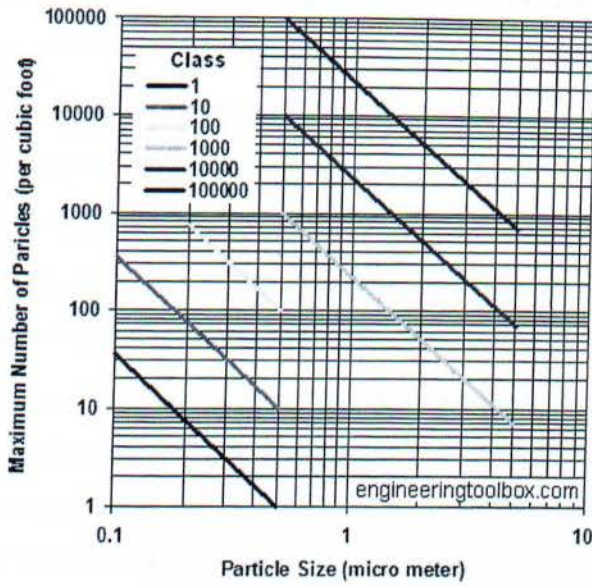
### 3.1.2. Ταξινόμηση των καθαρών χώρων

Το 1963 εμφανίζεται το American Federal Standard 209 για τον ορισμό των καθαρών Χώρων.

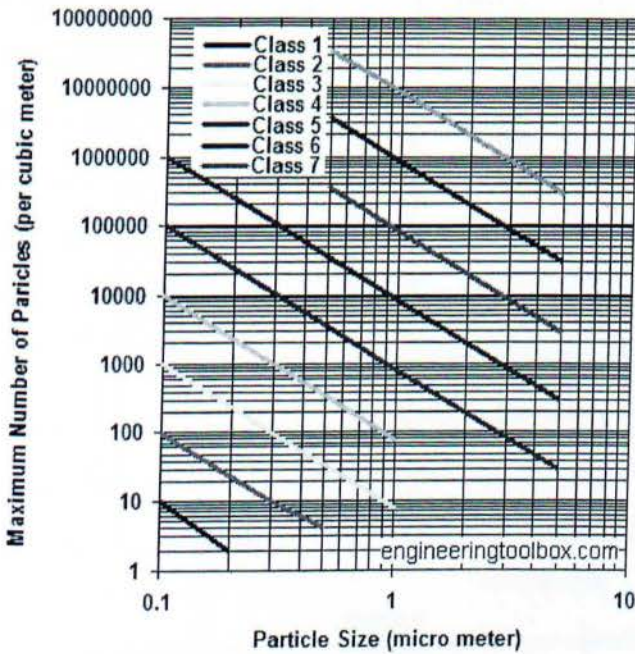
Στα επόμενα 30 χρόνια αυτό το πρότυπο έχει επανεξεταστεί και έχει βελτιωθεί σύμφωνα με τις ανάγκες της βιομηχανίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Ο βαθμός καθαρότητας εκφράζεται σε «class» και βασίζεται στον μέγιστο αριθμό σωματιδίων ορισμένων διαστάσεων που επιτρέπεται να βρίσκονται σε μια μονάδα χώρου.

Έτσι, σύμφωνα με το πρότυπο 209E, ο αριθμός του «class» σε Αγγλικό Σύστημα Μέτρησης, είναι ο μέγιστος αριθμός σωματιδίων διαστάσεων ίσων ή μεγαλύτερων των 0,5 μm που μπορούν να βρεθούν σε ένα κυβικό πόδι (cubic foot) (διάγραμμα 3.1)



Διάγραμμα 3.1: Μέγιστος αριθμός σωματιδίων διαστάσεων ίσων ή μεγαλύτερων των 0,5 μm που μπορούν να βρεθούν σε ένα κυβικό πόδι [7].



Διάγραμμα 3.2: Μέγιστος αριθμός σωματιδίων διαστάσεων ίσων ή μεγαλύτερων των 0,5 μm που μπορούν να βρεθούν σε ένα κυβικό μέτρο [8].



Το πρότυπο 209 E ορίζει επίσης και την ταξινόμηση των Καθαρών Χώρων σε Μετρικό Σύστημα Μέτρησης (class M1, M1,5, M2,.....M7).

Σε αυτό το στάνταρτ ο αριθμός του «class» είναι ο δεκαδικός λογάριθμος του μεγίστου αριθμού σωματιδίων ίσων ή μεγαλύτερων των 0,5 μm που μπορούν να βρεθούν σε ένα κυβικό μέτρο (διάγραμμα 3.2).

Έτσι, σε ένα καθαρό χώρο «class» M2 μπορούν να βρεθούν το πολύ 100 σωματίδια διαστάσεων ίσων ή μεγαλύτερων των 0,5 μm σε ένα κυβικό μέτρο.

Στο Γιαπωνέζικο στάνταρτ JISB9920 ο αριθμός των «class» γίνεται με τον ίδιο τρόπο, σε Μετρικό Σύστημα Μέτρησης, όμως ο αριθμός του «class» είναι ο λογάριθμος του μεγίστου αριθμού σωματιδίων, διαστάσεων ίσων ή μεγαλύτερων του 0,1 μm, που μπορούν να βρεθούν σε ένα κυβικό μέτρο.

Στο διάγραμμα 3.3 παρουσιάζεται ο μέγιστος αριθμός σωματιδίων διαφόρων διαστάσεων για κάθε «class» σύμφωνα με τα στάνταρτ 209E και JIS 209E.

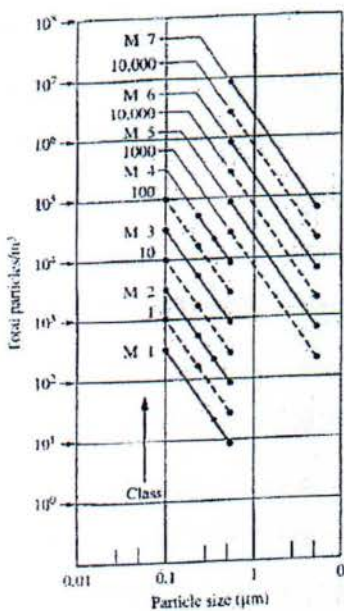


FIGURE 1  
Air cleanliness according to U.S. Fed. Std. 209F.

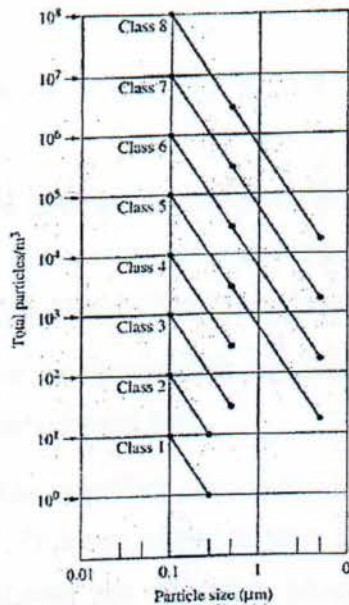


FIGURE 2  
Air cleanliness according to Japanese Std. B9920 rev.

Διάγραμμα 3.3: Μέγιστος αριθμός σωματιδίων διαφόρων διαστάσεων για κάθε «class» σύμφωνα με τα στάνταρτ 209E και JIS 209E [2].



Για τον προσδιορισμό του βαθμού καθαρότητας ενός χώρου το στάνταρτ 209E ορίζει μια στάνταρτ ονοματολογία έκφρασης της τάξης «class» καθαρότητας . Έτσι ο ορισμός του «class» ενός καθαρού χώρου γίνεται ως εξής :

«class» X (at Y μm)

όπου το X είναι ο αριθμός του «class» και το Y είναι η διάσταση των σωματιδίων.

Επιπλέον στο στάνταρτ 209E υπάρχει ένας καινούργιος ορισμός U(X) όπου U εκφράζει τα πολύ μικρά σωματίδια διαστάσεων μεταξύ 0,02 μm και το μικρότερο όριο ανίχνευσης του οργάνου μέτρησης. Το X είναι ο αριθμός αυτών των σωματιδίων που μπορούν να βρεθούν σε ένα κυβικό μέτρο.

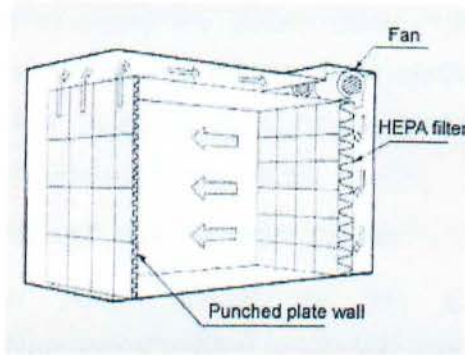
Δίνουμε πιο κάτω μερικά παραδείγματα έκφρασης βαθμού καθαρότητας :

1. «class» M 2,5 (at 0,3 μm) σημαίνει καθαρότητα του αέρα όπου μπορούμε να βρούμε το πολύ 1060 σωματίδια/m<sup>3</sup> με διαστάσεις 0,3μ ή μεγαλύτερες.
2. «class» 100 (at 0,5 μm) σημαίνει καθαρότητα του αέρα όπου μπορούμε να βρούμε το πολύ 100 σωματίδια / ft<sup>3</sup> με διαστάσεις 0,5μm ή μεγαλύτερες.
3. «U(20)» σημαίνει ότι στον αέρα μπορούμε να βρούμε το πολύ 20 πολύ λεπτά σωματίδια / m<sup>3</sup> διαστάσεων 0,02 μm.

Οι καθαροί χώροι ταξινομούνται επίσης σύμφωνα με την φορά της στρωτής ροής αέρα σε καθαρούς χώρους οριζόντια ροής αέρα (Horizontal Laminar Flow Clean Room) και σε καθαρούς χώρους κατακόρυφης ροής αέρα (Vertical Laminar Flow Clean Room).

Η οριζόντια στρωτή ροή αέρα χρησιμοποιείται σε χώρους όπου το είδος των διεργασιών και η διάταξη των μηχανημάτων το επιτρέπουν (εικόνα 3.4).

Έτσι σε αυτούς τους χώρους, σε έναν κύκλο, συνήθως τον μικρότερο, τοποθετούνται απόλυτα φίλτρα σε όλη την επιφάνεια του. Ο αέρας οδηγείται κατά μήκος του χώρου προς την απέναντι πλευρά, όπου συλλέγεται και οδηγείται μέσω καναλιών που συνήθως τοποθετούνται στην ψευδοροφή, προς την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του αέρα. Εκεί ο αέρας ανανεώνεται με φρέσκο αέρα, γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις σε ότι αφορά τη θερμοκρασία και την υγρασία και ο κύκλος ξαναρχίζει, ο αέρας διοχετεύεται προς τα απόλυτα φίλτρα.

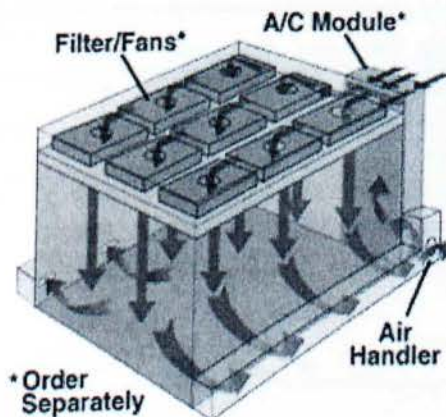


Εικόνα 3.4 οριζόντια στρωτή ροή αέρα [9].

Σε αυτούς τους χώρους οι πιο ευαίσθητες διεργασίες τοποθετούνται κοντά στον τοίχο με τα απόλυτα φίλτρα ενώ οι λιγότερο ευαίσθητες κοντά στον απέναντι τοίχο απ όπου απάγεται ο αέρας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί, τοπικά, καθαρότητα «class» 100 με χαμηλό κόστος.

Οι καθαροί χώροι κατακόρυφης ροής αέρα είναι οι πιο ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι στην Μικροηλεκτρονική.

Ανάλογα τον βαθμό καθαρότητας του χώρου, υπάρχει και η αντίστοιχη διάταξη των απόλυτων φίλτρων. Έτσι για υψηλό βαθμό καθαριότητας (class 1, 10, 100) τα απόλυτα φίλτρα τοποθετούνται σε όλη την επιφάνεια της ψευδοροφής και για την εξασφάλιση της στρωτής ροής είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός διάτρητου ψευδό-πατώματος, υπερυψωμένο, από το οποίο ο αέρας περισυλλέγεται και οδηγείται προς την κεντρική μονάδα. Αυτή η διάταξη παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5: Τοποθέτηση φίλτρων στην οροφή [10].



Για μικρότερο βαθμό καθαρότητας του χώρου (class 1.000, 10.000, 100.000) τα απόλυτα φίλτρα τοποθετούνται κατά διαστήματα στην ψευδοροφή και δεν καλύπτουν όλη την επιφάνεια της. η επιστροφή του αέρα στην κεντρική μονάδα γίνεται σε χαμηλό επίπεδο του χώρου μέσω στομιών επιστροφής [2].

### 3.1.3 Η εξέλιξη στον σχεδιασμό των καθαρών χώρων

Οι απαιτήσεις για τον βαθμό καθαρότητας του χώρου παραγωγής των μικροηλεκτρονικών διατάξεων έχουν αλλάξει σημαντικά από το 1970 και μέχρι τώρα μαζί με την εξέλιξη της τεχνολογίας.

Στην δεκαετία του 70 στην παραγωγή οι απαιτήσεις για καθαρότητα του χώρου ήταν class 10.000 με τοπικό περιβάλλον class 100 για κρίσιμα σημεία της τεχνολογίας. Ο καθαρός χώρος είχε την μορφή μιας μεγάλης αίθουσας, το λεγόμενο «ballroom» concept.

Μετά το 1980, με την εξέλιξη της τεχνολογίας προς μικρονικές και υπομικρονικές διαστάσεις, οι απαιτήσεις για καθαρότητα του χώρου αυξάνουν (πίνακας 3.1) και οι ανάγκες για class 100, 10 και 1 οδηγούν στην ιδέα να ξεχωρίζουν οι χώροι όπου γίνονται οι διαδικασίες (process area) και όπου η καθαρότητα του χώρου είναι υψηλή, από τους χώρους που βρίσκονται τα μηχανήματα και άλλες βοηθητικές εγκαταστάσεις (service area) όπου ο βαθμός καθαρότητας μπορεί να είναι μικρότερος.

Πίνακας 3.1: Απαιτήσεις καθαρότητας του χώρου σύμφωνα με τις διαστάσεις της τεχνολογίας [2].

TABLE 1  
Evolution of IC processing features

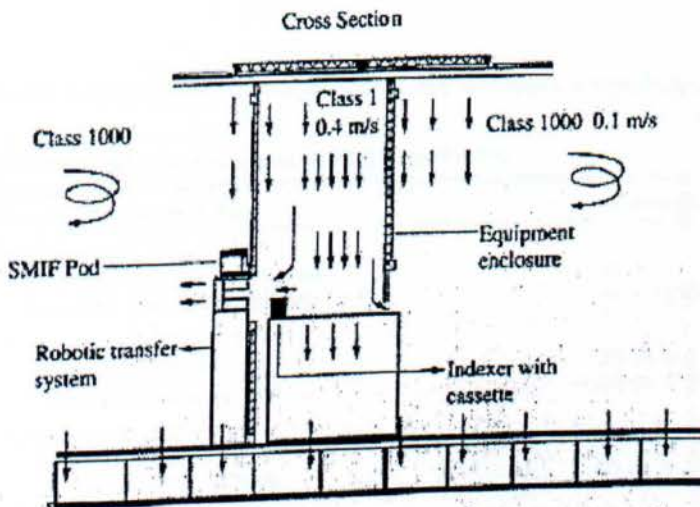
Mass production started	1980	1984	1987	1990	1993	1996	1999	2004
Wafer size, mm	75	100	125	150	200	200	200	300
Technology (DRAM)	64K	256K	1M	4M	16M	64M	256M	1G
Chip size (cm <sup>2</sup> )	0.3	0.4	0.5	0.9	1.4	2.0	3.0	4.5
Feature size(μm)	2.0	1.5	1.0	0.8	0.5	0.35	0.25	0.2-0.1
Process Steps	100	150	200	300	400	500	600	700-800
Cleanroom class (to be defined in Sec. 1.2)	1,000-100	100	10	1	0.1	0.1	0.1/mini-environment	0.1/inert mini-environment
Utility impurity (ppb)	1,000	500	100	50	5	1	0.1	0.01

Source: Courtesy of KLA.



Έτσι π.χ. μόνο η είσοδος ενός φούρνου διάχυσης βρίσκεται στον καθαρό χώρο υψηλής καθαρότητας ενώ ο φούρνος βρίσκεται σε έναν χώρο κατωτέρου βαθμού καθαρότητας. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή σαν «tunnel» concept και έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους του καθαρού χώρου με τον περιορισμό της έκτασης του και ταυτόχρονα την αύξηση της καθαρότητας του χώρου.

Οι απαιτήσεις για το περιβάλλον για αυτές τις τεχνολογίες είναι ο υψηλός βαθμός καθαρότητας [class 0,1 (at 0,1 μm)] και πολύ μικρή απόκλιση των παραμέτρων που το χαρακτηρίζουν (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα στρωτής ροής αέρα, κλπ.). Σύμφωνα με αυτές τις ανάγκες εμφανίστηκε η ιδέα των «clean machines» η δημιουργία ενός μικρού περιβάλλοντος (minienvironment) με υψηλές προδιαγραφές καθαρότητας, (εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6 δημιουργία ενός μικρό περιβάλλοντος (mini environment) με υψηλές προδιαγραφές καθαρότητας [2].

Τα δισκίδια μεταφέρονται μέσα και έξω από αυτό το ειδικό χώρο μέσω μιας συσκευής απομόνωσης από το περιβάλλον (Standard Mechanical Interfaces – SMIF pods) μια τεχνική που αναπτύχθηκε από την Hewlett Packard.

Για την εξασφάλιση των απαιτήσεων καθαρότητας ενός μικρό περιβάλλοντος είναι, φυσικά, απαραίτητος ο έλεγχος του περιβάλλοντος γύρω από αυτό. Έτσι εάν η απαιτούμενη καθαρότητα του μικρό- περιβάλλοντος είναι class 0,1 (at 0,1 μm) γύρω από αυτό πρέπει να είναι τουλάχιστον class 1.000.

Για την μεγαλύτερη ελαστικότητα σε ότι αφορά την διάταξη του εξοπλισμού και τις πιθανές αλλαγές μέσα στον καθαρό χώρο του εξοπλισμού και των διαδικασιών, οι καινούργιοι καθαροί χώροι κατασκευάζονται σε δύο επίπεδα.

Το ένα επίπεδο περιλαμβάνει τους καθαρούς χώρους για τεχνολογικές διεργασίες. Το επίπεδο από κάτω χρησιμοποιείται για επιστροφή του αέρα από τους πάνω χώρους. Περιέχει επίσης όλες τις εγκαταστάσεις που μπορούν να βρεθούν μακριά από τον χώρο διαδικασιών όπως οι εγκαταστάσεις απιονισμένου νερού, διανομής χημικών και διαφόρων αερίων, πεπιεσμένου αέρα, κενού, κλπ [2].

### 3.1.4 Χαρακτηριστικά των καθαρών χώρων

Τα χαρακτηριστικά ενός καθαρού χώρου υψηλών προδιαγραφών παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά ενός καθαρού χώρου υψηλών προδιαγραφών [2].

<b>Design parameters</b>	<b>Criteria</b>
Cleanliness, pieces/ft <sup>3</sup>	
Process area $\geq 0.12 \mu\text{m}$	$\leq 1$
Service area $\geq 0.30 \mu\text{m}$	$\leq 1,000$
Temperature control, °C	
Photolithography area	$22 \pm 0.1$
Other cleanroom area	$22 \pm 0.5$
Humidity control, %	
Photolithography area	$43 \pm 2$
Other cleanroom area	$43 \pm 5$
Air quality, ppb	
Total hydrocarbons (THC)	$< 100$
NO <sub>x</sub>	$< 0.5$
SO <sub>2</sub>	$< 0.5$
Cleanroom interior surface outgassing rate, torr-L/cm <sup>2</sup> /sec	$6.3 \times 10^8$
Cleanroom pressure, relative to outside ambient, Pa	$> 30$
Acoustical noise, dB	$< 60$
Vibration (8 to 100 Hz), $\mu\text{m}/\text{sec}$	$< 3$
Grounding resistance, $\Omega$	$< 1$
Magnetic field variation, mG	$< \pm 1$
Charging voltage, V	$< \pm 50$



Όπως φαίνεται από αυτόν τον πίνακα οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν έναν καθαρό χώρο είναι οι εξής:

- η καθαρότητα.
- η θερμοκρασία.
- η σχετική υγρασία.
- η ποιότητα του αέρα.
- η εξαέρωση.
- η υπερπίεση του χώρου.
- το επίπεδο ακουστικού θορύβου.
- το επίπεδο των κραδασμών.
- η αντίσταση της γείωσης.
- το μαγνητικό πεδίο.
- το ηλεκτρικό πεδίο.

Παρακάτω θα αναλύσουμε τον ρόλο αυτών των παραμέτρων [2].

#### **3.1.4.1 Η καθαρότητα**

Όπως αναφέραμε πριν, η καθαρότητα του χώρου εκφράζεται σε τάξεις (class). Ο πιο καθαρός χώρος που ορίζεται στο Standard 209E είναι ο χώρος class M1 όπου μπορούν να βρεθούν 10 σωματίδια διαστάσεων ίσων ή μεγαλύτερων των 0,5 μm σε ένα κυβικό μέτρο ή 0,28 σωματίδια σε ένα κυβικό πόδι. Σήμερα οι τεχνολογικές απαιτήσεις είναι πολύ πιο πέρα από αυτό το βαθμό καθαρότητας. Έτσι για τις κρίσιμες διαδικασίες ο στόχος καθαρότητας είναι το πολύ ένα σωματίδιο διαστάσεων 0,1 μm σε ένα κυβικό πόδι [class 1(at 0,12 μm)].

Η καθαρότητα του χώρου εξαρτάται σημαντικά από την απόδοση των φίλτρων HEPA στην κατακράτηση σωματιδίων.

Για τον καλύτερο έλεγχο της καθαρότητας του χώρου οι μετρήσεις on-line της σωματιδιακής ρύπανσης πρέπει να γίνονται σε συνεχή βάση.



- Η θερμοκρασία και η υγρασία.

Οι τιμές που συνιστώνται και επιτυγχάνονται στους καθαρούς χώρους είναι :

- Για τον καθαρό χώρο λιθογραφίας και ευαίσθητων μετρήσεων :

Θερμοκρασία :  $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σχετική υγρασία :  $43\% \pm 2\%$

- Για τους υπόλοιπους καθαρούς χώρους :

Θερμοκρασία :  $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σχετική υγρασία :  $43\% \pm 5\%$

Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων γίνεται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του αέρα. Όταν η υγρασία είναι πάνω από επιτρεπτά όρια, ο αέρας θερμαίνεται και με αυτό τον τρόπο αφαιρείται υγρασία ενώ όταν η υγρασία είναι χαμηλή, προστίθεται στον αέρα ατμοί νερού [2].

#### 3.1.4.2 Η ποιότητα του αέρα

Υπάρχουν εσωτερικοί και εξωτερικοί ρύποι του αέρα του καθαρού χώρου.

- Οι εσωτερικοί ρύποι όπως οι υδαάνθρακες προέρχονται βασικά από τα υλικά που καλύπτουν τους τοίχους και τα πατώματα του καθαρού χώρου. Αυτή η ρύπανση μπορεί να ελαττωθεί με την επιλογή κατάλληλων υλικών κάλυψης των τοιχωμάτων του καθαρού χώρου, υλικά με χαμηλό ρυθμό εξαέρωσης (outgassing).

Στον εξωτερικό αέρα η περιεκτικότητα των υδατανθράκων είναι τυπικά 1,5 – 50 ppm. Αυτή μπορεί να ελαττωθεί από 90 έως 98% με ειδικά φίλτρα ενεργού άνθρακα στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του αέρα. Ειδικά φίλτρα τοποθετημένα στο κύκλωμα ανακύκλωσης του αέρα επιτυγχάνουν συγκεντρώσεις κάτω του 100 ppb του ολικού επιπέδου υδατανθράκων (THC – total hydrocarbon).

- Άλλοι εξωτερικοί μοριακοί ρύποι είναι  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{N}_2$ , αλογόνα ( $\text{CCl}_4$ ,  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{Cl}_2$ ) και ενώσεις του θείου όπως  $\text{H}_2\text{S}$ . Η συγκέντρωση αυτών των ρύπων στον αέρα εξαρτάται κυρίως από τοπικές συνθήκες. η περιεκτικότητα των ρύπων τύπου  $\text{NO}_x$  και  $\text{SO}_x$  είναι τυπικά 5 – 100 ppb και 10 – 50 ppb αντίστοιχα. Μέσα στους καθαρούς χώρους η συγκέντρωση τους επιτυγχάνεται κάτω από 0,5 ppb [2].

### 3.1.4.3 Η εξαέρωση

Η εξαέρωση των πτητικών ουσιών από την επιφάνεια του καθαρού χώρου και από τον εξοπλισμό, μπορεί να προκαλέσει ρύπανση με οργανικές ουσίες ή με διάφορα ιόντα, με την συμπίκνωση αυτών στην επιφάνεια του δισκιδίου.

Ο ανεκτός ρυθμός εξαέρωσης είναι  $6,8 \cdot 10^{-8} \text{ torr} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$  και αποτελεί κριτήριο για την επιλογή υλικών στην κατασκευή των καθαρών χώρων [2].

### 3.1.4.4 Η υπερπίεση

Είναι εντελώς απαραίτητο να υπάρχει μια υπερπίεση του αέρα στους καθαρούς χώρους σε σχέση με τους γύρω χώρους (συνήθως η τιμή είναι +30 Pa), για αποφυγή ρύπανσης από τους έξω χώρους.

Η υπερπίεση ελέγχεται αυτόματα στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του αέρα. Η μεταβολή της πίεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Αυτή η μεταβολή της πίεσης μπορεί να προκληθεί από την επιτάχυνση και την επιβράδυνση του αέρα στην ανακυκλοφορία του. Η ταχύτητα του αέρα που ανακυκλοφορεί συνιστάται να είναι κάτω από 2,5 m/s [2].

### 3.1.4.5 Ο ακουστικός θόρυβος

Ο ακουστικός θόρυβος ενός καθαρού χώρου σε λειτουργία πρέπει να είναι μέχρι 60db, χωρίς την λειτουργία του εξοπλισμού. Εάν δεν επιτυγχάνεται αυτό το επίπεδο από τον κατασκευαστή, τοποθετούνται ειδικοί εξασθενητές ακουστικού θορύβου στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του αέρα [2].

### 3.1.4.6 Το επίπεδο των κραδασμών

Το επίπεδο κραδασμών είναι πολύ σημαντικός παράγων σε χώρους όπως η λιθογραφία ή χώροι μετρήσεων όπου υπάρχουν ευαίσθητα μηχανήματα όπως STEPPER, μικροσκόπιο SEM, AFM, κ.λ.π.

Η μέγιστη ταχύτητα κραδασμών πρέπει να μην ξεπερνάει τα 3μm/sec, μετρημένη στην περιοχή 8-100 Hz. Για τον περιορισμό των κραδασμών η δομή του πατώματος του καθαρού χώρου δεν είναι μονοκόμμη, αλλά αποτελείται από πλάκες στηριγμένες σε



κολόνες. Στους ευαίσθητους χώρους η απόσταση στήριξης σε κολόνες είναι 3,6 m ενώ στους υπόλοιπους χώρους 7,2 m [2].

#### **3.1.4.7 Η αντίσταση της γείωσης**

Η γείωση είναι αναγκαία για λόγους ασφαλείας του προσωπικού για προστασία του από τυχαία ηλεκτρικά σοκ. Πρέπει να εγκατασταθεί ένα συνολικό πλέγμα γείωσης κάτω από το έδαφος. Τα πλέγματα γείωσης διαφόρων κτηρίων πρέπει να ενοποιούνται και να σχηματίζουν ένα δίκτυο ίδιου δυναμικού.

Όλες οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και όλος ο εξοπλισμός πρέπει να γειωθούν στο πλέγμα γείωσης. Το σύστημα πλεγμάτων γείωσης πρέπει να έχει μια αντίσταση που να μην ξεπερνάει το  $1\Omega$  [2].

#### **3.1.4.8 Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή**

Πολλά μηχανήματα είναι ευαίσθητα στη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή που σχηματίζεται μεταξύ καλωδίων ή ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Το επίπεδο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής είναι ικανοποιητικό εάν είναι κάτω από το επίπεδο ευαισθησίας των μηχανημάτων.

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ενός κτηρίου μπορεί να οφείλεται σε εσωτερικές και εξωτερικές πηγές. Για προστασία από εξωτερικές πηγές το κτήριο κτίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελέσει ένα κλωβό Faraday. Πανό οπλισμένου χάλυβα εγκαθίσταται στην οροφή και κατά μήκος των τοιχωμάτων για αυτό το σκοπό. Είναι απαραίτητη επίσης η εγκατάσταση ενός πλέγματος γείωσης, μικρής αντίστασης, κάτω από το ψευδοπάτωμα του καθαρού χώρου [2].

#### **3.1.4.9 Η ηλεκτροστατική εκκένωση**

Το ηλεκτροστατικό φορτίο μπορεί να δημιουργηθεί με την επαφή ή με την τριβή. Η εκφόρτιση αυτού του φορτίου σε μηχανήματα, σε ανθρώπους, μπορεί να καταστρέψει κυκλώματα, να προκαλέσει προβλήματα στην λειτουργία κάποιου μηχανήματος ή μπορεί ακόμα να προκαλέσει και τραυματισμούς.

Η ηλεκτροστατική εκκένωση ελέγχεται με την γείωση όλων των μηχανημάτων, με τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας και με την κάλυψη του πατώματος και των τοιχωμάτων



του καθαρού χώρου με ένα πολύ λεπτό αγώγιμο υλικό που να οδηγεί το ηλεκτρικό φορτίο προς την γείωση [2].

### 3.1.5 Λειτουργία των καθαρών χώρων

Για την καλή λειτουργία ενός καθαρού χώρου είναι πολύ σημαντική ή συνεχή καταγραφή του επιπέδου ρύπανσης με σωματίδια, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας καθώς και η σωστή προληπτική συντήρηση των εγκαταστάσεων του.

Όλες οι διεργασίες που γίνονται μέσα στον καθαρό χώρο πρέπει να έχουν ως γνώμονα την αποφυγή της ρύπανσης του χώρου.

Ο βαθμός καθαρότητας ενός καθαρού χώρου, επηρεάζεται από τον αριθμό σωματιδίων που μπαίνουν στον καθαρό χώρο καθώς και από τον αριθμό των σωματιδίων που “γεννούνται” μέσα στον καθαρό χώρο από την κίνηση των αντικειμένων και πολύ περισσότερο από την κίνηση του προσωπικού.

Το προσωπικό είναι η μεγαλύτερη πηγή ρύπανσης. Υπολογίζεται ότι ένα άτομο σε κανονική δραστηριότητα “παράγει” περίπου ένα εκατομμύριο σωματίδια ανά λεπτό, από το σώμα, τα ρούχα και την αναπνοή.

Εκτός από το γεγονός ότι “παράγει” σωματίδια στην κανονική δραστηριότητα του το προσωπικό βρίσκεται πάντα πολύ κοντά στα δισκίδια στην διάρκεια των διαδικασιών.

Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό για τον έλεγχο της ρύπανσης το προσωπικό να ακολουθεί τους κανόνες που επιβάλλονται για την λειτουργία των καθαρών χώρων.

Για την προστασία της καθαρότητας του περιβάλλοντος το προσωπικό φοράει ειδικά συνθετικά ρούχα, ανάλογα με τον βαθμό καθαρότητας του χώρου.

Για υψηλό βαθμό καθαρότητας υπάρχουν σύνολα που καλύπτουν όλο το σώμα, μπότες στα πόδια, μάσκες για το στόμα και τη μύτη και γάντια για τα χέρια.

Στις εικόνες 3.7, 3.8, 3.9 και 3.10 παρουσιάζεται ένα τέτοιο ντύσιμο, η είσοδος στον καθαρό χώρο μέσω ειδικών ταπέτων καθώς και η κίνηση μέσα στον καθαρό χώρο. Αυτές οι ενδυμασίες πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγώγιμες για μείωση ηλεκτρικού φορτίου.

Για τον καθαρισμό αυτών των ενδυμάτων χρησιμοποιούνται απιονισμένο νερό και ειδικά απορρυπαντικά χωρίς νάτριο (Na).



Εικόνα 3.7: Ντύσιμο πριν την είσοδο στον καθαρό χώρο [11].

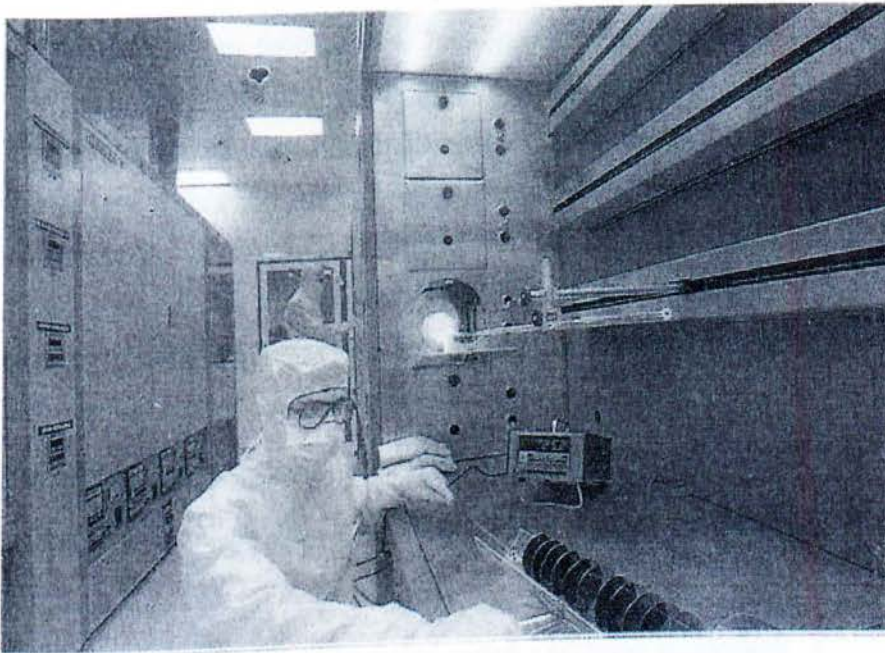


Εικόνα 3.8: Ειδικός τάπητας για την κατακράτηση σωματιδίων πριν την είσοδο στον καθαρό χώρο [12].





Εικόνα 3.9: Διεργασίες στον καθαρό χώρο [13].



Εικόνα 3.10: Προστατευμένη μεταφορά δισκιδίων πριν την είσοδό τους στους <φούρνους> [14].



Για την αποφυγή της ρύπανσης στους καθαρούς χώρους υψηλών προδιαγραφών στο προσωπικό απαγορεύεται να φοράει πούδρες, κρέμες, make-up καθώς και κοσμήματα.

Ιδιαίτερη προσοχή επίσης πρέπει να δοθεί στα αντικείμενα που μεταφέρονται στον καθαρό χώρο. Υπάρχουν χαρτιά και πένες ειδικά για καθαρούς χώρους, που δεν δημιουργούν σωματίδια. Μόνο αυτά πρέπει να χρησιμοποιηθούν στους καθαρούς χώρους. Τα κοινά χαρτιά, έγγραφα φωτοτυπίες, χάρτινα κουτιά κλπ. απαγορεύονται. Τα υλικά που μπαίνουν μέσα στους καθαρούς χώρους όπως : μπουκάλια χημικών, ανταλλακτικά, εξοπλισμός, πρέπει να καθαριστούν πολύ προσεκτικά στην είσοδο του καθαρού χώρου.

Στην περίπτωση επισκευής ή συντήρησης ενός μηχανήματος πρέπει να απομονωθεί το μηχάνημα με πάνελ έτσι ώστε να αποφευχθεί η ρύπανση γύρω απ αυτό.

Ο καθαρισμός του χώρου πρέπει να γίνεται σε καθημερινή βάση, με ένα σύστημα κεντρικού κενού και σφουγγάρισμα με απιονισμένο νερό [2].

### 3.1.6 Σύστημα παραγωγής και τροφοδοσίας με απιονισμένο νερό

Το απιονισμένο νερό είναι βασικό στοιχείο στον υγρό καθαρισμό δισκιδίων πυριτίου. Το νερό χωρίς ιόντα δρα σαν “σφουγγάρι” για τα ιόντα που βρίσκονται στην επιφάνεια του δισκιδίου πυριτίου κατά τη διάρκεια του ξεπλύματος. Επιπλέον επειδή το ξέπλυμα με απιονισμένο νερό γίνεται στο τέλος της διαδικασίας καθαρισμού δισκιδίων, η περιεκτικότητα πρέπει να είναι χαμηλή, ανάλογα των απαιτήσεων της τεχνολογίας. Ένας από τους πιο κρίσιμους ρύπους του απιονισμένου νερού για την τεχνολογία ULSI είναι η περιεκτικότητα σε οξυγόνο που πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή για την αποφυγή σχηματισμού του αυτογενούς οξειδίου (native oxide) στην επιφάνεια γυμνού πυριτίου, κατά τη διάρκεια του ξεπλύματος. Υπάρχουν διάφορα συστήματα μείωσης του οξυγόνου στο απιονισμένο νερό . Τα πιο γνωστά είναι :

- συστήματα που βασίζονται στην θέρμανση του νερού πάνω από 55 °C.
- συστήματα που χρησιμοποιούν την έγχυση αζώτου αντίστροφα στη ροή του νερού.
- συστήματα που κάνουν χρήση καταλυτικών ρητινών παλλαδίου.

Πρόσφατα έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος λιγότερο δαπανηρή, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και βασίζεται στη δημιουργία κενού ( $< 700 \text{ mmHg}$ ). Το διαλυμένο οξυγόνο παρασύρεται από τους ατμούς του νερού που σχηματίζονται και διαπερνούν το απιονισμένο νερό. Επιτυγχάνεται έτσι ένα επίπεδο οξυγόνου γύρω στα 2 ppb.

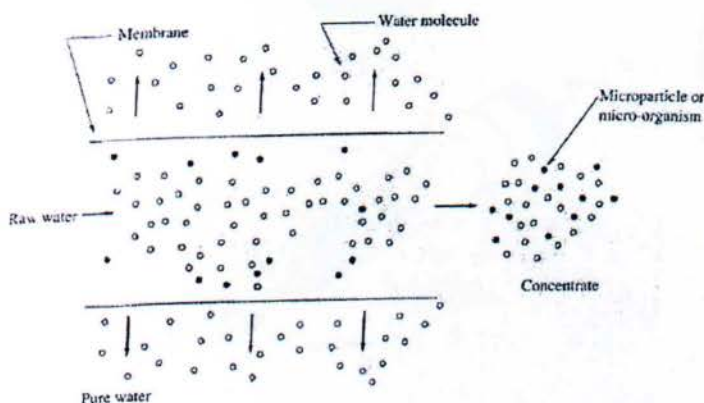
Στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες απιονισμένου νερού. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι για την κατασκευή κυκλωμάτων 16Mbit DRAM, για κάθε δισκίδιο πυριτίου διαμέτρου 200 mm, ξοδεύοντας περίπου 4,5 τόνοι απιονισμένου νερού !

Το απιονισμένο νερό παρασκευάζεται πάντα κοντά στην κατανάλωση για την ικανοποίηση των ποιοτικών και ποσοτικών αναγκών. Το ανεπεξέργαστο νερό, ανάλογα την πηγή του, περιέχει πολλούς και διάφορους ρύπους όπως : σωματίδια, οργανικές και ανόργανες ουσίες, μικροοργανισμούς, βακτηρίδια και διάφορα διαλυμένα αέρια. Αυτοί οι ρύποι απομακρύνονται σε διάφορα στάδια της επεξεργασίας του νερού.

Για την απομάκρυνση σωματιδίων διαστάσεων ενός μικρού και άνω, χρησιμοποιούνται φίλτρα όπως : multimedia filters, precoated filters και microfolters. Όταν κατά την λειτουργία τους, η διαφορά πίεσης στις δύο πλευρές του φίλτρου ξεπεράσει κάποιο όριο, γίνεται αυτόματα η αναγέννηση του φίλτρου με αντίστροφη τροφοδοσία.

Η αντίστροφη όσμωση χρησιμοποιείται για απομάκρυνση πολλών μικρών σωματιδίων (1-20 Å) καθώς και για την απομάκρυνση οργανικών ουσιών και μερικών ιόντων.

Η αρχή λειτουργίας της αντίστροφης όσμωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11: Αρχή λειτουργίας της αντίστροφης όσμωσης [2].

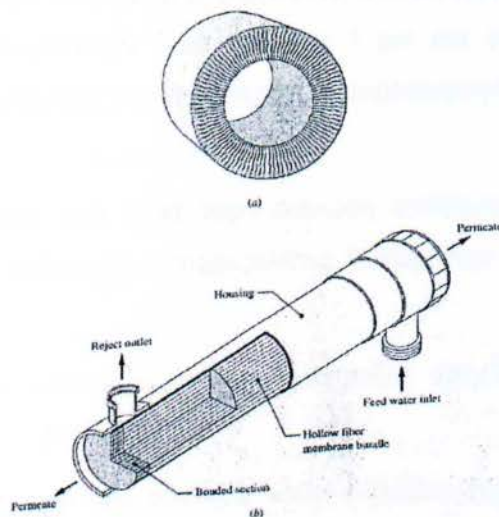


Η όσμωση είναι το αυτόματο πέρασμα του υγρού ενός αραιού διαλύματος προς ένα συμπυκνωμένο διάλυμα δια μέσου μιας υδατοπερατής μεμβράνης. Η αντίστροφη όσμωση χρησιμοποιεί την πίεση στην πλευρά της μεμβράνης συμπυκνωμένου διαλύματος για να περάσει το υγρό προς την πλευρά του αραιού διαλύματος. Αυτή είναι και η αρχή λειτουργίας των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης στην παραγωγή απιονισμένου νερού.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11 το νερό που μπαίνει με υψηλή πίεση στο σύστημα υδατοπερατών μεμβρανών περνάει από τους πόρους της μεμβράνης ενώ τα μικροσωματίδια, οι μικροοργανισμοί και μερικά ιόντα δεν περνούν από τη μεμβράνη. Οι ρύποι οδηγούνται προς την αποχέτευση και μόνο μερικοί παραμένουν στην επιφάνεια της μεμβράνης.

Για την αναγέννηση τη μεμβράνης η λειτουργία του συστήματος σταματάει και το καθαρό νερό, χωρίς πίεση αυτή τη φορά, μπαίνει από την μεριά τροφοδοσίας του συστήματος παρασύροντας έτσι τους ρύπους που κατακρατήθηκαν από την μεμβράνη προς την αποχέτευση.

Για υπομικρονικά σωματίδια χρησιμοποιούνται τα ultrafilters. Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζει ένα τέτοιο φίλτρο τοποθετημένο στο φυσίγγιο του καθώς και την τομή του φίλτρου.



Εικόνα 3.12: Ultrafilters [2].



Το νερό τροφοδοτείται από την εξωτερική πλευρά του φίλτρου το οποίο έχει σχήμα κυλίνδρου. Το νερό περνάει από τους πόρους των ινών του φίλτρου προς την εσωτερική πλευρά του, ενώ τα μικροσωματίδια μένουν στην εξωτερική επιφάνεια του φίλτρου. Το φίλτρο αναγεννιέται με καθαρό νερό που μπαίνει από την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή από το εσωτερικό του φίλτρου και με αυτόν τον τρόπο παρασύρει τα σωματίδια από την εξωτερική πλευρά του.

Μια εγκατάσταση, state of the art, απιονισμένου νερού αποτελείται από δύο κύκλους επεξεργασίας νερού:

- Ο πρώτος κύκλος (make up look) απομακρύνει στην πρώτη φάση τα μεγάλα σωματίδια ( $\geq 1 \mu\text{m}$ ) και κολλοειδές και σε συνέχεια απομακρύνει τους οργανικούς ρύπους, τα διάφορα αέρια διαλυμένα στο νερό, τους ιοντικούς ρύπους.
- Ο δεύτερος κύκλος – polishing loop – απομακρύνει τους τελευταίους ρύπους που μπορούν να εμφανισθούν κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου επεξεργασίας νερού.

Αναλυτικά η επεξεργασία του νερού για παραγωγή απιονισμένου νερού γίνεται με τον εξής τρόπο :

Το νερό δικτύου που έχει υποστεί μια διαδικασία αποσκλήρυνσης του, περνάει από φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων διαστάσεων  $\geq 1 \mu\text{m}$  και σε συνέχεια μπαίνει στο σύστημα αντίστροφης όσμωσης για απομάκρυνση μικροσωματιδίων, οργανικών ουσιών και μερικών ιόντων.

Το νερό που έχει περάσει από αντίστροφη όσμωση αποθηκεύεται σε μια κατάλληλη δεξαμενή. Ακολουθεί η διαδικασία απομάκρυνσης διαλυμένων στο νερό αερίων όπως  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , κλπ με κενό.

Στη συνέχεια γίνεται η αποστείρωση για βακτηρίδια χρησιμοποιώντας μια πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας (254 nm).

Το νερό περνάει έπειτα από ένα σύστημα «MIX - BED», ρητινών για κατακράτηση ανιόντων και κατιόντων. Μετά, το νερό οδηγείται από φίλτρα για κατακράτηση μικροσωματιδίων προς την κατανάλωση.

Το νερό διοχετεύεται στο καθαρό χώρο δια μέσου κατάλληλων σωληνώσεων. Το υλικό που χρησιμοποιείται για διοχέτευση του απιονισμένου νερού είναι PVC (polyvinyl chloride) PVDF (polyvinylidene fluoride).

Γενικά αποφεύγεται η στασιμότητα του νερού στις σωληνώσεις που μπορεί να υποβιβάζει την ποιότητα του νερού.

Γι αυτό το λόγο το νερό που διοχετεύεται προς την κατανάλωση στους καθαρούς χώρους κυκλοφορεί σε ένα δακτύλιο σωληνώσεων, επιστρέφοντας συνεχώς προς την μονάδα παραγωγής απιονισμένου νερού. Η ταχύτητα κυκλοφορίας του νερού στις σωληνώσεις πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 1,5 m/sec. Επίσης περιοδικά γίνεται αποστείρωση του δικτύου κατανομής απιονισμένου νερού με όζον.

Για υπομικρονικές τεχνολογίες υπάρχουν οι δύο κύκλοι επεξεργασίας νερού. Στο δεύτερο κύκλο, polishing – loop, γίνεται επιπλέον αποστείρωση του νερού με υπεριώδεις ακτινοβολίες, των 158 nm για την ελάττωση των TOC (total organic carbon) υπάρχει επίσης δεύτερο σύστημα αντίστροφης όσμωσης (για τεχνολογία 0,35 μ) και δεύτερο σύστημα «MIX BED» ρητινών [2].

### 3.1.7 Συστήματα τροφοδοσίας με χημικά

Στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται πάνω από 20 είδη πολύ καθαρών χημικών. Τα περισσότερα χημικά είναι οξέα, καυστικά και ακολουθούν τα διαλυτικά. Αναφέρουμε πιο κάτω μερικά από αυτά :

$\text{NH}_4\text{OH}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HCL}$ , IPA που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό δισκιδίων πυριτίου πριν τις θερμικές διαδικασίες.

$\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{BHF}$  (buffered HF) που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία χάραξης υμενίων : διοξειδίου του πυριτίου, νιτριδίου, αλουμινίου.

Φωτοευαίσθητες ρητίνες, εμφανιστής, ακετόνη που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία φωτολιθογραφίας.

Στις μονάδες παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τα χημικά που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες διοχετεύονται στα σημεία κατανάλωσης δια



μέσου ενός συστήματος τροφοδοσίας χημικών. Αυτό το σύστημα αποτελείται από τρία μέρη:

- την μονάδα διανομής χημικών,
- το δίκτυο σωληνώσεων,
- την κεντρική μονάδα ελέγχου.

Η μονάδα διανομής χημικών μπορεί να είναι δύο ειδών :

Μία μεγάλη δεξαμενή (1.000 – 9.000 L) εξοπλισμένη με μια αντλία και φίλτρα διανομής χημικών ή για μικρότερες ποσότητες δύο σχετικά μικρά ειδικά δοχεία (200l). Το ένα δοχείο χρησιμοποιείται για την διανομή χημικών, ενώ το άλλο είναι σε αναμονή. Όταν αδειάσει το ένα δοχείο, η διανομή περνάει αυτόματα στο δεύτερο. Αυτά τα δοχεία προμηθεύονται κατευθείαν από τον παραγωγό.

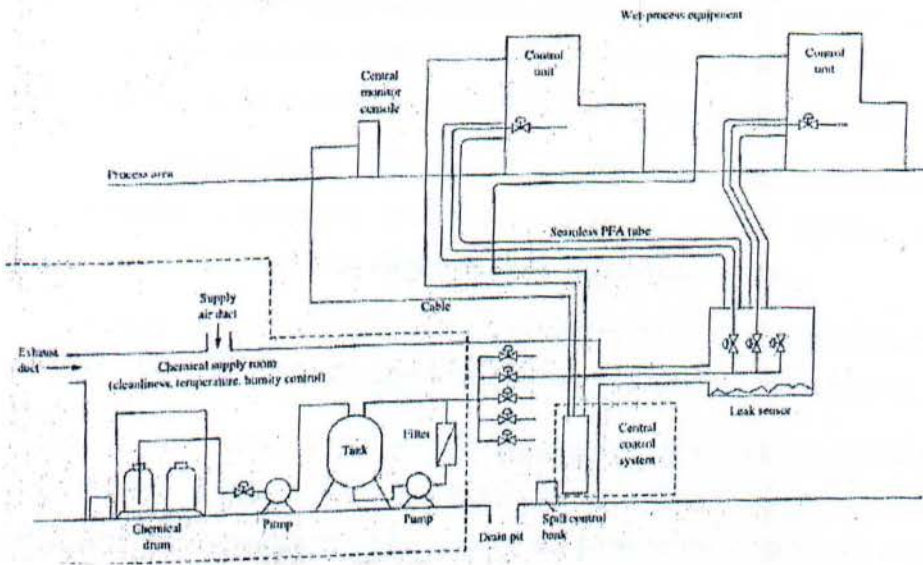
Η εγκατάσταση της διανομής χημικών γίνεται σε καθαρό χαρτί με έλεγχο της θερμοκρασίας και υγρασίας.

Τα δίκτυα διανομής οξέων και καυστικών χημικών κατασκευάζονται από ειδικό υλικό, το PFA (perfluoroalkoxy). Για τον έλεγχο τυχόν διαρροών εγκαθίσταται αισθητήρες. Για τα διαλυτικά, τα δίκτυα κατασκευάζονται από σωλήνες ανοξείδωτου χάλυβα SS316L με την εσωτερική επιφάνεια ηλεκτροστιλβωμένη.

Η κεντρική μονάδα ελέγχου της τροφοδοσίας των χημικών ενεργοποιεί την μονάδα διανομής όταν υπάρχει ζήτηση στο σημείο κατανάλωσης.

Στην εικόνα 3.13 παρουσιάζεται ένα σύστημα τροφοδοσίας χημικών.





Εικόνα 3.13 Συστήματα τροφοδοσίας με καθαρά αέρια [2].

Στην παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται πάνω από 20 διαφορετικά πολύ καθαρά αέρια. Μεταξύ αυτών αέρια όπως :  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$  και  $Ar$  χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες και είναι γνωστές με την ονομασία Bulk-gases.

Τα άλλα αέρια όπως :  $He$ ,  $AsH_3$ ,  $PH_3$ ,  $NH_3$ ,  $SiH_4$ ,  $HF_3$  χρησιμοποιούνται σε μικρές σχετικά ποσότητες και θεωρούνται ειδικά αέρια.

Η τροφοδοσία με αέρια μεγάλης κατανάλωσης που αναφέραμε παραπάνω γίνεται από μεγάλες δεξαμενές υδροποιημένου αερίου. Το κάθε αέριο που αεριοποιείται περνάει από ειδικά συστήματα καθαρισμού διαφόρων ρύπων (purifier), από φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων και μετά διοχετεύεται στον καθαρό χώρο.

Η τροφοδοσία με αέρια μικρής κατανάλωσης γίνεται κατευθείαν από τις μπουκάλες αερίου υψηλής πίεσης. Οι μπουκάλες βρίσκονται σε ειδικά μεταλλικά ντουλάπια (gas cabinet) εξοπλισμένα με εξαερισμό και με σύστημα ελέγχου ροής και πίεσης του αερίου.

Συνήθως υπάρχουν δύο μπουκάλες, η μία για την διανομή και η άλλη σε αναμονή. Όταν τελειώνει η μία μπουκάλα, αυτόματα περνά η διανομή στην δεύτερη μπουκάλα.

Επίσης κοντά στις δύο μπουκάλες υπάρχει μια μπουκάλα αζώτου που χρησιμοποιείται στον καθαρισμό των γραμμών στην διαδικασία αλλαγής της μπουκάλας. Με λίγες εξαιρέσεις, όπως το  $\text{Cl}_2$  και το  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  η πίεση στις γραμμές των αερίων είναι  $5 \text{ kg/cm}^2$ .

Σε κάθε σημείο κατανάλωσης η πίεση αερίων ελέγχεται και ρυθμίζεται τοπικά με μια σειρά από βαλβίδες, αισθητήρες πίεσης και ρυθμιστές πίεσης. Επίσης, πριν την κατανάλωση το αέριο περνάει από φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων.

Συνήθως όλο αυτό το σύστημα ελέγχου και διανομής ενός ή περισσοτέρων αερίων βρίσκεται σε μια ξεχωριστή μονάδα (gas manifold box) κοντά στον τόπο χρήσης.

Στην εξασφάλιση των πολύ αυστηρών προδιαγραφών αερίων κατά την μεταφορά τους δια μέσου δικτύου παίζουν, όλο και περισσότερο κρίσιμο ρόλο τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση δικτύου, η κατάσταση της εσωτερικής επιφάνειας των σωληνώσεων που έρχεται σε επαφή με τα καθαρά αέρια, ο τρόπος στεγανοποίησης ενώσεων, ο σχεδιασμός του δικτύου.

Όλη η εγκατάσταση δικτύου πρέπει να στοχεύει προς :

- Την ελαχιστοποίηση δικτύου της προσρόφησης σωματιδίων και υγρασίας στα τοιχώματα του δικτύου που έρχεται σε επαφή με το αέριο.
- Την μείωση της παγίδευσης ανεπιθύμητων αερίων σε “νεκρές ζώνες” του δικτύου. Η μείωση της παγίδευσης ανεπιθύμητων αερίων αντιμετωπίζεται με σωστό σχεδιασμό δικτύου και με την επιλογή βαλβίδων αερίων σχεδιασμένες να έχουν πολύ μικρή “νεκρή ζώνη”.
- Την αποφυγή εισόδου υγρασίας και οξυγόνου στο δίκτυο από μη στεγανοποιημένες καλά ενώσεις. Η αποφυγή εισόδου υγρασίας και οξυγόνου στο δίκτυο, αντιμετωπίζεται με την στεγανοποίηση των ενώσεων των τμημάτων και εξαρτημάτων του δικτύου με την χρήση μεταλλικών φλαντζών.

Το υλικό που χρησιμοποιείται στην Μικροηλεκτρονική για το δίκτυο αερίων είναι ο ανοξειδωτος χάλυβας με εσωτερική επιφάνεια ηλεκτροστιλβωμένη (electropolished) και με την επιφανειακή τραχύτητα κάτω του ενός μικρού για την ελαχιστοποίηση της προσρόφησης σωματιδίων και υγρασίας στα τοιχώματα του δικτύου.



Για την βελτίωση των χαρακτηριστικών του σε ότι αφορά προσρόφηση υγρασίας και άλλων ρύπων, η ηλεκτροσπιλβωμένη επιφάνεια ουδετεροποιείται με την ανάπτυξη ενός στρώματος  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  σε οξειδωτική ατμόσφαιρα. Το ουδετεροποιημένο υλικό είναι γνωστό με την ονομασία GOLDEP λόγο του χρυσαφί χρώματος [2].

## 3.2 Τεχνολογία καθαρισμού δισκιδίων Si

### 3.2.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία καθαρισμού των δισκιδίων πυριτίου είναι ένα από τα σημαντικότερα και κρίσιμότερα βήματα στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μια καθαρή επιφάνεια είναι, γενικά μια επιφάνεια χωρίς ρύπους : σωματίδια, μέταλλα και οργανικές ουσίες.

Όσο μικραίνουν οι διαστάσεις των μικροηλεκτρονικών διατάξεων, οι απαιτήσεις “καθαρότητας” αυξάνονται και εξελίσσονται.

Έτσι για τεχνολογία ULSI, όπου το πάχος του οξειδίου της πύλης του τρανζίστορ (gate oxide) είναι κάτω από 100 Å, η μικρό-τραχύτητα (microroughness) της επιφάνειας είναι πολύ σημαντικός παράγων για την ποιότητα του λεπτού οξειδίου που αναπτύσσεται σε αυτή την επιφάνεια και για την ευκινησία των ηλεκτρονίων στο κανάλι του τρανζίστορ.

Επίσης στην τεχνολογία ULSI, καθαρή θεωρείται μια επιφάνεια χωρίς το αυτογενές οξείδιο (native oxide) που αναπτύσσεται τη γυμνή επιφάνεια του πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου.

Η αφαίρεση του αυτογενούς οξειδίου επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο ανάπτυξης του λεπτού οξειδίου πύλης, την μικρότερη αντίσταση επαφής πυριτίου-μετάλλου και την προετοιμασία της επιφάνειας για επιταξία και CVD.

Η ανάπτυξη του οξειδίου πύλης είναι ένα από τα πιο κρίσιμα τεχνολογικά βήματα στην κατασκευή κυκλωμάτων MOS, διότι από την ποιότητα του οξειδίου πύλης εξαρτάται η απόδοση (yield), οι επιδόσεις (performances) και η αξιοπιστία (reliability) των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [2].



### 3.2.2 Μηχανισμοί προσρόφησης και απομάκρυνσης ρύπων

Ο πίνακας 3.3 παρουσιάζει συνοπτικά τους ρύπους, τις πιθανές πηγές προέλευσης και την επίδραση τους στην ποιότητα του ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Διαφορετικοί ρύποι επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τα χαρακτηριστικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Πίνακας 3.3: Ρύποι, πιθανές πηγές προέλευσης τους και η επίδραση τους στην ποιότητα του ολοκληρωμένου κυκλώματος [2].

<b>Sources and related effects of various contaminations</b>		
<b>Contamination</b>	<b>Possible source</b>	<b>Effects</b>
Particles	Equipment, ambient, gas, deionized (DI) water, chemical	Low oxide breakdown Poly-Si and metal bridging-induced low yield
Metal	Equipment, chemical, reactive ion etching (RIE), implantation ashing	Low breakdown field Junction leakage Reduced minority lifetime $V_t$ shift
Organic	Vapor in room, residue of photoresist, storage containers, chemical	Change in oxidation rate
Microroughness	Initial wafer material, chemical	Low oxide breakdown field Low mobility of carrier
Native oxide	Ambient moisture, DI water rinse	Degraded gate oxide Low quality of epi-layer High contact resistance Poor silicide formation

Πιο κάτω θα παρουσιάσουμε αναλυτικά για κάθε είδους ρύπανσης (contamination ) τα προβλήματα που σχετίζονται με αυτή και τους μηχανισμούς προσρόφησης και απομάκρυνσης τους, για μία καθαρή επιφάνεια κατάλληλη για τεχνολογία VLSI-ULSI [2].

#### 3.2.2.1 Σωματίδια

Τα σωματίδια που εναποθέτονται στην επιφάνεια των δισκιδίων πυριτίου κατά την διάρκεια των διαδικασιών προέρχονται από το περιβάλλον, τον εξοπλισμό, τα αέρια, τα χημικά, το αποιονισμένο νερό. κλπ.

Οι απαιτήσεις για τις διαστάσεις των σωματιδίων, εξαρτώνται από την μικρότερη διάσταση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Σαν γενικό κανόνα οι διαστάσεις σωματιδίων θα έπρεπε να είναι 1/10 από την μικρότερη διάσταση του κυκλώματος.

Για τον έλεγχο της ρύπανσης με σωματίδια είναι σημαντικό να καταλάβουμε τους μηχανισμούς προσκόλλησης και απομάκρυνσής τους από την επιφάνεια.

- Η προσκόλληση των σωματιδίων στην επιφάνεια πυριτίου οφείλεται σε μηχανισμούς όπως :
  - δυνάμεις λόγω στατικού φορτίου στα σωματίδια δυνάμεις van der Waals.
  - χημικός δεσμός σωματιδίων με την επιφάνεια.
  - δυνάμεις που οφείλονται στο σχηματισμό ενός διπλού ηλεκτρικού στρώματος μεταξύ σωματιδίου και επιφάνειας. δυνάμεις που οφείλονται στο "τριχοειδές φαινόμενο" (capillarity) γύρω από τα σωματίδια.
- Οι μηχανισμοί απομάκρυνσής των σωματιδίων ταξινομούνται ως εξής :
  - διάλυση,
  - οξειδωτική διάβρωση και διάλυση των σωματιδίων,
  - αποκόλληση «lift-off» με την ελαφριά χάραξη της επιφάνειας του πυριτίου κάτω από τα σωματίδια,
  - ηλεκτρική απώθηση μεταξύ σωματιδίων και επιφάνειας,
  - μηχανική αποκόλληση.

#### Βήματα χημικού καθαρισμού

- Προκαταρκτικός καθαρισμός (αν κριθεί απαραίτητο).
- Απομάκρυνση υμενίου πολυμερούς με εμβάπτιση σε οργανικό διαλύτη ή σε οξειδωτικό μίγμα  $H_2O_2 : H_2SO_4 = 1:2$  (ή ακόμα μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε  $H_2SO_4$  για πιο δραστικό καθαρισμό).
- Έκπλυση με απιονισμένο νερό.
- Απομάκρυνση λεπτού υμενίου οξειδίου (native oxide).
- Αρχικά ξεπλένουμε τα δισκία.
- Εμβάπτιση δισκίων σε διάλυμα  $HF : H_2O = 1:50$  σε δοχείο Teflon για 15 s.



- Έκπλυση με απιονισμένο νερό, μέχρι η ειδική αντίσταση του νερού να είναι μεγαλύτερη από 13 ΜΩ.
- Απομάκρυνση οργανικών υπολειμμάτων και μετάλλων.
- Προετοιμασία διαλύματος  $H_2O : NH_4OH : H_2O_2 = 5:1:1$  στο δοχείο της αμμωνίας.
- Θέρμανση μίγματος στους 85 °C και εμβάπτιση των δισκίων για 10 min.
- Έκπλυση δισκίων και διαλύματος με απιονισμένο νερό για 1 min και τελική έκπλυση δισκίων μέχρι η ειδική αντίσταση του νερού να είναι μεγαλύτερη από 13 ΜΩ.
- Απομάκρυνση λεπτού υμενίου οξειδίου που αναπτύχθηκαν στο 3ο βήμα.
- Εμβάπτιση δισκίων σε διάλυμα  $HF : H_2O = 1:50$  σε δοχείο Teflon για 15 s.
- Έκπλυση με απιονισμένο νερό για 20 - 30 s μόνο, ώστε να παρεμποδιστεί η εκ νέου ανάπτυξη λεπτού οξειδίου.
- Απομάκρυνση εναπομεινάντων ατομικών και ιοντικών ρύπων.
- Εμβάπτιση σε διάλυμα  $H_2O : HCl : H_2O_2 = 6:1:1$  θερμοκρασίας 85 °C για 10 - 15 min.
- Έκπλυση δισκίων σε τρεχούμενο νερό για 20 min ακόμα.
- Στέγνωμα των δισκίων.
- Φύλαξη των δισκίων [3].

### 3.2.2.2 Μεταλλικοί ρύποι

Η ρύπανση με μέταλλα ξεκινάει από το επίπεδο των 1010 άτομα/cm<sup>2</sup>.

Οι πιο σημαντικές πηγές ρύπανσης με μέταλλα είναι τα χημικά και οι διαδικασίες όπως ιοντική εμφύτευση, εγχάραξη με πλάσμα (R.I.E), καθαρισμός ρητίνης με πλάσμα.

Φαίνεται ότι η υγρή οξειδωση προκαλεί την λιγότερη ρύπανση (< 1010 άτομα / cm<sup>2</sup> ) ενώ η ιοντική εμφύτευση την μεγαλύτερη : (1012 + 1013 άτομα / cm<sup>2</sup>).



Η ρύπανση (contamination) με μέταλλα προκαλεί ατέλειες (defects) στην διεπιφάνεια πυριτίου/ διοξειδίου του πυριτίου, ατέλειες (stacking faults) κατά τη διάρκεια των διαδικασιών που ακολουθούν όπως η οξειδωση ή η επιταξία. Προκαλούν επίσης την αύξηση του ρεύματος διαρροής της επαφής p-n και επίσης την μείωση του χρόνου ζωής φορέων μειονότητας.

Μία επιφάνεια με ρύπους από μέταλλα και προπαντός από ασβέστιο (Ca) παρουσιάζει μεγάλη μικρο- τραχύτητα της επιφάνειας, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του οξειδίου του πυριτίου που αναπτύσσεται σε αυτήν.

Το επίπεδο ρύπανσης με Ca πρέπει να είναι κάτω από 1011 άτομα / cm<sup>2</sup> για να μην υπάρχουν σοβαρά προβλήματα στην ποιότητα του οξειδίου της πύλης.

Είναι γνωστοί δύο μηχανισμοί σχηματισμού ιζημάτων των μετάλλων πάνω στην επιφάνεια του Si.

Ο πρώτος μηχανισμός είναι η απευθείας προσρόφηση στην επιφάνεια του πυριτίου με ανταλλαγή φορτίου μεταξύ του ιόν του μετάλλου και το άτομο πυρίτιο ή υδρογόνου που βρίσκεται τελευταίο προς την επιφάνεια στο κρυσταλλικό πλέγμα. Τα ιόντα μετάλλων όπως Cu, Hg, Ag, Pt, Au που έχουν μεγαλύτερη ηλεκτροαρνητικότητα από το Si, έχουν την τάση να πάρουν ένα ηλεκτρόνιο από το Si, εξουδετερώνονται και σχηματίζουν ίζημα μετάλλου στην επιφάνεια του πυριτίου. Αυτοί οι ρύποι απομακρύνονται με χημικό τρόπο. Το διάλυμα HF : 0,5 % - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : 10% είναι πολύ αποτελεσματικό για αυτό το είδος των ρύπων.

Ένας δεύτερος μηχανισμός για σχηματισμό ιζημάτων των μετάλλων εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της θερμικής οξειδωσης όταν μέταλλα όπως Al, Cr, Fe οξειδώνονται και ενσωματώνονται στο οξείδιο που σχηματίζεται. Αυτοί οι ρύποι απομακρύνονται με την απομάκρυνση του διοξειδίου του πυριτίου, σε ένα διάλυμα HF.

Εξ αιτίας του ανοξειδωτου ατσάλιου (SS) που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην κατασκευή του εξοπλισμού στη μικροηλεκτρονική, είναι αναπόφευκτη η ρύπανση με σίδηρο (Fe) στην επιφάνεια του πυριτίου [2].

### 3.2.2.3 Ρύπανση με οργανικές ουσίες

Η ρύπανση με οργανικές ουσίες οφείλεται σε ατμούς οργανικών ουσιών από το περιβάλλον, σε πλαστικά δοχεία όπου αποθηκεύονται τα δισκίδια ή σε υπολείμματα φωτοευαίσθητης ρητίνης που χρησιμοποιείται στην λιθογραφία.

Η απομάκρυνση των οργανικών ουσιών είναι απαραίτητη, προπάντων στην αρχή του καθαρισμού δισκιδίων διότι αυτοί οι ρύποι που βρίσκονται σε μορφή σωματιδίων ή λεπτών υμενίων, εμποδίζουν τον καθαρισμό της επιφάνειας από μέταλλα ή από οξειδίο κάτω απ αυτούς. Επίσης, δρουν σαν μάσκα σε διαδικασίες χάραξης με πλάσμα (R.I.E).

Η απομάκρυνση της φωτοευαίσθητης ρητίνης που είναι και η πιο σημαντική πηγή ρύπανσης με οργανικές ουσίες, γίνεται με τον συνδυασμό υγρού καθαρισμού με πλάσμα όζον και επακόλουθα με υγρό καθαρισμό σε διάλυμα  $H_2SO_4 - H_2O_2$  σε ποσοστό από 3:1 μέχρι 4:1 σε 130 °C.

Μια άλλη σύγχρονη μέθοδος χρησιμοποιεί πολύ καθαρό αφιονισμένο νερό στο οποίο έχει γίνει έγχυση μικρής ποσότητας όζον (0,1-2 ppm). Το όζον διασπάται στο νερό και μέσω της πολύ ισχυρής οξειδωτικής δράσης του, αποσυνθέτει τους οργανικούς ρύπους.

Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι γίνεται σε χαμηλή θερμοκρασία, είναι απλή, με μικρή κατανάλωση χημικών.

Παρόλα αυτά, αυτή η μέθοδος προκαλεί ανάπτυξη του αυτογενούς οξειδίου (native oxide) λόγω παρουσίας του όζοντος.

Για τον έλεγχο της επιφάνειας για υπολείμματα φωτοευαίσθητης ρητίνης ή άλλων οργανικών ουσιών χρησιμοποιείται αποτελεσματικά ή μικροσκοπία με φωτοδιαύγεια (fluorescence microscopy).

Το δισκίδιο φωτίζεται με υπεριώδη ακτινοβολία και το υλικό εκπέμπει χαρακτηριστική ακτινοβολία στο ορατό τμήμα του φάσματος. Οι οργανικές ουσίες εκπέμπουν πιο έντονα από τις ανόργανες και έτσι ξεχωρίζουν [2].

#### 3.2.2.4 Μικροτραχύτητα της επιφάνειας

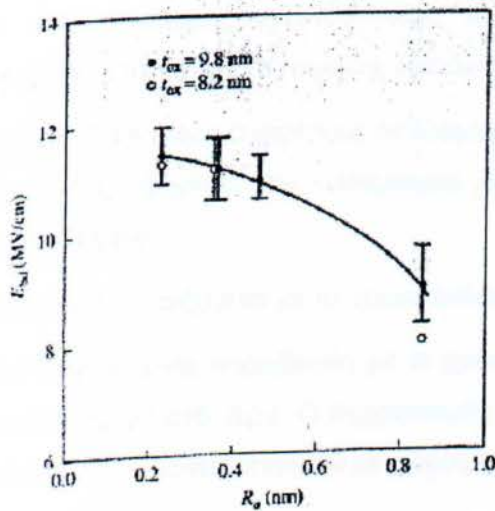
Η μικροτραχύτητα της επιφάνειας του πυριτίου (micro roughness) είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα του λεπτού οξειδίου του πυριτίου για τεχνολογίες ULSI όπου η πύλη του τρανζίστορ έχει πάχος μικρότερο από 100 Å.



Ανωμαλίες της επιφάνειας μεγαλύτερες από 10 Å υποβιβάζουν σημαντικά την ποιότητα του οξειδίου πύλης, προκαλώντας μείωση της ευκινησίας των φορέων και χαμηλή τάση διάτρησης του οξειδίου.

Για τεχνολογία 0,1 μm όπου η πύλη του τρανζίστορ έχει πάχος μόλις 40 Å, οι απαιτήσεις για μικροτραχύτητα είναι στις διαστάσεις του ατόμου για κυκλώματα υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας.

Το διάγραμμα 3.4 παρουσιάζει την μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου διάτρησης του οξειδίου πύλης με το μέγεθος της τραχύτητας της επιφάνειας.



Διάγραμμα 3.4: μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου διάτρησης του οξειδίου πύλης με το μέγεθος της τραχύτητας της επιφάνειας [2].

Όσο μεγαλύτερη τραχύτητα έχουμε τόσο πιο χαμηλό είναι το ηλεκτρικό πεδίο διάτρησης του οξειδίου. Για τραχύτητα περίπου 8 Å και για πάχος οξειδίου 98 Å, το ηλεκτρικό πεδίο διάτρησης είναι 9 MV/cm σε σχέση με 11,5 MV/cm σε τραχύτητα της επιφάνειας 2 Å [2].

### 2.2.5 Αυτογενές οξείδιο (Native oxide)

Το αυτογενές οξείδιο που σχηματίζεται στην γυμνή επιφάνεια του πυριτίου στην θερμοκρασία δωματίου, το λεγόμενο «native oxide» είναι ανεπιθύμητο στην τεχνολογία VLSI - ULSI διότι έχει σαν αποτέλεσμα :



Μη ελεγχόμενη ανάπτυξη του πολύ λεπτού στρώματος οξειδίου της πύλης (< 100 Å) υψηλή αντίσταση επαφής πυριτίου-μετάλλου.

Λειτουργεί σαν μάσκα στις διαδικασίες όπως : CVD και επιταξία.

Επιπλέον το αυτογενές οξείδιο που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια του χημικού καθαρισμού εγκλωβίζει μεταλλικούς ρύπους, οι οποίοι διαχέονται στο πυρίτιο κατά τη διάρκεια θερμικής διαδικασίας ή σχηματίζουν ίζημα μετάλλων στην διεπιφάνεια Si-SiO<sub>2</sub> που δημιουργούν ατέλειες στη διάρκεια της θερμικής διαδικασίας που ακολουθεί, υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητα του οξειδίου της πύλης.

Συνεπώς η απόκτηση μιας επιφάνειας πυριτίου χωρίς το αυτογενές οξείδιο είναι σημαντικός παράγοντας στην κατασκευή Ο.Κ. υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας.

Το αυτογενές οξείδιο σχηματίζεται όπως αναφέραμε αυθόρμητα από τον αέρα που έχει κάποια σχετική υγρασία ή στην διάρκεια του καθαρισμού με απιονισμένο νερό που περιέχει κάποια ποσότητα οξυγόνου.

Το πάχος του ενδογενούς οξειδίου αυξάνεται με το χρόνο έκθεσης.

Στον αέρα η αύξηση του πάχους είναι παραβολική με το χρόνο και εξαρτάται από την ποσότητα του οξυγόνου διαλυμένο στο νερό. Ο σχηματισμός του ενδογενούς οξειδίου στο νερό δημιουργεί επίσης μια επιφάνεια πυριτίου με μικροτραχύτητα.

Φαίνεται ότι στον αέρα το οξυγόνο διασπά πρώτα ένα δεσμό Si-Si. Η επιφάνεια παραμένει ουδετεροποιημένη με άτομα υδρογόνο.

Στο απιονισμένο νερό η επιφάνεια τερματίζει σε Ο ή ΟΗ, οι δεσμοί Si - Η υπάρχουν μόνο στην διεπιφάνεια SiO<sub>2</sub> - Si.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την ελάττωση του διαλυμένου οξυγόνου στο απιονισμένο νερό. Το πρώτο στάδιο είναι μια μονάδα «αποαέρωσης» με ειδικές μεμβράνες. Το οξυγόνο διαχέεται μέσω των μεμβρανών στο περιβάλλον χώρο που είναι σε χαμηλό κενό. Μετά από αυτό το στάδιο το επίπεδο του οξυγόνου ελαττώνεται στα 300-400 ppb. Ακολουθούν δύο άλλα βήματα, η μείωση του οξυγόνου μέσω καταλυτικής ρητίνης και η ελάττωση της μερικής πίεσης του οξυγόνου μέσω «bubbling» με άζωτο.

Έτσι το επίπεδο του οξυγόνου στο νερό μπορεί να μειωθεί κάτω του 0.1 ppb.

Το οξείδιο του πυριτίου απομακρύνεται γενικά με ένα διάλυμα HF. Μετά από αυτό το διάλυμα, η επιφάνεια καλύπτεται περίπου 80 % με άτομα υδρογόνου (H) που συμπληρώνουν τους ελεύθερους δεσμούς στην επιφάνεια του πυριτίου, ενώ το 20% καλύπτεται με άτομα F.O.C.

Μια επιφάνεια που δεν είναι πλήρως ουδετεροποιημένη με άτομα υδρογόνου κατά τη διάρκεια έκθεσης στον αέρα μπορεί να ρυπανθεί με άτομα C [2].

### 2.3 Τεχνολογία υγρού καθαρισμού

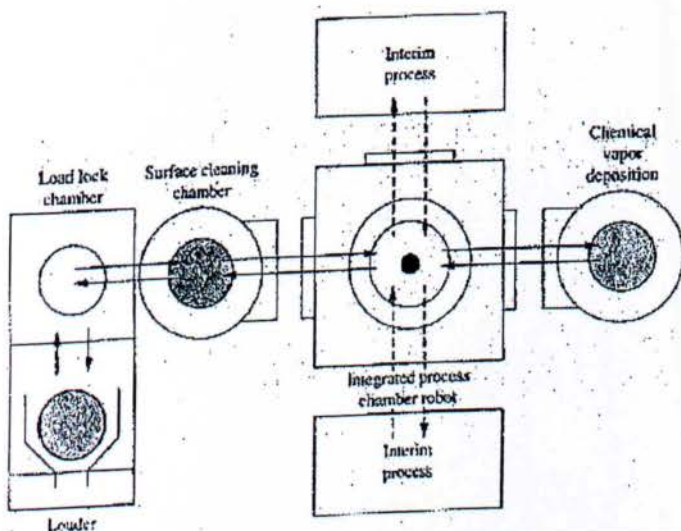
Είναι η γνωστή <συνταγή> της RCA [2].

### 2.4 Τεχνολογία ξηρού καθαρισμού

Η τεχνολογία υγρού καθαρισμού παραμένει η βασική μέθοδος για τον καθαρισμό των δισκιδίων. Παρόλα αυτά η βιομηχανία ULSI άρχισε να συνειδητοποιεί προβλήματα που σχετίζονται με τον υγρό καθαρισμό. Μεταξύ αυτών είναι η δημιουργία σωματιδίων, δυσκολία στην ξύραση δισκιδίων, κόστος, η απόρριψη των χημικών αποβλήτων, ασυμβατότητα με προχωρημένες διαδικασίες ολοκλήρωσης και έλλειψη ευελιξίας.

Η διαδικασία ξηρού καθαρισμού μπορεί να οδηγήσει σε λύση αυτών των προβλημάτων παρότι προς το παρόν δεν είναι ικανοποιητική.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα ξηρού καθαρισμού παρουσιάζεται στην εικόνα 3.14.





**Εικόνα 3.14: Ολοκληρωμένο σύστημα ξηρού καθαρισμού [2].**

Ο θάλαμος ξηρού καθαρισμού είναι συνδεδεμένος με ένα σύστημα επεξεργασίας σε μορφή «cluster».

Η διαδικασία ξηρού καθαρισμού, ένα είδος χημείας αέριας φάσης, συνήθως απαιτεί ενέργεια διέγερσης για την αύξηση των χημικών αντιδράσεων σε χαμηλή θερμοκρασία. Αυτή η επιπλέον ενέργεια μπορεί να είναι : πλάσμα, δέσμες σωματιδίων, ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ή θέρμανση, οι οποίες αυξάνουν το αποτέλεσμα καθαρισμού της επιφάνειας, αλλά πρέπει να αποφευχθούν οι παράπλευρες παρενέργειες προσβολής του δισκιδίου.

Προσφάτως αναπτύχθηκαν πολλές τεχνολογίες ξηρού καθαρισμού όπως :

Καθαρισμός σε ατμό HF / H<sub>2</sub>O για απομάκρυνση του ενδογενούς οξειδίου και δημιουργία μιας επιφάνειας ουδετεροποιημένης με άτομα φθορίου.

Υπεριώδη ακτινοβολία και όζον για απομάκρυνση υδατανθράκων (UVOC).

Πλάσμα H<sub>2</sub>/Ar για καθαρισμό των ρύπων με βομβαρδισμό με ιόντα αργού (physical sputtering) και χημική χάραξη της επιφάνειας με ιόντα υδρογόνου.

Θερμικός καθαρισμός για απομάκρυνση του ενδογενούς οξειδίου σε υψηλή θερμοκρασία 800 °C - 1000 °C και υπέρ υψηλό κενό (< 10 - 40 torr) [2].

# 4

## ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ MEMS



Εισαγωγή.....	σελ 99
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.....	σελ 99
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.....	σελ 104
Διοξείδιο του πυριτίου.....	σελ 105
Καρβίδιο του πυριτίου SiC (Silicon Carbide).....	σελ 107
Νιτρίδιο του πυριτίου (SiN <sub>3</sub> ).....	σελ 109
Γάλλιο – Αρσενικό.....	σελ 111
Μέταλλα.....	σελ 116
Αλουμίνιο (Aluminium).....	σελ 117
Χρυσός (Gold).....	σελ 118
Χαλκός (Cooper).....	σελ 119
Βολφράμιο.....	σελ 120
Ιστορικά στοιχεία για το Βολφράμιο.....	σελ 120
Περιγραφή και ιδιότητες του Βολφραμίου.....	σελ 121
Πεδία χρήσης του Βολφραμίου.....	σελ 123
Πολυαμίδη (Polyimides).....	σελ 124

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ MEMS

#### 4.1 Εισαγωγή

Τα MEMS κατασκευάζονται από υλικά κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετική επίπτωση στην αξιοπιστία τους. Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετική απόκριση σε μηχανισμούς που οδηγούν σε λάθη και οι οποίοι πρέπει να γίνουν κατανοητοί προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία των κατασκευών. Προκειμένου να αποσαφηνιστούν οι σκοποί των πολυάριθμων υλικών των MEMS, το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια συνοπτική επισκόπηση των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους, καθώς επίσης και λίστα με τις ιδιότητες των υλικών αυτών.

Μια από τις μεγαλύτερες διαμάχες στην κοινότητα αυτών που ασχολούνται με τα MEMS έχει να κάνει με το εάν πρέπει να εξετασθούν οι ιδιότητες των λεπτών φιλμ ή των συμπαγών (bulk) κατά τη διάρκεια της δομικής ανάλυσης. Το πρόβλημα βρίσκεται στο ότι εάν τα υλικά αυτά εξετασθούν υπό το πρίσμα των ιδιοτήτων των συμπαγών υλικών, τότε όταν οι διαστάσεις τους γίνουν τόσο μικρές όσο αυτές των MEMS, η έκταση των ατελειών στο κρυσταλλικό τους πλέγμα δεν είναι πια μικρή σε σχέση με το μέγεθος της δομής που πρόκειται να αναλυθεί. Ενώ το μεγαλύτερο μέρος της εξέτασης γίνεται σε δείγματα με μακροσκοπικές διαστάσεις, οι ιδιότητες των συμπαγών υλικών δεν είναι κατάλληλες όσον αφορά τα MEMS, ωστόσο υιοθετούνται ελλείψει καλύτερων στοιχείων. Προκειμένου να ελεγχθεί στατιστικά η αξιοπιστία, ενός υλικού που κατασκευάζεται με συγκεκριμένη τεχνοτροπία, οι ιδιότητες του υλικού αυτού πρέπει να χαρακτηριστούν. Προς το σκοπό αυτό και με τα υπάρχοντα δεδομένα μπορούν να γίνουν προσεγγίσεις. Το κεφάλαιο αυτό προσφέρει τις ιδιότητες των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων υλικών που είναι γενικά αποδεκτά. Για τα λεπτά φιλμ η εφαρμοσιμότητα των ιδιοτήτων αυτών βρίσκεται υπό συζήτηση [1].

#### 4.2 Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Το πυρίτιο είναι το πιο σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ημιαγωγικών συσκευών.



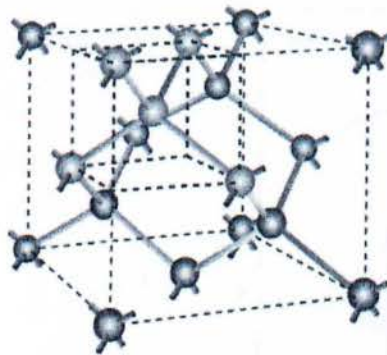
Πίνακας 4.1: Ιδιότητες μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου [1].

Property	Value	Ιδιότητα
Crystal structure	Diamond	Κρυσταλλική δομή
Lattice constant	5.43 Å	Πλεγματική σταθερά
Atoms / cm <sup>3</sup>	5.0 · 10 <sup>22</sup>	Άτομα ανά κυβικό εκατοστό
Density	2.32 g/cm <sup>3</sup>	Πυκνότητα
Melting point	1412 °C	Σημείο τήξης
Specific Heat	.7 J/g-°C	Ειδική θερμότητα
Young's modulus <100>	130 GPa	Σταθερά του Young για <100>
Stiffness Constants:		Σταθερές ακαμψίας
E11	165.6 GPa	E11
E12	63.98 GPa	E12
E44	79.51 GPa	E44
Poisson's ration <100> orientation	0.28	Λόγος Poisson για <100>
Tensile strength	3790 MPa	Μηχανική αντοχή
Fracture toughness	.9 MPa m <sup>0.5</sup>	Αντοχή στην θραύση
Thermal conductivity	1.5 W/cm-°C	Θερμική αγωγιμότητα
Coefficient of thermal expansion	4.2 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Heat Capacity	20.07 (J/mol-K)	Θερμοχωρητικότητα
Breakdown Field	~3 x 10 <sup>5</sup> V/cm	Πεδίο κατάρευσης
Piezoresistive coefficients		Συντελεστής πιεζοαντίστασης
n-type: p11	6.6·10 <sup>-11</sup> Pa <sup>-1</sup>	n-type: p11
p12	-1.1·10 <sup>-11</sup> Pa <sup>-1</sup>	p12
p44	138·10 <sup>-11</sup> Pa <sup>-1</sup>	p44
p-type p11	-102·10 <sup>-11</sup> Pa <sup>-1</sup>	p-type p11
p12	53.4·10 <sup>-11</sup> Pa <sup>-1</sup>	p12
p44	-13.6·10 <sup>-11</sup> Pa <sup>-1</sup>	p44
DC dielectric constant	11.7	Διηλεκτρική σταθερά συνεχούς ρεύματος
High frequency dielectric constant	11.7	Διηλεκτρική σταθερά υψηλής συχνότητας
Resistivity	2.3 x 10 <sup>5</sup> W-cm	Αντίσταση
Energy Gap	1.12 eV	Ενεργειακό χάσμα
Electron mobility	1500 cm <sup>2</sup> /V-s	Ευκινησία ηλεκτρονίων
Hole mobility	450 cm <sup>2</sup> /V-s	Ευκινησία οπών
Index of Refraction	3.42	Δείκτης διάθλασης



Στην κρυσταλλική του μορφή, το πυρίτιο έχει τη δομή του αδάμαντα, η οποία αποτελείται από ένα εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα βάσης δύο ατόμων όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1. Η ατομική δομή του πυριτίου καθορίζει πολλές από τις φυσικές ιδιότητές του, οι οποίες αποδίδονται στον πίνακα 6. Όμοια με τις ιδιότητες του αδάμαντα έτσι και οι ιδιότητες του πυριτίου υποδεικνύουν ότι πρόκειται για ένα πολύ σκληρό υλικό. Υπερβαίνει την μηχανική αντοχή του χάλυβα αλλά είναι εξαιρετικά πιο εύθραυστο. Η αντοχή του καθιστά το πυρίτιο ιδανικό για

πολλές δομές των MEMS δεδομένου ότι έχει την υψηλότερη αντοχή στην θραύση από κάθε άλλο υλικό που χρησιμοποιείται στα MEMS. Εξαιτίας της καλά ελεγχόμενης διαδικασίας παραγωγής από την οποία εξάγεται πυρίτιο υψηλής κρυσταλλικότητας, το πυρίτιο έχει την απαιτούμενη ποιότητα ώστε οι μηχανικές του ιδιότητες να μπορούν να αναπαραχθούν. Για τους λόγους αυτούς το πυρίτιο συχνά χρησιμοποιείται για υψηλής ποιότητας μικροκατασκευές.

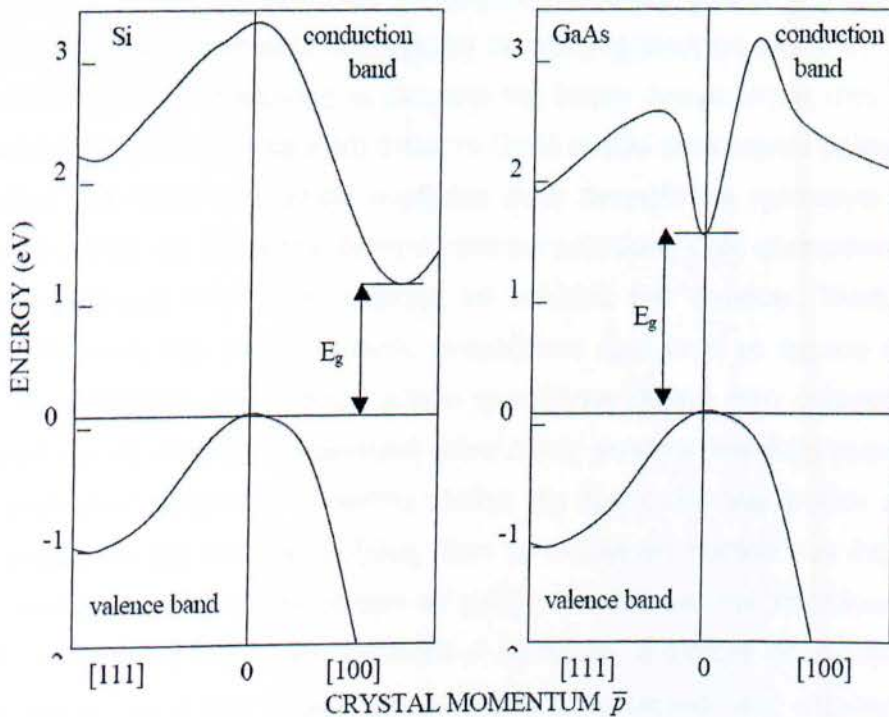


Εικόνα 4.1: Δομή πυριτίου [1].

Η επιστήμη της παραγωγής πυριτίου έχει υπερεπεκταθεί τα τελευταία χρόνια. Τα δισκία πυριτίου (wafer) παράγονται τώρα με πυκνότητα εξαρμώσεων της τάξεως 1 εξαρμωση /  $\text{cm}^2$ , κάτι που εξηγεί την υψηλή αντοχή στην θραύση του υλικού αυτού. Επιπλέον τα δισκία του πυριτίου έχουν πυκνότητα προσμίξεων μικρότερη της 0,3 άτομα προσμίξεων /  $\text{cm}^2$ . Στο κυβικό πλέγμα του αδάμαντα όπως και του πυριτίου η θραύση γίνεται παράλληλα στη διεύθυνση  $\{1,1,1\}$ . Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι τα επίπεδα στον κρύσταλλο που είναι παράλληλα στην διεύθυνση αυτή έχουν την μικρότερη επιφανειακή ενέργεια ώστε να αντισταθούν στην διάδοση ρωγμής στον κρύσταλλο. Παρότι η θραύση

μπορεί να γίνει και σε άλλα κρυσταλλικά επίπεδα, αυτό δεν θα γίνει χωρίς την βοήθεια εξάρμωσης η οποία θα μειώσει την αντοχή του κρυστάλλου.

Καθώς η τεχνολογία προοδεύει, το γεγονός ότι το πυρίτιο δεν έχει τις υψηλές ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες άλλων υλικών, αποτελεί ένα δευτερεύον μειονέκτημα. Το πυρίτιο έχει χαμηλότερη ευκινησία ηλεκτρονίων από άλλα συνήθη ημιαγώγιμα υλικά, κάτι που εμποδίζει την λειτουργία συσκευών σε υψηλή συχνότητα. Ενώ αυτό αποτελεί πρόβλημα για τους σχεδιαστές ψηφιακών συσκευών, είναι μικρής σημασίας για σχεδιαστές διατάξεων MEMS, καθώς υπάρχει μικρός αριθμός τέτοιων εφαρμογών που επιδιώκουν οι μηχανικές δομές να λειτουργούν στο όριο των συχνοτήτων λειτουργίας του πυριτίου. Από την άλλη πλευρά οι ηλεκτρικές ιδιότητες του πυριτίου έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ευαίσθητες στην εξωτερική πίεση, την θερμοκρασία, τα μαγνητικά πεδία και την ακτινοβολία, κάτι που χαρακτηρίζεται ως πλεονέκτημα σε έναν αριθμό στερεών αισθητήρων.



Διάγραμμα 4.1: Δομή ενεργειακών ζωνών στο Si και στο GaAs [1].

Ένα θέμα μεγάλης σημασίας στο πυρίτιο είναι η δομή των ενεργειακών ζωνών. Στο πρώτο μισό του εικοστού αιώνα, οι επιστήμονες που ασχολούντο με την έρευνα της



κβαντικής μηχανικής ανακάλυψαν ότι τα ηλεκτρόνια στα στερεά μπορούν να καταλαμβάνουν μόνο διακριτά ενεργειακά επίπεδα. Οι ενέργειες αυτών συνιστούν διακριτές ενεργειακές ζώνες. Στο χαμηλότερο δυναμικό, όλα τα ηλεκτρόνια σε ένα στερεό καταλαμβάνουν την ζώνη σθένους, κάτι που αντιστοιχεί σε δέσμια τροχιακά για τα άτομα. Με την απορρόφηση ενός ποσού ενέργειας, συχνά με την μορφή φωτός ή θερμότητας, από το στερεό, τα ηλεκτρόνια θα μεταβούν στην ζώνη αγωγιμότητας. Η ενεργειακή απόσταση μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας καλείται ενεργειακό χάσμα και καθορίζει τις θεμελιώδεις ηλεκτρικές ιδιότητες ενός υλικού. Στους μονωτές, όπως το γυαλί ή το ελαστικό, το ενεργειακό χάσμα θα είναι της τάξεως αρκετών eV. Αντίστροφα στους καλούς αγωγούς, όπως είναι τα μέταλλα, το ενεργειακό χάσμα έχει τιμή ανάμεσα στις δύο προηγούμενες περιοχές. Σαν τέτοιος ημιαγωγός, το ενδογενές πυρίτιο έχει μια μέτρια αντίσταση της τάξεως των  $2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ .

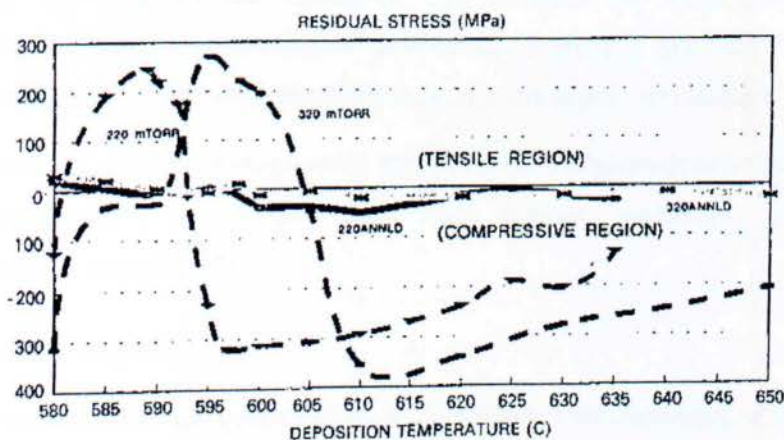
Καθώς το ενεργειακό χάσμα καθορίζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες μιας συσκευής, επηρεάζει επίσης και τις οπτικές της ιδιότητες. Η ενέργεια στην οποία βρίσκεται η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας είναι διαφορετική σε κάθε ημιάγωγο υλικό. Το ενεργειακό χάσμα υπολογίζεται αφαιρώντας το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας από το μέγιστο της ζώνης σθένους. Σε μερικά υλικά όπως το GaAs τα δύο αυτά σημεία βρίσκονται στην ίδια ευθεία. Τα υλικά στα οποία συμβαίνει αυτό ονομάζονται ημιαγωγοί με άμεσο ενεργειακό χάσμα και έχουν την ιδιότητα κατά την μετάβαση ενός ηλεκτρονίου από την ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη σθένους να εκλύεται ένα φωτόνιο. Υλικά όπως το πυρίτιο στα οποία δεν συμβαίνει αυτό, ονομάζονται ημιαγωγοί με έμμεσο ενεργειακό χάσμα. Τα ηλεκτρόνια σε ένα τέτοιο χάσμα χρειάζονται αλλαγή στην ενέργεια αλλά και στην ορμή για να αλλάξουν ενεργειακή ζώνη όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.1. Στο άμεσο ενεργειακό χάσμα δεν απαιτείται αλλαγή της ορμής του ηλεκτρονίου αλλά μόνο της ενέργειάς του για να αλλάξει ζώνη. Έτσι το ενδογενές πυρίτιο σαν ένα υλικό με έμμεσο ενεργειακό χάσμα, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή **LASER** (Light Amplifier using Stimulated Emission of Radiation) ή διόδων παραγωγής φωτός. Ο περιορισμός αυτός στο πυρίτιο έχει οδηγήσει στην έρευνα μιας ολόκληρης τάξης ημιαγωγικών υλικών που είναι ικανά να εκπέμπουν φως [1].



### 4.3 Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Στις εφαρμογές επίπεδης μικρομηχανικής, τα λεπτά φιλμ από πυρίτιο απαιτούνται ως δομικό υλικό. Εφόσον είναι δύσκολη η παραγωγή λεπτών φιλμ από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, η παραγωγή τους γίνεται με πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Τα υλικά αυτά έχουν τώρα εκτεταμένη χρήση στην βιομηχανία των MEMS.

Οι μηχανικές ιδιότητες των φιλμ από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο εξαρτώνται έντονα από την εναπόθεσή τους (deposition). Η εναπομένον μηχανική τάση μπορεί να ελεγχθεί από την μεταβαλλόμενη πίεση και θερμοκρασία κατά την εναπόθεση, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.2. Έχει επίσης βρεθεί ότι υπάρχει μια άμεση σύνδεση μεταξύ των κόκκων (grains) στην  $\langle 110 \rangle$  κρυσταλλογραφική διεύθυνση και της εναπομένουσας μηχανικής τάσης στα φιλμ, παρότι οι λόγοι που συμβαίνει αυτό δεν είναι σαφείς. Η αντοχή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι λιγότερο κατανοητή. Διαφορετικοί ερευνητές έχουν αναφέρει τιμές της σταθεράς του Young κυμαινόμενες ανάμεσα στα 140 και 210 GPa, με τις τιμές αυτές να εξαρτώνται από την κρυσταλλική δομή και διεύθυνση. Πρόσφατες έρευνες έχουν αποδείξει ότι, η τιμή της σταθεράς του Young των



Διάγραμμα 4.2: Παραμένουσα παραμόρφωση συναρτήσει των συνθηκών εναπόθεσης [1].

πολυκρυσταλλικών φιλμ, εξαρτάται έντονα από τις συνθήκες εναπόθεσης (deposition conditions). Τα φιλμ εμφανίζουν επιλεκτική διεύθυνση στους κόκκους η οποία μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Δεδομένου ότι ένα ιδανικό φιλμ δεν εμφανίζει εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων του από την διεύθυνση των κόκκων, οι ερευνητές έχουν βρει ότι η εναπόθεση φιλμ στους 590 °C, που είναι το σημείο μετάβασης μεταξύ

πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου, είναι μια αποτελεσματική μέθοδος παραγωγής ισοτροπικών φιλμ από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Σε αυτή τη θερμοκρασία, το άμορφο πυρίτιο θα επανακρυσταλλωθεί κατά την θέρμανση (annealing), παράγοντας φιλμ με τιμή σταθεράς του Young των 165 GPa.

Στα πολυκρυσταλλικά υλικά, η αντοχή στην θραύση εξαρτάται από δύο παράγοντες, το μέγεθος των κόκκων  $d$  και την επιφανειακή ενέργεια θραύσης  $\gamma_s$ . Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το μέγεθος μιας εξάρμωσης συνήθως ρυθμίζεται από το μέγεθος των κόκκων, το οποίο από την εξίσωση του Griffith, σχέση 4.1, δείχνει ότι η κρίσιμη τάση θραύσης  $\sigma_f$  του υλικού αυτού είναι:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{4E\gamma_s}{\pi d}} \quad (4.1)$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, η ένταση θραύσης ( $\sigma_f$ ) εξαρτάται από την επιφανειακή ενέργεια θραύσης ( $\gamma_s$ ). Για πολυκρυσταλλικά υλικά μικρών κόκκων, η ενέργεια που απαιτείται ώστε να προκληθεί θραύση σε μια κοκκώδη επιφάνεια, αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους του κόκκου. Ως αποτέλεσμα, οι κόκκοι μεγαλύτερου μεγέθους παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή, εξαιτίας της αυξημένης ενέργειας που απαιτείται για να διαδοθεί η ρωγμή κατά μήκος του υλικού.

Σε αρκετές μελέτες η μέση αντοχή στην θραύση του πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχει βρεθεί ανάμεσα σε 2 με 3 GPa που είναι σαφώς μικρότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου [1].

#### 4.4 Διοξείδιο του πυριτίου

Το διοξείδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται σαν μονωτής στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Στα MEMS χρησιμοποιείται για να απομονώσει ηλεκτρικά στοιχεία και έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε πρόσφατες εφαρμογές σαν ένα δομικό υλικό. Οι ιδιότητές του παρατίθενται στον πίνακα 4.2.



Πίνακας 4.2: Ιδιότητες του διοξειδίου του πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου [1].

Property	Value	Ιδιότητα
Density	2.65 g/cm <sup>3</sup>	Πυκνότητα
Melting point	1728 °C	Σημείο τήξης
Young's modulus	66 GPa	Σταθερά του Young
Tensile strength	69 MPa	Μηχανική αντοχή
Thermal conductivity	1.4 x10 <sup>-2</sup> W/°C-cm	Θερμική αγωγιμότητα
Thermal coefficient of expansion	7 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Dielectric constant	3.78	Διηλεκτρική σταθερά
Resistivity	1012 W-cm	Αντίσταση
Energy gap	8 eV	Ενεργειακό χάσμα
Index of refraction	1.46	Δείκτης διάθλασης

Στην κρυσταλλική μορφή των Quartz (χαλαζίας) το διοξείδιο του πυριτίου ανήκει στην τραπεζοεδρική τάξη του ρομβοεδρικού συστήματος. Η τάξη αυτή έχει έναν άξονα με συμμετρία C<sub>3V</sub> (three fold symmetry) και τρεις πολικούς άξονες με συμμετρία C<sub>2V</sub> (two fold symmetry). Το Quartz εξαιτίας της υψηλής πιεζοηλεκτρικής σύζευξης, περιστασιακά χρησιμοποιείται στα MEMS. Ωστόσο, σαν αποτέλεσμα της υψηλής ανισοτροπίας, το Quartz είναι πιο δύσκολο να εγχαραχθεί από το πυρίτιο. Το διοξείδιο του πυριτίου είναι σύνηθες στοιχείο των γυαλιών και είναι σαν τέτοιο πολύ λεπτό και εύθραυστο υλικό. Τα λεπτά φιλμ του οξειδίου έχουν συμπιεστικές εσωτερικές τάσεις της τάξεως του 1 GPa.

Παρά το γεγονός ότι το διοξείδιο του πυριτίου είναι λιγότερο δύσκαμπτο από άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για λεπτά φιλμ και παρά το γεγονός ότι έχει μοναδικές ηλεκτρικές ιδιότητες, χρησιμοποιείται περιστασιακά ως μηχανικό υλικό σε εφαρμογές υψηλής ευαισθησίας. Το διοξείδιο του πυριτίου με την χαμηλή θερμική αγωγιμότητά του, είναι ένας φυσικός θερμικός μονωτής. Η ιδιότητα του αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ολοκληρωμένων θερμικών ανιχνευτών. Με μικρή μηχανική αντοχή, το διοξείδιο του πυριτίου είναι ευαίσθητο στην μηχανική θραύση.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του διοξειδίου του πυριτίου είναι οι ιδιότητες του ως μονωτής. Με ενεργειακό χάσμα των 8 eV, το διοξείδιο του πυριτίου μπορεί επιτυχώς να διαχωρίσει διαφορετικά στρώματα (layers) από αγωγούς με μικρή ηλεκτρική αλληλεπίδραση. Λόγω των εγγενών πλεονεκτημάτων του στο να

ολοκληρώσει έναν τέτοιο αποτελεσματικό μονωτή, το διοξείδιο του πυριτίου έχει βοηθήσει στο να καταστεί το πυρίτιο, το ημιαγωγίμο υλικό πρώτης επιλογής για τις περισσότερες εφαρμογές [1].

#### 4.5 Καρβίδιο του πυριτίου SiC (Silicon Carbide)

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε μεγάλο ενδιαφέρον στην χρήση του καρβιδίου του πυριτίου σαν υλικό για τα MEMS. Το καρβίδιο του πυριτίου έχει πολλές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές σε MEMS, ωστόσο η τεχνολογία παραγωγής δισκίων (wafers) από SiC δεν έχει ωριμάσει αρκετά ώστε το SiC να γίνει το σύνηθες υλικό για τα MEMS. Το πολυκρυσταλλικό καρβίδιο του πυριτίου υπάρχει σε 180 διαφορετικούς πολυτύπους, με τις τέσσερις θεμελιώδεις δομές του να αναπαρίστανται στον πίνακα 8.

Πίνακας 4.3: Θεμελιώδεις τύποι του καρβιδίου του πυριτίου [1].

Modification	Polytype
$\alpha$ -SiC	6H
(High-temperature modification)	15R
	4H
$\beta$ -SiC	
(Low-temperature modification)	3C

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το SiC υπάρχει στην  $\beta$  μορφή του σε θερμοκρασίες μικρότερες των 2000 °C η κατάσταση αυτή καλείται χαμηλής θερμοκρασίας τροποποίηση (modification). Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτή, μόνο εξαγωνικοί (H – Hexagonal) και ρομβοεδρικοί (R – Romboedral) πολυτύποι είναι ευσταθείς.

Οι ιδιότητες του SiC εξαρτώνται έντονα από την διαδικασία και τις συνθήκες παραγωγής του και μπορούν να μεταβάλλονται σχεδόν δραματικά. Οι ιδιότητες αυτές παρατίθενται στον πίνακα 4.4 για διάφορες τεχνικές παρασκευής.



Πίνακας 4.4: Ιδιότητες του SiC σε θερμοκρασία δωματίου [1].

SiC type	SiC content	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Thermal expansion coefficient (10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity (W /m-K)	Flexural strength (MPa)
Ceramic bonded	up to 95%	2.55	100	5.8	16	30
Recrystallized	100%	2.55	240	5.0	28	100
Sintered	95%	2.55	410	4.9	50	450
Hot-pressed	98%	2.55	450	4.5	55	650

Οι μέθοδοι αυτοί ανάπτυξης SiC δεν είναι όλοι συμβατοί με την ανάπτυξη των δισκίων SiC, ενώ οι ιδιότητες του SiC μεταβάλλονται ανάλογα με την επεξεργασία. Το καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται για την μεγάλη σκληρότητά του και για την αντίσταση του σε υψηλές θερμοκρασίες. Δεν έχει καθορισμένο σημείο τήξης, αντίθετα έχει σημείο κατάρρευσης (break down point) στους 2830 °C. Στην θερμοκρασία αυτή το SiC αποσυντίθενται σε γραφίτη και πολύ από πυρίτιο. Πολλές δομές SiC είναι λιγότερο ελαστικές από το πυρίτιο, το οποίο είναι χρήσιμο σε συγκεκριμένες εφαρμογές των MEMS. Το SiC επίσης έχει λόγο Poisson (Poisson's ratio) που κυμαίνεται μεταξύ 0,183 και 0.192. Το κύριο μειονέκτημα του SiC στα MEMS είναι ότι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή δισκίων SiC, ακόμα, οδηγεί σε υψηλής πυκνότητας εξαρμώσεις στο υλικό. Αυτό μειώνει την αντοχή του SiC, κάτι το οποίο απαγορεύει τη χρήση του σε πολλές εφαρμογές. Για να βρει ευρεία απήχηση η χρήση του SiC πρέπει οι τεχνικές παραγωγής του να «ωριμάσουν».

Το SiC με ενεργειακό χάσμα γύρω στα 3 eV είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό με μεγάλο χάσμα. Παρότι το ακριβές μέγεθος του ενεργειακού του χάσματος εξαρτάται από τον πολυτύπο του, το SiC είναι καλύτερος φυσικός μονωτής απ' ότι το πυρίτιο ή το GaAs. Το ενδογενές SiC έχει αντίσταση 10<sup>8</sup> Ω cm, ωστόσο με την διαδικασία του ντοπαρίσματος του, η τιμή αυτή μπορεί να κυμανθεί από 0,1 έως 10<sup>12</sup> Ω cm.

Το καρβίδιο του πυριτίου επίσης οξειδώνεται σε θερμοκρασία πάνω από τους 600 °C σχηματίζοντας διοξείδιο του πυριτίου CO<sub>2</sub> σύμφωνα με την αντίδραση [1]:



#### 4.6 Νιτρίδιο του πυριτίου (SiN<sub>3</sub>)

Το νιτρίδιο του πυριτίου είναι υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Δεδομένου ότι δεν αλληλεπιδρά καλά με πολλά διαλύματα εγχάραξης, χρησιμοποιείται συχνά για να εμποδίσει διάχυση προσμίξεων και ιοντικών στοιχείων. Οι βασικές του ιδιότητες αναπαρίστανται στον πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Ιδιότητες του νιτρίδιου του πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου [1].

Property	Value	Ιδιότητα
Density	3.1 g/cm <sup>-3</sup>	Πυκνότητα
Melting point	1900°C	Σημείο τήξης
Young's Modulus	73 GPa	Σταθερά του Young
Fracture strength	460 MPa	Αντοχή στην θραύση
Coefficient of thermal expansion	3·10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Thermal conductivity	0.28 W /cm·°C	Θερμική αγωγιμότητα
Resistivity	1015W-cm	Αντίσταση
Dielectric constant	9.4	Διηλεκτρική σταθερά
Breakdown field	1·10 <sup>7</sup> V/cm	Πεδίο κατάρρευσης
Index of refraction	2.1	Δείκτης διάθλασης
Band gap	3.9-4.1 eV	Ενεργειακό χάσμα

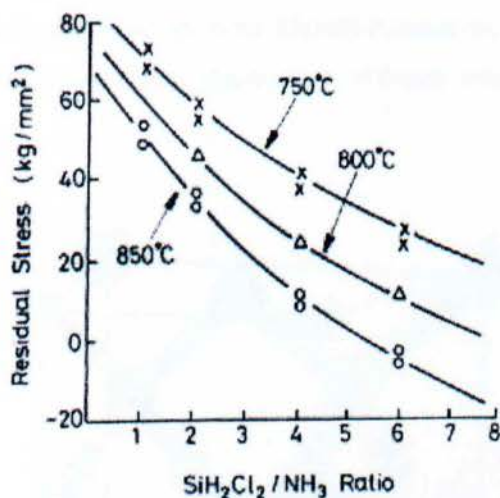
Τα φιλμ νιτρίδιου του πυριτίου που χρησιμοποιούνται στις συσκευές MEMS είναι άμορφα και συνήθως ψεκασμένα (sputtered) ή τοποθετημένα χημικά με CVD. Τα φιλμ αυτά παράγονται με την ακόλουθη αντίδραση, που συμβαίνει μεταξύ 300 έως 500 mT και 700 έως 900 °C.



Τα στοιχειομετρικά φιλμ από νιτρίδιο του πυριτίου έχουν μηχανική αντοχή της τάξεως των 1 - 2 GPa, κάτι που τους προκαλεί μεγάλη στρέβλωση. Για να διατηρηθεί η δομική ολοκλήρωση των φιλμ, αναπτύσσονται μόνο σε μερικές δεκάδες nm πάχος. Για να αποφευχθεί ο περιορισμός αυτός συχνά χρησιμοποιούνται φιλμ νιτρίδιου του πυριτίου πλούσια σε πυρίτιο. Ένα κοινό φιλμ από Si<sub>1,0</sub>N<sub>1,1</sub> έχει παραχθεί, με σταθερά του Young της τάξης των 260 – 330 GPa, με λόγο Poisson 0,25 και αντοχή εφελκυσμού της τάξεως του 3%.



Οι τάσεις στο νιτρίδιο του πυριτίου μπορούν να ελεγχθούν με ρύθμιση της θερμοκρασίας εναπόθεσης και του λόγου διχλωσιλανίου προς αμμωνία. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.3, φιλμ με σχεδόν μηδενικές τάσεις παράγονται με λόγο 4:1 σε θερμοκρασία 835 °C. Το νιτρίδιο του πυριτίου έχει πολλές μηχανικές ιδιότητες που το καθιστούν επιθυμητό υλικό για χρήση. Είναι καλύτερος θερμικός μονωτής από ότι το πολυπυρίτιο, κάτι που είναι σημαντικό για απομόνωση επιφανειών μικρομηχανικών δομών. Επίσης εξαιτίας της υψηλής μηχανικής αντοχής του είναι ιδανικό φιλμ για ανάπτυξη τριβής (friction) και εμπόδιο για την σκόνη (dust burrier).



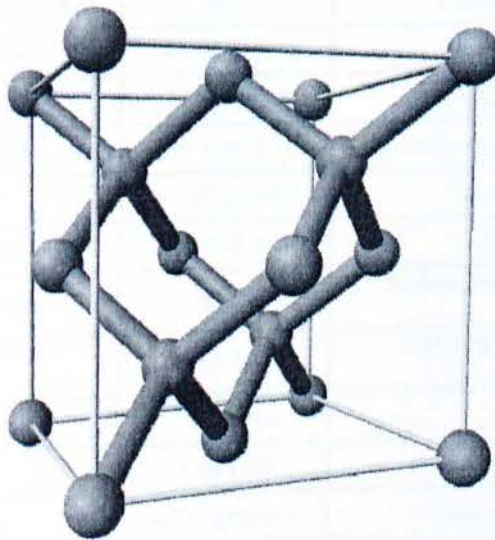
Διάγραμμα 4.3: Παραμένουσες τάσεις σε φιλμ νιτρίδιου του πυριτίου σαν συνάρτηση της διαδικασίας παραγωγής [1].

Μια όχι τόσο καλή ιδιότητα του νιτρίδιου του πυριτίου είναι ότι δεν είναι τόσο καλός μονωτής όσο το διοξείδιο του πυριτίου. Με ενεργειακό χάσμα 40% μικρότερο του SiO<sub>2</sub> η ηλεκτρική μόνωση που παρέχει είναι πολύ μικρότερη από αυτή του διοξειδίου του πυριτίου. Περαιτέρω, το νιτρίδιο του πυριτίου (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) δημιουργεί έναν χαμηλό φραγμό δυναμικού προς το πυρίτιο και τα άλλα μέταλλα και το οποίο ευνοεί την ενίσχυση οπών στο διηλεκτρικό του υλικού, για ηλεκτρικά πεδία μεγαλύτερα από 2\*10<sup>6</sup> V/cm. Αυτό οδηγεί σε μια υστέρηση που εμφανίζεται στο διάγραμμα χωρητικότητας – τάσης των μεταλλικών – μονωτικών – ημιαγωγικών δομών, αφού η τάση έχει πάρει μεγάλες τιμές. Εξαιτίας των παραπάνω, μερικοί σχεδιαστές προτιμούν να σχηματίζουν πρώτα έναν

μονωτή με το διοξείδιο του πυριτίου και κατόπιν να επικαλύπτουν την επιφάνεια του με  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [1].

#### 4.7 Γάλλιο – Αρσενικό

Το Γάλλιο - Αρσενικό είναι το δεύτερο πιο συνηθισμένο ημιαγωγίμο υλικό. Έχει κάποιες μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές στις οποίες το πυρίτιο είναι ακατάλληλο. Αρχικά ευρισκόμενο στην παραδοσιακή αγορά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το Γάλλιο - Αρσενικό εξαιτίας των οπτικών ιδιοτήτων του έχει προσφάτως χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή οπτικών MEMS. Το κρυσταλλικό πλέγμα του Γάλλιου – Αρσενικού, εικόνα 4.2, αποτελείται από εδροκεντρωμένες κυψελίδες με βάση δύο άτομων, ενός ατόμου Γάλλιου και ενός Αρσενικού. Η δομή αυτή λέγεται Zinc Blende.



Εικόνα 4.2: Κρυσταλλικό Γάλλιο Αρσενικό [1].

Οι βασικές ιδιότητες του παρατίθενται στον πίνακα 4.6.



Πίνακας 4.6: Ιδιότητες Γάλλιου - Αρσενικού σε σταθερή θερμοκρασία δωματίου [1].

Property	Value	Ιδιότητα
Crystal structure	Zincblende	Κρυσταλλική δομή
Lattice constant	5.65 Å	Πλεγματική σταθερά
Atoms / cm <sup>3</sup>	4.42 x 10 <sup>22</sup>	Άτομα ανά κυβικά εκατοστά
Density	5.32 g/cm <sup>3</sup>	Πυκνότητα
Melting point	1237 °C	Σημείο τήξης
Specific heat	.35 J/g-°C	Ειδική θερμότητα
Young's modulus <100> orientation	85.5 GPa	Σταθερά του Young για την διεύθυνση <100>
Stiffness constants:		Σταθερές ακαμψίας
E11	118.8 GPa	E11
E12	53.8 GPa	E12
E44	58.9 GPa	E44
Poisson's ratio <100> orientation	0.31	Λόγος Poisson <100>
Fracture toughness	.44 MPa m <sup>.5</sup>	Αντοχή στην θραύση
Thermal conductivity	.46 W/cm-°C	Θερμική αγωγιμότητα
Coefficient of thermal expansion	6.86 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Heat capacity	47.02 J/mol-K	Θερμοχωρητικότητα
Breakdown Field	~4 x 10 <sup>5</sup> V/cm	Πεδίο κατάρρευσης
DC dielectric constant	13.18	Διηλεκτρική σταθερά συνεχούς ρεύματος
High frequency dielectric constant	10.89	Διηλεκτρική σταθερά υψηλής συχνότητας
Resistivity	108 W-cm	Αντίσταση
Energy Gap	1.424 eV	Ενεργειακό χάσμα
Electron mobility	8500 cm <sup>2</sup> /V-s	Ευκινησία ηλεκτρονίων
Hole mobility	400 cm <sup>2</sup> /V-s	Ευκινησία οπών
Index of Refraction	3.66	Δείκτης διάθλασης

Το AlGaAs αποτελεί μέρος της παραγωγικής διαδικασίας του GaAs. Οι νέες τεχνολογίες χρησιμοποιούν το AlGaAs σε MEMS που βασίζονται στο GaAs. Το AlGaAs αποτελεί ένα ελκυστικό στοιχείο επειδή έχει κάποιες ιδιότητες που συμπληρώνουν το GaAs (πίνακας 4.7).

**Πίνακας 4.7: Ιδιότητες AlGaAs σε θερμοκρασία δωματίου [1].**

Property	Value	Ιδιότητα
Crystal structure	Zincblende	Κρυσταλλική δομή
Lattice constant	5.66 Å	Πλεγματική σταθερά
Atoms / cm <sup>3</sup>	4.42 x 10 <sup>22</sup>	Άτομα ανά κυβικό εκατοστό
Density	3.76 g/cm <sup>3</sup>	Πυκνότητα
Melting point	1467 °C	Σημείο τήξης
Specific heat	.48 J/g-°C	Ειδική θερμότητα
Stiffness constants:		Σταθερές ακαμψίας
E11	120.2 GPa	E11
E12	57.0 GPa	E12
E44	58.9 GPa	E44
Fracture toughness	1.7 MPa m <sup>-5</sup>	Αντοχή στην θραύση
Hardness	5 GPa	Σκληρότητα
Thermal expansion coefficient	5.2*10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Thermal conductivity	.9 W/cm-°C	Θερμική αγωγιμότητα
DC dielectric constant	10.06	Διηλεκτρική σταθερά συνεχούς ρεύματος
High frequency dielectric constant	8.16	Διηλεκτρική σταθερά υψηλής συχνότητας
Energy Gap	2.168 eV (indirect)	Ενεργειακό χάσμα

Το Γάλλιο - Αρσενικό δεν χρησιμοποιείται στην βιομηχανία ημιαγωγών εξαιτίας των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Παρότι έχει αρκετές κοινές μηχανικές ιδιότητες με το Si είναι σημαντικά λιγότερο ανθεκτικό από αυτό, με σταθερά του Young το 54% του Si. Όπως και το πυρίτιο είναι πολύ εύθραυστο και έτσι δεν παρέχει πλεονεκτήματα σε μηχανικές εφαρμογές. Το Γάλλιο – Αρσενικό (GaAs) περιέχει περισσότερες κρυσταλλικές ατέλειες από το υψηλής ποιότητας πυρίτιο και από αυτές, τα <ιζήματα> ατόμων αρσενικού είναι καθοριστικής σημασίας στον καθορισμό της αντοχής της θραύσης του. Για μια κανονική κατανομή από ιζήματα ατόμων αρσενικού σε μεγάλο δείγμα, όπως ένα δισκίο (wafer), θα υπάρχει πάντα τουλάχιστον μια ατέλεια αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει μικρή θραύση φορτίου. Ωστόσο για μικρά δείγματα υλικών είναι αναμενόμενο να υπάρχουν ατέλειες περιορισμένου μεγέθους, που επιτρέπουν την κατασκευή δομών υψηλής πίεσης από μακροσκοπικά υλικά χαμηλής πίεσης.



Εξαιτίας του γεγονότος ότι το GaAs δεν έχει μια στοιχειακή (elemental) δομή, παρουσιάζει κάποιες μηχανικές ιδιότητες που δεν παρατηρούνται σε άλλα υλικά. Στο Γάλλιο - Αρσενικό το νέφος των ηλεκτρονίων τείνει να κινείται προς τα άτομα του αρσενικού, κάτι που δημιουργεί διπολική ροπή κατά μήκος της κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης [1,1,1]. Αυτό όμως προκαλεί στις οχτώ {1,1,1} επιφάνειες να έχουν διαφορετική συγκέντρωση ατόμων Γαλλίου και Αρσενικού. Σαν αποτέλεσμα τα {1,1,1} επίπεδα έρχονται περισσότερο κοντά από ότι είναι αναμενόμενο. Το πλησίασμα αυτό προκαλεί τα {1,1,0} επίπεδα να είναι τα πρωταρχικά fracture σημεία.

Το Γάλλιο - Αρσενικό έχει επίσης θερμική αγωγιμότητα που είναι λιγότερη του 1/3 αυτής του πυριτίου και 1/10 αυτής του σιδήρου, κάτι που το καθιστά κακό αγωγό. Αποτέλεσμα της χαμηλής αυτής αγωγιμότητας είναι ότι η πυκνότητα ολοκλήρωσης των διατάξεων που βασίζονται στο GaAs να είναι περιορισμένο από την θερμική αντίσταση του υποστρώματος. Ένα ακόμη θέμα είναι το γεγονός ότι τα εύθραυστα υλικά γίνονται όλκιμα (ductile) κατά την θέρμανση περίπου κατά 35% του σημείου τήξεως τους. Στους 250 °C το Γάλλιο - Αρσενικό έχει μια εντυπωσιακή πτώση στην σκληρότητα του και μια αύξηση στην καταπόνηση του, κάτι που δημιουργεί προβλήματα στις συσκευές που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το Γάλλιο - Αρσενικό έχει τις περισσότερες εφαρμογές του εξαιτίας των υψηλών οπτικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων του. Όπως φαίνεται στους πίνακες 6 και 11, το GaAs έχει περίπου 6 φορές μεγαλύτερη ευκινησία ηλεκτρονίων από ότι το πυρίτιο. Η ηλεκτρονική ευκινησία, η οποία περιγράφει πόσο ισχυρά ένα ηλεκτρόνιο επηρεάζεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο, προκύπτει από νόμους της βασικής Φυσικής και σχετίζεται με την σχέση 3.2

$$v_d = - \left( \frac{qt_c}{m^*} \right) E \quad (4.2)$$

Όπου:  $v_d$  η ταχύτητα ολίσθησης,  $q$  το ηλεκτρονικό φορτίο,  $t_c$  ο μέσος χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε κρούσεις (ηλεκτρονίου με άτομα),  $m^*$  η ενεργός μάζα ηλεκτρονίου και  $E$  το ηλεκτρικό πεδίο.

Στην σχέση 4.2 η σταθερή ποσότητα μέσα στην παρένθεση καλείται ηλεκτρονική ευκινησία. Όπως η εξίσωση ξεκάθαρα δείχνει, η ηλεκτρονική ευκινησία είναι ευθέως ανάλογη του μέσου χρόνου μεταξύ κρούσεων  $t_c$ . Το μέγεθος αυτό με την σειρά του είναι συνάρτηση του αριθμού των σκεδάσεων του ηλεκτρονίου με τα πλεγματικά άτομα και τα άτομα προσμίξεων στον κρύσταλλο. Η σκέδαση με τα πλεγματικά άτομα είναι αποτέλεσμα των θερμικών ταλαντώσεων και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας έως ότου γίνει ο κυρίαρχος παράγοντας, ενώ η σκέδαση με τα άτομα προσμίξεων είναι μια σταθερή συνάρτηση που εξαρτάται από το επίπεδο του ντοπαρίσματος του κρυστάλλου από αυτές. Έτσι η ηλεκτρονική ευκινησία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, με αλλαγές που βασίζονται στην ένταση της λειτουργίας της συσκευής. Σαν αποτέλεσμα αυτού, η ηλεκτρονική ευκινησία στο Γάλλιο - Αρσενικό δεν είναι πάντα 6 φορές αυτής του πυριτίου, καθώς μπορεί συχνά να είναι μόνο διπλάσια.

Με την ηλεκτρονική ευκινησία να καθορίζει την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας της συσκευής και με το GaAs να έχει πάντοτε μεγαλύτερη ηλεκτρονική ευκινησία από αυτή του πυριτίου, το GaAs μπορεί να λειτουργήσει σε μεγαλύτερες συχνότητες από ότι το πυρίτιο και έτσι έχει καταστεί το ιδανικό υλικό για πολλές εφαρμογές στην επικοινωνία. Ωστόσο για τα MEMS, η εισαγωγή των παραγόντων αυτών είναι περιορισμένης σημασίας. Καθώς μερικά συστήματα GaAs υψηλής συχνότητας δοκιμάζονται να ολοκληρώσουν στοιχεία των MEMS, οι περισσότερες συσκευές MEMS με Γάλλιο - Αρσενικό θα λειτουργήσουν με σημαντικά μικρότερες συχνότητες εξαιτίας των μηχανικών περιορισμών των συστημάτων αυτών.

Το Γάλλιο - Αρσενικό έχει μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα από αυτό του πυριτίου, κάτι που σημαίνει ότι είναι καλύτερος φυσικός μονωτής. Με την εισαγωγή οξυγόνου ή χρωμίου στο τηγμένο GaAs κατά την παρασκευή του, μπορεί περαιτέρω να μετατραπεί σε ένα ημιμονωτικό υλικό. Αυτό παρέχει ένα υπόστρωμα που απομονώνει στοιχεία και διεκπεραιώνει πολλές από τις λειτουργίες, όχι όμως τόσο επιτυχώς, όσο το διοξείδιο του πυριτίου.

Το άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του GaAs έναντι του πυριτίου είναι ότι, όπως αναπτύχθηκε νωρίτερα, έχει άμεσο ενεργειακό χάσμα. Αυτό έχει επιτρέψει σε

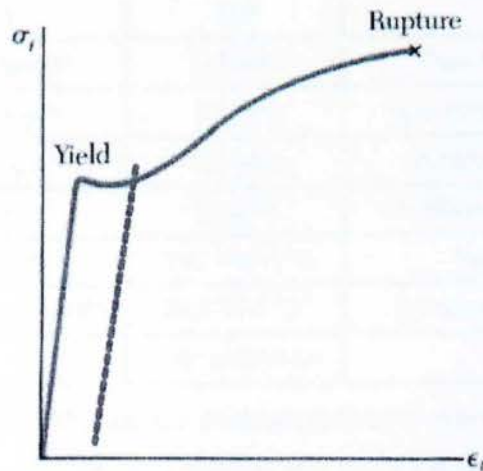


ολόκληρες τάξεις από οπτικομηχανικές συσκευές να αναπτυχθούν. Είναι αυτή η ιδιότητα που επιτρέπει σε ημιαγωγίμα LASER και LED (Light Emitting Diodes) να κατασκευάζονται από GaAs και θα χρησιμοποιηθεί εκτενώς, αναμφισβήτητα στο μέλλον.

Καθώς το GaAs έχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του πυριτίου υπάρχουν ωστόσο κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Δεν υπάρχουν ευσταθή μονωτικά οξειδία και νιτρίδια στην τεχνολογία του GaAs. Αυτό σημαίνει ότι είναι δύσκολο να κατασκευαστούν αναπαραγωγίμα υμένα παθητικοποίησης (passivation layers) [1].

#### 4.8 Μέταλλα

Τα μέταλλα χρησιμοποιούνται στα MEMS σαν ηλεκτρικοί αγωγοί και συχνά σαν δομικά υλικά. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στα MEMS είναι αντίθετα με τα υλικά που συζητήθηκαν ως τώρα, όλκιμα (ductile). Αυτό σημαίνει ότι θα διαμορφωθούν πλαστικά σαν πιεστούν με δύναμη υπεράνω της αντοχής τους. Η πλαστική διαμόρφωση οδηγεί σε μη μηδενική μηχανική τάση με εφαρμογή μηδενικού πεδίου πίεσης, κάτι που παρουσιάζεται σαν ολίσθηση στο διάγραμμα πίεσης – τάσης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.4.



**Διάγραμμα 4.4:** Πίεση συναρτήσεσι τάσης για ένα όλκιμο υλικό. Φαίνεται καθαρά το σημείο από το οποίο και έπειτα συμβαίνει πλαστική διαμόρφωση. Εάν το υλικό πιεστεί περισσότερο από αυτό το σημείο και μετά δεν εφαρμοστεί πίεση, στο διάγραμμα θα υπάρξει μείωση παράλληλη με την ελαστική διαμόρφωση, όπως φαίνεται από την εστιγμένη γραμμή [1].

#### 4.8.1 Αλουμίνιο (Aluminium)

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται συχνά στα MEMS ως φιλμ που ψεκάζεται (sputtered) πάνω σε μια επεξεργασμένη δομή. Καλύπτοντας μια δομή με αγωγίμο φιλμ δημιουργούνται ισοδυναμικές επιφάνειες σε μια συσκευή που είναι κρίσιμες για την λειτουργία πολλών ηλεκτροστατικών συσκευών. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται επίσης σαν ηλεκτρικός αγωγός στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Το αλουμίνιο όπως και τα περισσότερα μέταλλα συχνά αναμιγνύεται με άλλα στοιχεία για να βελτιώσει τις δομικές του ιδιότητες. Το καθαρό αλουμίνιο έχει πολλές ιδιότητες που το ξεχωρίζουν από άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στα MEMS. Οι ιδιότητες που παρατίθενται στον πίνακα 4.8, για τους ερευνητές των περασμένων δεκαετιών είναι ταυτόχρονα ωφέλιμες αλλά και ανησυχητικές.

Πίνακας 4.8 Ιδιότητες αλουμινίου (καθαρότητας 99,6%) σε θερμοκρασία δωματίου [1].

Property	Value	Ιδιότητα
Density	2.71 g/m <sup>3</sup>	Πυκνότητα
Melting Point	659°C	Σημείο τήξης
Specific Heat	0.90 J/g-°C	Ειδική θερμότητα
Young's modulus (bulk value)	70 GPa	Σταθερά του Young για το υπόστρωμα
Poisson's ratio	0.35	Λόγος Poisson
Ultimate tensile strength	110 MPa	Όριο δύναμης επιμήκυνσης
Ultimate shear strength	70 MPa	οριακή/τελική διατμητική δύναμη
Yield tensile strength	100 MPa	αποδίδουσα εκτατική δύναμη
Yield shear strength	55 MPa	αποδίδουσα διατμητική δύναμη
Thermal conductivity	2.37 W/cm-°C	Θερμική αγωγιμότητα
Coefficient of thermal expansion	23.6·10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Resistivity	2.82·10 <sup>-6</sup> W-cm	Αντίσταση

Οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου είναι μειωμένες αναφορικά με αυτές του πυριτίου και του Γάλλιου - Αρσενικού. Με τη σταθερά του Young να είναι μικρότερη από τη μισή του πυριτίου, το αλουμίνιο είναι καθαρά όλκιμο υλικό. Ωστόσο επειδή η αποδίδουσα δύναμη του αλουμινίου, στα 100 MPa, είναι τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους μικρότερη από την αντοχή θραύσης του πυριτίου και του GaAs, το αλουμίνιο σπάνια χρησιμοποιείται σαν δομικό υποστήριγμα (support) στα MEMS.



Για ένα υπολογίσιμο χρονικό διάστημα, το αλουμίνιο ήταν ο μοναδικός καλός αγωγός που μπορούσε εύκολα να ολοκληρωθεί σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Δεδομένου ότι το αλουμίνιο σχηματίζει τριοξειδίο του αργιλίου ( $Al_2O_3$ ) (σάπφειρος) μπορεί να κάνει δεσμό με το διοξειδίο του πυριτίου και έτσι είναι απλό να εγκατασταθεί στα υμένα παθητικοποίησης. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην εξάπλωση της εφαρμογής του, παρά το γεγονός ότι υπήρχαν υλικά με καλύτερες ηλεκτρικές ιδιότητες [1].

#### 4.8.2 Χρυσός (Gold)

Ο χρυσός είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται αρκετά στο πεδίο των MEMS. Παρότι όχι τόσο σύνηθες όσο το αλουμίνιο, έχει εκτός από τις κοινές με αυτό ιδιότητες και κάποια πρόσθετα πλεονεκτήματα. Οι ιδιότητες του παρατίθενται στον πίνακα 4.9, προκειμένου να αναφερθούμε σε αυτές. Ο χρυσός δεν είναι γνωστός ως υλικό με υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Είναι ένα μαλακό, όλκιμο υλικό που διαμορφώνεται εύκολα ή παραμορφώνεται.

Πίνακας 4.9: Ιδιότητες του Χρυσού [1].

Property	Value	Ιδιότητα
Density	19.3 g/m <sup>3</sup>	Πυκνότητα
Melting Point	1063°C	Σημείο τήξης
Specific Heat	0.13 J/g-°C	Ειδική θερμότητα
Young's modulus (bulk value)	75 GPa	Σταθερά του Young για το υπόστρωμα
Poisson's ratio	0.42	Λόγος Poisson
Ultimate tensile strength	125 MPa	Όριο δύναμης επιμήκυνσης
Thermal conductivity	3.15 W/cm-°C	Θερμική αγωγιμότητα
Coefficient of thermal expansion	14.2·10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Resistivity	2.44·10 <sup>-6</sup> W-cm	Αντίσταση

Σαν αποτέλεσμα δεν χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό. Αντίθετα, σχεδόν πάντα θα μπει ως στρώσεις πάνω από ένα πιο άκαμπτο υλικό ή θα χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που δεν απαιτούν μηχανική κίνηση.

Ο χρυσός αναμιγνύεται με το διοξειδίο του πυριτίου, ωστόσο υπάρχουν ορισμένες καθορισμένες μέθοδοι ώστε αυτή η ανάμιξη να αποφευχθεί. Μια μέθοδος είναι η χρήση

μιας ενδιάμεσης επίστρωσης από χρώμιο σαν υλικό ανάμιξης, το οποίο αφενός μεν σχηματίζει  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  με το  $\text{SiO}_2$  αλλά επίσης δεσμεύει και τον χρυσό.

Η κύρια ώθηση που έχει δοθεί στον χρυσό στις εφαρμογές των MEMS οφείλεται στο γεγονός ότι είναι καλύτερος ηλεκτρικός αγωγός από το αλουμίνιο. Σε εφαρμογές όπου η υψηλή αγωγιμότητα είναι κεφαλαιώδους σημασίας, ο χρυσός είναι το υλικό πρώτης επιλογής. Μια από τις ελκυστικές ιδιότητες του χρυσού είναι ότι πρόκειται για αρκετά αδρανές υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια του δεν οξειδώνεται εύκολα στην ατμόσφαιρα, κάτι που βοηθά να διατηρεί την αγωγιμότητά του σε εφαρμογές ατμοσφαιρικών συνθηκών [1].

#### 4.8.3 Χαλκός (Cooper)

Με την πρόσφατη χρήση του χαλκού στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, είναι μόνο θέμα χρόνου μέχρι ο χαλκός να ολοκληρωθεί στα MEMS. Εφόσον πολλοί σχεδιαστές ελπίζουν να τοποθετήσουν MEMS σε συσκευές με συστήματα τσιπ, είναι συνεπώς κεφαλαιώδους σημασίας η χρήση συστημάτων χαμηλής ισχύος. Η ανάπτυξη του χαλκού προς την κατεύθυνση αυτή μπορεί να αναπτυχθεί. Ο χαλκός έχει μερικές μοναδικές ιδιότητες, πίνακας 4.10, κάτι που καθιστά αξιόλογη την προσπάθεια να ολοκληρωθεί.

Πίνακας 4.10: Ιδιότητες χαλκού (καθαρότητας 99,99%) [1].

Property	Value	Ιδιότητα
Density	8.89 g/m <sup>3</sup>	Πυκνότητα
Melting Point	1083°C	Σημείο τήξης
Specific Heat	0.39 J/g-°C	Ειδική θερμότητα
Young's modulus (bulk value)	115 GPa	Σταθερά του Young για το υπόστρωμα
Poisson's ratio	0.36	Λόγος Poisson
Ultimate tensile strength	220 MPa	Όριο δύναμης επιμήκυνσης
Ultimate shear strength	150 MPa	οριακή/τελική διατμητική δύναμη
Yield tensile strength	100 MPa	αποδίδουσα εκτατική δύναμη
Thermal conductivity	3.98 W/cm-°C	Θερμική αγωγιμότητα
Coefficient of thermal expansion	16.6·10 <sup>-6</sup> οC <sup>-1</sup>	Συντελεστής θερμικής διαστολής
Resistivity	1.72·10 <sup>-6</sup> W-cm	Αντίσταση



Στην πραγματικότητα ο χαλκός είναι λίγο πιο ισχυρό υλικό από το καθαρό αλουμίνιο. Ωστόσο, είναι μάλλον απίθανο να χρησιμοποιηθεί σαν κάτι άλλο, παρά σαν ένας αγωγός στο κοντινό μέλλον εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν αναμιγνύεται καλά με το πυρίτιο. Η ικανότητα του χαλκού να βρει μια θέση στην κοινότητα των MEMS θα εξαρτηθεί από το αν θα δημιουργηθούν δεσμοί μεταξύ Si και χαλκού ώστε η ανάμιξη να είναι δυνατή. Ο χαλκός είναι ένας εξαιρετικός αγωγός της θερμότητας, κάτι που θα φανεί χρήσιμο σε πολλές εφαρμογές.

Ο κύριος λόγος των εκτεταμένων ερευνών πάνω στην ανάπτυξη του χαλκού σε ολοκληρωμένα κυκλώματα και MEMS διατάξεις, είναι ότι έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από το αλουμίνιο και το χρυσό. Αυτό σημαίνει έκλυση λιγότερης θερμότητας και κατανάλωση μικρότερης ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό αποτελεί ένα μεγάλο κίνητρο για την ενσωμάτωση του χαλκού στην βιομηχανία των MEMS [1].

#### 4.8.5 Βολφράμιο

##### 4.8.5.1 Ιστορικά στοιχεία για το Βολφράμιο

Κατά τη διάρκεια του 17ου αιώνα, οι εργαζόμενοι στα ορυχεία στο βουνό Erzgebirge της Σαξονίας παρατήρησαν ότι ορισμένα μεταλλεύματα που σχετιζόντουσαν με την τήξη του κασσίτερου παρεμποδίζανε την αναγωγή του κασσιτερίτη και σχετιζόταν με το σχηματισμό οξειδωτικών ενώσεων. Το συγκεκριμένο μέταλλευμα γνωστό σήμερα ως βολφραμίτης, πήρε το όνομα του από το γερμανικό "wolf rahm" γιατί υπήρχε η εντύπωση ότι «καταβροχθίζει» το μέταλλευμα. Το 1758, ο Σουηδός χημικός και μεταλλειολόγος Axel Fredrik Cronstedt, ανακάλυψε και περιέγραψε ένα ασυνήθιστα πυκνό ορυκτό γνωστό σήμερα ως scheelite. Του έδωσε το όνομα "tungsten" που στα σουηδικά σημαίνει βαριά πέτρα. Αργότερα, το 1779, ο Peter Woulfe μελέτησε το ορυκτό που είναι σήμερα γνωστό ως βολφραμίτης και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να περιέχει ένα νέο στοιχείο. Το 1781, 23 χρόνια μετά την ανακάλυψη του αποκαλούμενου scheelite, ο Σουηδός φαρμακοποιός Carl Wilhem Scheele από την Urpsala, ανακάλυψε ότι ένα νέο οξύ ( οξείδιο του βολφραμίου) μπορούσε να απομονωθεί από το μέταλλευμα. Αργότερα ο Scheele και ο Berman προτείνανε πως είναι πιθανό να απομονωθεί ένα νέο μέταλλο από την αναγωγή αυτού του οξειδίου. Δουλεύοντας ανεξάρτητα από τους παραπάνω, οι Ισπανοί Fausto και Juan Jose Elhuyar de Suvisa



απομονώσανε ένα οξειδίο του βολφραμίου από το βολφραμίτη το 1783. Αυτό το καταφέρανε με αναγωγή του στοιχειακού μετάλλου με άνθρακα. Το 1816, ο Σουηδός χημικός Jöns Jacob Berzelius και αργότερα, το 1824, ο Γερμανός χημικός Friedrich Wöhler περιγράψανε τα οξειδία του βολφραμίου και τα διάφορα είδη μπρούτζου και δώσανε το όνομα wolfram στο νέο στοιχείο, ενώ οι Αγγλο - Σάξονες επιστήμονες το ονομάζανε tungsten. Το 1821 ο K.C. von Leonhard πρότεινε το όνομα scheelite. Η πρώτη προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί το βολφράμιο ως συστατικό ενός κράματος στην παραγωγή χάλυβα έγινε το 1855 αλλά το υψηλό κόστος του μετάλλου, οδήγησε γρήγορα στη διακοπή του εγχειρήματος. Οι βιομηχανικές εφαρμογές που χρησιμοποιούσαν βολφράμιο ως συστατικό κραμάτων για τη σκλήρυνση του χάλυβα ξεκινήσανε στα τέλη του 19ου και ακολούθησαν εφαρμογές του βολφραμίου που βρήκανε ταχύτατη ανάπτυξη. Το 1903, ο Βρετανός επιστήμονας W.D. Coolidge παρασκεύασε το πρώτο ελατό σύρμα βολφραμίου εισάγοντας με τη μέθοδο της νόθευσης (doping) άνθρακα στο οξειδίο του βολφραμίου πριν την αναγωγή. Η ανηγμένη μεταλλική σκόνη συμπυκνώθηκε και έτσι σχηματιστήκανε ράβδοι. Ένα λεπτό σύρμα σχηματίστηκε μετά την ελασματοποίηση των ράβδων. Η αξιοποίηση του λαμπτήρα πυρακτώσεως που εφευρέθηκε από τον Edison μερικά χρόνια αργότερα, που απαιτούσε νήματα βολφραμίου, συνετέλεσε στην γρήγορη ανάπτυξη της παραγωγής νημάτων βολφραμίου. Επί πλέον, το 1923, ο Γερμανός K. Schröter εφηύρε το πρώτο σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας που συνδύαζε σωματίδια καρβιδίου του βολφραμίου τοποθετημένα σε μια μήτρα από κοβάλτιο, δηλαδή WC - Co, υλικό που άνοιξε το δρόμο για την κατασκευή μηχανουργικών εργαλείων από σκληρά μέταλλα και του οποίου η εξέλιξη συνεχίζεται [1].

#### 4.8.5.2. Περιγραφή και ιδιότητες του Βολφραμίου

Το βολφράμιο (wolfram ή tungsten), με ατομικό αριθμό 74, χημικό συμβολισμό W και σχετική ατομική μάζα (ατομικό βάρος) 183,34 είναι το βαρύτερο από όλα τα μέταλλα της ομάδας VIB του περιοδικού πίνακα. Το χημικό του σύμβολο W, πήρε το όνομα του από το γερμανικό "wolfram" από το μέταλλευμα βολφραμίτης (οι ιδιότητές του παρουσιάζονται στον πίνακα 4.11. Το καθαρό βολφράμιο έχει υψηλή πυκνότητα ( $19,3 \text{ g / cm}^3$ ), χρώμα γκριζο μεταλλικό ή σπιλπνό άσπρο μεταλλικό και κυβική



χωροκεντρωμένη (bcc) κρυσταλλική δομή. Στην υψηλής καθαρότητας μορφή του είναι εύπλαστο και μπορεί να τεμαχιστεί με μια σκληρή σέγα πριονιού. Επίσης μπορεί να σφυρηλατηθεί σε θερμοκρασία 400 - 800 °C, να ελασματοποιηθεί και να εξωθηθεί υπό συνθήκες κενού ή αδρανούς αερίου όπως Αργόν.

Ορισμένες προσμίξεις όπως το μονοξειδίο του άνθρακα είναι υπεύθυνες για την αξιοσημείωτη σκληρότητα και ευθραυστότητα του μετάλλου. Το βολφράμιο έχει το υψηλότερο σημείο τήξης (3422 °C) από όλα τα μέταλλα και τη χαμηλότερη τάση ατμών,

Πίνακας 4.11: Ιδιότητες του Βολφραμίου [1].

Σημείο τήξης °C	3422
Σημείο βρασμού °C	5900
Ατομικό βάρος	183,92
Ειδικό βάρος g/cm <sup>3</sup>	19,3
Ειδική θερμότητα( 20°C) cal/kg	0,033
Δομή πλέγματος	bcc
Πλεγματική σταθερά (A)	3,158
Συντελεστής γραμμικής διαστολής (20°C)	4,4 10 <sup>-6</sup>
Μέτρο ελαστικότητας Kra/mm <sup>2</sup>	41500
Θερμική αγωγιμότητα (20°C) cal/sec cm K	0,31
Ηλεκτρική αντίσταση (20°C) μΩ cm	5,5

ακόμη και σε θερμοκρασίες άνω των 1650 °C. Όσον αφορά της μηχανικές του ιδιότητες, έχει υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και αντίσταση σε ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτοί είναι και οι λόγοι που χρησιμοποιείται για την κατασκευή φούρνων κενού υπέρ - υψηλών θερμοκρασιών καθώς και για την κατασκευή λαμπτήρων τόξου, ως άνοδος και ως κάθοδος σε λυχνίες, επίσης χρησιμοποιείται σε βολταϊκά τόξα όπως στην ηλεκτροσυγκόλληση και σε κλιβάνους υψηλών θερμοκρασιών. Επίσης έχει το χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από όλα τα

μέταλλα ο οποίος είναι περίπου ίσος με αυτόν του σκληρού γυαλιού. Η σκόνη βολφραμίου με μικρές διαστάσεις ( $\leq 25\mu\text{m}$ ) είναι εύφλεκτη και μπορεί να αναφλεχθεί όταν έρθει σε επαφή με τον αέρα ή με οξειδωτικά ( $\text{F}_2$ ,  $\text{ClF}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{IF}_5$  και  $\text{N}_2\text{O}$ ). Έχει εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση για τα περισσότερα χημικά και μπορεί να διαβρωθεί μόνο από ισχυρά οξέα όπως το νιτρικό οξύ ( $\text{HNO}_3$ ). Επίσης μπορεί να διαβρωθεί από ορισμένα άλατα όπως  $\text{KOH}$  και το  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Το βολφράμιο οξειδώνεται στον αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες και πρέπει να προστατεύεται από θερμικώς μονωμένο κάλυμμα, μέσω υψηλού κενού ή σε ατμόσφαιρα Αργού, Υδρογόνου ή Αζώτου [1].

#### 4.8.5.3 Πεδία χρήσης του Βολφραμίου

Το Βολφράμιο χρησιμοποιείται:

- Στους λαμπτήρες και στις ηλεκτρονικές λυχνίες λόγω της χαμηλής πίεσης των ατμών του.
- Σε λυχνίες κενού ως ηλεκτρόδιο μέσα από ειδικό πυρίμαχο γυαλί λόγω του μικρού συντελεστή διαστολής του.
- Στις ηλεκτρονικές λυχνίες σαν κάθοδος εκπομπής.
- Στις λυχνίες ακτινοβολίας Röntgen σαν άνοδος.
- Στις αντιστάσεις θέρμανσης για θερμοκρασίες άνω των 1200 - 3000 °C.
- Σαν υποδοχή για εξάχνωση μετάλλων στην τεχνική της επικάλυψης από την αέρια φάση σε υψηλό κενό.
- Στα ηλεκτρόδια συγκολλήσεων στο βολταϊκό τόξο (προσμίξεις 1 - 4%  $\text{ThO}_2$  εμποδίζουν το σχηματισμό μεγάλων κόκκων και αυξάνουν έτσι τη διάρκεια ζωής των ηλεκτροδίων).
- Κράματα W-26 % Re είναι τα πιο γνωστά θερμοζεύγη για υψηλές θερμοκρασίες (1600 - 2400 °C).
- Κράματα 90% W με ενώσεις Ni - Cu και Ni - Fe (βαρέα μέταλλα) χρησιμοποιούνται σαν θωρακίσεις για ακτίνες γ και δοχεία για ραδιενεργά ισότοπα.
- Ευτηκτικά κράματα WC με προσμίξεις Co ή Ni 3 - 5 % χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία για τόνους, φρέζες, ειδικά μαχαίρια και άλλα κοπτικά.



Λόγω του μεγάλου ειδικού βάρους ( $\rho = 19,3 \text{ g / cm}^3$ ) κράματα του βολφραμίου χρησιμοποιούνται στη βαλλιστική.

- Ως υλικό για την κατασκευή εξατμίσεων πυραύλων και τουρμπίνων.
- Σε θωρακίσεις θερμικής ακτινοβολίας σε φούρνους υψηλών θερμοκρασιών.
- Η ένωση  $\text{CaWO}_4$ , λόγω της υψηλής απορροφητικότητας του W για ακτίνες - X, χρησιμοποιείται στην ιατρική διαγνωστική (εισάγεται με κατάποση στον οργανισμό σε ακτινογραφίες στομάχου, εντέρων κτλ. για να επισημανθούν χωρητικότητες και κοιλότητες [1].

#### 4.9 Πολυαμίδη (Polyimides)

Τα πολυαμίδη είναι μια τάξη οργανικών φιλμ που έχουν αποδειχτεί υποσχόμενα για μια πιθανή αντικατάσταση του διοξειδίου του πυριτίου, ως μονωτές στην μικροηλεκτρονική. Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών πολυαμιδών φιλμ, διαθέσιμων στο εμπόριο, που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία ημιαγωγών και των οποίων οι ιδιότητες διαφέρουν σημαντικά. Ο κύριος λόγος για την έρευνα των πολυαμιδών φιλμ είναι ότι προσφέρουν μια νέα γενιά από χαμηλής επιδεκτικότητας διηλεκτρικά, μερικά από τα οποία έχει αναφερθεί να έχουν επιδεκτικότητα μικρότερη από 2 εο (εο η διηλεκτρική επιδεκτικότητα στο κενό) εφόσον, χαμηλότερης διηλεκτρικής σταθεράς μονωτές καταναλώνουν λιγότερη ηλεκτρική ισχύ στα FET, τα υλικά αυτά μπορεί να αρχίσουν να βρίσκουν τον δρόμο τους στην κοινότητα των MEMS. Οι ιδιότητες των PMDA / BPDA / TFMOB πολυαμιδών φιλμ, έχουν ερευνηθεί αρκετά και παρατίθενται στον πίνακα 4.12.

**Πίνακας 4.12: Ιδιότητες των PMDA / BPDA / TFMOB πολυαμιδών [1].**

Property	Value	Ιδιότητα
Young's Modulus (in plane)	7.5 GPa	μέτρο του Young (στο επίπεδο)
Young's Modulus (out of plane)	8.0-15.0 GPa	μέτρο του Young (εκτός επιπέδου)
Shear Modulus	1.0-10.0 GPa	μέτρο διάτμησης
Poisson's Ratio (in plane)	0.35	λόγος Poisson (στο επίπεδο)
Poisson's Ratio (out of plane)	0.1-0.45	λόγος Poisson (εκτός επιπέδου)
Dielectric coefficient	2-4	Διηλεκτρικός συντελεστής
Coefficient of thermal expansion	$6.0 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$	Συντελεστής θερμικής διαστολής

Τα πολυαμιδή είναι μια τάξη ασθενών υλικών. Η κύρια λειτουργία τους στα MEMS βρίσκεται στα κυκλώματα και σαν στρώσεις χημικά ενεργών αισθητήρων σε μεμβράνες και υποστηρίγματα. Σαν τέτοια, τα πολυαμιδή γενικά δεν λαμβάνονται υπόψη για δομικές εφαρμογές.

Το κύριο κίνητρο για την ανάπτυξη πολυαμιδών, είναι ότι θα μπορέσουν να έχουν χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά από ότι το διοξείδιο του πυριτίου, κάτι που θα μπορούσε να παρουσιαστεί ως μέγιστη μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Έτσι, όπως και ο χαλκός, τα πολυαμιδή είναι πιθανόν να εισαχθούν στην αγορά των MEMS, μέσω του συνυπολογισμού τους στην ηλεκτρονική αγορά. Σαν καλοί μονωτές, τα πολυαμιδή φιλμ έχουν μυριάδες πιθανές χρήσεις στην βιομηχανία των ημιαγωγών [1].



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Μ. ΣΙΔΕΡΗ: <<ΤΑ MEMS ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΟΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΠΥΡΑΚΤΩΣΗΣ>> Διπλωματική εργασία Μεταπτυχιακού Μικροηλεκτρονικής. Αθήνα - Δεκέμβριος 2010
- [2] <<ΚΑΘΑΡΟΙ ΧΩΡΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΔΙΣΚΙΔΙΩΝ Si>> Αθήνα 1999
- [3] <<ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΧΩΡΟΥ>> Αθήνα 2004
- [4] <http://www.abtech.net/hardwallspec.jpg>
- [5] <http://medicaldesign.com/mag/clean1.jpg>
- [6] <http://www.google.gr/imgres?imgurl=http://medicaldesign.com/mag/clean1.jpg>
- [7] <http://docs.engineeringtoolbox.com/documents/932/clean-room-class-particle-size-diagram.png>
- [8] <http://docs.engineeringtoolbox.com/documents/933/clean-room-class-particle size-diagram-ISO.png>
- [9] <http://www.cleanairproduct.com/images/type2.jpg>
- [10] <http://www.terrauniversal.com/gallery/cleanrooms/Images/cleanroom air handlers illustration.jpg>
- [11] [http://www.joebrownmems.com/yahoo\\_site\\_admin/assets/images/Clean Room Joey.7253347\\_std.jpg](http://www.joebrownmems.com/yahoo_site_admin/assets/images/Clean Room Joey.7253347_std.jpg)
- [12] [http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-m2/clean-room-entrance-mat-538058.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-m2/clean-room-entrance-mat-538058.jpg)
- [13] <http://www.stevens.edu/ses/images/fileadmin/images/mdl-clean-room.jpg>
- [14] <http://www.microsystems.metu.edu.tr/pctrs/fab1.jpg>