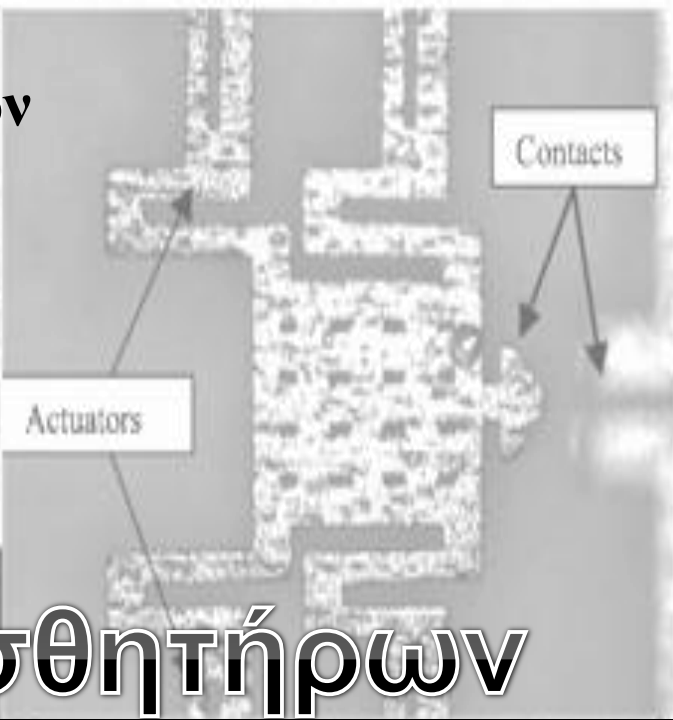




Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Ηλεκτρονικής



Τεχνολογία των αισθητήρων

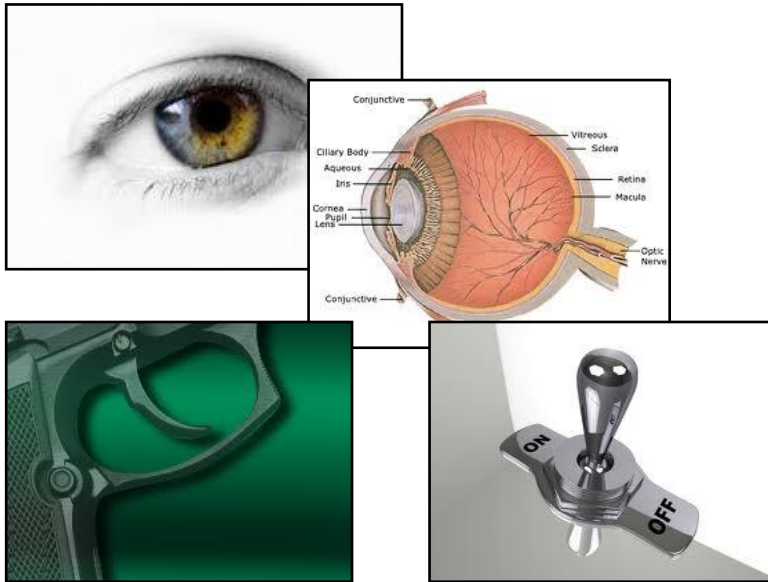


Δρ. Α. Πετρόπουλος, 2011
apetro@teiath.gr

Εισαγωγή στους αισθητήρες

Αισθητήρας

Γενικός ορισμός: Η συσκευή εκείνη που μετρά μια φυσική ή χημική ποσότητα και τη μετατρέπει σε ένα μέγεθος (σήμα) που μπορεί να το διαβάσει ένας παρατηρητής

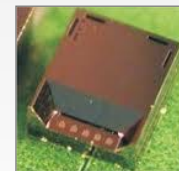
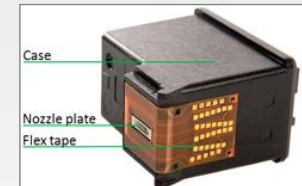
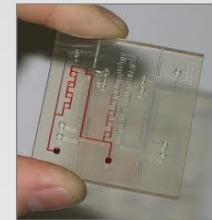


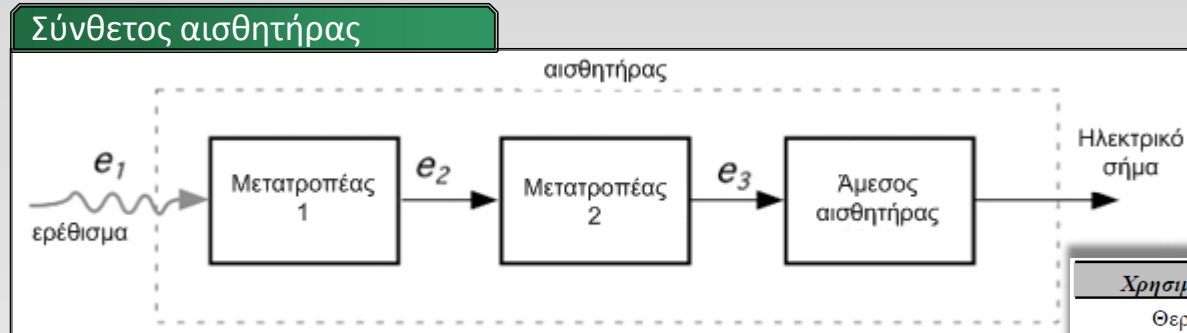
Ειδικός ορισμός: η συσκευή που δέχεται ένα ερέθισμα και αποκρίνεται σε αυτό με ένα ηλεκτρικό σήμα



Το πρωτογενές φυσικό μέγεθος εκείνο που δέχεται ο αισθητήρας κατά τη μέτρηση ορίζεται ως *ερέθισμα (stimulus)* ή *μετρούμενο μέγεθος (measurand)*

- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Υγεία
- Μεταφορές
- Υπολογιστές - Εκτυπωτές
- Τηλεπικοινωνίες
- Διαστημικές εφαρμογές
- Άλλες (ηλεκτρονικά, περιβάλλον, ρομποτική, βιομηχανική παραγωγή κ.ά)





- Μεταφορά ενέργειας από το αντικείμενο μέτρησης προς τη συσκευή *Συμφασμένη με την μεταφορά πληροφορίας που πραγματοποιείται κατά τη διαδικασία της μέτρησης μέσω ενός αισθητήρα (sensing process).*
- Μετατροπή της ενέργειας αυτής σε διαφορετική μορφή *Αφορά την μετατροπή του ερεθίσματος (π.χ. πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία, χημική σύσταση) σε ηλεκτρικό σήμα*

Η γενικότερη κατηγορία συσκευών που ασχολείται με την μετατροπή ενός είδους ενέργειας σε οποιοδήποτε άλλο ονομάζονται **μετατροπείς (transducers)**

Χρησιμοποιούμενα μέσα αντίληψης στους αισθητήρες

Θερμότητα & Θερμοκρασία	Χημικά
Ηλεκτρικά	Μαγνητικά & ηλεκτρομαγνητικά κύματα
Μηχανική μετατόπιση	Μηχανικό κύμα
Ραδιενέργεια	Ακτινοβολία (διάφορες μορφές)
Άλλα	Βιολογικά

Φαινόμενα μετατροπής

Φυσικοί αισθητήρες	Χημικοί αισθητήρες
Θερμοηλεκτρικό	Χημικός μετασχηματισμός
Φωτοηλεκτρικό	Φυσικός μετασχηματισμός
Μαγνητοηλεκτρικό	Ηλεκτροχημική διαδικασία
Ηλεκτρομαγνητικό	Φασματοσκοπία
Θερμοελαστικό	Άλλα
Ηλεκτροελαστικό	Βιολογικοί αισθητήρες
Θερμομαγνητικό	Βιοχημικός μετασχηματισμός
Θερμοοπτικό	Επίδραση σε οργανισμούς
Πιεζοηλεκτρικό	Φασματοσκοπία
Άλλα	Άλλα

Οι συσκευές εκείνες που μετρούν μια φυσική ποσότητα και τη μετατρέπουν σε ένα μέγεθος (σήμα) που μπορεί να το διαβάσει ένας παρατηρητής, ονομάζονται *αισθητήρες*. Το πρωτογενές φυσικό μέγεθος εκείνο που δέχεται ο αισθητήρας κατά τη μέτρηση ορίζεται ως *ερέθισμα (stimulus)* ή *μετρούμενο μέγεθος (measurand)*. Ο ορισμός αυτός για τους αισθητήρες είναι πολύ ευρύς, καθώς περιλαμβάνει από το ανθρώπινο μάτι μέχρι τη σκανδάλη ενός πιστολιού. Τυπικά οι σύγχρονοι αισθητήρες νοούνται ως οι συσκευές που δέχονται ένα ερέθισμα και αποκρίνονται σε αυτό με ένα ηλεκτρικό σήμα. Κατά τη λειτουργία του δηλαδή ο αισθητήρας μετατρέπει ένα φυσικό μέγεθος εισόδου σε ένα σήμα συμβατό με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μπορεί γενικά να θεωρηθεί ως «μεταφραστής» μιας μη ηλεκτρικής τιμής σε ηλεκτρική, όπως η ηλεκτρική τάση, η ένταση ή το φορτίο, τα οποία και αποτελούν το *σήμα εξόδου* του.

Κατά τη λειτουργία οποιουδήποτε είδους αισθητήρα, λαμβάνει χώρα τόσο η μεταφορά ενέργειας από το αντικείμενο μέτρησης προς τη συσκευή όσο και η μετατροπή της ενέργειας αυτής σε διαφορετική μορφή. Η μεταφορά της ενέργειας είναι συνυφασμένη με την μεταφορά πληροφορίας που πραγματοποιείται κατά τα τη διαδικασία της μέτρησης μέσω ενός αισθητήρα (*sensing process*). Αντίστοιχα, η μετατροπή ενέργειας αφορά την μετατροπή του ερεθίσματος (π.χ. πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία, χημική σύσταση) σε ηλεκτρικό σήμα. Η γενικότερη κατηγορία συσκευών που ασχολείται με την μετατροπή ενός είδους ενέργειας σε *οποιοδήποτε άλλο* ονομάζονται *μετατροπείς (transducers)*. Ως παράδειγμα μιας τέτοιας συσκευής μπορεί να αναφερθεί το ηχείο. Το τελευταίο μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα αρχικά σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και τελικά σε ακουστικά κύματα. Προφανώς αυτή η περίπτωση δε σχετίζεται με τη μέτρηση κάποιου μεγέθους. Ειδικότερα, όταν η μετατροπή ενέργειας που πραγματοποιείται είναι η αντίστροφη αυτής του αισθητήρα, δηλαδή όταν η είσοδος είναι ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο και μετατρέπεται σε άλλου είδους ενέργεια, τότε οι συσκευές αυτές χαρακτηρίζονται ως *ενεργοποιητές (actuators)*.

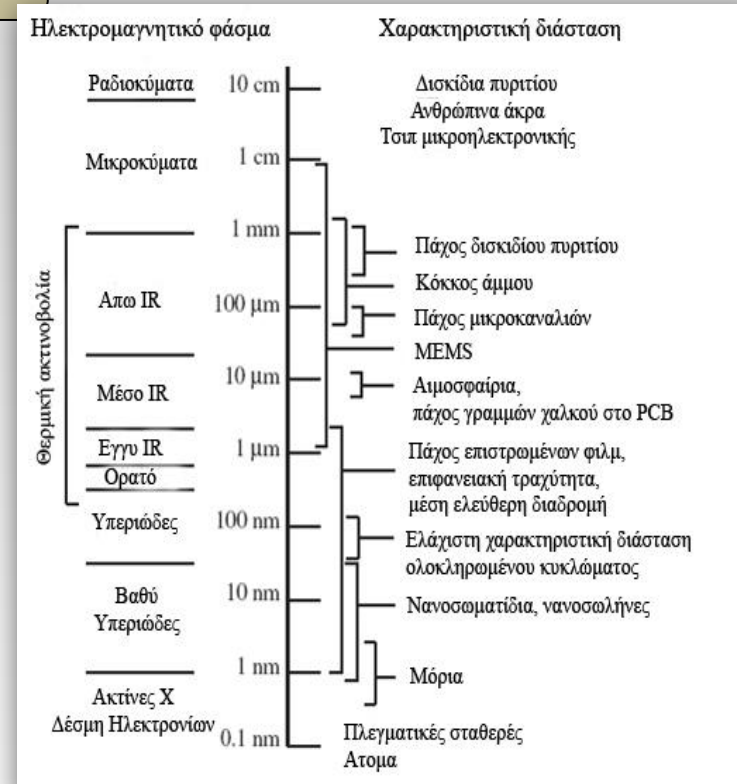
Οι μετατροπείς μπορεί να αποτελούν μέρος ενός *σύνθετου αισθητήρα*. Για παράδειγμα, σε ένα χημικό αισθητήρα, ένα τμήμα αυτού μπορεί να αποτελεί ένας μετατροπέας ο οποίος μετατρέπει την ενέργεια μιας χημικής αντίδρασης σε θερμότητα, ενώ ένα άλλο τμήμα του σύνθετου αισθητήρα (π.χ. θερμοευαίσθητος αντιστάτης) μετατρέπει τη θερμότητα σε ηλεκτρικό σήμα. Ο συνδυασμός των δύο αυτών τμημάτων συνιστά τον πλήρη χημικό αισθητήρα, μια συσκευή που παρέχει ηλεκτρικό σήμα αποκρινόμενη σε μια χημική αντίδραση. Καθίσταται προφανές ότι παρά το σύνθετο της δομής ενός αισθητήρα, θα περιλαμβάνεται σε κάθε περίπτωση ένας *άμεσος* αισθητήρας, μια συσκευή δηλαδή που θα δέχεται κάποιο φυσικό μέγεθος και θα το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα.

Μία άλλη ταξινόμηση των αισθητήρων μπορεί να γίνει με βάση το κατά πόσο ένας αισθητήρας είναι *ενεργός* ή *παθητικός*. Παθητικοί αισθητήρες είναι εκείνοι που δεν έχουν ανάγκη την επιπλέον πηγή ενέργειας προκειμένου να παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα ως απόκριση σε ένα ερέθισμα. Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια του ερεθίσματος μετατρέπεται απ' ευθείας στο σήμα εξόδου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι οι θερμοζεύγος, η φωτοδίοδος ή ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι άμεσοι αισθητήρες. Αντίθετα, οι ενεργοί αισθητήρες βασίζουν τη λειτουργία τους στην παροχή εξωτερικής ισχύος, το λεγόμενο *σήμα διέγερσης*.

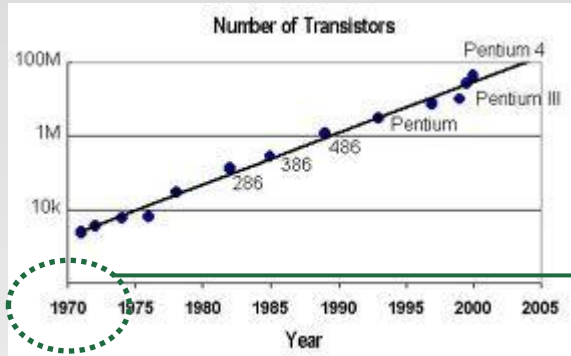
Μικροαισθητήρας (microsensor): Ο αισθητήρας με μια τουλάχιστον φυσική διάσταση σε επίπεδο μικρότερο του 1mm [1]

Κλίμακες μεγεθών

- ❑ **Μακροκλίμακα:** Δομές του μακρόκοσμου, με τυπικές τάξεις μεγέθους σχετικές με την μέση ανθρώπινη δραστηριότητα. Ανεξάρτητα από τις χαρακτηριστικές διαστάσεις των όποιων συσκευών, τελικά σε κάποιο στάδιο της διαδικασίας επικοινωνίας είναι αναγκαία η μετάβαση στη μακροκλίμακα έτσι ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του σήματος του αισθητήρα και του ανθρώπου.
- ❑ **Μικροκλίμακα:** Διατάξεις της τάξης των μερικών δεκάδων μικρομέτρων (μm). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MicroElectroMechanical Systems- MEMS)
- ❑ **Νανοκλίμακα:** Δομές με χαρακτηριστική διάσταση νανομέτρων (nm). Οι ιδιότητες των υλικών (νανοϋλικά) και τα φαινόμενα που παρατηρούνται είναι συχνά σημαντικά διαφοροποιημένες σε σχέση με των αντίστοιχων μακροδομών (bulk).

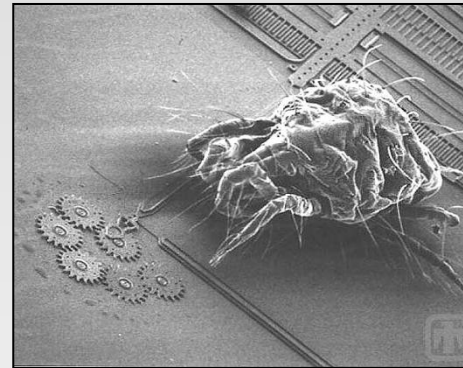


Integrated Circuits



Χρήσης
υπάρχουσας
υποδομής

MEMS (MicroElectroMechanicalSystems)
Μικροσυστήματα ή Μικροηλεκτρομηχανικά
συστήματα

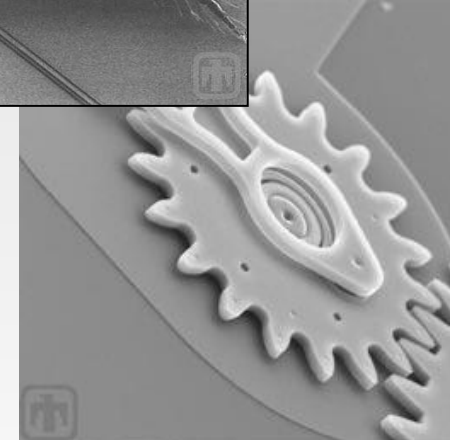


Τα **MEMS** διατηρούν **πλεονεκτήματα** που προέρχονται από τις μικροηλεκτρονικές διατάξεις...

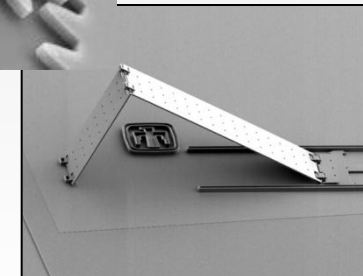
- Μαζική παρασκευή (μειωμένο κόστος και χρόνος)
- Άμεση επικοινωνία με ICs (smart sensors)
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος
- Μειωμένες διαστάσεις
- Εκμετάλλευση νέων φυσικών φαινομένων

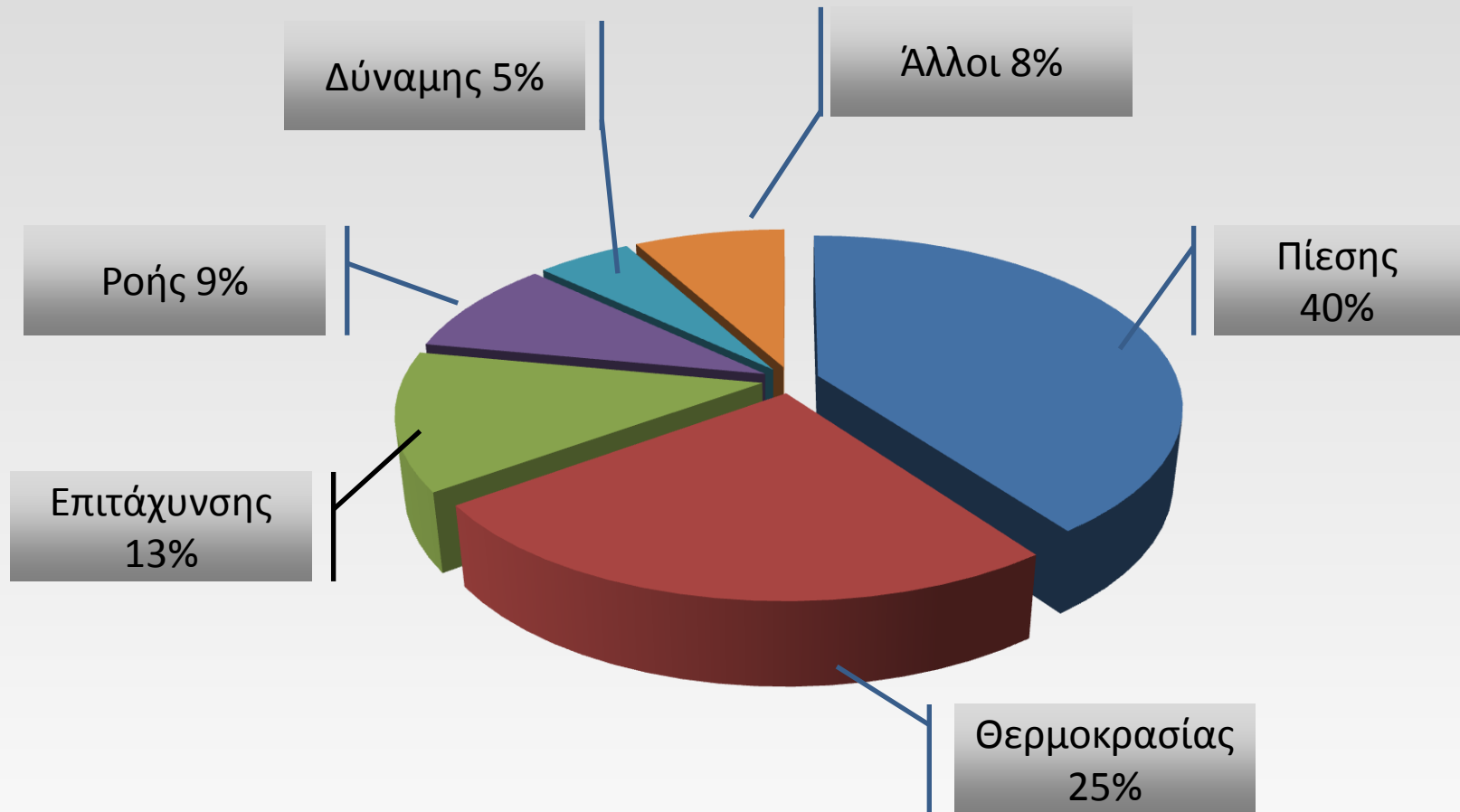
...με μια σημαντική διαφοροποίηση:

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



Sandia
National
Laboratories





Κατηγοριοποίηση αισθητήρων

1. Με βάση το μετρούμενο μέγεθος (ερέθισμα).

π.χ. αισθητήρες Ροής, αισθητήρες Πίεσης, αισθητήρες Επιτάχυνσης κ.ά.

Αισθητήρας Ροής

- Θερμικός
- Μηχανικός
- Ηλεκτρομαγνητικός
- Υπερήχων
- Άλλοι

2. Με βάση το φυσικό μέγεθος στο οποίο στηρίζεται η αρχή λειτουργίας

π.χ. Θερμικοί αισθητήρες, Χωρητικοί αισθητήρες, Μηχανικοί αισθητήρες κ.ά.

Θερμικοί αισθητήρες

- Ροής
- Θερμοκρασίας
- Υγρασίας
- Η/Μ Ακτινοβολίας
- Άλλοι

Μείωση διαστάσεων συστημάτων

Σημαντικές διαφοροποιήσεις τόσο στις ιδιότητες των υλικών όσο και στη σχετική έκταση των φαινομένων που παρατηρούνται.

- Λόγος επιφάνειας προς όγκο, S/V*
 - S/V αντιστρόφως ανάλογος της χαρακτηριστικής διάστασης του συστήματος
 - *Κυρίαρχης σημασίας τα επιφανειακά φαινόμενα*

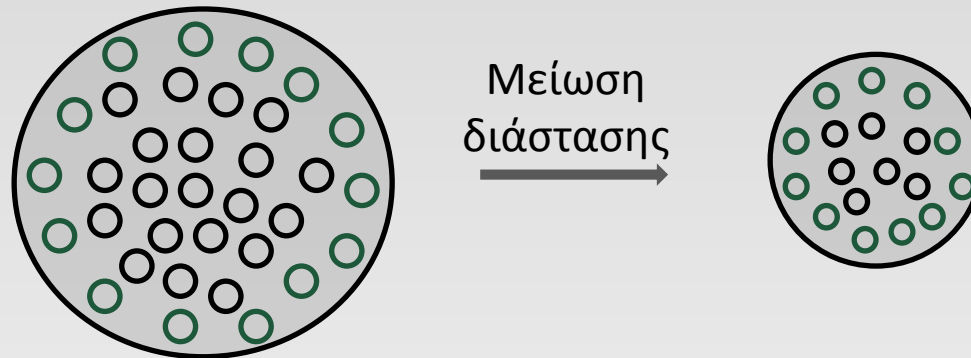
- Διάδοση θερμότητας*
 - *Μειωμένη θερμοχωρητικότητα → Αύξηση ταχύτητας*

- Χωρητικότητα*
 - *Χαμηλές τιμές χωρητικότητας ($pF - fF$)*

- Ροή*
 - *Στρωτή ροή*
 - *Microfluidics , νέα φαινόμενα (electrokinetic flow, electroosmotic flow)*

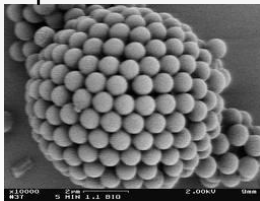
Οι κλασσικές θεωρίες της φυσικής συχνά δεν είναι σε θέση να περιγράψουν ολοκληρωμένα τα φαινόμενα της μικροκλίμακας!

Αυξημένος λόγος επιφάνειας προς όγκο, S/V



- Ο ρόλος των επιφανειακών μορίων των μικροδομών γίνεται κυρίαρχης σημασίας, σε αντίθεση με τις μακροδομές όπου τα μόρια της επιφάνειας αποτελούν αμελητέα ποσότητα σε σχέση με τα μόρια στο εσωτερικό του υλικού.
- Οι επιφανειακές δυνάμεις (δυνάμεις επαφής, δυνάμεις συνάφειας, ηλεκτρικά δίπολα, δυνάμεις van der Waals) καθίστανται γενικά πιο σημαντικές από τις δυνάμεις όγκου (π.χ. βαρυτικές).
- Τα φαινόμενα που βασίζονται στις δυνάμεις επιφάνειας κυριαρχούν στη μικροκλίμακα, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των φαινομένων που συναντώνται στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου τα οποία και υποβαθμίζονται σε σημασία, ενώ επιπλέον παρατηρείται η εμφάνιση φαινομένων χωρίς ανάλογο στη μακροκλίμακα.

Για μια σφαίρα...



$$\left. \begin{aligned} S_{sp} &= 4\pi r^2 \\ V_{sp} &= \frac{4}{3}\pi r^3 \end{aligned} \right\} \frac{S_{sp}}{V_{sp}} = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} \propto \frac{1}{r}$$

Διαδικασία Ανάπτυξης Μικροαισθητήρα



ASIC
Application
Specific
Integrated
Circuit

1. Προδιαγραφές (Specifications)

Αναφέρονται στα χαρακτηριστικά λειτουργίας του αισθητήρα

Παράδειγμα Datasheet αισθητήρα ροής

Κύριες κατηγορίες:

- Εύρος Μέτρησης (Measurement Range)
- Ευαισθησία (Sensitivity)
- Ανάλυση (Resolution)
- Θόρυβος (Noise)
- Απόκλιση από τη Γραμμικότητα (Non Linearity)
- Ταχύτητα Απόκρισης (Response Time)
- Επαναληψιμότητα (Repeatability)
- Ακρίβεια (Accuracy)
- Θερμοκρασιακή σταθερότητα (Temperature stability)
- Σταθερότητα στο χρόνο (Long Term stability)
- Τάση λειτουργίας

- + Ειδικά χαρακτηριστικά
- + Εύρος μεταβολών των πιο πάνω παραμέτρων από συσκευή σε συσκευή

ASL1600 Liquid Mass Flow Meter

SENSIRION
THE SENSOR COMPANY

1 Liquid Mass Flow Sensor Performance

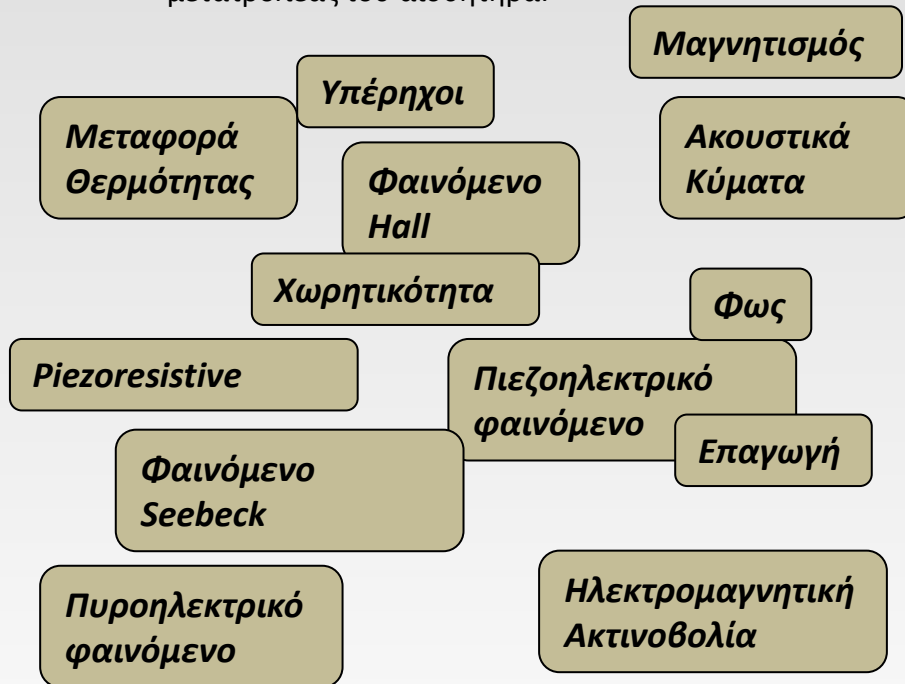
Table 1: Overview ASL1600 Liquid Flow Sensor Performance (all data for 23°C, 1 bar_{abs} unless otherwise noted).

Parameter	Condition	ASL1600-10	ASL1600-20	Units
Liquid Flow Sensor				
Maximum Flow (bi-directional)		1000	4000	μl/min
Calibrated Minimum Flow		40	200	μl/min
Accuracy [#]	Flow ≥ Calibrated Minimum Flow	3.0 ^{α,β}	3.0 ^{α,β}	% of measured value
	Flow ≤ Calibrated Minimum Flow	0.15 ^{α,β}	0.15 ^{α,β}	% of full scale
Best Resolution ^β	at calibrated min. flow	0.1	0.3 ^α	μl/min
	at maximum flow	1.5	5.0	μl/min
Pressure Drop	at maximum flow	<100	<100	Pa ^ε
Repeatability	reference conditions ^δ	<0.8	<0.8	% of measured value
Overpressure related Offset		0	0	% FS / bar
Overpressure Resistance ^ε		5	3	bar ^δ
Flow Detection Response Time		30	30	ms
Digital Sampling Time (Data Readout)	depends on resolution setting (see Table 2)	5	5	ms
Operating Temperature	avoid freezing	+0...+60	+0...+60	°C
Temperature Coefficient	25%...75% of max. flow	<0.2	<0.2	% MV / K
	<25% or >75% of max flow	<0.4	<0.4	% MV / K
Mounting Orientation Sensitivity ^ζ		<1.5	<3	% of full scale
Temperature Sensor Measures temperature inside the sensor chip, but not of the surrounding air ^η				
Dynamic Range		+10...50	+10...50	°C
Resolution		0.1	0.1	°C
Accuracy		3	3	°C

2. Αρχή λειτουργίας & Τεχνολογία κατασκευής

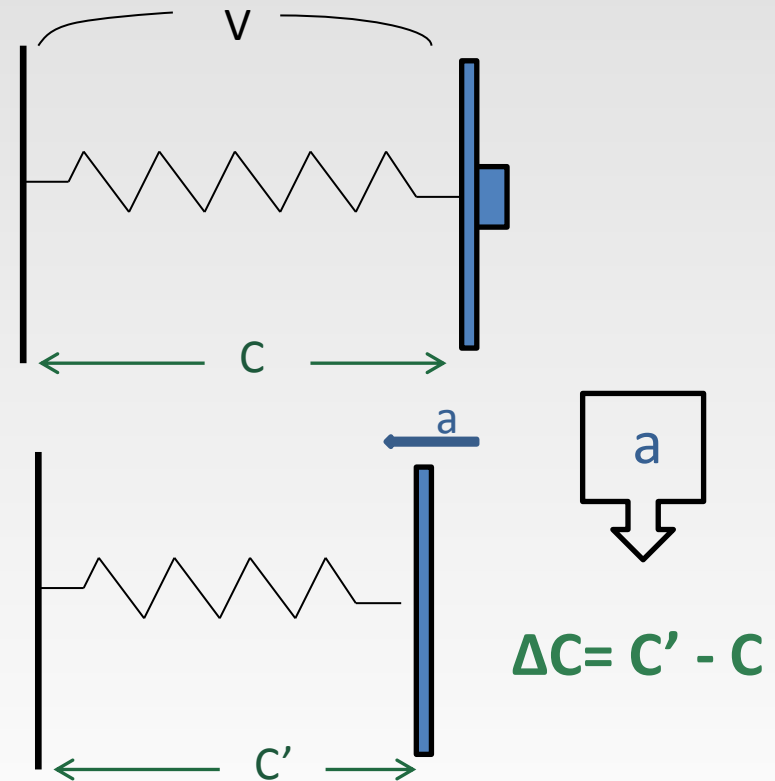
Αρχή λειτουργίας

Επιλογή της φυσικής αρχής στην οποία βασίζεται η λειτουργία του αισθητήρα, το φυσικό μέγεθος στο οποίο βασίζεται ο μετατροπέας του αισθητήρα.



- Κοινά γενικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας.
- Συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

π.χ.



2. Αρχή λειτουργίας & Τεχνολογία κατασκευής

Ανάπτυξη Τεχνολογίας κατασκευής

-Επιλογή Υλικών

Συγκεκριμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στα MEMS (*Si, poly-Si, SiO₂, Si₃N₄, Al, Pt, Au, Ti, Ni, W*)

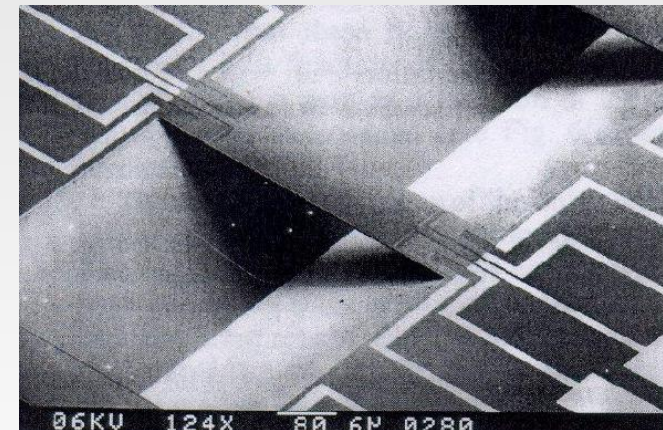
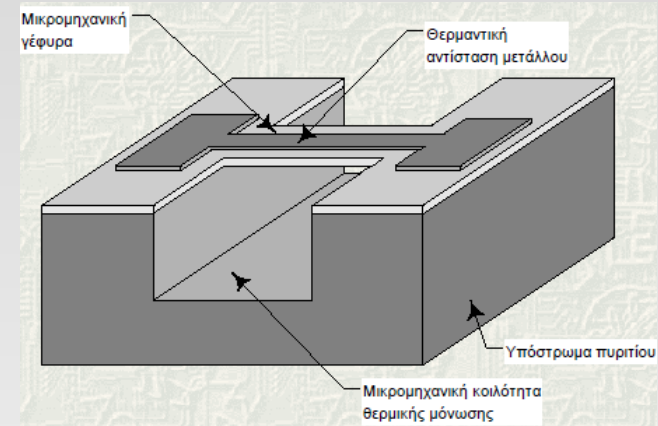
- Κυρίαρχο υλικό το Si.
- Νέες γενιές MEMS βασισμένες σε πολυμερή υλικά

-Επιλογή μεθόδων

- Συγκεκριμένες μέθοδοι διαμόρφωσης μικροδομών (bulk micromachining, surface micromachining, soft lithography κ.ά.)
- Επιλογή των δομών (π.χ. *beam, bridge, cantilever, comb*)

Εναλλακτικά:

Έρευνα πάνω σε υπάρχουσες τεχνολογίες κατασκευής. Προσαρμογή αυτών στις ανάγκες της εφαρμογής



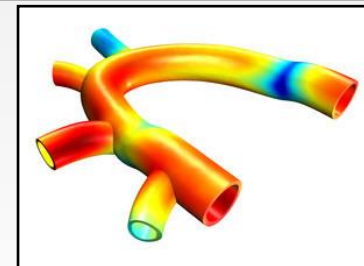
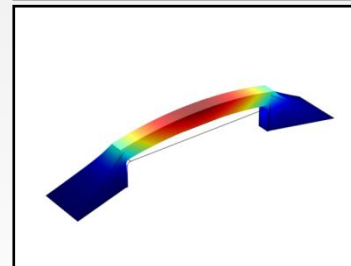
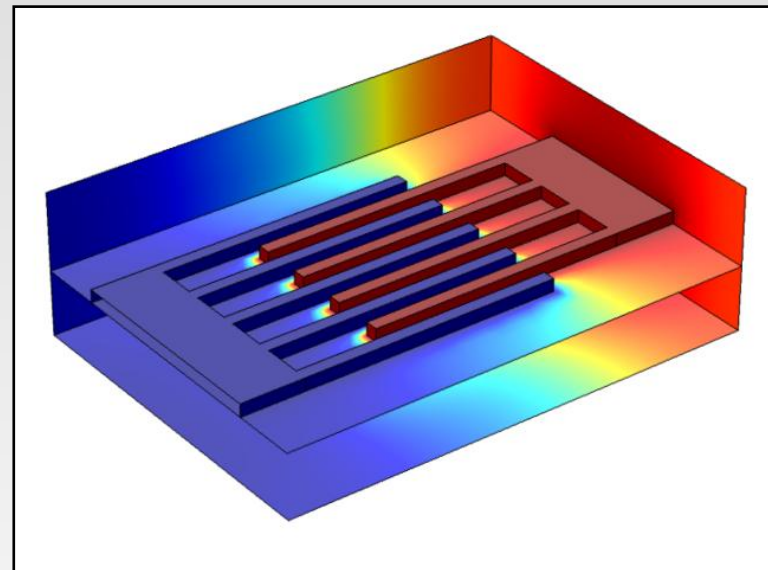
3. Προσομοίωση και Σχεδιασμός

Μεταφορά των φυσικών φαινομένων στον υπολογιστή. Υπολογισμός των πεδίων μέσω της επίλυσης των σχετικών εξισώσεων

1. Γεωμετρία
2. Φυσική του προβλήματος
Συνοριακές συνθήκες
3. Διακριτοποίηση του χώρου (*meshing*)
4. Επίλυση
5. Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Στόχος:

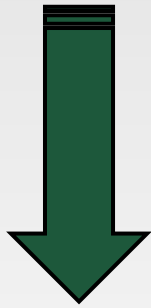
Η ακριβής πρόβλεψη της λειτουργίας του αισθητήρα.
Βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων.



3. Προσομοίωση και Σχεδιασμός

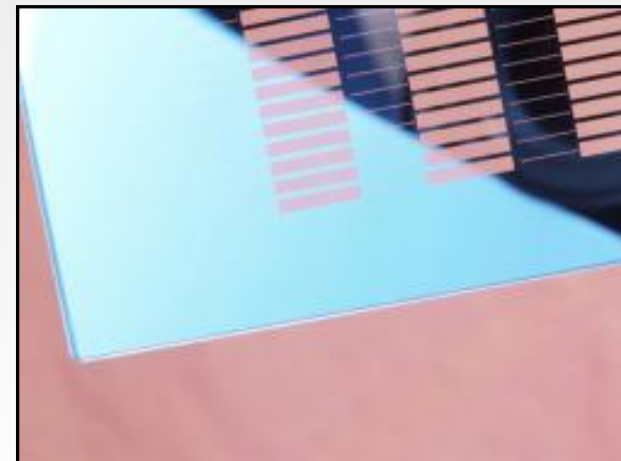
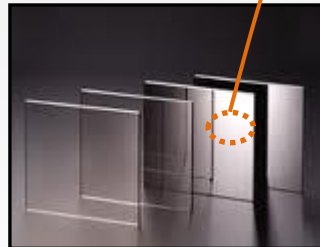
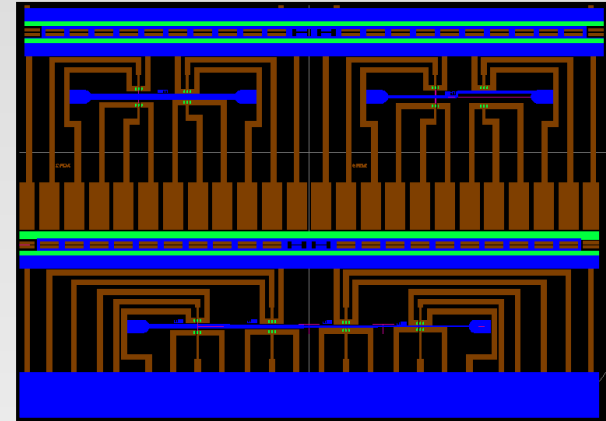
Σχεδιαστικά προγράμματα CAD

Κύριοι τύποι αρχείων: dxf, gdsII

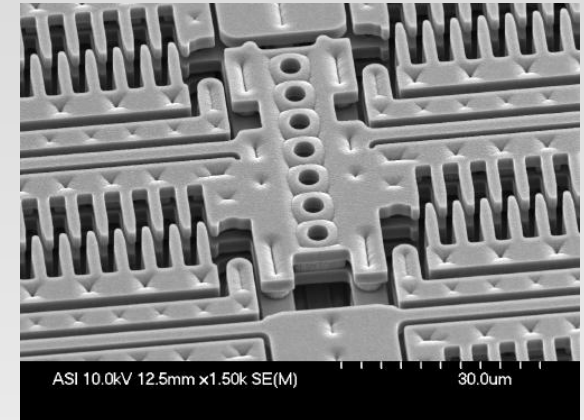
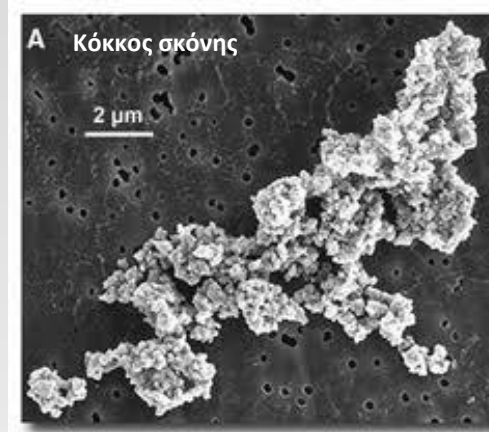
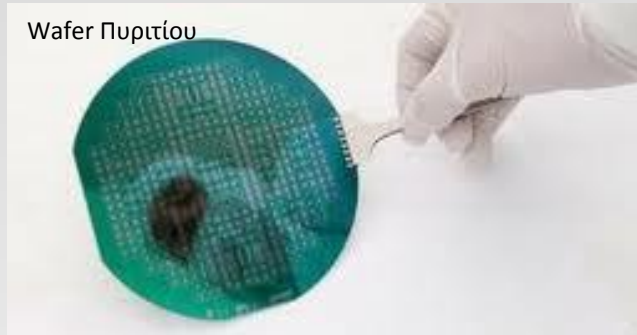


Photomasks:

Χαλαζίας (quartz)



4. Κατασκευή

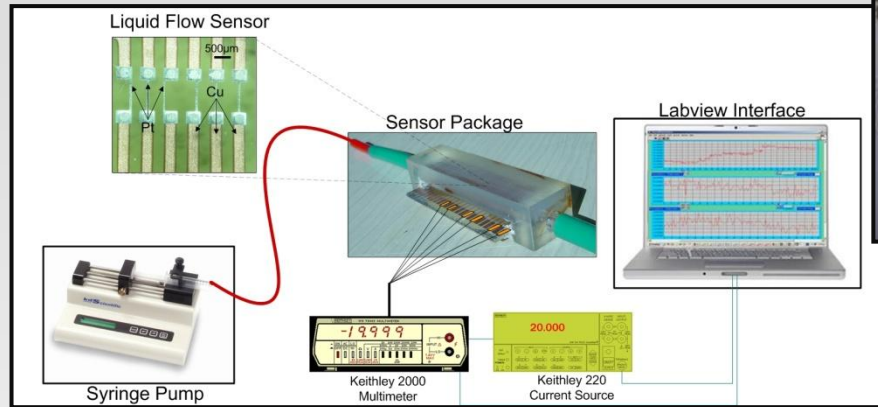


1. Μαζική παραγωγή (*Batch fabrication*)
2. Ελεγχόμενες συνθήκες
3. *Process variations*
4. *Yield*

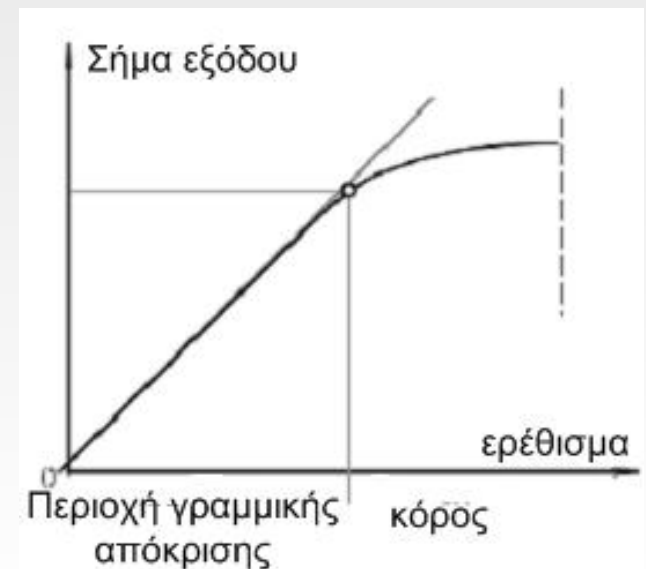
Απαίτηση για αυξημένη ακρίβεια στη μικροκλίμακα



5. Διαδικασία Μέτρησης



- Ηλεκτρική μέτρηση
- Μετρητική Διάταξη (Measurement Setup)
- Labview®
- Βαθμονόμηση (calibration)



+ ASIC

Στόχος:

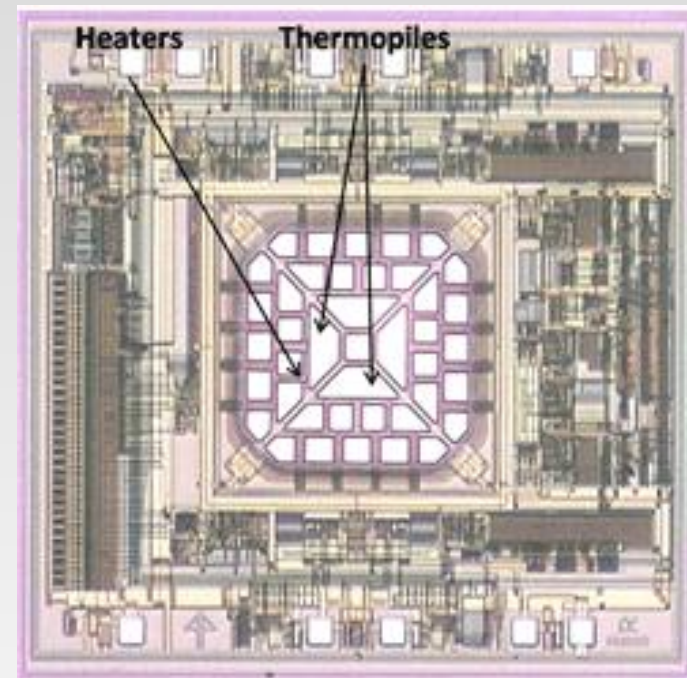
- ❑ Signal Conditioning
- ❑ Temperature compensation
- ❑ Βελτίωση Γραμμικότητας & ακρίβειας
- ❑ Μείωση Θορύβου

Τυπικά συστατικά στοιχεία:

ADC, CtoV, Φίλτρα, Μικροελεγκτές, ενισχυτές κ.ά.

Προσομοίωση λειτουργίας:

Cadence, Simulink, SPICE



MEMSIC

- 1 Προδιαγραφές
Ποιο μέγεθος θέλουμε να μετρήσουμε, μεταξύ ποιων τιμών, με τι ανάλυση, γραμμικότητα, ευαισθησία, επίπεδο θορύβου κ.ά.
- 2 Αρχή λειτουργίας & τεχνολογία κατασκευής
Επιλογή της αρχής λειτουργίας της συσκευής. Ανάπτυξη ή έρευνα αγοράς πάνω στην τεχνολογία κατασκευής.
- 3 Προσομοίωση (Simulation) & Σχεδιασμός
Προσομοίωση της λειτουργίας του αισθητήρα μέσω σχετικού software. Σχεδιασμός φωτοασκών.
- 4 Κατασκευή
Κατασκευή της διάταξης με τη χρήση ειδικευμένου εξοπλισμού εντός του clean room (καθαρός χώρος)
- 5 Διαδικασία Μέτρησης
Ανάπτυξη μετρητικής διάταξης. Λήψη, αποθήκευση, επεξεργασία, ερμηνεία μετρητικών δεδομένων.