

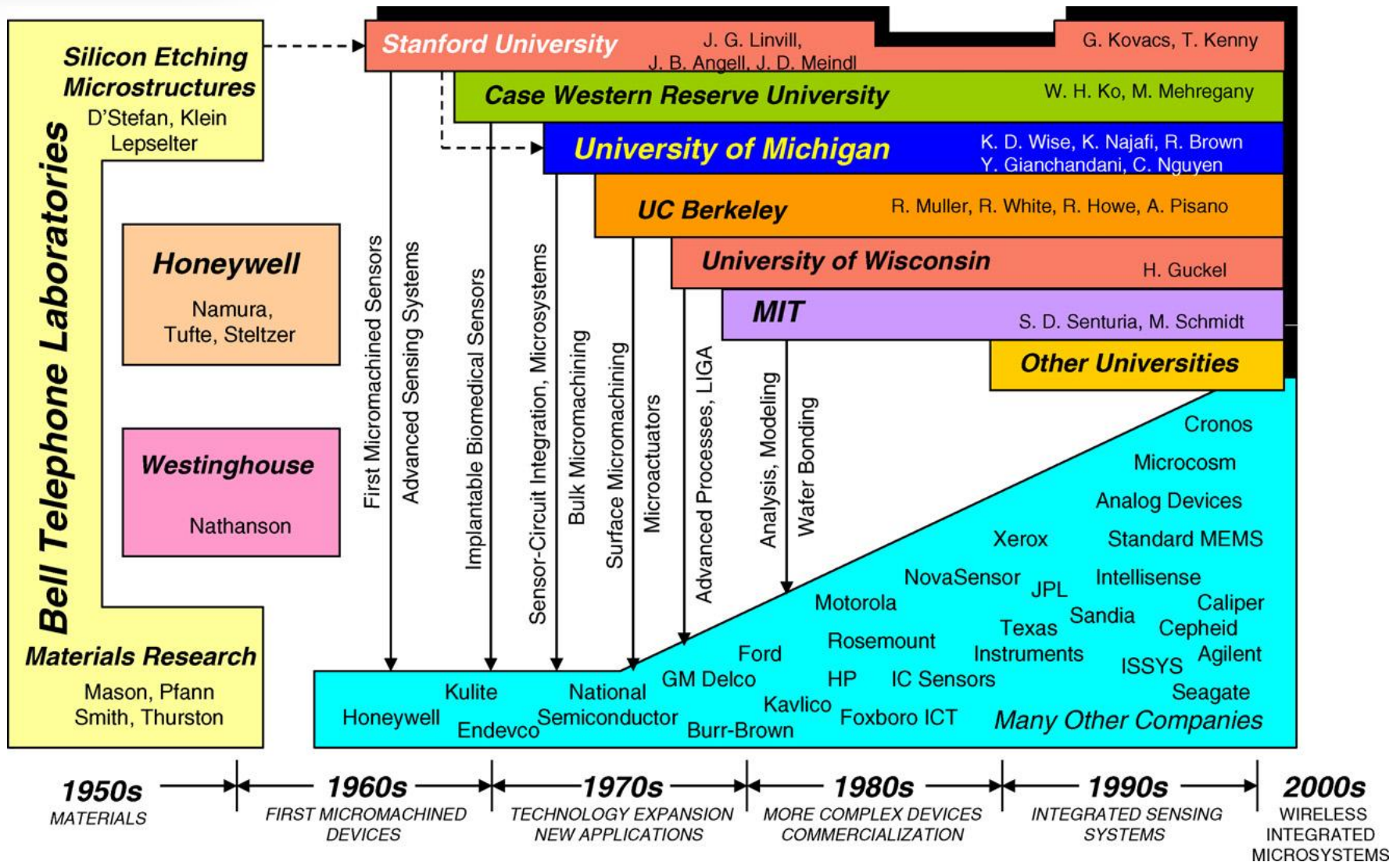
1959 : “There’s plenty of room at the bottom”

“I would like to describe a field, in which little has been done, but in which an enormous amount can be done in principle. ..What I want to talk about is the problem of manipulating and controlling things on a small scale.”

- Πως γράφουμε «μικρά» – η πληροφορία σε μικρές κλίμακες
- Ηλεκτρονικά μικροσκόπια
- Το βιολογικό σύστημα
- Σμικρύνοντας του υπολογιστές
- Νανο/μίκρο μηχανές
- Αναδιατάσσοντας τα άτομα

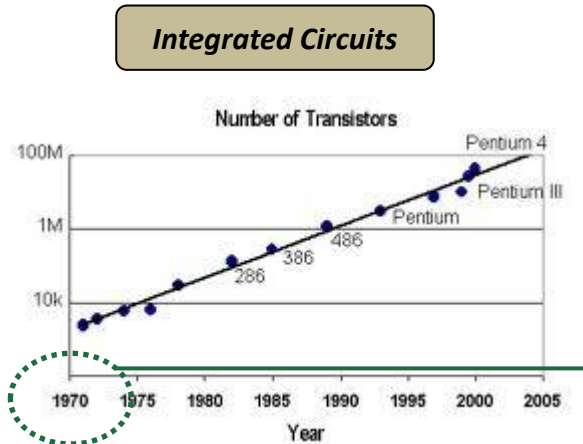


R.P. Feynman 1918 - 1988



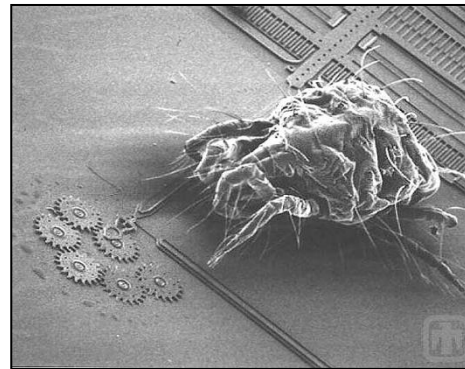
Υπενθύμιση:

Μικροηλεκτρονική



Χρήσης
υπάρχουσας
υποδομής

MEMS (MicroElectroMechanicalSystems)
Μικροσυστήματα ή Μικροηλεκτρομηχανικά
συστήματα



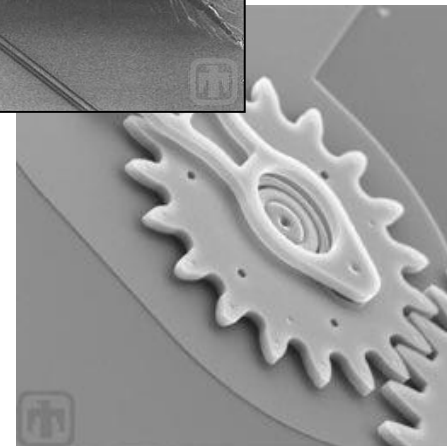
Μικρομηχανική

Τα **MEMS** διατηρούν **πλεονεκτήματα** που προέρχονται από τις μικροηλεκτρονικές διατάξεις...

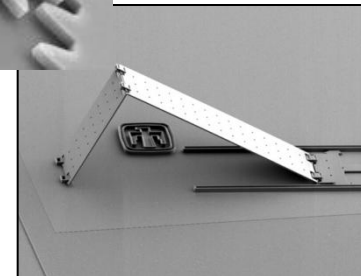
- Μαζική παρασκευή (μειωμένο κόστος και χρόνος)
- Άμεση επικοινωνία με ICs (smart sensors)
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος
- Μειωμένες διαστάσεις
- Εκμετάλλευση νέων φυσικών φαινομένων

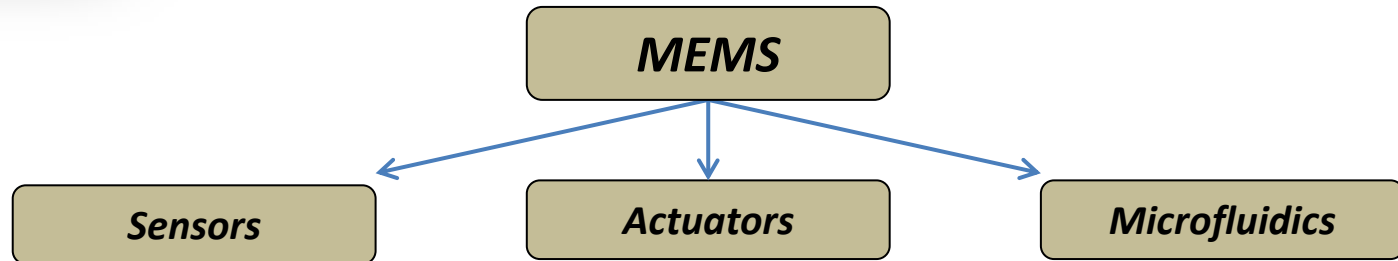
...με μια σημαντική διαφοροποίηση:

Είναι η επιθυμητή η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον (μετρούμενο μέγεθος)!



Sandia
National
Laboratories





Η αξιοποίηση των διαφοροποιημένων ιδιοτήτων των φαινομένων και των υλικών στη μικροκλίμακα είναι μία από τις βασικές τάσεις στην κατασκευή συσκευών, ωστόσο δεν μπορεί να θεωρηθεί ο βασικός λόγος που οδήγησε στην σμίκρυνση των διαστάσεων. Πιθανότατα αυτό ήταν το κόστος παρασκευής, που με την μείωση των διαστάσεων των συσκευών και τη δυνατότητα μαζικής επεξεργασίας (*batch processing*) οδηγήθηκε σε δραστική μείωση. Επιπλέον, σημαντικό χαρακτηριστικό των μικροσυσκευών είναι η σημαντικά μειωμένη ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία τους. Με βάση αυτούς τους άξονες, τη δεκαετία του 1970 αναπτύχθηκε το πεδίο των **μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων** (**MicroElectroMechanical Systems - MEMS**) ή εναλλακτικά **μικροσυστημάτων** (**Microsystems**) που περιγράφει συστήματα με χαρακτηριστικές διαστάσεις κατώτερες του 1mm (τυπικά 1-100μm). Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι, **αισθητήρες**, **ενεργοποιητές** ή γενικότερα «μικρές μηχανές», συσκευές για ιατρικές ή βιολογικές εφαρμογές κ.ά. Για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου τεχνολογικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε ο ήδη υπάρχων εργαστηριακός εξοπλισμός και τεχνογνωσία που υποστήριζε την εξελιγμένη τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Integrated circuits –ICs) Ως συνέπεια, οι τυπικές διατάξεις MEMS είναι κατασκευασμένες σε υπόστρωμα πυριτίου που αποτελεί το υλικό στο οποίο βασίζεται η συντριπτική πλειοψηφία των διατάξεων της μικροηλεκτρονικής, με τις ιδιότητες αυτού να είναι μελετημένες εις βάθος

Γενική Περιγραφή MEMS

Οι μικροηλεκτρονικές τεχνολογίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορεί να προσέφεραν την ιδανική πλατφόρμα εκκίνησης για την κατασκευή μικροσυστημάτων, ωστόσο είχαν να επιδείξουν ένα θεμελιώδες μειονέκτημα: οι δομές που παρασκευάζονταν παρέμεναν στο ένα επίπεδο. Ωστόσο για την λειτουργία ενός μηχανικού συστήματος, απαιτείται κάποιος αριθμός βαθμών ελευθερίας του συστήματος στο χώρο έτσι ώστε να είναι δυνατή η κίνηση ή η παραμόρφωση τμημάτων στερεών ή ρευστών σωμάτων. Οι τυπικές τεχνολογίες κατασκευής της μικροηλεκτρονικής δεν είναι σε θέση να υλοποιήσουν αιωρούμενες ή ελεύθερες δομές, και γενικότερα δομές με υψηλή τοπογραφία πάνω στην επιφάνεια του ημιαγωγίμου υλικού (πυρίτιο ή κάποιο παρεμφερές). Προέκυψε δηλαδή η ανάγκη της επινόησης νέων τεχνολογιών κατασκευής που να είναι σε θέση να παράγουν αντίστοιχες δομές, χωρίς ωστόσο να διακυβευτεί η συμβατότητα με τις προϋπάρχουσες τεχνολογίες, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και τη λειτουργικότητα των ηλεκτρονικών μερών της εκάστοτε συσκευής. Για το σκοπό αυτό, έχουν παρουσιαστεί αρκετές τεχνολογίες, οι οποίες εντάσσονται στην κατηγορία της **μικρομηχανικής**. Η εξέλιξη των υπάρχοντων κατασκευαστικών μεθόδων και η επινόηση νέων που να είναι σε θέση να παρέχουν καινοτόμα προϊόντα αποτελεί το βασικότερο πεδίο έρευνας στο πεδίο των MEMS. Η σχετική προσπάθεια έχει οδηγήσει στην διαρκή ανάπτυξη ολοένα και πιο εξελιγμένων συσκευών, με σημαντικά βελτιωμένες λειτουργικές επιδόσεις.



Εφαρμογή	2005	2015
Αισθητήρες Πίεσης	3.0	6.0
Διαγνωστικά εκτός σώματος (<i>in-vitro</i>)	0.01	5.0
Κεφαλές εγγραφής/ανάγνωσης σκληρών δίσκων	2.0	4.0
Κεφαλές εκτυπωτών ink-jet	2.0	3.5
Οθόνες	1.0	3.0
Γυροσκόπια	0.1	2.0
Lab-on-a-chip	0.01	2.0
Συστήματα παροχής φαρμάκων	0.0	1.5
Αισθητήρες αδράνειας	0.2	1.5
Χημικοί αισθητήρες	0.1	1.0
Οπτικοί διακόπτες	0.1	1.0
Συσκευές ραδιοσυχνότητας (<i>RF</i>)	0.1	1.0
Μικροφασματογράφοι	0.02	0.4

Introduction to MEMS:

<http://www.youtube.com/watch?v=CNmk-SeMOZI&NR=1>

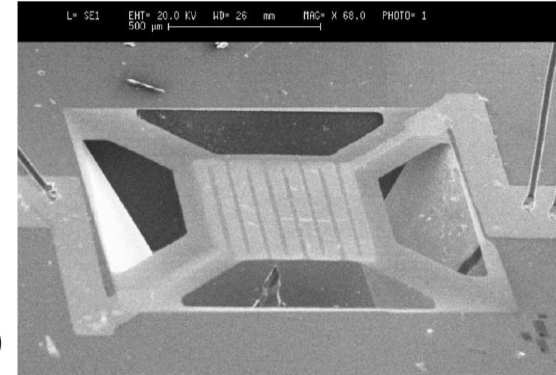
Πως κατασκευάζουμε με ακρίβεια τόσο μικρές δομές;

Αρχικά ξεκινάμε με μια επίπεδη επιφάνεια (υπόστρωμα), συνήθως από Si.

Η ιδέα είναι, να δημιουργούμε λειτουργικές δομές στο υπόστρωμα:

- «Χτίζοντας»
- «Σκάβοντας»
- Με εναπόθεση υλικών
- Αλλάζοντας τις ιδιότητες υλικών (οξειδωση, εμφύτευση, θέρμανση κ.ά.)

✓ Αρχικά όμως πρέπει να μπορούμε ορίσουμε γεωμετρικά τις όποιες δομές

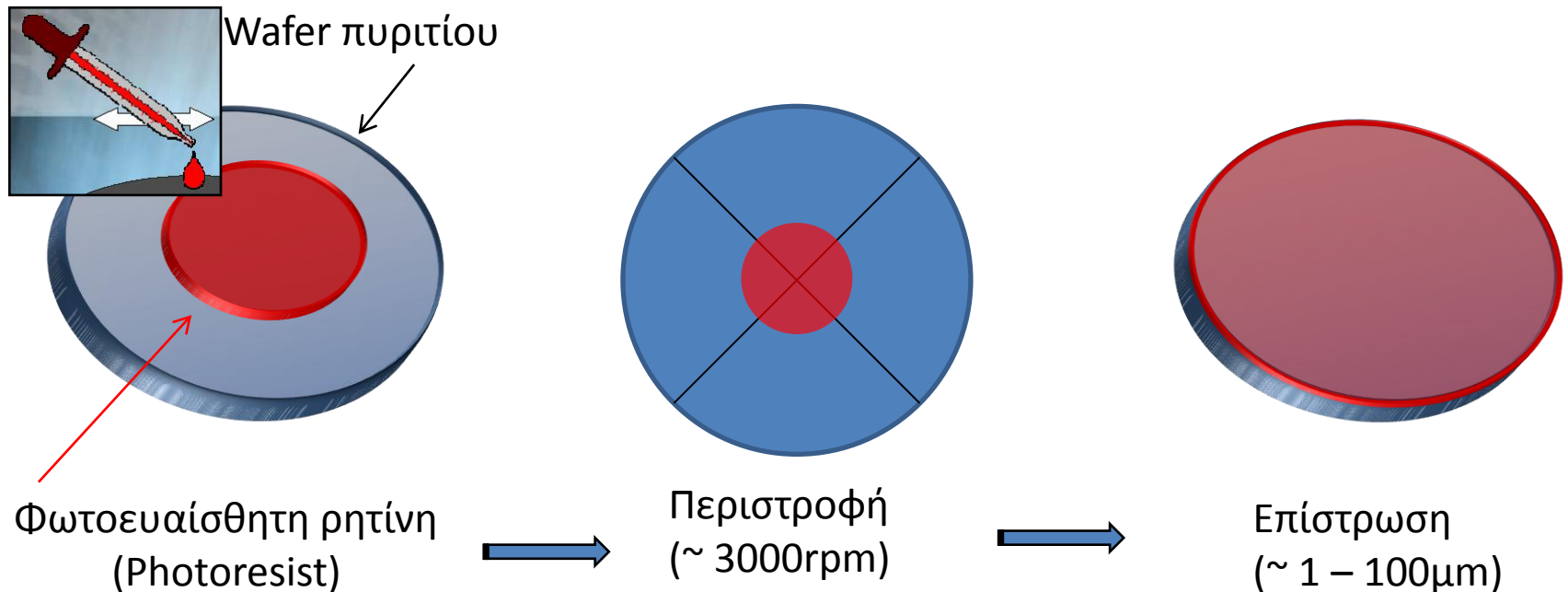


β)

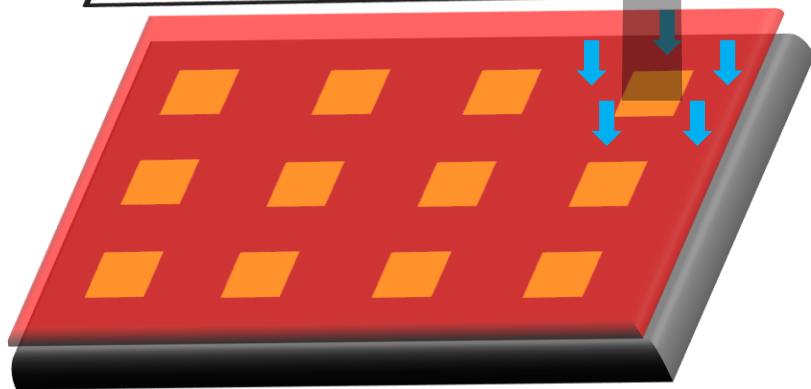
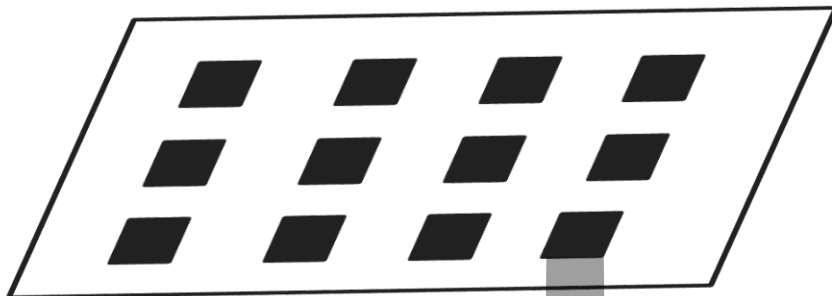
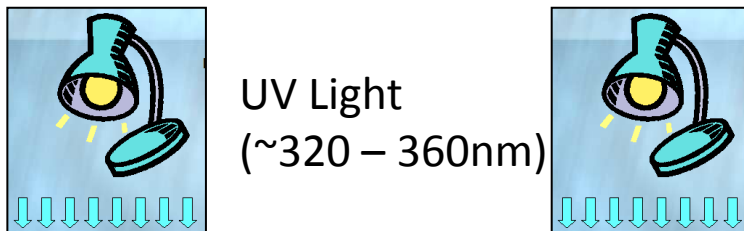


1. Επίστρωση (Spin coating)

Αρχικά επιστρώνεται ομοιόμορφα φωτοευαίσθητο υλικό



Στη συνέχεια ορίζουμε τις δομές



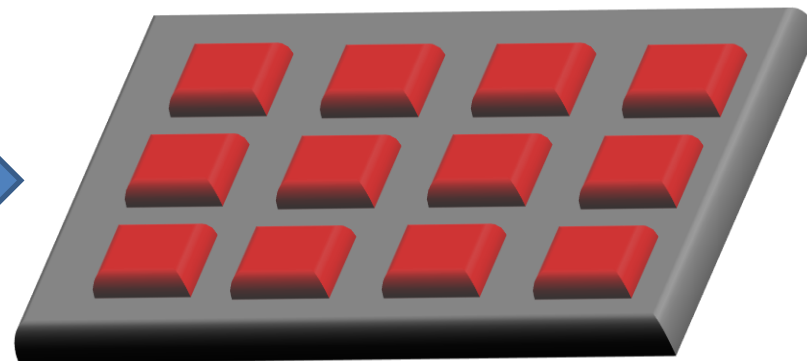
2. Έκθεση

Minimum feature size

$$F = 0.5 * \lambda * NA$$

λ : μήκος κύματος

NA: οπτική παράμετρος



3. Εμφάνιση (Development)

Παραδοσιακά υλικά μικρομηχανικής: Η αρχική σύλληψη αφορούσε μια τεχνολογική πλατφόρμα βασισμένη στο πυρίτιο, προερχόμενη από την βιομηχανία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (μικροηλεκτρονική) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα υλικά που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο πεδίο (πυρίτιο, διοξείδιο και νιτρίδια του πυριτίου, καθώς και αλουμίνιο).

Si	Υπόστρωμα (Substrate)
Polysilicon	Διάφορες δομές
SiO ₂ Si ₃ N ₄	Ηλεκτρική & θερμική μόνωση
Al, Pt, Au, Ti, Ni, W	Λεπτά υμένα μετάλλων (~100nm)
Άλλα	Ειδικευμένες εφαρμογές (πιεζοηλεκτρικά, μαγνητικά, βιοευαίσθητα κ.ά.)

Νέα υλικά - Πολυμερή: Με στόχο την ανάπτυξη συσκευών οι οποίες θα παρουσιάζουν εξαιρετικά διευρυμένες δυνατότητες και ευκολία παραγωγής, έχει εμφανιστεί σχετικά πρόσφατα μια νέα κατηγορία συσκευών η οποία βασίζεται σε οργανικά πολυμερή προς διαμόρφωση των σχετικών δομών.

Polyimides (PI)

PDMS

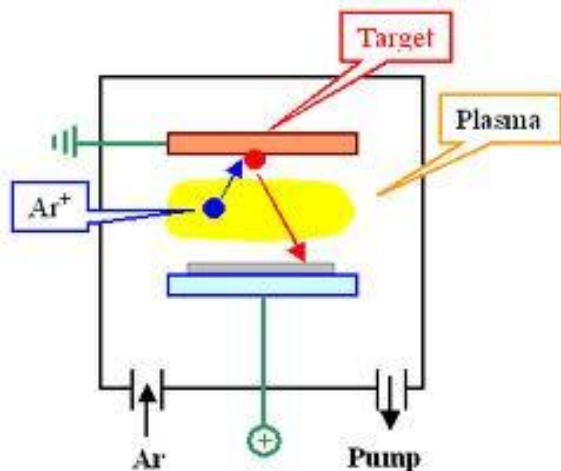
SU8

PMMA

Αγωγή Πολυμερή

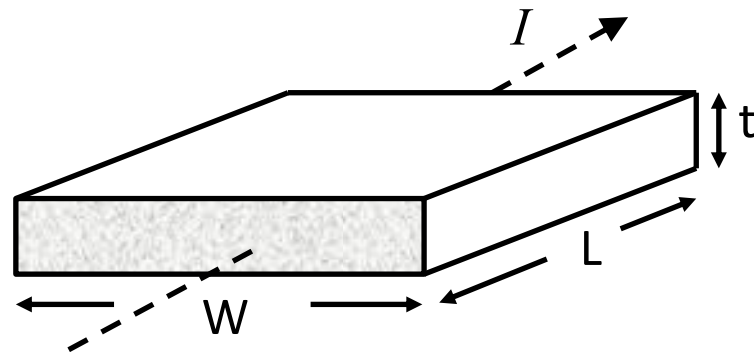
Εναπόθεση (*deposition*)-Sheet Resistance

Sputtering



Εναπόθεση υλικών (πάχος της τάξης μερικών δεκάδων/εκατοντάδων *nm*)

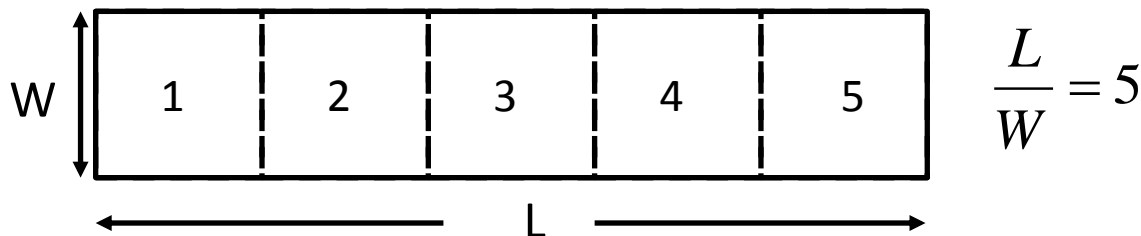
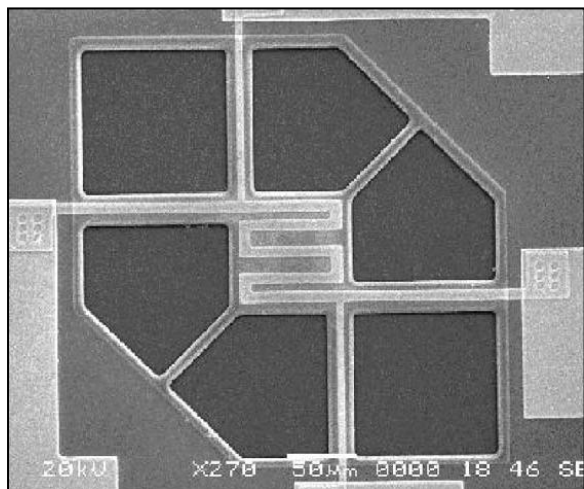
$$R = \rho \frac{L}{A}$$

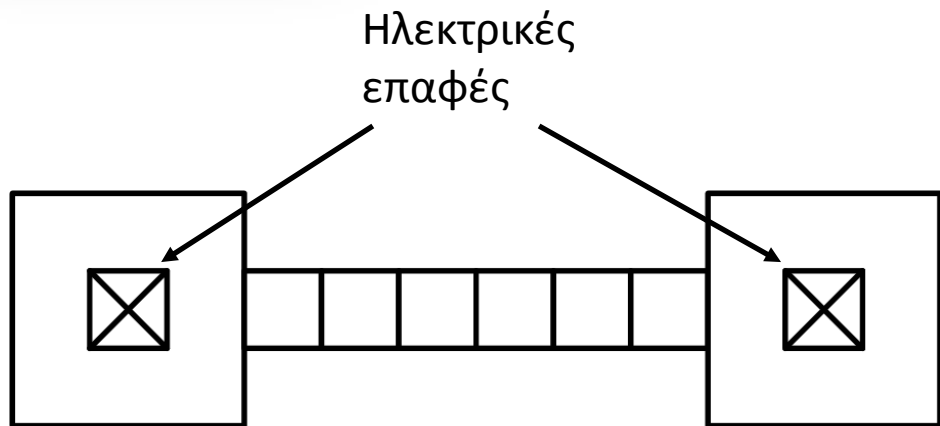


$$R = \rho \frac{L}{t \cdot W} = \frac{\rho}{t} \frac{L}{W}$$

$$R = R_s \frac{L}{W}$$

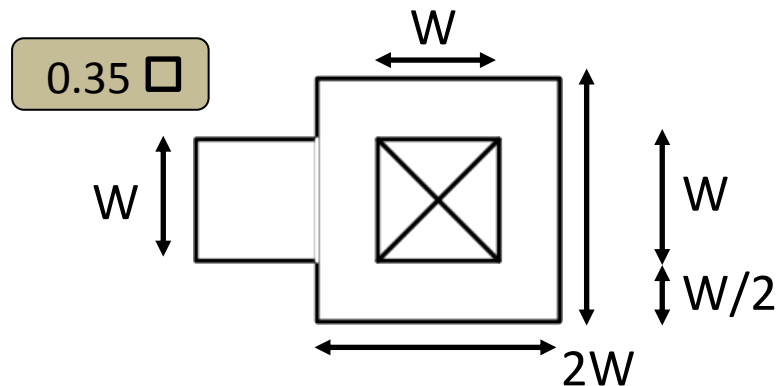
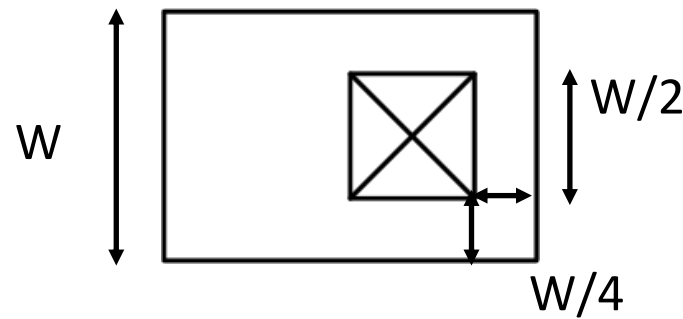
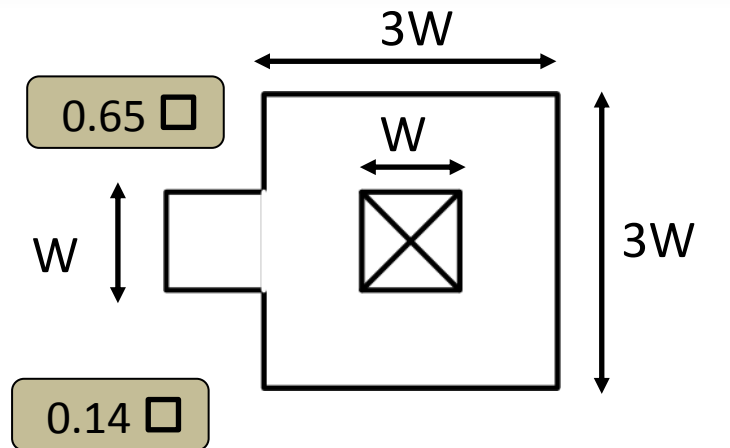
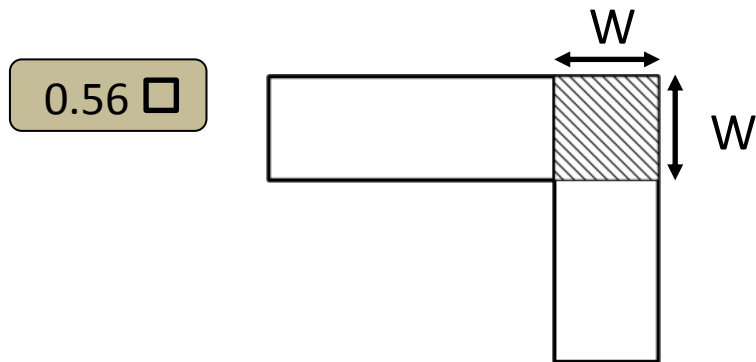
Sheet Resistance



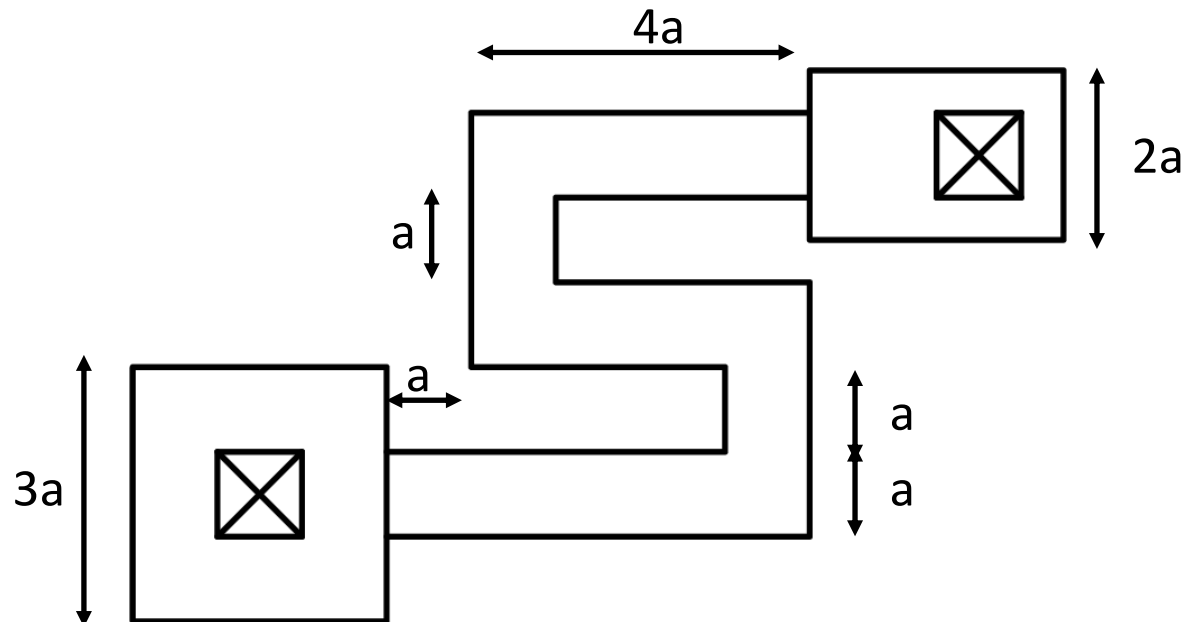


$$R_s = 120 \Omega / \square$$

$$R_{tot} = ?$$



1. Έστω ότι θέλουμε να κατασκευάσουμε αντιστάτη $R=5k\Omega$, στο σχήμα του αντιστάτη της προηγούμενης διαφάνειας. Με $R_s=200\Omega/\square$, πόσα τετράγωνα θα χρειαστούν;
2. Με $R_s=200\Omega/\square$, να υπολογίσετε την συνολική αντίσταση της παρακάτω διάταξης



Στρώματα SiO_2 χρησιμοποιούνται για **ηλεκτρική** και **θερμική** μόνωση

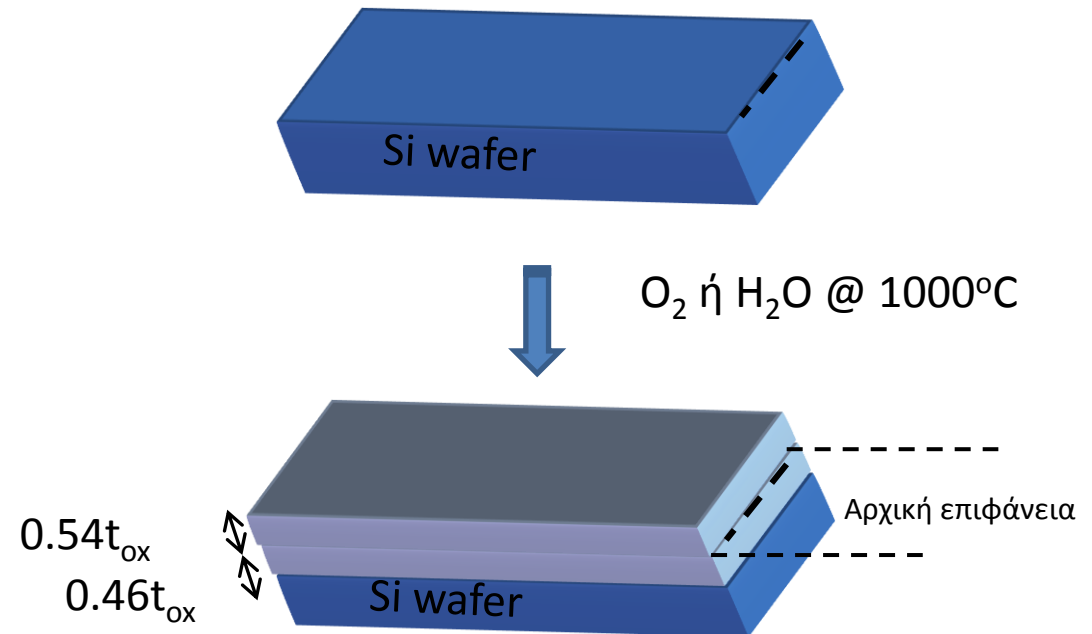
2 τρόποι διαμόρφωσης στρωμάτων SiO_2 :

α) Οξείδωση υποστρώματος

β) Εναπόθεση

Νόμος διάχυσης Fick

$$J = -D \frac{\partial N(x, t)}{\partial x}$$

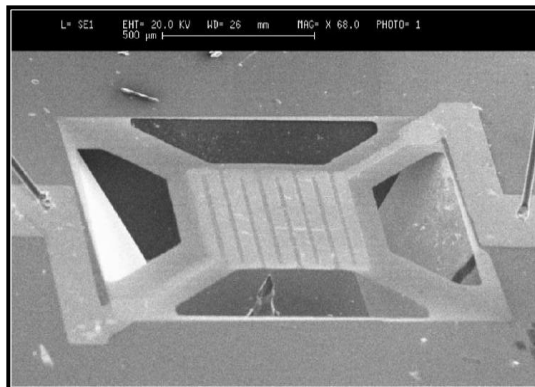


Κατασκευαστικές Τεχνικές

Μικρομηχανική όγκου (Bulk micromachining):

Τα μηχανικά στοιχεία κατασκευάζονται με σημείο εκκίνησης υπόστρωμα πυριτίου από το οποίο αφαιρούνται (εγχαράσσονται) επιλεγμένα μέρη προς δημιουργία μηχανικών, θερμικών ή μαγνητικών συσκευών

- Παλαιότερη κατηγορία
- Δομές μόνο σε πυρίτιο
- Απλούστερες τεχνικές (λιγότερα στάδια)



Μικρομηχανική επιφάνειας (Surface micromachining):

Οι συσκευές κατασκευάζονται μέσω μιας διαδοχικής διαμόρφωσης στρωμάτων διάφορων υλικών τα οποία εναποτίθενται στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου

- Νεότερες τεχνικές
- Περισσότερα υλικά
- Περισσότερα κατασκευαστικά στάδια
- Πιο σύνθετες δομές



Παράδειγμα: Δημιουργία μικροκαναλιών



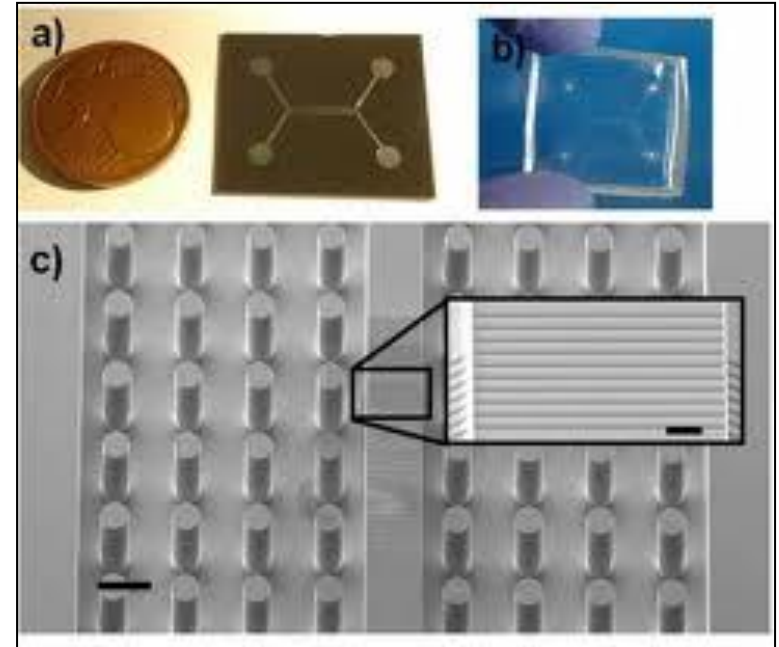
Σε δισκίο πυριτίου μορφοποιείται η επιφάνεια (μήτρα)



Πάνω στο δισκίδιο χύνεται ποσότητα PDMS



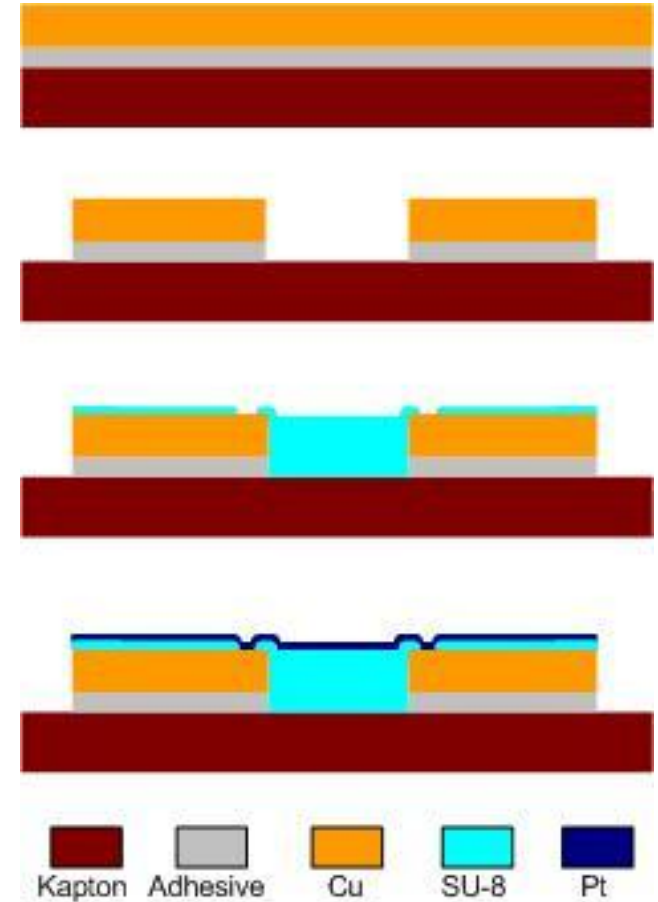
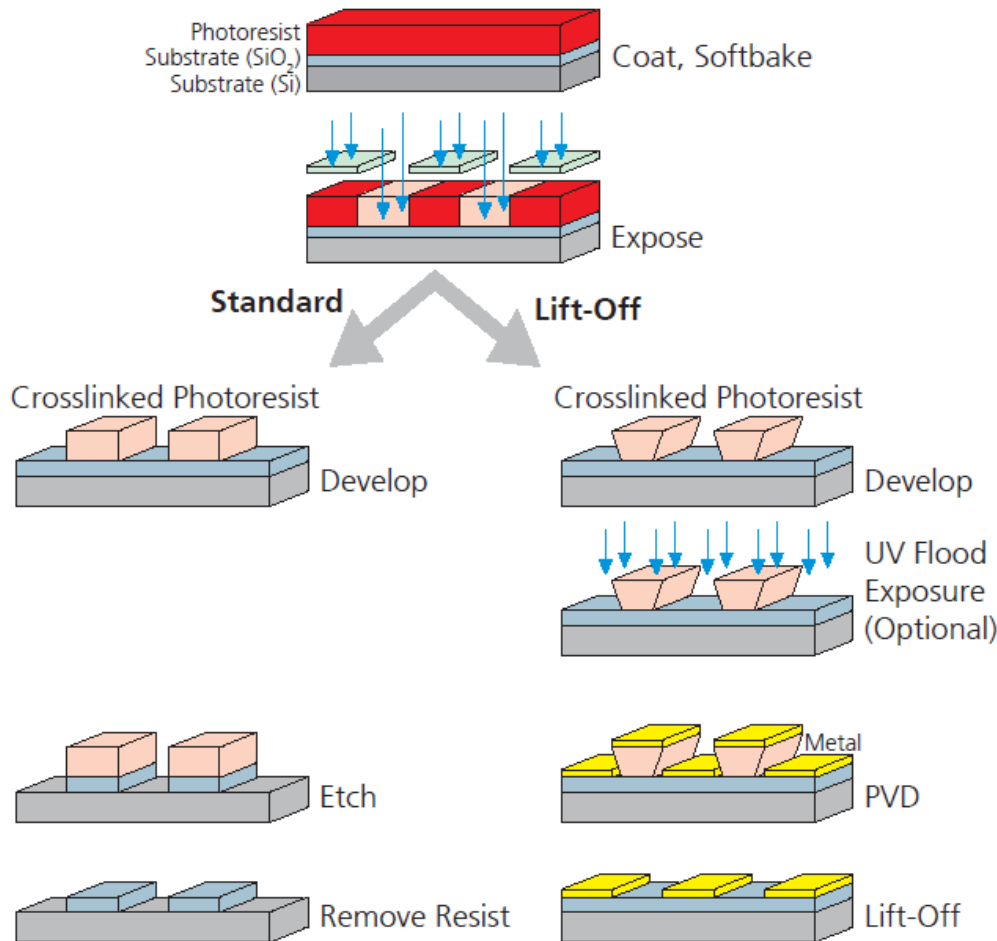
Το PDMS αποκολλάται από το wafer και στη συνέχεια προσαρμόζεται σε επίπεδη επιφάνεια

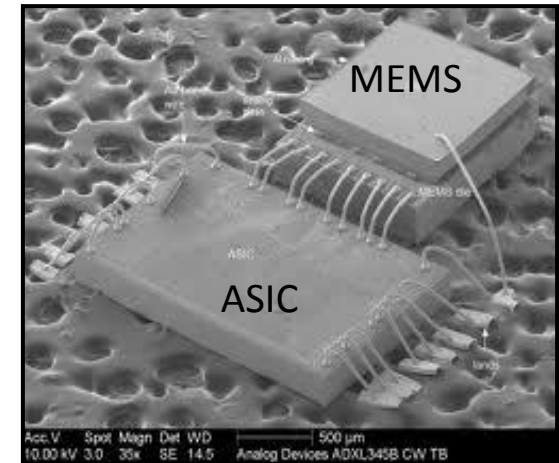
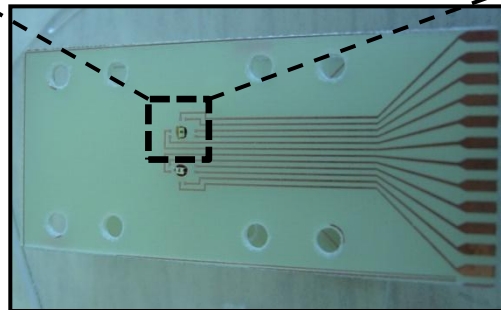
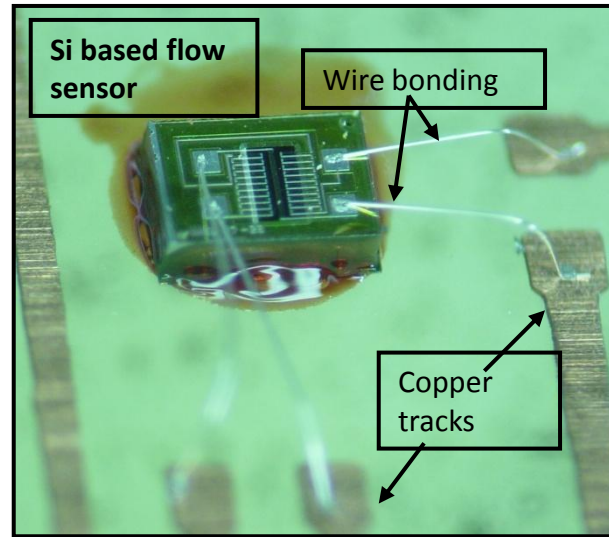
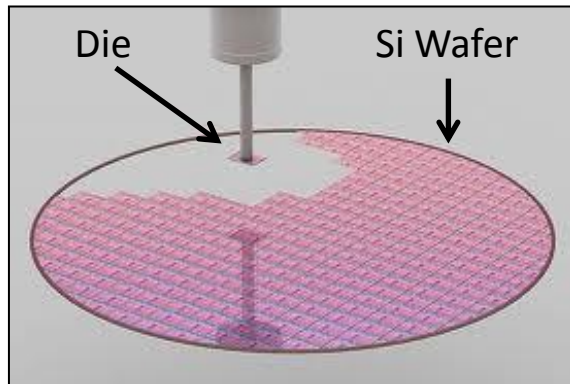


Μικροκάνάλι
(10-100 μ m)



Παραδείγματα Κατασκευής





ADXL345 MEMS and ASIC Die

- ❑ Die Cutting/dicing – Κόψιμο του Si wafer σε ψηφίδες (die)
- ❑ Die Mounting – Τοποθέτηση της ψηφίδας πάνω στο PCB
- ❑ Wire Bonding – Ηλεκτρική διασύνδεση της συσκευής με το μακρόκοσμο
- ❑ ASIC – Ανάπτυξη και διασύνδεση των ειδικών ηλεκτρονικών ελέγχου

Μέτρηση ροής



Μέτρηση πίεσης



- Ειδικευμένες απαιτήσεις λειτουργικότητας με βάση την συγκεκριμένη επιλογή
- Προστασία από **ανεπιθύμητους** εξωτερικούς παράγοντες (υγρασία, διάβρωση, θερμοκρασιακές μεταβολές)
- Έκθεση στα **επιθυμητά** φυσικά μεγέθη σε κάθε περίπτωση (π.χ. ροή , πίεση)

✓ Κατά μέσο όρο, τα στάδια των Packaging και Housing αποτελούν το 80% του συνολικού κόστους ενός αισθητήρα (τελικό προϊόν)