

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ MEMS

Εισηγητής : Α.Χαδέλλης
Σπουδαστής : Ε.κομιτόπουλος
Αρ πτυχ: 1328

ΠΑΤΡΑ 2013



Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Τι είναι τα MEMS;

1.1 Γενικά	..3
1.2 Η Ιστορία των MEMS	..5
1.3 Γενική μεθοδολογία σχεδίασης MEMS	..5
1.4 Πλεονεκτήματα των MEMS	..7

Κεφάλαιο 2

Λειτουργία των MEMS

2.1 Εισαγωγή	..8
2.2 Μέθοδοι Ενεργοποίησης στα MEMS	..9
2.2.1 Ηλεκτροστατική Ενεργοποίηση	..10
2.2.2 Πιεζοηλεκτρική Ενεργοποίηση	..11
2.2.3 Θερμική Ενεργοποίηση	..11
2.2.4 Μαγνητική ενεργοποίηση	..12
2.2.5 Κράματα με Μνήμη (Shape-Memory Alloys)	..12

Κεφάλαιο 3

Σχεδιασμός ανάπτυξη και υλοποίηση των MEMS

3.1 Εισαγωγή	..13
3.2 Μέθοδοι Επεξεργασίας των MEMS	..14
3.2.1 Πιεζοωμική Επεξεργασία	..15
3.2.2 Χωρητική Επεξεργασία	..16
3.2.3 Ηλεκτρομαγνητική Επεξεργασία	..16
3.3 Τεχνικές Κατασκευής των MEMS	..17
3.3.1 Παχιά Φωτοευαίσθητα Υλικά (Thick Photoresists)	..17
3.3.2 Λιθογραφία Κλίμακας Του Γκρι (Grayscale Lithography)	..18
3.3.3 Βαθιά Χάραξη με Ενεργά Ιόντα (Deep Reactive Ion Etching – DRIE)	..19
3.4 Τεχνικές που Αναπτύχθηκαν Ειδικά για τα MEMS	..20
3.4.1 Επιφανειακή Μικρο-Διαμόρφωση (Surface Micromachining)	..20
3.4.2 Μικροδιαμόρφωση Στον Όγκο Του Πυριτίου (Bulk Micromachining)	..21
3.4.3 Διασυνδέσεις στο Δίσκο του Πυριτίου (Wafer Bonding)	..22
3.4.4 LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung)	..23
3.4.5 Ηλεκτρολυτική Επιμετάλλωση-Γαλβανισμός(Electroplating)	..24
3.4.6 Πορώδες Πυρίτιο (Porous Silicon)	..25
3.4.7 Συγκεντρωμένη Ιοντική Ακτίνα Χάραξης και Εναπόθεσης (Focused Ion Beam Etching And Deposition)	..26

Κεφάλαιο 4

4.1	Εισαγωγή	
4.2	Εμπορικά Προϊόντα	..27
4.2.1	Ιατρικός Αισθητήρας Πίεσης	..28
4.2.2	Κεφαλή Εκτυπωτών Inkjet	..29
4.2.3	Αυτόματος Αισθητήρας Αερόσακων (Επιταχυνσίμετρο)	..31
4.3	ΜικροΟπτοΗλεκτροΜηχανικά Συστήματα (MOEMS)	..33
4.3.1	Οπτικός Σαρωτής	..34
4.3.2	Συσκευές Ψηφιακών Μικροκατόπτρων (Digital Micromirror Devices)	..36
4.3.3	Ψηφιακός Οπτικός Μεταγωγέας MxN	..39
4.3.4	Οθόνες iMoD Βασισμένες σε MEMS	..40
4.3.5	Τεχνολογία Διαθλαστικών MEMS (Diffractive MEMS Technology)	..42
4.3.6	Συσκευές Αποθήκευσης MEMS	..44
4.3.7	MEMS και χάος	..49
4.4	Εφαρμογές Στην Αεροδιαστημική	..51
4.4.1	Έλεγχος Ανατάραξης	..51
4.4.2	UAVs	..51
4.5	ΒιοMEMS	..51
4.5.1	Lab-On-A-Chip	..52
4.5.2	Ιατρικές Εμπορικές Εφαρμογές	..54
4.5.3	Υπό Ανάπτυξη Συσκευές MEMS	..55
4.5.3.1	Βοηθήματα Ακοής	..56
4.5.3.2	Βοηθήματα Όρασης	..57
4.5.3.3	Νεφρό	..58

Κεφάλαιο 5

Το μέλλον των MEMS

5.1	Εισαγωγή	..59
5.2	Ζητήματα Δυσλειτουργιών	..59
5.3	Το Πρόβλημα Τυποποίησης	..61
5.4	Προτάσεις	..61

Βιβλιογραφία

..63

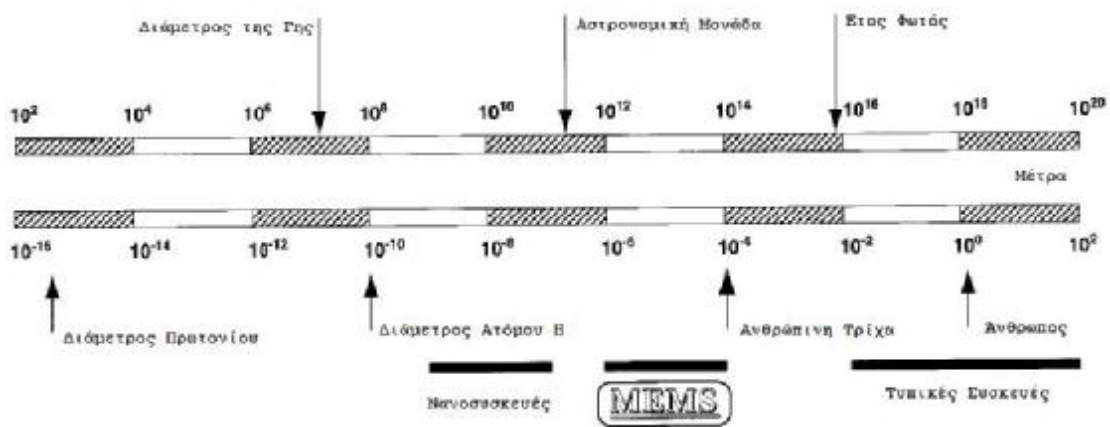
Κεφάλαιο 1

Τι είναι τα MEMS;

1.1 Γενικά

MEMS είναι ένα αρκτικόλεξο από το Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα (*MicroElectroMechanical Systems-MEMS*). Τα MEMS αναφέρονται με διαφορετικά ονόματα σε διάφορες χώρες : ονομάζονται Μικρο-Μηχανές (*Micro Machines*) στην Ιαπωνία, Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα (*MicroElectroMechanical Systems – MEMS*) και Τεχνολογία Μικρο-Συστημάτων (*MicroSystems Technology-MST*) στις ΗΠΑ, Μικρο-Μηχανική (*MicroMechanics*) και Ολική Ανάλυση Μικρο-Συστημάτων (*MicroTotal Analysis Systems-M-TAS*).

Ανεξάρτητα όμως από την ονομασία τους, ο ενοποιός παράγοντας των συσκευών MEMS είναι ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζονται. Τα μικρο-μηχανικά εξαρτήματα των MEMS κατασκευάζονται με περίπλοκους χειρισμούς του πυριτίου και άλλων υποστρωμάτων χρησιμοποιώντας διαδικασίες μικροδιαμόρφωσης.

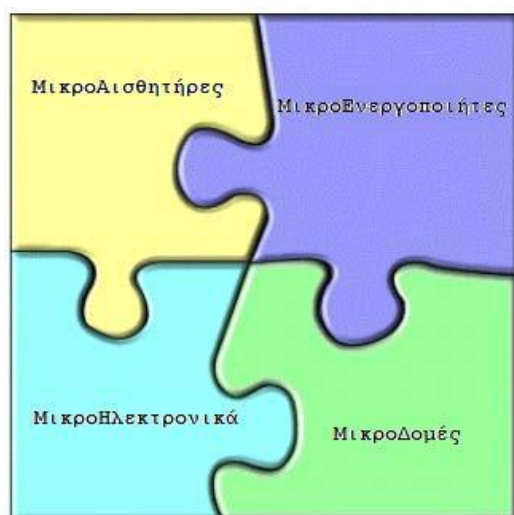


Εικόνα 1-1 : Διαστάσεις διαφόρων αντικειμένων [1].

Οι συσκευές MEMS είναι τόσο μικρές που είναι ορατές μόνο με μικροσκόπιο. Οι χαρακτηριστικές τους διαστάσεις κυμαίνονται σε μερικά μm (ένα μm είναι το ένα εκατομμυριοστό του μέτρου). Συγκριτικά, μια ανθρώπινη τρίχα έχει διάμετρο $100\mu\text{m}$.

Στην Εικόνα 1-1 φαίνονται οι διαστάσεις των MEMS συγκριτικά με άλλα αντικείμενα.

Τα MEMΣ είναι μια τεχνολογία κατασκευής. Είναι ένα παράδειγμα για το σχεδιασμό και τη δημιουργία σύνθετων μηχανικών συσκευών και συστημάτων καθώς επίσης και ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών, που χρησιμοποιούν μαζικές τεχνικές κατασκευής. Αυτές οι συσκευές (ή συστήματα) έχουν τη δυνατότητα να αισθάνονται, να ελέγχουν και να ενεργοποιούνται στη μικροκλίμακα και να παράγουν αποτελέσματα στη μακροκλίμακα. Δουλεύουν ακριβώς όπως οι άνθρωποι. Αισθάνονται, σκέφτονται και έπειτα ενεργούν σύμφωνα με τα δεδομένα.



Εικόνα 1-2 : Τα μέρη των MEMΣ [2].

Στη γενικότερη μορφή τους, τα MEMΣ κατηγοριοποιούνται σε μηχανικές μικροδομές, μικροαισθητήρες, μικροενεργοποιητές και μικροηλεκτρονικά, όλα ενσωματωμένα στο ίδιο τσιπ πυριτίου (Εικόνα 1-2). Οι αισθητήρες ανιχνεύουν τις αλλαγές στο περιβάλλον του συστήματος, μετρώντας μηχανικές, θερμικές, μαγνητικές, χημικές ή ηλεκτρομαγνητικές πληροφορίες ή άλλα φαινόμενα. Η μικροηλεκτρονική επεξεργάζεται αυτές τις πληροφορίες και δίνει σήματα στους μικροενεργοποιητές να αντιδράσουν και να προκαλέσουν αλλαγές στο περιβάλλον.

Οι τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται στα MEMΣ είναι συμβατικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) όπως η Εναπόθεση (*Deposition*), η Λιθογραφία (*Lithography*), και η Εγχάραξη/Αποτύπωση (*Etching*).

Πολλές από αυτές τις συμβατικές τεχνικές έχουν τροποποιηθεί για χάρη των MEMΣ, όπως η χρήση Παχιών Φωτοευαίσθητων Υλικών (*Thick Photoresists*), η Λιθογραφία Κλίμακας του Γκρι (*Grayscale Lithography*), ή η Βαθιά Αντιδραστική Ιοντική Εγχάραξη/Αποτύπωση (*Deep Reactive Ion Etching – DRIE*).

Άλλες διαδικασίες και τεχνικές, που δεν χρησιμοποιούνται στα συμβατικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, αναπτύχθηκαν ειδικά για τα MEMΣ, και αυτές περιλαμβάνουν

την Επιφανειακή ΜικροΔιαμόρφωση (*Surface MicroMachining*), το Γαλβανισμό (*Electroplating*), τη LIGA (το γερμανικό αρκτικόλεξο για *Lithographie, Galvansformung, Abformung*) και άλλες [2].

1.2 Η Ιστορία των MEMS

Από ένα πολύ πρόωρο όραμα στις αρχές του 1950, τα MEMS σταδιακά έχουν περάσει τα τοιχώματα των εργαστηρίων και έχουν διεισδύσει στην καθημερινότητά μας. Η πρώτη εφαρμογή MEMS ήταν ένας μετρητής πίεσης, ο οποίος εμπορευματοποιήθηκε γύρω στο 1958. Οι αισθητήρες πίεσης βασισμένοι σε πυρίτιο και τα τρανζίστορ πυλών αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του '60.

Στη δεκαετία του '70, αναπτύχθηκαν το επιταχύμετρο και το ακροφύσιο (*nozzle*) για τον εκτυπωτή Inkjet. Αυτές οι δύο συσκευές κατέχουν ένα σημαντικό μερίδιο της αγοράς, βασισμένων στο πυρίτιο, συσκευών MEMS ακόμα και σήμερα. Αργότερα αναπτύχθηκαν πολλές νέες τεχνολογίες MEMS, όπως η επιφανειακή μικροδιαμόρφωση και η LIGA, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 και του 1990.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, τα εξαρτήματα MEMS άρχισαν να εμφανίζονται σε πολυάριθμα εμπορικά προϊόντα και εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων των επιταχύμετρων, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των αερόσακων στα οχήματα, των αισθητήρων πίεσης για τις ιατρικές εφαρμογές, και των κεφαλών εκτυπωτών *Inkjet*.

Η μετέπειτα δεκαετία του '90 επιβεβαίωσε την ανάπτυξη των εφαρμογών MEMS σε διαφορετικούς τομείς όπως την οπτική, τις ραδιοσυχνότητες και τις βιολογικές επιστήμες. Σήμερα, οι συσκευές MEMS βρίσκονται επίσης στις οθόνες προβολής και στα συστήματα αποθήκευσης δεδομένων.

Τα MEMS έχουν κατακλίσει σχεδόν όλα τα επίπεδα της ζωής μας. Ένας κοινός πολίτης χρησιμοποιεί MEMS στην καθημερινή ζωή του. Εντούτοις, οι μέγιστες δυνατότητες των συσκευών MEMS βρίσκονται στις νέες εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες (οπτικές και ασύρματες), στον τομέα της βιοϊατρικής και στο τομέα διαχείρισης δεδομένων [3].

1.3 Γενική Μεθοδολογία Σχεδίασης MEMS

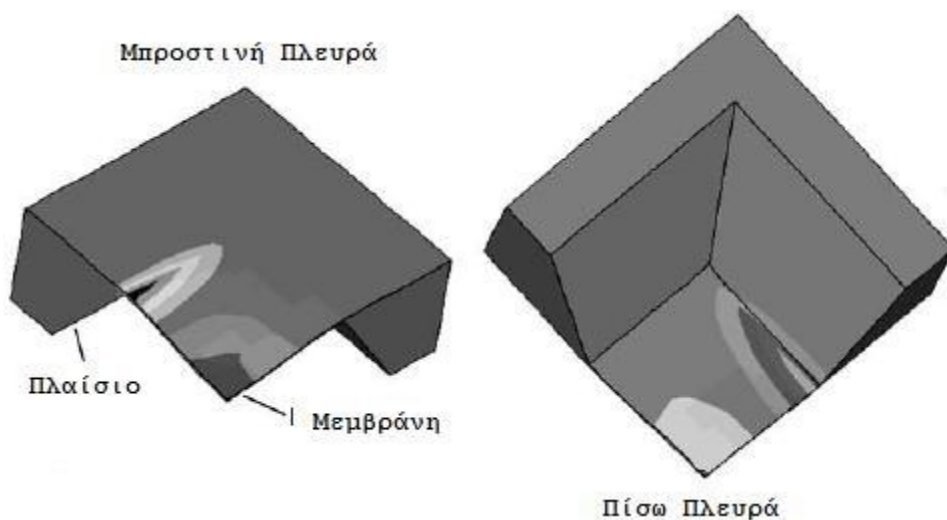
Η διαδικασία σχεδίασης των MEMS αρχίζει με τον προσδιορισμό των γενικών αρχών λειτουργίας και των γενικών δομικών στοιχείων. Στη συνέχεια προχωρά στην ανάλυση και την προσομοίωση. Έπειτα έχουμε την περιγραφή των μεμονωμένων βημάτων της

διαδικασίας επεξεργασίας. Το τελικό βήμα είναι η σχεδίαση των λιθογραφικών μασκών και ολοκληρώνεται χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα εργαλεία CAD, με σκοπό να καθοριστούν δισδιάστατα πρότυπα.

Αρχικά προσδιορίζονται οι γενικοί μηχανισμοί αντίληψης ή ενεργοποίησης, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Παραδείγματος χάριν, σε ένα μηχανικό μικροενεργοποιητή είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί πιεζοηλεκτρική ενεργοποίηση παρά ηλεκτροστατική. Η διεπιστημονική φύση του τομέα συγκεντρώνει εκτιμήσεις από μια ευρεία κλίμακα ειδικοτήτων, συμπεριλαμβανομένων της μηχανικής, της οπτικής, της επιστήμης υλικών, της ηλεκτρονικής, της χημείας, και ακόμη και των βιολογικών επιστημών.

Μεγάλο ρόλο στον καθορισμό της προσέγγισης που θα ακολουθηθεί διαδραματίζουν το κόστος καθώς και η ευκολία κατασκευής αφήνοντας κατά μέρος την απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, η μεγάλη πλειοψηφία των αισθητήρων πίεσης χρησιμοποιούν τα οικονομικώς αποδοτικά πιεζοωμικά στοιχεία αντίληψης αντί των καλύτερων σε λειτουργικότητα, αλλά ακριβότερων, δομών αντίληψης τύπου αντηχείων (*resonant-type*).

Η διαδικασία σχεδίασης περιλαμβάνει και την ανάπτυξη προτύπων εφαρμοσμένης μηχανικής, με σκοπό το σχηματισμό πιο φυσικών δομών. Χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία είναι κατάλληλα για την ανάλυση σύνθετων συστημάτων. Διάφορα διαθέσιμα προγράμματα, όπως το ANSYS® (*ANSYS, Canonsburg, Πενσυλβανία*) μπορούν και προσομοιώνουν μηχανικές, θερμικές, και ηλεκτροστατικές δομές (*Εικόνα 1-3*). Εντούτοις, όσο ισχυρά κι εάν θεωρούνται αυτά τα εργαλεία, η χρησιμότητά τους είναι αμφισβητούμενη. Προς το παρόν χρησιμοποιείται μονάχα στην απεικόνιση της λειτουργίας της συσκευής.



Εικόνα 1-3 : Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προτύπων ANSYS.

Απεικονίζεται το ένα τέταρτο του όγκου ενός αισθητήρα πίεσης πυριτίου, παρουσιάζοντας διαγράμματα μηχανικής πίεσης σε απόκριση ενός εφαρμοζόμενου φορτίου πίεσης [4].

Τελικώς, στον προγραμματισμό της διαδικασίας επεξεργασίας, οι επιλογές είναι τρεις

- Να χρησιμοποιηθεί μια λειτουργία τυποποιημένη και με προκαθορισμένη ροή διαδικασίας.
- Να χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία που επιτρέπει την επιλογή προηγούμενα αναπτυγμένων μεμονωμένων βημάτων διαδικασίας.
- Να σχεδιαστεί μια κατά παραγγελία διαδικασία συγκεκριμένη για τη συσκευή ή το σύστημα [4].

1.4 Πλεονεκτήματα των MEMS

Τα MEMS έχουν διάφορα σαφή πλεονεκτήματα ως τεχνολογία κατασκευής. Μερικά από αυτά είναι :

- Η διεπισημονική φύση της τεχνολογίας MEMS και των τεχνικών μικροδιαμόρφωσης έχουν οδηγήσει σε μια πρωτοφανή ποικιλία συσκευών. Οι προηγουμένως ανεξάρτητοι τομείς συνεργάζονται αρμονικά, για παράδειγμα, η βιολογία και η μικροηλεκτρονική παράγουν τις συσκευές BioMEMS.
- Οι μαζικές τεχνικές επεξεργασίας επιτρέπουν στα εξαρτήματα και τις συσκευές MEMS να κατασκευάζονται με ολοένα και αυξανόμενη απόδοση και αξιοπιστία.
- Επιπλέον, παρουσιάζουν μειωμένο φυσικό μέγεθος, όγκο, βάρος και κόστος, γεγονός που τα κάνει ακόμα πιο ελκυστικά.
- Παρέχουν τη βάση για την κατασκευή προϊόντων που δεν μπορούν να κατασκευαστούν με άλλες συμβατικές μεθόδους.

Αυτοί οι παράγοντες κάνουν τα MEMS κυρίαρχη τεχνολογία σε σχέση με αυτή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Εντούτοις, υπάρχουν πολλές προκλήσεις και τεχνολογικά εμπόδια που πρέπει να εξεταστούν και να υπερνικηθούν προτού να αποκαλύψουν τα MEMS τις τεράστιες δυνατότητες τους.

Επίσης τα MEMS έχουν διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με μεγαλύτερα μηχανικά εξαρτήματα.

- Είναι πιο ευαίσθητα, κινούνται γρηγορότερα, και χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια.
- Είναι φτηνότερα στην κατασκευή και μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα σε μεγάλες ποσότητες.
- Η ολοκλήρωση των MEMS με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής καθιστά δυνατό να κατασκευαστεί ένα πλήρες σύστημα πάνω σε ένα τσιπ (*complete-system-on-a-chip*) με μικρότερο μέγεθος και υψηλότερη απόδοση [4].

Κεφάλαιο 2

Λειτουργία των ΜΕΜΣ

2.1 Εισαγωγή

Στη γενικότερη τους μορφή, όπως προαναφέραμε, τα ΜΕΜΣ αποτελούνται από μηχανικές μικροδομές, μικροαισθητήρες (*micro sensors*), μικροενεργοποιητές (*micro actuators*) και μικροηλεκτρονικά, όλα ενσωματωμένα πάνω στο ίδιο τσιπ πυριτίου.

Ένας μικροαισθητήρας είναι μια συσκευή που συλλέγει συγκεκριμένες πληροφορίες από το περιβάλλον και παρέχει ένα ηλεκτρικό σήμα σε απάντηση της πληροφορίας που συνέλλεξε. Ένας μικροενεργοποιητής είναι μια συσκευή που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε ενέργεια. Μπορεί να χρησιμοποιήσει την ενέργεια αυτή για να ενεργοποιήσει τον εαυτό του ή άλλες μηχανικές συσκευές ή ακόμη να την διοχετεύσει στο περιβάλλον για να εκτελέσει κάποια χρήσιμη λειτουργία.

Οι μικροαισθητήρες ανιχνεύουν αλλαγές στο περιβάλλον του συστήματος μετρώντας μηχανικά, θερμικά, μαγνητικά, χημικά ή ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα και συλλέγουν πληροφορίες. Οι μικροαισθητήρες διοχετεύουν αυτές τις πληροφορίες στα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος. Στη συνέχεια τα μικροηλεκτρονικά στοιχεία επεξεργάζονται αυτές τις πληροφορίες και δίνουν σήμα στους μικροενεργοποιητές για να αντιδράσουν και να δημιουργήσουν κάποια μορφή αλλαγών στο περιβάλλον. Στην πραγματικότητα τα ΜΕΜΣ λειτουργούν ακριβώς όπως εμείς. Αντιλαμβάνονται, σκέφτονται, και έπειτα λειτουργούν, πάντα βάση των δεδομένων που προσέλαβαν από το περιβάλλον.

2.2 Μέθοδοι Ενεργοποίησης στα MEMS

Ενεργοποίηση	Μέγιστη Ενεργειακή Πυκνότητα	Φυσικές & Υλικές Παράμετροι	Εκτιμώμενες Συνθήκες	Τάξη (J/cm ³)
Ηλεκτροστατική	$\frac{1}{2\epsilon_0 E^2}$	E =ηλεκτρικό πεδίο ϵ_0 =διηλεκτρική σταθερά	5 V/μm	~0.10
Θερμική	$\frac{1}{2Y(\alpha\Delta T)^2}$	α =συντελεστής διαστολής ΔT =διαφορά θερμοκρασίας Y =ακέραιο υπόλοιπο Young	$3 * 10^{-6}$ 100 °C 100 GPa	~5
Μαγνητική	$\frac{1}{2B^2\mu_0}$	B =μαγνητικό πεδίο μ_0 =μαγν.διαπερατότητα	0.1 T	~4
Πιεζοηλεκτρική	$\frac{1}{2Y(\delta_{33}E)^2}$	E =ηλεκτρικό πεδίο Y =ακέρ. υπόλοιπο Young δ_{33} =πιεζοηλεκτρική σταθερά	30 V/μm 100 GPa 3×10 ⁻¹² C/N	~0.2
Κράμματα με μνήμη	-	Κρίσιμη θερμοκρασία		~10

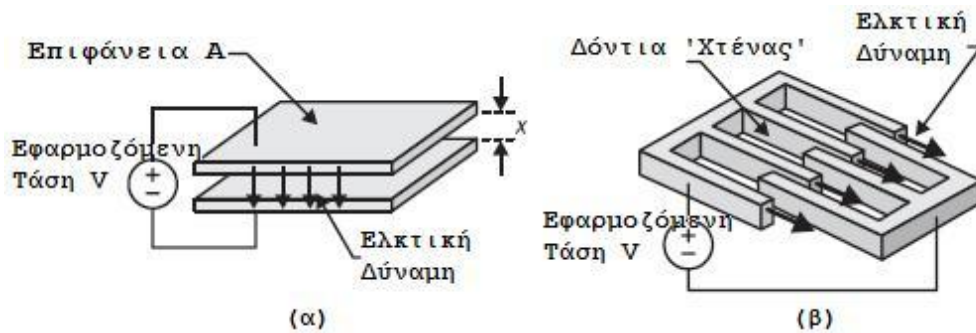
Πίνακας 2.2 : Σύγκριση των διάφορων μεθόδων ενεργοποίησης βάσει της μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας. Το πραγματικό αποτέλεσμα μπορεί να είναι χαμηλότερο ανάλογα με τη γενικότερη απόδοση του συστήματος [4].

Υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία στην επιλογή μεθόδων ενεργοποίησης στα MEMS. Αυτές είναι η ηλεκτροστατική, η πιεζοηλεκτρική, η θερμική, η μαγνητική, και η αποκατάσταση φάσης που χρησιμοποιούν τα κράμματα με μνήμη (Phase Recovery Using Shape-Memory Alloys). Η επιλογή της μεθόδου ενεργοποίησης εξαρτάται από τη φύση της εφαρμογής, την ευκολία κατασκευής, τη διαδικασία επεξεργασίας, τις λεπτομέρειες του περιβάλλοντος συστήματος και το κόστος

2.2.1 Ηλεκτροστατική Ενεργοποίηση

Η ηλεκτροστατική ενεργοποίηση στηρίζεται στην ελκτική δύναμη μεταξύ δύο αγωγικών

πλακών ή στοιχείων που φέρνουν αντίθετα φορτία. Επομένως, μια εφαρμοζόμενη τάση, ανεξάρτητα από την πολικότητά της, οδηγεί πάντα σε μια ελκτική ηλεκτροστατική δύναμη. Έτσι αν C είναι η χωρητικότητα δύο παράλληλων πλακών (Εικόνα 2-1 (α)), X είναι η απόσταση μεταξύ τους, και V είναι μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση τότε η ηλεκτροστατική δύναμη είναι $\frac{x}{2CV^2}$ (το τετράγωνο εξασφαλίζει ότι η δύναμη είναι πάντα θετική και ελκτική)



Εικόνα 2-1 : (α) Απεικόνιση ενός ηλεκτροστατικού ενεργοποιητή παράλληλων πλακών με εφαρμοζόμενη τάση V και απόσταση X . Η ελκτική δύναμη είναι κάθετη στην επιφάνεια των πλακών (β) Απεικόνιση ενός ηλεκτροστατικού ενεργοποιητή "χτένα". Η ελκτική δύναμη είναι προς την κατεύθυνση των δοντιών [4].

Ο ηλεκτροστατικός ενεργοποιητής "χτένα" είναι μια παραλλαγή που περιλαμβάνει δύο σύνολα χτενών, τα "δόντια" μπαίνουν το ένα μέσα στο άλλο (Εικόνα 2-1 (β)). Η εφαρμοζόμενη τάση φέρνει τις δύο χτένες κοντά έτσι ώστε τα δόντια της μίας να εναλλάσσονται με τα δόντια της άλλης.

Οι ενεργοποιητές "χτένας" προτιμώνται από τους ενεργοποιητές παράλληλων πλακών για δύο βασικούς λόγους :

- επιτρέπουν μεγαλύτερη μετατόπιση (της τάξης των δεκάδων μικρομέτρων) και
- η δύναμη είναι σχετικά ανεξάρτητη από τη μετατόπιση.

Εντούτοις, οι δυνάμεις είναι της ίδιας κλίμακας με τις δυνάμεις στις παράλληλες πλάκες με την ίδια τετραγωνική εξάρτηση από την τάση

Μια φυσική επέκταση της ηλεκτροστατικής ενεργοποίησης είναι η ανατροφοδότηση κλειστών βρόγχων. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι αναπόσπαστο τμήμα στη λειτουργία κλειστών βρόγχων πολλών επιταχύνων και αισθητήρων [4].

2.2.2 Πιεζοηλεκτρική Ενεργοποίηση

Η πιεζοηλεκτρική ενεργοποίηση μπορεί να παρέχει σημαντικά μεγάλες δυνάμεις, ειδικά εάν χρησιμοποιούνται παχιές πιεζοηλεκτρικές ταινίες. Οι εμπορικά διαθέσιμοι πιεζοκεραμικοί κύλινδροι παρέχουν δυνάμεις μέχρι μερικά Newton για εφαρμοζόμενες τάσεις της τάξης των μερικών εκατοντάδων *Volt*. Ενώ, οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές λεπτών ταινιών παρέχουν δυνάμεις μερικών mNewton.

Τόσο οι πιεζοηλεκτρικές και οι ηλεκτροστατικές μέθοδοι προσφέρουν το πλεονέκτημα της μικρής κατανάλωσης ισχύος δεδομένου ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται είναι πολύ μικρό [4].

2.2.3 Θερμική Ενεργοποίηση

Η θερμική ενεργοποίηση καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από την ηλεκτροστατική ή πιεζοηλεκτρική ενεργοποίηση αλλά μπορεί να παρέχει δυνάμεις ενεργοποίησης εκατοντάδων mNewtons ή και υψηλότερες. Τουλάχιστον τρεις σαφείς προσεγγίσεις έχουν προκύψει εντός της κοινότητας των MEMS. πρώτη εκμεταλλεύεται τη διαφορά των συντελεστών της θερμικής διαστολής μεταξύ δύο ενωμένων στρωμάτων ανόμοιων υλικών, προκαλώντας την κάμψη αυτών με την άνοδο της θερμοκρασία. Το ένα στρώμα διαστέλλεται περισσότερο από το άλλο καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, γεγονός που οδηγεί στην κάμψη. Το ποσό της κάμψης εξαρτάται από τη διαφορά των συντελεστών της θερμικής διαστολής και την απόλυτη θερμοκρασία. Σε μια άλλη προσέγγιση γνωστή ως θερμομηχανική ενεργοποίηση των αερίων (*thermopneumatic*), ένα υγρό θερμαίνεται μέσα σε μια αεροστεγώς σφραγισμένη κοιλότητα. Η πίεση από τη διαστολή ή την εξάτμιση ασκεί μια δύναμη στα τοιχώματα της κοιλότητας, τα οποία μπορούν να λυγίσουν. Αυτή η μέθοδος εξαρτάται επίσης από την απόλυτη θερμοκρασία του ενεργοποιητή και χρησιμοποιείται σε πολλές βαλβίδες.

Μια τρίτη ευδιάκριτη μέθοδος χρησιμοποιεί μια αιρούμενη δοκό ομοιογενούς υλικού όπου το ένα άκρο της δένεται σε ένα ενισχυτικό πλαίσιο του ίδιου υλικού. Η θέρμανση της δοκού σε μια θερμοκρασία πάνω από αυτή του πλαισίου προκαλεί επιμήκυνση του ελεύθερου άκρους της δοκού αναφορικά με το πλαίσιο. Κρατώντας αυτό το ελεύθερο άκρο σταθερό προκαλείται μια δύναμη ανάλογη προς τη διαφορά μήκους και θερμοκρασίας της δοκού. Ένας τέτοιος ενεργοποιητής αποδίδει μέγιστη δύναμη με μηδενική μετατόπιση, και αντιθέτως, καμία δύναμη όταν η μετατόπιση είναι μέγιστη [4].

2.2.4 Μαγνητική ενεργοποίηση

Οι δυνάμεις *Lorentz* διαμορφώνουν τον κυρίαρχο μηχανισμό στη μαγνητική ενεργοποίηση. Ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα αγώγιμο στοιχείο που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο προκαλεί μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη —τη δύναμη *Lorentz*— που είναι κάθετη στο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Αυτή η δύναμη είναι ανάλογη προς την πυκνότητα της μαγνητικής ροής, και το μήκος του στοιχείου. Ένας αγωγός 1mm που φέρνει φορτίο 10mA σε ένα μαγνητικό πεδίο 1T υπόκειται σε μια δύναμη $10\mu\text{N}$. Οι δυνάμεις *Lorentz* είναι χρήσιμες για την ανατροφοδότηση κλειστών βρόγχων στα συστήματα [4].

2.2.5 Κράματα με Μνήμη (Shape-Memory Alloys)

Τέλος, από τους πέντε τρόπους ενεργοποίησης, το κράμα με μνήμη προσφέρει αναμφισβήτητη την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, διαθέσιμη για ενεργοποίηση. Το φαινόμενο μπορεί να παρέχει πολύ μεγάλες δυνάμεις όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του υλικού πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία.

Μικρές αλλαγές στη σύνθεση του κράματος μπορεί να προκαλέσουν δραματικές αλλαγές στην απόλυτη θερμοκρασία. Έτσι, επιδιώκεται μια σύνθεση κραμάτων 50% νικέλιο και 50% τιτάνιο, ποσοστό επί του ατομικού τους $_{100}$ βάρους, όπου η απόλυτη θερμοκρασία είναι γύρω στους $^{\circ}$. Η απόλυτη θερμοκρασία ενός κράματος μπορεί να καθοριστεί μέσω της διαφορικής θερμιδομέτρησης.

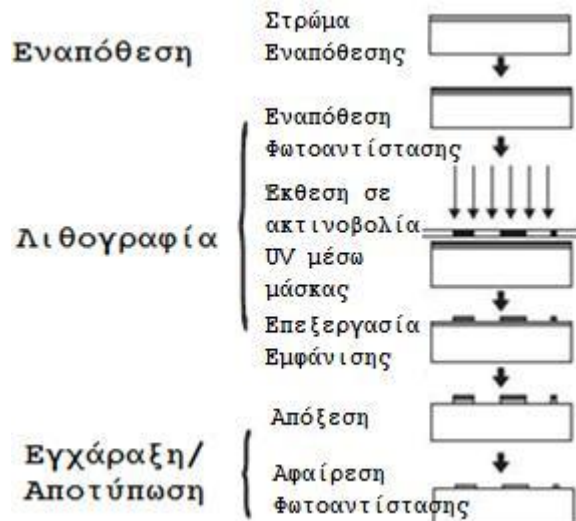
Η πρόκληση με τα κράματα μνήμης βρίσκεται στην δυσκολία επεξεργασίας τους με τις συμβατικές διαδικασίες κατασκευής πυριτίου [6].

Κεφάλαιο 3

Μέθοδοι Κατασκευής

3.1 Εισαγωγή

Οι τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται στα ΜΕΜΣ είναι οι ίδιες συμβατικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) καθώς και τεχνικές που αναπτύχθηκαν ειδικότερα για τα ΜΕΜΣ. Τα τρία απαραίτητα στοιχεία στη συμβατική επεξεργασία πυριτίου είναι η Εναπόθεση (*Deposition*), η Λιθογραφία (*Lithography*), και η Εγχάραξη/αποτύπωση (*Etching*). Αυτά φαίνονται στην Εικόνα 3-1.



Εικόνα 3-1 : Απεικόνιση της διαδικασίας εναπόθεσης, λιθογραφίας, και εγχάραξης/αποτύπωσης [7].

Οι πιο συνηθισμένες διαδικασίες εναπόθεσης είναι η Οξείδωση (*Oxidation*), η Χημική Εναπόθεση Ατμού (*Chemical Vapor Deposition-CVD*), η Επίταξη (*Epitaxy*), η Φυσική Εναπόθεση Ατμού (*Physical Vapor Deposition-PVD*), η Διάχυση (*Diffusion*), και η Ιονική Εμφύτευση (*Ion Implantation*).

Στη λιθογραφία χρησιμοποιούνται είτε η Οπτική Δέσμη (*Optical Beam*) είτε η Δέσμη Ηλεκτρονίων, (*Electron Beam*) και η Εγχάραξη/Αποτύπωση γίνεται είτε με Υγρή Χημική Εγχάραξη/Αποτύπωση (*Wet Chemical Etch Process*), είτε με Ξηρά Χημική Εγχάραξη/Αποτύπωση (*Dry Chemical Etch Process*).

Πολλές από αυτές τις συμβατικές τεχνικές έχουν τροποποιηθεί για χάρη των MEMΣ. Για παράδειγμα, η χρήση Παχιών Φωτοευαίσθητων Υλικών (*Thick Photoresists*), η Λιθογραφία Κλίμακας του Γκρι (*Grayscale Lithography*), ή η Βαθιά Αντιδραστική Ιοντική Εγχάραξη/Αποτύπωση (*Deep Reactive Ion Etching-DRIE*).

Άλλες διαδικασίες και τεχνικές αναπτύχθηκαν ειδικά για τα MEMΣ, και περιλαμβάνουν την Επιφανειακή Μικρό-Διαμόρφωση (*Surface MicroMachining*), τις Διασυνδέσεις Δίσκου Πυριτίου (*Wafer Bonding*), το Τύπωμα Φιλμ Μεγάλου Πλάτους (*Thick-Film Screen Printing*), το Γαλβανισμό (*Electroplating*), το πορώδες πυρίτιο (*Porous Silicon*), τη LIGA (το γερμανικό αρκτικόλεξο για *Lithographie Galvansformung Abformung*), και τη Χάραξη και Εναπόθεση Εστιασμένης Ιοντικής Δέσμης (*Focused Ion Beam Etching and Deposition*).

3.2 Μέθοδοι Επεξεργασίας των MEMΣ

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας. Αυτό όμως που διακρίνει την πιεζοωμική, χωρητική και ηλεκτροστατική μέθοδο, και τις καθιστά κατάλληλες για τα MEMΣ είναι η δυνατότητα να αντιλαμβάνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα καθώς και η αξιοσημείωτη λειτουργικότητά τους.

Ο στόχος των μεθόδων επεξεργασίας είναι η μετατροπή μιας συγκεκριμένης φυσικής παραμέτρου σε ηλεκτρική ενέργεια. Περιστασιακά, πραγματοποιείται ένα ενδιάμεσο βήμα μετατροπής. Παραδείγματος χάριν, η πίεση ή η επιτάχυνση μετατρέπονται σε μηχανική πίεση, η οποία μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ίσως ο πιο κοινός όλων των τεχνικών αντίληψης είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας την εξάρτηση των ιδιοτήτων των διάφορων υλικών από τη θερμοκρασία.

3.2.1 Πιεζοωμική Επεξεργασία

Πιεζοωμική	Χωρητική	Ηλεκτρομαγνητική
Απλή επεξεργασία	Απλή μηχανική δομή	Η δομική πολυπλοκότητα ποικίλλει
Χαμηλό κόστος	Χαμηλό κόστος	Σύνθετη συσκευασία
Οδήγηση τάσης ή ρεύματος	Οδήγηση τάσης	Οδήγηση ρεύματος
Απλά κυκλώματα μέτρησης	Απαιτεί ηλεκτρονικά κυκλώματα μέτρησης	Απλά κυκλώματα ελέγχου
Χαμηλής απόδοσης αντίσταση	Ευαίσθησία στο EMI	Ευαίσθησία στο EMI
Εξάρτηση από Θερμοκρασία	Μικρή εξάρτηση από θερμοκρασία	Μικρή εξάρτηση θερμοκρασίας
Μικρή ευαισθησία	Μεγάλη δυναμική περιοχή	Ευαισθησία ∞ μαγνητικό πεδίο
Μη ευαισθησία σε παρασιτική αντίσταση	Ευαίσθησία σε παρασιτική χωρητικότητα	Μη ευαισθησία σε παρασιτική αυτεπαγωγή
Ανοικτός βρόγχος	Ανοικτός ή κλειστός βρόγχος	Ανοικτός ή κλειστός βρόγχος
Μέση κατανάλωση ισχύος	Μικρή κατανάλωση ισχύος	Μέση κατανάλωση ισχύος

Πίνακας 2.1 : Οι σχετικές αξίες της πιεζοωμικής, χωρητικής, και ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου αντίληψης [4].

Το πυρίτιο παρουσιάζει πιεζοωμική συμπεριφορά (Πίνακας 2.1). Η μέτρηση της αλλαγής στην αντίσταση και η ενίσχυση του αντίστοιχου παραγόμενου σήματος είναι απλές και απαιτούν βασική γνώση των αναλογικών κυκλωμάτων.

Η αντίσταση του πυριτίου αλλάζει όχι μόνο λόγω της πίεσης που εξαρτάται από την αλλαγή της γεωμετρίας, αλλά και λόγω της πίεσης που εξαρτάται από την αντίσταση του υλικού. Αυτό οδηγεί σε μεγέθη δύο φορές μεγαλύτερα από εκείνα που παρατηρούνται στα μέταλλα.

Ένα μειονέκτημα της πιεζοωμικής συμπεριφοράς του πυριτίου είναι η ισχυρή εξάρτησή του από τη θερμοκρασία, η οποία πρέπει να αντισταθμιστεί χρησιμοποιώντας εξωτερικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα [4], [5].

3.2.2 Χωρητική Επεξεργασία

Σε αντίθεση, η χωρητική αντίληψη στηρίζεται σε μια εξωτερική φυσική παράμετρο που αλλάζει είτε το διάστημα είτε τη σχετική διηλεκτρική σταθερά μεταξύ των δύο πλακών ενός πυκνωτή. Παραδείγματος χάριν, μια εφαρμοζόμενη επιτάχυνση ωθεί τη μία πλάκα πιο κοντά στην άλλη.

Τα πλεονεκτήματα της χωρητικής αντίληψης είναι η πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος και η σχετική σταθερότητα με τη θερμοκρασία. Γενικά, η χωρητική αντίληψη απαιτεί εξωτερικά ηλεκτρονικά για να μετατρέψει τις μικρές αλλαγές της χωρητικότητας σε τάση [4].

3.2.3 Ηλεκτρομαγνητική Επεξεργασία

Αυτή η προσέγγιση αντίληψης χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά σήματα για να ανιχνεύσει και να μετρήσει μια φυσική παράμετρο. Οι μαγνητικοί-αντιστασιακοί αισθητήρες στις κεφαλές ανάγνωσης των δίσκων υπολογιστών μετρούν την αλλαγή στην αγωγιμότητα του δίσκου σε απόκριση του μαγνητικού πεδίου ενός τμήματος αποθήκευσης. Μια άλλη μορφή ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής χρησιμοποιεί το νόμο του Faraday για να ανιχνεύσει την κίνηση ενός αγωγού που μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.

Ο έλεγχος των ηλεκτρονικών για τους μαγνητικούς αισθητήρες μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα χρησιμοποιώντας τη σύγχρονη τεχνολογία CMOS, αλλά η παραγωγή μαγνητικών πεδίων απαιτεί συχνά την παρουσία ενός μόνιμου μαγνήτη ή ενός σωληνοειδούς [4].

3.3 Τεχνικές Κατασκευής των MEMS

3.3.1 Παχιά Φωτοευαίσθητα Υλικά (Thick Photoresists)

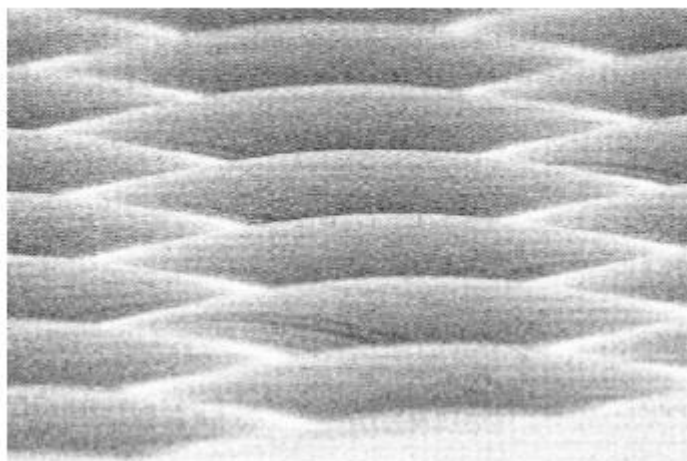
Υπάρχουν διάφορα διαθέσιμα παχιά φωτοευαίσθητα υλικά ακτινοβολίας UV και χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Στη συμβατική επεξεργασία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το πάχος του φωτοαντιστάτη, που έχει επιστρωθεί με τη μέθοδο της περιστροφικής επικάλυψης στο δίσκο πυριτίου, είναι της τάξης του ενός μικρού (μm). Το πάχος, εντούτοις, μπορεί να αυξηθεί με την επιβράδυνση της ταχύτητας περιστροφής, και μπορούν να ληφθούν παχύτερα στρώματα έως 60 μm με την επανάληψη της διαδικασίας για να σχηματιστούν πολλαπλά επίπεδα.

Μια διαδεδομένη τεχνική φωτοευαίσθητων υλικών είναι η τεχνική SU-8. Σε αυτή χρησιμοποιείται ως φωτοαντιστάτης μια ειδική ρητίνη με την ονομασία SU-8. Οι δίσκοι πυριτίου μπορούν να επικαλυφθούν με στρώματα του SU-8 με μεγάλο πάχος ($>500\mu\text{m}$) και στη συνέχεια να εφαρμοστεί η τυπική διαδικασία φωτολιθογραφίας. Το σημαντικό είναι ότι η μέθοδος αυτή δίνει πολύ καλά αποτελέσματα με τη δημιουργία κατακόρυφων τοιχωμάτων, ενώ ταυτόχρονα η διαδικασία είναι αρκετά εύκολη και έχει χαμηλό κόστος, κάτι που την κάνει ελκυστική ως εναλλακτική τεχνική της LIGA [12].

3.3.2 Λιθογραφία Κλίμακας Του Γκρι (*Grayscale Lithography*)

Είναι μια τεχνική με την οποία μπορούν να αποτυπωθούν τοπογραφικά διάφορα πρότυπα με τη χρήση φωτοαντιστατών. Το ποσό του φωτοευαίσθητου υλικού που αφαιρείται κατά την επεξεργασία εμφάνισης εξαρτάται από την έκθεση σε Joules ανά τετραγωνικό μέτρο.

Η έκθεση στα διαφορετικά σημεία του φωτοαντιστάτη μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα του γκρι στη μάσκα. Ο αριθμός γκριζών επιπέδων που μπορούν να επιτευχθούν κυμαίνεται στα 300. Στην πράξη, είναι ικανοποιητικά 30 γκριζα επίπεδα για τις περισσότερες εφαρμογές. Θεωρητικά, η αποτύπωση των διαφόρων προτύπων πάνω στο φωτοαντιστάτη μπορεί να μεταφερθεί στο υπόστρωμα με μια από τις διαδικασίες χάραξης. Μια εφαρμογή αυτής της τεχνικής είναι η κατασκευή μικροφακών και πινάκων μικροφακών όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-8 [7].

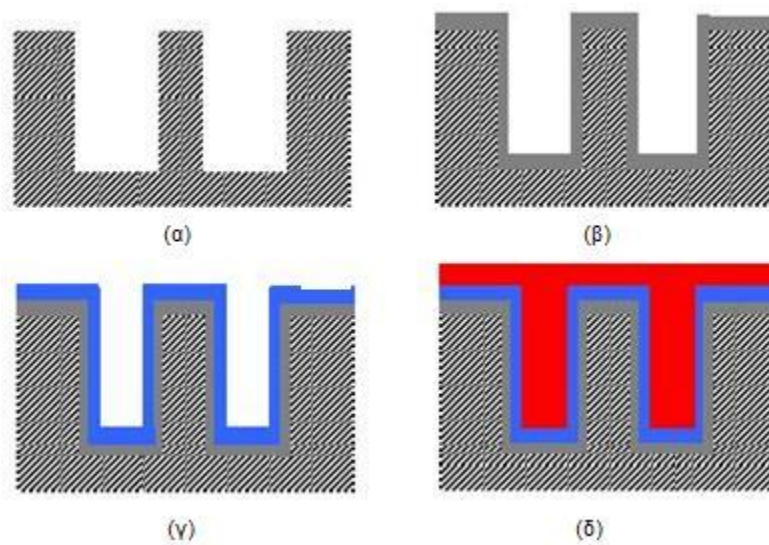


Εικόνα 3-8 : Πίνακας μικροφακών χρησιμοποιώντας λιθογραφία κλίμακας του γκρι [7].

3.3.3 Βαθιά Χάραξη με Ενεργά Ιόντα

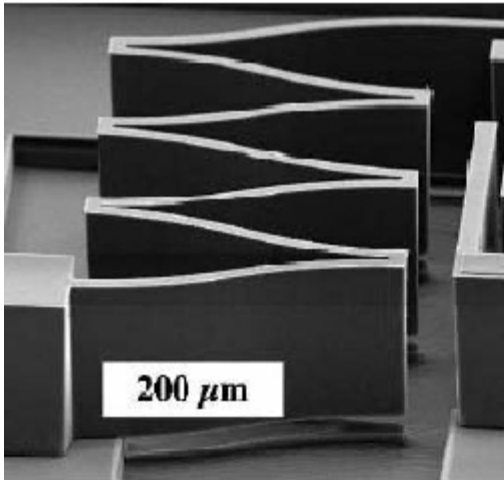
(Deep Reactive Ion Etching – DRIE)

Η μέθοδος DRIE χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πηγαδιών με μεγάλο βάθος και κατακόρυφα τοιχώματα μέσα στο υπόστρωμα (Εικόνα 3-9(α)). Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται ιόντα που αφαιρούν το υλικό από την επιλεγμένη περιοχή. Στη συνέχεια γίνεται οξείδωση του υποστρώματος (β), επεξεργασία εμφάνισης ενδιάμεσου υμενίου (γ) και τέλος γίνεται εναπόθεση Ni ή άλλου μαγνητικού υλικού που «γεμίζει» την περιοχή (δ) [4].

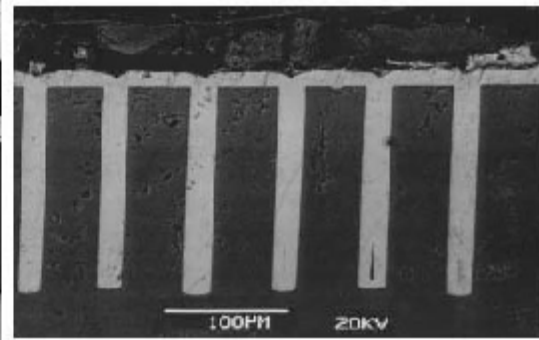


Εικόνα 3-9 : Τεχνική DRIE [4].

Στις Εικόνα 3-10 και Εικόνα 3-11 φαίνονται διαμορφώσεις που έγιναν με τη μέθοδο DRIE. Είναι σαφής η ακρίβεια της μεθόδου, τα κατακόρυφα τοιχώματα και ο υψηλός λόγος της κατακόρυφης διάστασης προς τις άλλες δύο.



Εικόνα 3-10 : Διαμόρφωση που προέκυψε με τη μέθοδο DRIE [4].



Εικόνα 3-11 : Φωτογραφία με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) διαμόρφωσης που προέκυψε με τη μέθοδο DRIE [4].

3.4 Τεχνικές που Αναπτύχθηκαν Ειδικά για τα MEMS

3.4.1 Επιφανειακή Μικροδιαμόρφωση (Surface Micromachining)

Η επιφανειακή μικροδιαμόρφωση του πυριτίου γίνεται με τεχνικές φωτολιθογραφίας. Σε αυτήν το υπόστρωμα του πυριτίου έχει κυρίως το ρόλο της στερεής βάσης όπου αναπτύσσονται και διαμορφώνονται τα MEMS. Χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου χρησιμοποιείται επιφανειακή μικροδιαμόρφωση είναι στην κατασκευή μικροδοκών, οι οποίες έχουν το ένα τους άκρο ελεύθερο και το άλλο δεσμευμένο (Cantilever beams - [Εικόνα 3-12](#)) [13].

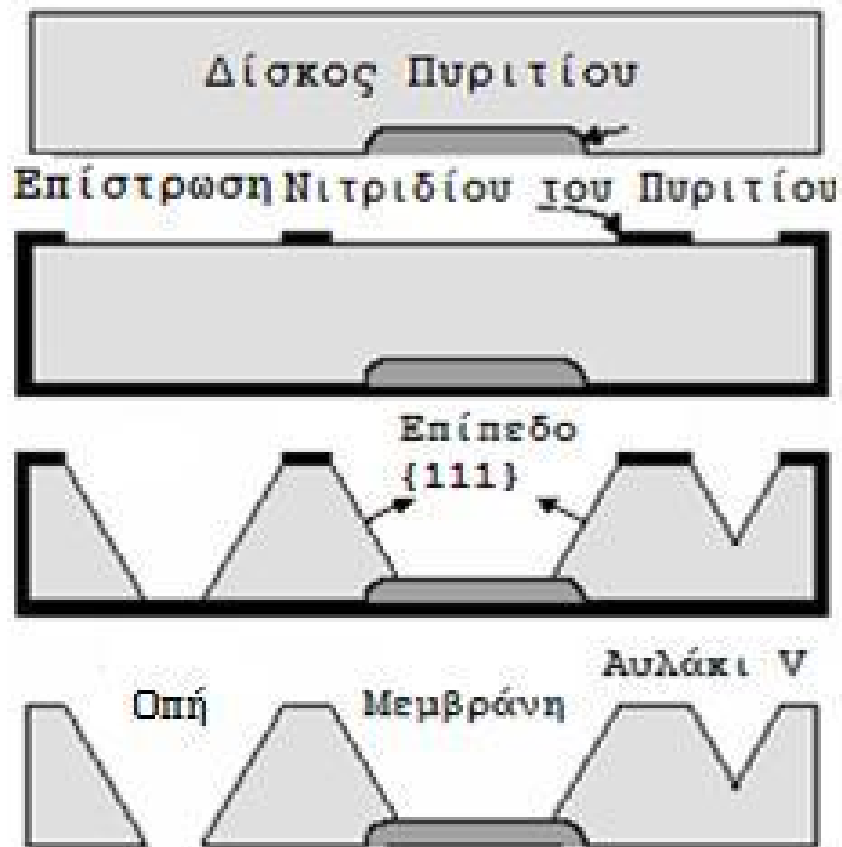


Εικόνα 3-12 : Διαδικασία κατασκευής μικρο-δοκών με επιφανειακή κατεργασία του υποστρώματος [14].

3.4.2 Μικροδιαμόρφωση Στον Όγκο Του Πυριτίου

(Bulk Micromachining)

Στη μικροδιαμόρφωση στον όγκο του πυριτίου (Bulk Micromachining) το υπόστρωμα υπόκειται σε διάφορες κατεργασίες, όπως είναι η ανισότροπη χάραξη (Anisotropic Etching). Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία δομών μέσα στο υπόστρωμα πυριτίου, όπως κοιλότητες με σχήμα πυραμίδας, ανοίγματα σε σχήμα “V”, κανάλια κ.ά. (Εικόνα 3-13). Αυτές οι διαμορφώσεις παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των εκάστοτε MEMS [13].



Εικόνα 3-13 : Μικρο-διαμόρφωση στον όγκο του Si και χαρακτηριστικές κατασκευές [14].

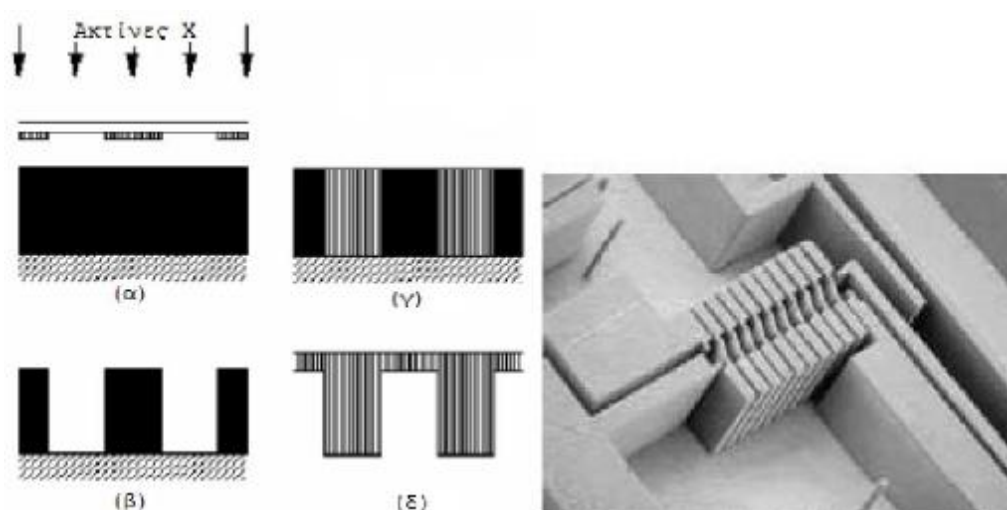
3.4.3 Διασυνδέσεις στο Δίσκο του Πυριτίου (*Wafer Bonding*)

Υπάρχουν πολλές διαδικασίες διασύνδεσης που είναι διαθέσιμες σήμερα, και η επιλογή της καταλληλότερης εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Οι διαδικασίες διασύνδεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της διαδικασίας κατασκευής των MEMS.

Σημαντικό ρόλο παίζει η καθαρότητα της επιφάνειας καθώς τα μόρια των υλικών που παγιδεύονται μεταξύ των δίσκων πυριτίου μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό κενών και τελικά στην αποτυχία του συνδέσμου. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η τάση παραμόρφωσης που δημιουργείται με τη διαδικασία αυτή. Για αυτόν το λόγο τα υλικά που διασυνδέονται καθώς και το υλικό που χρησιμοποιείται για τη σύνδεσή τους, αν υπάρχει, πρέπει να διαφέρουν θερμικά κατά τον ελάχιστο βαθμό, διαφορετικά οι αλλαγές της θερμοκρασίας θα οδηγήσουν σε εφαρμοζόμενη τάση στις διατάξεις. Τέλος, οι δεσμοί πρέπει επίσης να είναι σταθεροί καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της διάταξης και να είναι αρκετά ισχυροί ώστε να αντιστέκονται σε οποιαδήποτε τάση παραμόρφωσης θα υποστεί η διάταξη [7], [15].

3.4.4 LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung)

Η LIGA είναι μια μέθοδος που βασίζεται στη χρήση επιστρώσεων φωτοαντιστατών με μεγάλο πάχος ($>1\text{mm}$) και ακτίνων-X υψηλής ενέργειας ($\sim 1\text{GeV}$). Πρόκειται δηλαδή για μια λιθογραφική μέθοδο (Εικόνα 3-14(α), (β)). Μετά την πραγματοποίηση της επιθυμητής διαμόρφωσης μπορεί να γίνει επιμετάλλωση (Εικόνα 3-14(γ), (δ)). Πλεονεκτήματά της είναι η εξαιρετικά πιστή απόδοση της μορφής της μάσκας-φωτοαντιστάτη, τα κατακόρυφα τοιχώματα και ο υψηλός λόγος της κατακόρυφης ως προς τις δύο άλλες διαστάσεις. Στην Εικόνα 3-15 φαίνεται ένα παράδειγμα μικρο-κατασκευής με LIGA, όπου είναι σαφή τα θετικά της μεθόδου αυτής.



Εικόνα 3-14 : Μέθοδος LIGA [4] Εικόνα 3-15 : Τοπική μικρο-κατασκευή της μεθόδου LIGA [4]

Μειονέκτημα της τεχνικής LIGA είναι η ανάγκη για ακτίνες-X υψηλής ενέργειας (π.χ. ακτινοβολία σύγχροντρον ή από γραμμικούς επιταχυντές) καθώς είναι λίγες οι εγκαταστάσεις που τις υποστηρίζουν και έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας [7], [16].

3.4.5 Ηλεκτρολυτική Επιμετάλλωση Γαλβανισμός (Electroplating)

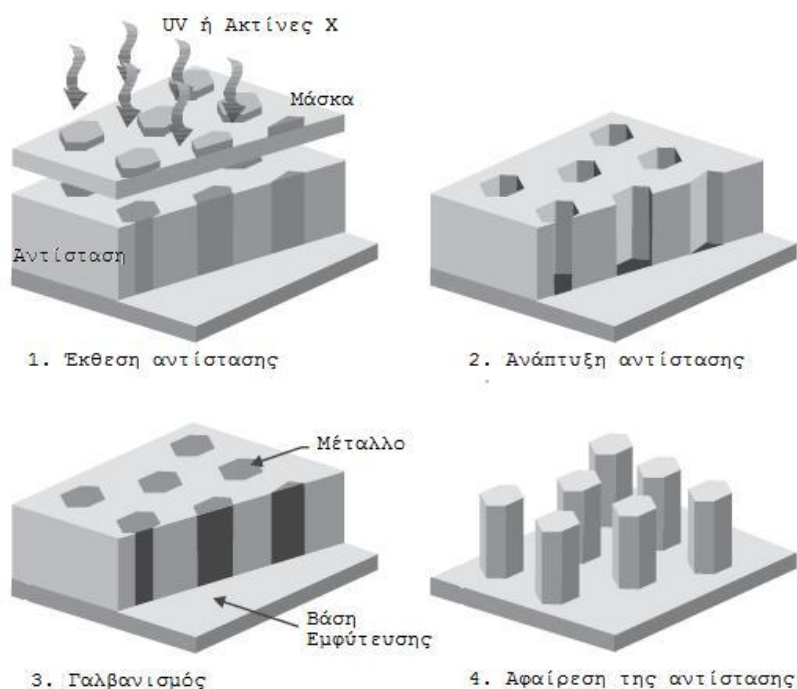
Η ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση είναι μια καθιερωμένη βιομηχανική μέθοδος που έχει προσαρμοστεί στην τεχνολογία μικροδιαμόρφωσης με χρήση καλουπιών πάνω σε μεμβράνες μετάλλων. Ποικιλία μετάλλων εγκαθίσταται στα υποστρώματα πυριτίου που καλύπτονται με μια κατάλληλη λεπτή βάση επιμετάλλωσης. Ο Πίνακας 3.1 απαριθμεί μερικές λύσεις ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης (γαλβανισμού).

Μέταλλο	Διάλυμα
Χρυσός	KAu(CN)_2 : $\text{K}_3\text{C}_6\text{H}_3\text{O}_7$: $\text{HK}_2\text{PO}_4\text{H}_2\text{O}$ NaAuSO_3 : H_2O
Χαλκός	CuSO_4 : H_2O
Νικέλιο	NiSO_4 : $\text{NiCl}_2\text{H}_3\text{BO}_3$: H_2O
Permalloy	NiSO_4 : NiCl_2 : FeSO_4 : H_3BO_3 : $\text{C}_7\text{H}_4\text{NNaSO}_3$: H_2SO_4 : H_2O
Πλατίνα	H_2PtCl_6 : $\text{Pb(CH}_2\text{COOH)}_2$: H_2O
Αλουμίνιο	LiAlH_4 : AlCl_3 σε διαιθυλικό αιθέρα

Πίνακας 3.1 : Παραδείγματα λύσεων ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης των επιλεγμένων μετάλλων [4].

Οι ηλεκτρολυτικές δομές MEMΣ μπορούν να πάρουν τη μορφή του βασικού υποστρώματος και μιας φόρμας φωτοευαίσθητων υλικών. Κατ' αρχάς, ένα αρχικό στρώμα (π.χ., χρυσού ή νικελίου) αποτίθεται στο υπόστρωμα. Στην απλούστερη περίπτωση, ένας παχύς αντιστάτης (5-100μm) αποτίθεται στη συνέχεια και σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας οπτική λιθογραφία (Εικόνα 3-16). Ο μεγαλύτερος λόγος που επιτυγχάνεται με την οπτική λιθογραφία είναι περίπου τρία, περιοριζόμενος από την ανάλυση και το βάθος της εστίασης. Σε LIGA, η οπτική λιθογραφία αντικαθίσταται με λιθογραφία ακτινών X για να καθορίσει πολύ υψηλό λόγο χαρακτηριστικών (>100).

Εργαλεία ακρίβειας και άλλες μικροδομές κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας LIGA, αλλά η μέθοδος θεωρείται ακριβή λόγω της απαίτησης να χρησιμοποιηθούν παράλληλα και ακτίνες X. Από την άλλη, ο σχηματισμός καλουπιών με χρήση οπτικής λιθογραφίας καλείται συχνά "LIGA του φτωχού" [7].

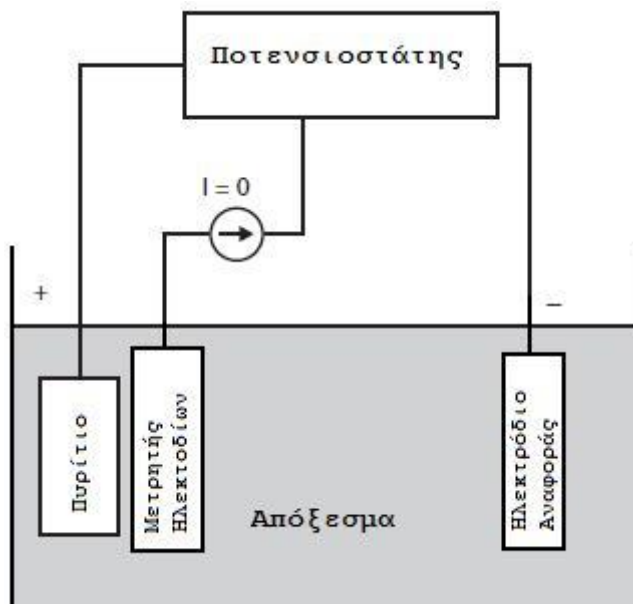


Εικόνα 3-16 : Απεικόνιση του σχηματισμού φορμών που χρησιμοποιεί είτε την οπτική είτε την ακτίνων X λιθογραφία και την ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση (LIGA).

3.4.6 Πορώδες Πυρίτιο (*Porous Silicon*)

Το ποσοστό χάραξης του πυριτίου σε μια ηλεκτροχημική διαδικασία χάραξης μπορεί να ελεγχθεί με την εφαρμογή ενός ανοδικού δυναμικού στο πυρίτιο, με επίπεδο αναφοράς το αρνητικό ηλεκτρόδιο λευκόχρυσου. Μια χαρακτηριστική δομή ηλεκτροχημικής χάραξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-17. Το ανοδικό δυναμικό αναγκάζει τις οπές να κατευθυνθούν προς την επιφάνεια του πυριτίου. Οι οπές έλκουν τα ιόντα OH από το διάλυμα χάραξης. Αυτές οι οπές επιταχύνουν την οξείδωση του πυριτίου, και εάν χρησιμοποιηθεί διάλυμα HF/H²O, το οξείδιο χαράζεται στιγμιαία, διαμορφώνοντας μια ομαλή επιφάνεια.

Με τη μείωση του εφαρμοζόμενου δυναμικού, το πυρίτιο δεν είναι εντελώς οξειδωμένο και δημιουργούνται πόροι ή κενά στη θέση της ομαλώς χαραγμένης επιφάνειας. Αυτοί οι πόροι μπορούν να διεισδύσουν σε μεγάλο βάθος στο πυρίτιο, σχηματίζοντας ένα υλικό, που είναι γνωστό ως πορώδες πυρίτιο. Η μορφή και το μέγεθος των πόρων εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος και ο προσανατολισμός του πυριτίου, τα χρησιμοποιούμενα χημικά διαλύματα χάραξης, και η πυκνότητα του φορτίου.



Εικόνα 3-17 Δομή για την ηλεκτροχημική χάραξης [7].

Στο πορώδες πυρίτιο μπορεί να γίνει επιλεκτικά ανάπτυξη, για παράδειγμα, ανάλογα με τη συγκέντρωση του πυριτίου, και να χαραχθεί επιλεκτικά, είτε σε ένα ασθενές διάλυμα KOH, είτε με την οξείδωση και τη χάραξη σε HF [7].

3.4.7 Συγκεντρωμένη Ιοντική Ακτίνα Χάραξης και Εναπόθεσης (*Focused Ion Beam Etching And Deposition*)

Η τεχνολογία ιοντικών ακτίνων (FIB) επιτρέπει τη χάραξη επιφανειών και την εναπόθεση αγωγικών υλικών και μονωτών με υψηλή ακρίβεια. Η χάραξη μπορεί να επιτευχθεί με τη σάρωση της επιφάνειας με εστιασμένη δέσμη ιόντων. Η εναπόθεση συμβαίνει με μια CVD αντίδραση η οποία προκαλείται από την ιοντική δέσμη.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών που μπορούν να χαραχθούν ή να εναποτεθούν με τη χρήση της τεχνολογίας FIB και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά διαφορετικά ιόντα. Χαρακτηριστικά μεγέθη που μπορούν να επιτευχθούν είναι της τάξης του 1μm, όμως είναι μια αργή διαδικασία.

Παραδείγματα της χρήσης της τεχνολογία FIB είναι οι μικρομηχανικές δομές όπως τα επιταχύμετρα και οι ενεργοποιητές καθώς και η εναπόθεση SiO₂ [4].

Κεφάλαιο 4

4.1 Εισαγωγή

Είναι προφανές ότι με ένα τεράστιο και διαφορετικό σύνολο εργαλείων επεξεργασίας, η δημιουργικότητα αφθονεί. Πράγματι, ο κατάλογος δομών και συσκευών MEMΣ αυξάνεται καθημερινά καθώς όλο και περισσότερες εφαρμογές επωφελούνται από το μικρό μέγεθος των MEMΣ. Τελικά όμως αυτό που καθορίζει την εμπορική επιτυχία της συγκεκριμένης σχεδίασης ή τεχνολογίας είναι το κόστος. Οι προτάσεις για υλοποίηση συσκευών MEMΣ είναι αναρίθμητες, αλλά τα επιτυχή προϊόντα είναι λίγα. Τα MEMΣ χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αυτοκινήτων, στην επιστήμη, στα καταναλωτικά αγαθά, την άμυνα, τις επικοινωνίες και στην ιατρική.

Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν :

- Αισθητήρες πίεσης, θερμοκρασίας, χημικών ουσιών.
- Ανακλαστήρες φωτός.
- Οπτικούς διακόπτες.
- Επιταχύμετρα.
- Μικροενεργοποιητές για την αποθήκευση δεδομένων και τις κεφαλές ανάγνωσης-γραφής.
- Τεχνητά βοηθήματα ακοής και όρασης.

Οι εφαρμογές αυτών των συσκευών χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία ποικιλία βιομηχανιών, όπως το αυτοκίνητο (αισθητήρες - πυροκροτητές αερόσακων), στην υγειονομική περίθαλψη (ενδοφλέβια όργανα ελέγχου της πίεσης αίματος), και καταναλωτικά προϊόντα. Τα MEMΣ χρησιμοποιούνται επίσης από την DARPA για να βελτιώσουν την απόδοση των οπλικών συστημάτων.

4.2 Εμπορικά Προϊόντα

4.2.1 Ιατρικός Αισθητήρας Πίεσης

Μια εξαιρετικά επιτυχής εφαρμογή των ΜΕΜΣ είναι ο μιας χρήσης αισθητήρας πίεσης, ο οποίος χρησιμοποιείται για να ελέγξει την πίεση του αίματος στα νοσοκομεία. Συνδέονται στον ασθενή ενδοφλέβια και ελέγχουν την πίεση του αίματος μέσω ενός διαλύματος.

Ο μίας χρήσης αισθητήρας πίεσης (*Εικόνα 4-1*) αποτελείται από ένα υπόστρωμα πυριτίου, ο οποίος με τη διεργασία της χάραξης παράγει μια μεμβράνη που συνδέεται στο υπόστρωμα. Ένα πιεζοωμικό στρώμα εναποτίθεται στην επιφάνεια της μεμβράνης κοντά στις άκρες της για να μετατρέψει τη μηχανική πίεση σε ηλεκτρική τάση. Η πίεση αντιστοιχεί στη μετατόπιση της μεμβράνης. Ο αισθητήρας τοποθετείται σε μια πλαστική ή κεραμική βάση με ένα πλαστικό καπάκι πάνω του. Μια γέλη (gel) χρησιμοποιείται για να χωρίσει το αλατούχο διάλυμα από τον αισθητήρα.

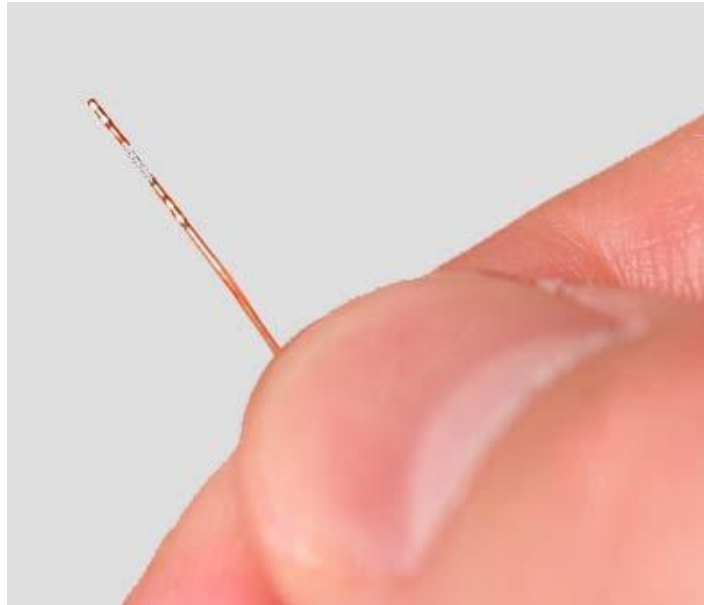


Εικόνα 4-1 : Αισθητήρας πίεσης για εφαρμογές ιατρικών συσκευών [17].

Κοστίζουν πολύ λιγότερο από τους εξωτερικούς αισθητήρες πίεσης αίματος, και αντίθετα με τους τελευταίους δεν χρειάζεται να αποστειρωθούν και να επαναρρυθμιστούν για να χρησιμοποιηθούν ξανά. Μαζί με τον αισθητήρα ΜΕΜΣ των αερόσακων, είναι μια από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές των ΜΕΜΣ μέχρι σήμερα.

Η τεχνολογία του αισθητήρα πίεσης αίματος έχει κάνει ένα ακόμα βήμα με την ανάπτυξη του αισθητήρα πίεσης στο άκρο του καθετήρα. Αυτός είναι λεπτός σωλήνας που εισάγεται στο σώμα για την εισροή ή την αποβολή υγρών.

Αυτή η αρκετά μικρή συσκευή ΜΕΜΣ έχει σχεδιαστεί για να εγκατασταθεί στην άκρη ενός καθετήρα και να μετρά την ενδοαγγειακή πίεση. Οι διαστάσεις της είναι μόνο 0.15mmX0,40mmX0,90mm (*Εικόνα 4-2*). Αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες εφαρμογές των ΜΕΜΣ μέχρι σήμερα μαζί με το επιταχυνσίμετρο [3].

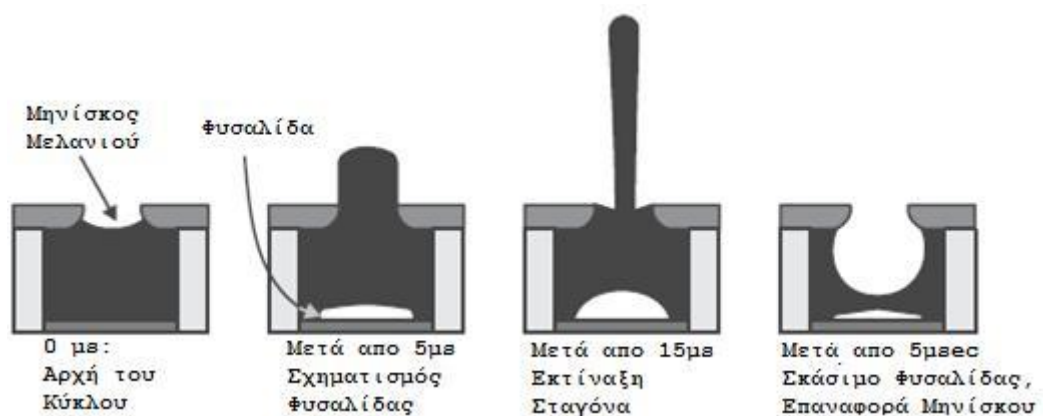


Εικόνα 4-2 : Ο μικρότερος αισθητήρας καθετήρα-ακρης [18].

4.2.2 Κεφαλή Εκτυπωτών Inkjet

Οι εκτυπωτές *Inkjet* χρησιμοποιούν μια σειρά ακροφυσίων για να ψεκάζουν μελάνι άμεσα προς ένα μέσο εκτύπωσης. Ανάλογα με τον τύπο εκτυπωτή *Inkjet*, τα σταγονίδια του μελανιού σχηματίζονται με διαφορετικό τρόπο : θερμικά ή πιεζοηλεκτρικά. Έχοντας ανακαλυφθεί από το 1979 από τη *Hewlett-Packard*, η θερμική κεφαλή MEMΣ του εκτυπωτή *Inkjet*, χρησιμοποιεί θερμική εκτόξευση ατμού μελανιού.

Μέσα στην κεφαλή του εκτυπωτή υπάρχει μια σειρά μικροσκοπικών αντιστατών γνωστά ως θερμικά στοιχεία (*heaters*). Ένα φρέαρ κάτω από το στόμιο περιέχει μια μικρή ποσότητα μελανιού, η οποία συγκρατείται από μια επιφανειακή τάση. Για να πυροδοτηθεί ένα σταγονίδιο, τα θερμικά στοιχεία ενεργοποιούνται, κάτω από τον έλεγχο μικρο-επεξεργαστών, και υπερθερμαίνουν τοπικά το μελάνι (*Εικόνα 4-3*).



Εικόνα 4-3 : Ακολουθία πυροδοτήσεων του κύκλου μελανιού [19].

Το μελάνι ρέει σε κάθε θερμικό στοιχείο, το οποίο, θερμαίνεται πάνω από 100 εκατομμύρια °C το δευτερόλεπτο. Μέσα σε 5μs, το μελάνι ατμοποιείται και σχηματίζεται μια φυσαλίδα. Η φυσαλίδα διαστέλλεται, και μετά από 15 μs, μερικό από το μελάνι εκτινάσσεται έξω από το ακροφύσιο. Μέσα σε 24μs του κύκλου πυροδότησης, η ουρά της σταγόνας του μελανιού έχει χωριστεί και η φυσαλίδα σκάει. Όταν η φυσαλίδα σκάσει, δημιουργείται ένα κενό και τραβά περισσότερο μελάνι στη κεφαλή από τη δεξαμενή. Έτσι μέσα σε λιγότερο από 50μs, ο θάλαμος ξαναγεμίζει, και ένας νέος μηνίσκος μελανιού δημιουργείται στο στόμιο. Το αξιοσημείωτο είναι ότι δεν υπάρχει κανένα κινούμενο μέρος σε αυτό το σύστημα (εκτός από το ίδιο το μελάνι) το οποίο αποδεικνύει ότι δεν είναι όλες οι συσκευές MEMS μηχανικές.

Ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να εξωθήσει το μελάνι από τα ακροφύσια. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος τοποθετείται στο πίσω μέρος της δεξαμενής μελανιού κάθε ακροφυσίου. Το στοιχείο αυτό λαμβάνει μια πολύ μικρή ηλεκτρική φόρτιση, η οποία το αναγκάζει να δονηθεί. Όταν δονείται προς το εσωτερικό σπρώχνει ένα μικροσκοπικό ποσό μελανιού έξω από το ακροφύσιο. Καθώς το στοιχείο δονείται προς τα πίσω, τραβά μελάνι από τη δεξαμενή για να αντικαταστήσει το μελάνι που ψεκάστηκε. Η Epson κατοχύρωσε αυτήν την τεχνολογία αλλά σήμερα χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των εταιρειών κατασκευής εκτυπωτών.

Τα MEMS επιτρέπουν όλο και περισσότερα θερμικά στοιχεία και πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους να ενσωματώνονται σε μία κεφαλή. Οι αρχικοί εκτυπωτές είχαν μόλις 12 ακροφύσια με ανάλυση μέχρι 92dpi. Σήμερα, οι σύγχρονοι εκτυπωτές Inkjet έχουν μέχρι 600 ακροφύσια, που μπορούν όλα να ενεργοποιηθούν ταυτόχρονα επιτρέποντας να έχουμε ανάλυση πάνω από 1200dpi. Οι *Epson*, *Lexmark*, *Hewlett-Packard*, *Olivetti*, *Xerox* και *Canon*, όλες χρησιμοποιούν κάποια μορφή αυτών των MEMS στους *Inkjet* εκτυπωτές τους [4].

4.2.3 Αυτόματος Αισθητήρας Αερόσακων

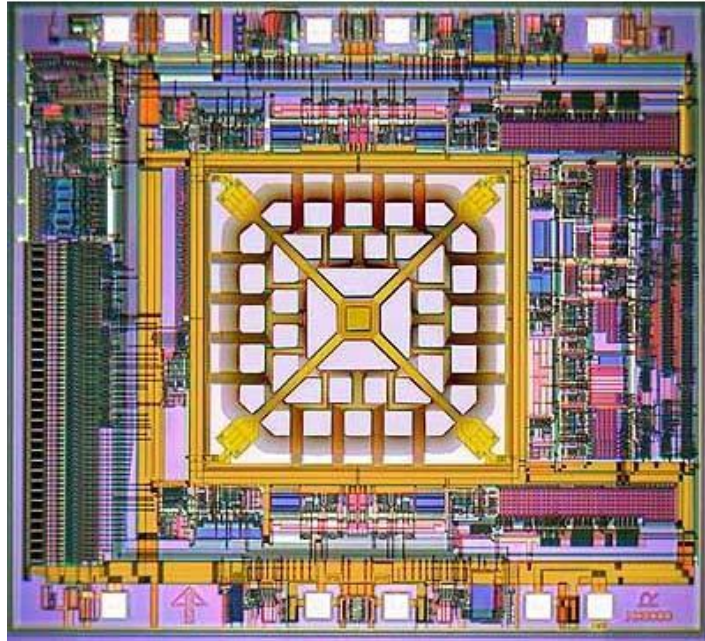
(Επιταχυνσίμετρο)

Ο αερόσακος, είναι μια συσκευή ασφαλείας που αποτελείται από έναν υφασμάτινο σάκο γεμάτο με αέρα και παρέχει προστασία στο κεφάλι και στο πάνω μέρος του σώματος κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Οι αερόσακοι σχεδιάζονται για να εμποδίσουν τον οδηγό ή το συνοδηγό να χτυπήσει στο ταμπλό του οχήματος, με αποτέλεσμα την εξάλειψη των τραυματισμών ή τη μείωση της δριμύτητάς τους.

Η αρχική τεχνολογία των αερόσακων χρησιμοποιούσε συμβατικές μηχανικές συσκευές που ήταν σχετικά σύνθετες, ζύγισαν πολύ και κόστισαν αρκετά. Τοποθετούνταν συνήθως στο μπροστινό μέρος του οχήματος και τα ηλεκτρονικά τους μέρη χωριστά κοντά στον αερόσακο. Τα MEMΣ επιτρέπουν η ίδια λειτουργία να ολοκληρωθεί με την ενσωμάτωση ενός επιταχυνσίμετρου και ηλεκτρονικών σε ένα ενιαίο τσιπ πυριτίου, με συνέπεια τη δημιουργία μιας μικροσκοπικής συσκευής που μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο τιμόνι και να κοστίσει λιγότερο.

Όταν ένας αερόσακος ενεργοποιείται, διογκώνεται αμέσως και δημιουργεί ένα σταθερό εμπόδιο, που αντιμετωπίζει την προς τα εμπρός μετακίνηση του οδηγού ή του συνοδηγού. Οι αισθητήρες σύγκρουσης σχεδιάζονται για να ανιχνεύσουν την ξαφνική επιβράδυνση ενός οχήματος που προκαλείται από μια σύγκρουση.

Ο αισθητήρας MEMΣ επιτάχυνσης (*Εικόνα 4-6*) αποτελείται από ένα τσιπ πυριτίου, που περιέχει μερικές εκατοντάδες τρανζίστορ, παράλληλα με ένα μικροσκοπικό μηχανικό ελατήριο, το οποίο έχει ένα προσαρτημένο βάρος. Το ελατήριο και το βάρος κατασκευάζονται από μια λεπτή μεμβράνη πυριτίου, 2μm παχιά.



Εικόνα 4-6 : Επιταχυνσίμετρο βασισμένο σε MEMS[20].

Τα τρανζίστορ μετατρέπουν την κίνηση του ελατηρίου και του βάρους σε ένα ηλεκτρικό σήμα, που αντιστοιχεί στη μετακίνηση του βάρους κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Όταν δημιουργηθεί αρκετή δύναμη, η κίνηση του βάρους στέλνει ένα ηλεκτρικό σήμα μέσω των τρανζίστορ. Όταν ανιχνεύεται μια σύγκρουση, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου ενεργοποιούν το διογκωτή του αερόσακου.

Μέσα στον αερόσακο έχουν τοποθετηθεί κόκκοι αζιδίου του νατρίου, μια χημική ουσία που όταν αναφλέγεται παράγει αέριο άζωτο. Όταν δίνεται σήμα από τους αισθητήρες, το κύκλωμα ελέγχου θερμαίνει ένα καλώδιο που αναφλέγει τους κόκκους. Ένα μεγάλο ποσό αερίου αζώτου παράγεται γρήγορα μέσα στον αερόσακο και τον αναγκάζει να διογκωθεί. Το άνοιγμα συμβαίνει εξαιρετικά γρήγορα (20-35ms). Ο αερόσακος εκρήγνυται με ταχύτητα μέχρι και 320km/h για να εμποδίσει τη μπροστινή μετακίνηση των επιβατών.

Ένα παράδειγμα αυτής της επιτυχίας των MEMS είναι τα σημερινά οχήματα. Η BMW χρησιμοποιεί πάνω από 70 συσκευές MEMS στα οχήματά της [21], όπως συστήματα που εμποδίζουν το κλείδωμα των φρένων, συστήματα πλοήγησης, έλεγχου δόνησης, αισθητήρες καυσίμων, μείωσης θορύβου, ανίχνευσης ανατροπής,

συγκράτηση των ζωνών ασφαλείας κλπ (*Εικόνα 4-7*). Κατά συνέπεια, η βιομηχανία αυτοκινήτων έχει γίνει ένας από τους κύριους κλάδους υποστήριξης της ανάπτυξης των MEMS [3].



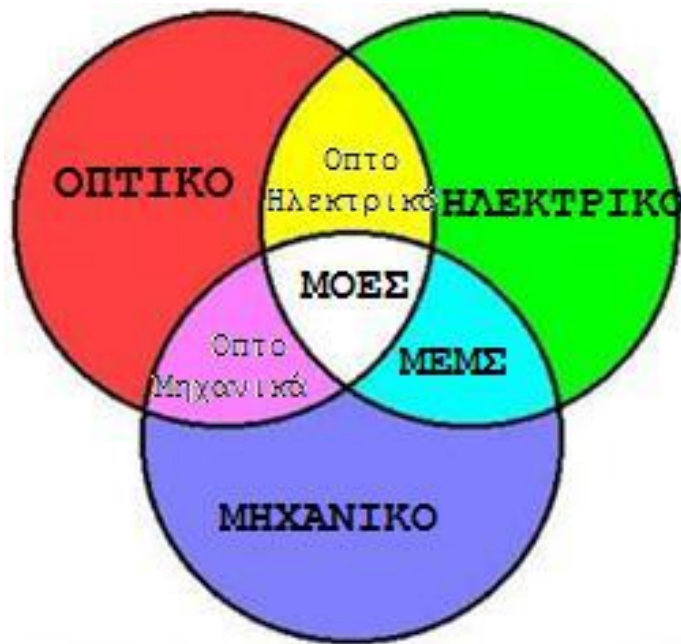
Εικόνα 4-7 : Εφαρμογές των MEMS στα αυτοκίνητα [22].

4.3 ΜικροΟπτοΗλεκτροΜηχανικά Συστήματα (MOEMS)

Τα MEMS χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή οπτικών τμημάτων μικροϋπολογιστών ή οπτικών συστημάτων όπως οι πίνακες παραμορφώσιμων μικροκατόπτρων (Deformable Micromirror Array), η προσαρμοζόμενη οπτική (adaptive optics), ο οπτικός ανιχνευτής για τη σάρωση bar codes (bar code scanning), οι οπτικοί διακόπτες για τις οπτικές επικοινωνίες με ίνες κ.τ.λ. Αυτός ο ειδικός τομέας MEMS καλείται ΜικροΟπτοΗλεκτροΜηχανικά Συστήματα

(MicroOptoElectroMechanical Systems-MOEMS). Αυτός ο διεπιστημονικός τομέας πρέπει να συνδυάσει τη γνώση από την οπτική, την ηλεκτρονική, και τη μηχανική για να σχεδιάσει και να κατασκευάσει συσκευές όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4-8*.

Τα MEMS χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τις δυνατότητες των συστημάτων επικοινωνίας, ιδιαίτερα των καλωδίων οπτικών ινών, που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μεγάλης απόστασης τηλεφωνικών γραμμών. Αυτά τα καλώδια, ενώ αρχικά μετέφεραν μόνο φωνή, τώρα μεταφέρουν γραφικά, ήχο, και προγράμματα υπολογιστών μέσω του Διαδικτύου.



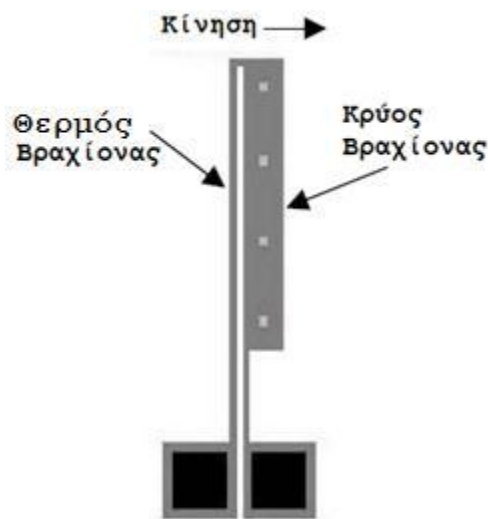
Εικόνα 4-8 : Σχηματικό διάγραμμα που παρουσιάζει το διεπιστημονικό τομέα των ΜΟΕΜΣ [23].

Οι ασύρματες επικοινωνίες, όπως τα κινητά τηλέφωνα, αρχίζουν επίσης να ενσωματώνουν συσκευές ΜΕΜΣ. Η τεχνολογία ΜΕΜΣ χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη "έξυπνων" κεραιών που παρέχουν τη μέγιστη υποδοχή ανταποκρινόμενες στις αλλαγές της επικοινωνίας. Τέλος, αναπτύσσονται και άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις που χρησιμοποιούν την τεχνολογία ΜΕΜΣ για να βελτιώσουν την απόδοση και να μειώσουν το μέγεθος των ασύρματων συστημάτων [23].

4.3.1 Οπτικός Σαρωτής

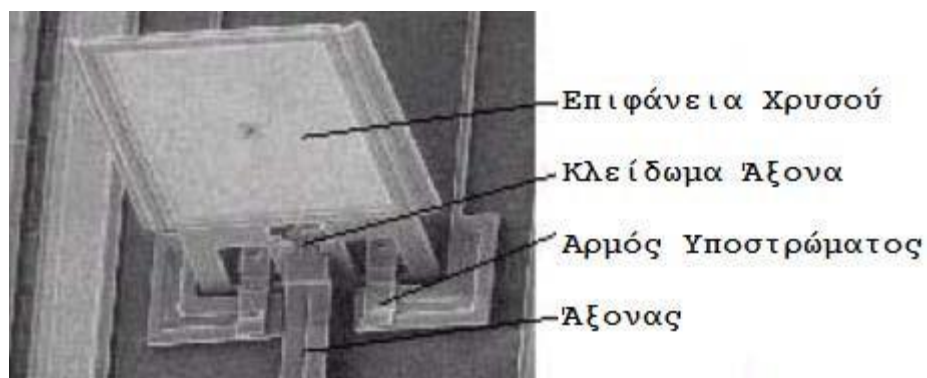
Ο οπτικός σαρωτής είναι μία οπτική συσκευή ΜΕΜΣ που κατακλύζει επιτυχώς την αγορά. Αποτελείται από αρθρωτές πλάκες κατόπτρων, οι οποίες συνδέονται με πίνακες θερμικών ενεργοποιητών. Οι ενεργοποιητές αυτοί μπορούν να κινηθούν οριζόντια στο υπόστρωμα και αποτελούνται από ένα στενότερο θερμό βραχίονα πολυπυρίτιου συνδεδεμένο με έναν πλατύτερο κρύο βραχίονα.

Όταν εφαρμόζεται ρεύμα στους βραχίονες, η υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος στο θερμό βραχίονα τον αναγκάζει να θερμανθεί και να διασταλεί περισσότερο από τον κρύο βραχίονα. Αυτό αναγκάζει την άκρη του ενεργοποιητή να κινηθεί οριζόντια σε μια τοξοειδή τροχιά προς την κρύα πλευρά όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-9 . Οι τυπικές διαστάσεις ενός θερμικού ενεργοποιητή είναι : Ζεστός βραχίονας 2,5 μm πλάτος, 240 μm μήκος ,Κρύος βραχίονας 16 μm πλάτος, 200 μm μήκος και κενό μεταξύ των δύο βραχίωνων έχει πλάτος 2 μm .



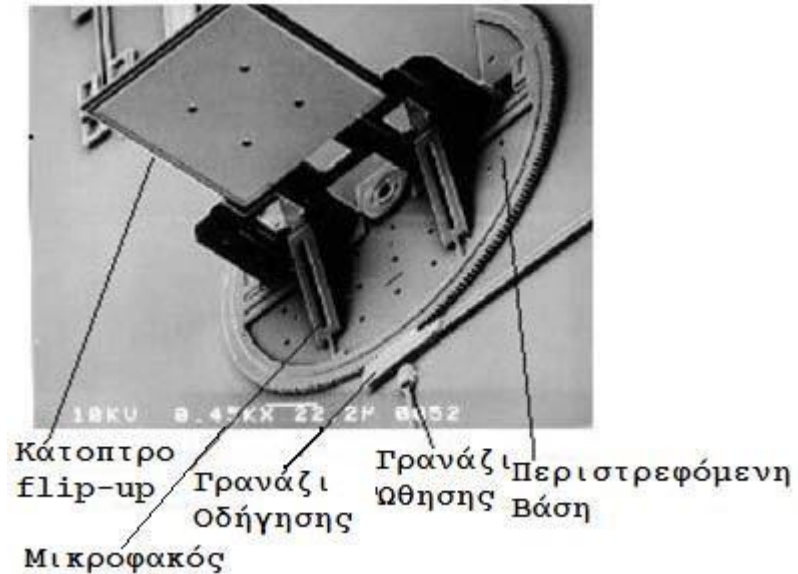
Εικόνα 4-9 : Θερμικός ενεργοποιητής MEMS [23]

Η επικαλυμμένη με χρυσό επιφάνεια των κατόπτρων είναι $75\mu\text{m}^2$ (Εικόνα 4-10). Στο κέντρο του κάτοπτρου έχει δημιουργηθεί μια οπή, για να εξασφαλίσει ότι αυτό είναι εντελώς ελεύθερο, κατά τη διάρκεια της καθοριστικής χάραξης του οξειδίου. Το κάτοπτρο συνδέεται με το υπόστρωμα με δύο αρμούς και με τον πίνακα ενεργοποιητών με έναν άξονα. Καθώς η πλάκα ανασηκώνεται από το υπόστρωμα, ο άξονας γλιστράει στην οπή. Ο πίνακας ενεργοποιητών χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη γωνία της πλάκας κατόπτρου για την οδήγηση της δέσμης.



Εικόνα 4-10 : Μικρο-Οπτικός σαρωτής [23].

Η περιστροφή της πλάκας του κατόπτρου είναι ένας άλλος μηχανισμός για τη σάρωση οπτικής δέσμης. Η *Εικόνα 4-11* παρουσιάζει ένα *flip-up* κάτοπτρο που συνδέεται με κινητήρα περιστροφικής κίνησης, που οδηγείται από έναν πίνακα θερμικών ενεργοποιητών, και επιτρέπει περιστροφή κατά 180° . Το κάτοπτρο έχει πλάτος $185\mu\text{m}$ και ύψος $200\mu\text{m}$ [23], [24].

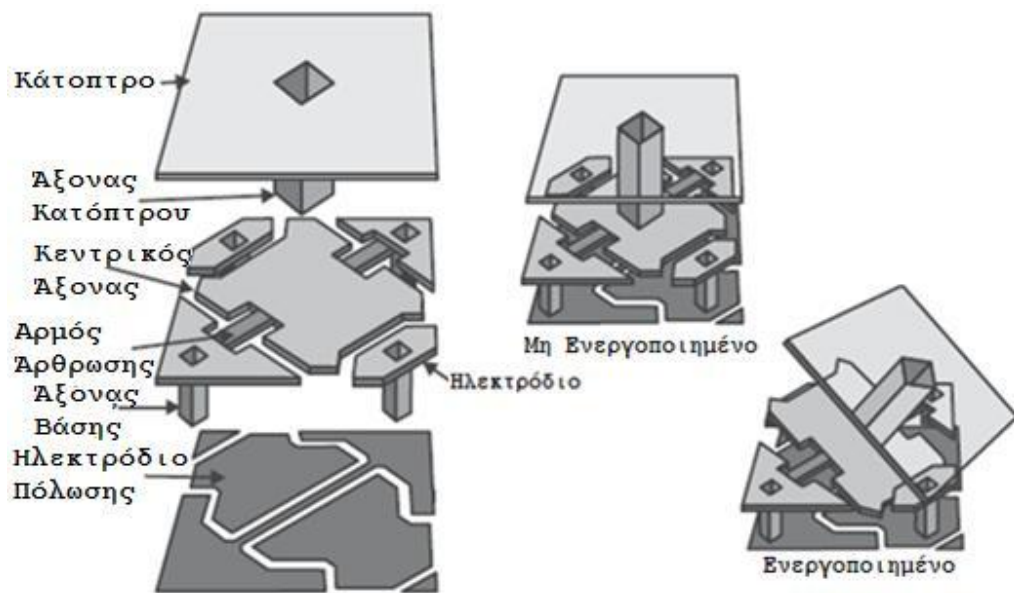


Εικόνα 4-11 : Οπτικός σαρωτής MEMS περιστροφής 180° [23].

4.3.2 Συσκευές Ψηφιακών Μικροκατόπτρων (Digital Micromirror Devices - DMD)

Μια νέα τεχνολογία προβολής που διατηρεί τη φωτεινότητα και την οξύτητα της εικόνας ακόμη και σε οθόνες των 254cm (100in) είναι οι Συσκευές Ψηφιακών Μικροκατόπτρων (DMD), αποκαλούμενες και ως Ψηφιακοί Επεξεργαστές Φωτός & Ψηφιακά Συστήματα Προβολής Βίντεο (*Digital Light Processors & Digital Video Projection Systems*). Η *Texas Instruments* βρήκε έναν τρόπο να βάλει 2,2 εκατομμύρια μικροσκοπικά κάτοπτρα, διαστάσεων $16 \times 16\mu\text{m}$ και πάχους 100nm , πάνω σε ένα τσιπ μεγέθους γραμματοσήμου και να παράγει εκπληκτικές εικόνες. Μια σειρά εκατομμυρίων κινητών μικροκατόπτρων αντικαθιστούν έναν συμβατικό τηλεοπτικό καθοδικό σωλήνα και προβάλλουν ψηφιακές τηλεοπτικές εικόνες [3].

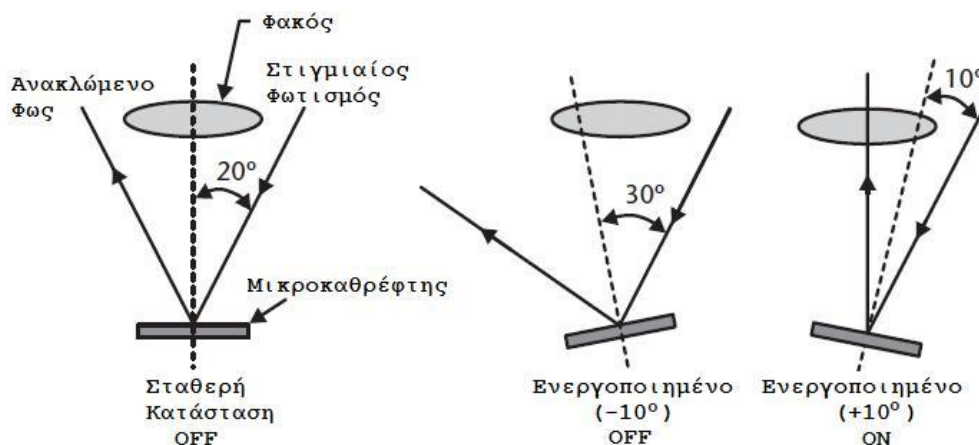
Το DMD αποτελείται από ένα δισδιάστατο πλέγμα στοιχείων οπτικής μεταγωγής (εικονοκύτταρα) τοποθετημένα σε ένα υπόστρωμα πυριτίου (Εικόνα 4-4). Κάθε εικονοκύτταρο αποτελείται από ένα μικροκάτοπτρο, που στηρίζεται σε έναν κεντρικό άξονα. Αυτός ο άξονας τοποθετείται σε μια χαμηλότερη μεταλλική πλατφόρμα. Η πλατφόρμα αυτή κρέμεται από λεπτούς αρμούς άρθρωσης, οι οποίοι είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το υπόστρωμα. Δύο ηλεκτρόδια, που τοποθετούνται κάτω από την πλατφόρμα, παρέχουν ηλεκτροστατική ενεργοποίηση.



Εικόνα 4-4 : Απεικόνιση ενός ενιαίου εικονοκυττάρου DMD σε κατάσταση ON και κατάσταση OFF [4].

Μια τάση πόλωσης μεταξύ ενός εκ των δύο ηλεκτροδίων και της πλατφόρμας, γέρνει το κάτοπτρο προς εκείνο το ηλεκτρόδιο. Η γωνία κλίσης περιορίζεται γεωμετρικά σε ± 10 μοίρες. Μόλις σταματήσει η εφαρμοζόμενη τάση τα μικροκάτοπτρα επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση. Η κατάσταση OFF του κυττάρου μνήμης γυρνάει τον καθρέφτη κατά -10° , ενώ η κατάσταση ON κατά $+10^\circ$.

Στη κατάσταση ON, ο άξονας φωτισμού αντανακλά από το μικροκάτοπτρο μέσα στην κόρη του φακού προβολής, αναγκάζοντας αυτό το μεμονωμένο εικονοκύτταρο να φωτιστεί (Εικόνα 4-5). Στις άλλες δύο καταστάσεις κλίσης (0° , 10°), ένα άνοιγμα εμποδίζει το αντανακλώμενο φως και δίνει στο εικονοκύτταρο σκοτεινή εμφάνιση.



Εικόνα 4-5 Απεικόνιση καθοδήγησης οπτικής ακτίνας με χρήση μικροκαθρεφτών [4].

Ενώ η λειτουργία κάθε κατόπτρου είναι ψηφιακή, το σύστημα είναι ικανό να επιτύχει αποχρώσεις του γκρι, ρυθμίζοντας το χρόνο παραμονής κάθε εικονοκυττάρου στην κατάσταση *ON* και *OFF*. Επειδή η ταχύτητα αλλαγής του εικονοκυττάρου είναι 1.000 φορές γρηγορότερη από το χρόνο απόκρισης του ματιού, είναι θεωρητικά δυνατό να υπάρξουν μέχρι περίπου 1.000 αποχρώσεις του γκρι (10 μπιτ βάθος χρώματος). Στην πραγματικότητα, οι πλήρους χρώματος οθόνες χρησιμοποιούν τρία DMD τσιπ, ένα για κάθε βασικό χρώμα (κόκκινο, πράσινο, και μπλε), με κάθε τσιπ να χωράει 8 μπιτ βάθος χρώματος για συνολικά 16 εκατομμύρια ξεχωριστά χρώματα.

Συνήθως τα εικονοκύτταρα οργανώνονται σε μια δισδιάστατη επιφάνεια 17μm για να σχηματίσουν οθόνες τυπικών διαστάσεων 800x600 (SVGA) μέχρι 1.280x1.024 (SXGA).

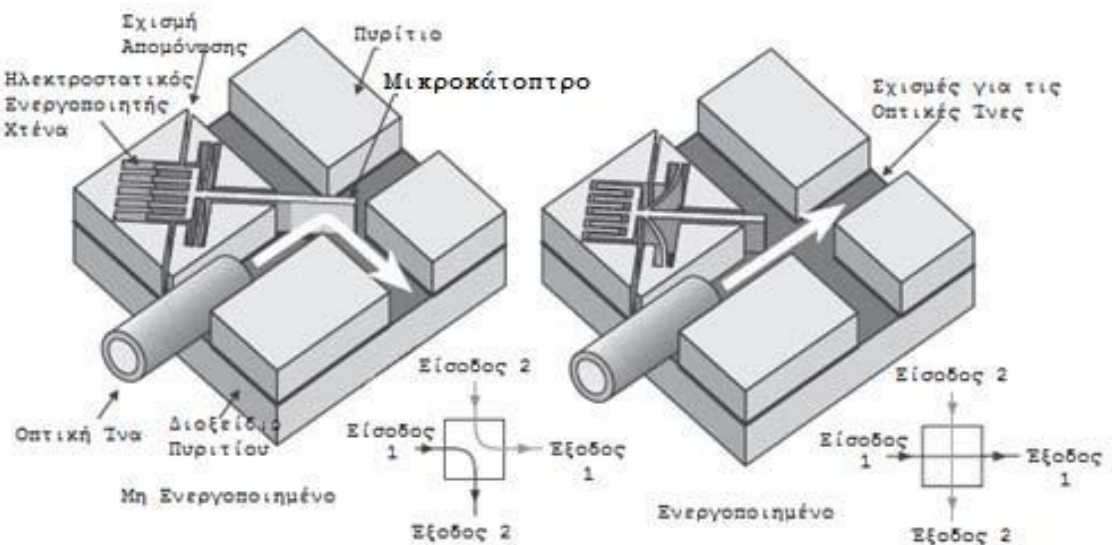
Τα DMDs χρησιμοποιούνται επίσης για οθόνες σε υπολογιστές, τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και για μεγάλους τόπους όπως οι ψηφιακοί κινηματογράφοι. Τα MEMS δίνουν τη δυνατότητα στα μικροκάτοπτρα να έχουν απόσταση μόνο 1μm μεταξύ τους, με αποτέλεσμα μια εικόνα να καταλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό (89%) του χώρου στην αντανακλαστική επιφάνεια του DMD τσιπ, σε σύγκριση με ένα τυπικό LCD (12 - 50%). Αυτό μειώνει την πιξελοποίηση (pixelation) και παράγει μια γενικά οξύτερη και φωτεινότερη εικόνα [4].

4.3.3 Ψηφιακός Οπτικός Μεταγωγέας MxN

Ένας οπτικός μεταγωγέας ανακατευθύνει ένα εισερχόμενο φωτεινό σήμα σε πολλές τελικές ίνες. Οι πίνακες οπικών μεταγωγέων επιτρέπουν τη γρήγορη αναδιαμόρφωση των οπικών δικτύων μετάδοσης δεδομένων, αλλάζοντας την πορεία του φωτός σε ένα σύστημα διασταυρούμενων ινών.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των πινάκων οπικών μεταγωγέων είναι η διάταξη τους (δηλαδή πόσες ίνες εισόδου και εξόδου μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα και ανεξάρτητα η μια με την άλλη). Εάν ένας μεταγωγέας μπορεί να οδηγήσει φως από μια ίνα εισόδου σε οποιοσδήποτε από τις ίνες εξόδου N, τότε αυτό ονομάζεται μεταγωγέας 1xN.

Γενικά, οι μεταγωγείς MxN είναι δισδιάστατοι πίνακες με M εισαγόμενες και N εξαγόμενες οπικές ίνες. Το ηλεκτρονικό τους αντίστοιχο είναι ένας αναλογικός πολυπλέκτης, που επιλέγει οποιοδήποτε από τα M εισερχόμενα ηλεκτρικά σήματα και τα κατευθύνει σε οποιαδήποτε από τις N γραμμές εξόδου.



Εικόνα 4-12 : Απεικόνιση ενός 2x2 οπικού μεταγωγέα. Στη θέση διασταύρωσης, το φως από μια ίνα εισόδου εκτρέπεται υπό γωνία 90°. Στη θέση φραγμού, το φως από εκείνη την ίνα ταξιδεύει ανεμπόδιστο μέσω του διακόπτη [4].

Το βασικό στοιχείο για ένα 2x2 πίνακα μεταγωγέων αποτελείται από έναν ηλεκτροστατικό ενεργοποιητή 'χτένα', που ελέγχει τη θέση μιας κάθετης πλάκας κατόπτρων στη διασταύρωση δύο κάθετων σχισμών. Μέσα σε κάθε σχισμή βρίσκονται δύο οπτικές ίνες, στο τέλος κάθε σχισμής (Εικόνα 4-12).

Στην κανονική θέση του ενεργοποιητή (*χωρίς τάση πόλωσης*), η πλάκα του κατόπτρου βρίσκεται στη μέση της διασταύρωσης και αντανακλά το φως κατά γωνία 90° . Εφαρμόζοντας τάση περίπου $70V$ στους ενεργοποιητές αναγκάζεται το κάτοπτρο να αποσυρθεί, αφήνοντας το φως να περάσει ανεμπόδιστα — αυτή είναι η θέση φραγμού. Παρατάσσοντας 2×2 στοιχεία και προς τις δύο κατευθύνσεις δημιουργείται ένας πίνακας μεταγωγών $M \times N$.

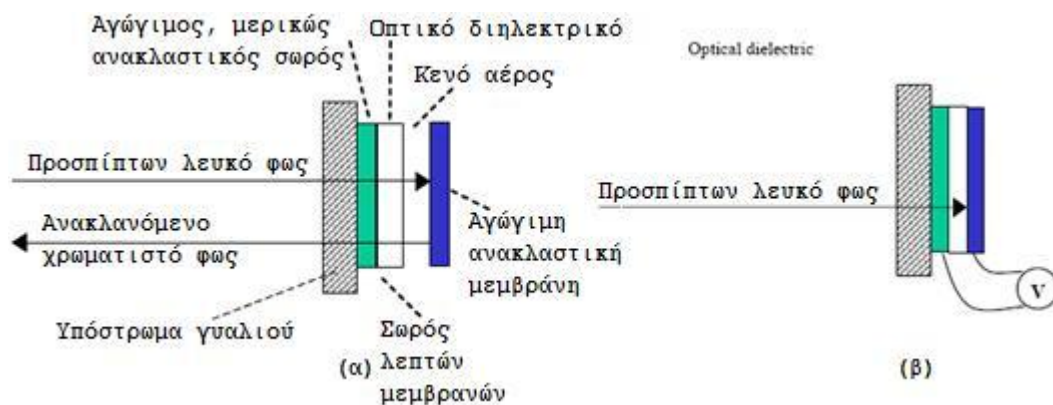
Οι σχισμές πρέπει κανονικά να χωρούν οπτικές ίνες, τυπικά με διάμετρο 150 έως 250 μm . Το βάθος της σχισμής πρέπει να είναι τέτοιο που το κέντρο της ίνας να ευθυγραμμίζεται με το κέντρο του μικροκατόπτρου. Επειδή το φως αποκλίνει τη στιγμή που φεύγει από την ίνα, το κάτοπτρο πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τον πυρήνα της ίνας. Η διάταξη κατασκευάζεται σε δίσκους πυριτίου *SOI* με πάχος $75 \mu m$ και ολικό μέγεθος περίπου $3,3 \times 3,7 mm^2$ [4].

4.3.4 Οθόνες iMoD Βασισμένες σε MEMS

Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι ένα αναγκαίο και συνεχώς αναπτυσσόμενο κομμάτι της σύγχρονης ζωής. Ειδικότερα, οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα εξελίσσονται γρήγορα σε "έξυπνα τηλέφωνα", προσφέροντας αυξανόμενη λειτουργικότητα, και υποστηρίζοντας πολυμέσα και ποικίλες νέες εφαρμογές. Το γεγονός αυτό παρουσιάζει διάφορες προκλήσεις στον τομέα των οθονών, όπως η μικρή κατανάλωση ισχύος, η ταχύτητα του βίντεο, και η ευκρίνεια σε διάφορες καταστάσεις φωτισμού.

Ο Συμβολομετρικός Διαμορφωτής (Interferometric Modulator-iMoD) οθόνης της QUALCOMM είναι μια ηλεκτροστατικά ενεργοποιήσιμη, δισταθής συσκευή MEMS. Η τεχνολογία iMoD υιοθετεί την οπτική συμβολή, η οποία είναι ένας αποδοτικός τρόπος για να αποδοθεί υψηλής φωτεινότητας χρώμα καθώς δεν χρησιμοποιείται κανένα φίλτρο ή πολωτής.

Ένα στοιχείο iMoD αποτελείται από μια αγώγιμη αντανακλαστική μεμβράνη (κάτοπτρο) που αιωρείται πάνω από μια στοίβα λεπτών μεμβρανών, τοποθετημένη πάνω σε υπόστρωμα γυαλιού (Εικόνα 4-13 (α)).



Εικόνα 4-13 : Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας iMoD. (α)φωτεινή - «ανοικτή» κατάσταση (β) σκοτεινή - «κλειστή» κατάσταση [25].

Τα στρώματα στη στοίβα των λεπτών μεμβρανών ομαδοποιούνται σε δύο λειτουργικά υποσύνολα : αγώγιμη και μερικώς αντανακλαστική στοίβα και οπτικό διηλεκτρικό. Ουσιαστικά, ένα στοιχείο iMoD είναι μια οπτικά συντονισμένη κοιλότητα, που ορίζεται από τους δύο αγώγιμους ανακλαστήρες, οι οποίοι χωρίζονται από κενό αέρα και διηλεκτρικό. Κατά συνέπεια, το χρώμα που βλέπει ο θεατής συνδέεται με το συντονισμένο μήκος κύματος της κοιλότητας, καθορίζεται από το οπτικό μήκος του μονοπατιού μεταξύ των δύο ανακλαστήρων. Τα RGB εικονοκύτταρα (pixel) έχουν στοιχεία iMoD με διαφορετικού μήκους κενά αέρος με σκοπό να ανακλούν το κόκκινο, πράσινο, και μπλε μήκος κύματος, αντίστοιχα.

Το μαύρο χρώμα γίνεται αντιληπτό όταν το μήκος κύματος μετακινείται στο UV μέρος του οπτικού φάσματος. Η εναλλαγή μεταξύ μιας φωτεινής και μιας σκοτεινής κατάστασης είναι εκεί όπου μπαίνει στο παιχνίδι η λειτουργικότητα των στοιχείων MEMS. Η εφαρμογή μιας τάσης μεταξύ των δύο ανακλαστήρων χρησιμοποιείται για να "πέσει" το εικονοκύτταρο σε κατάσταση μαύρου χρώματος (Εικόνα 4-13 (β)).

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα που προέρχεται από τις ιδιότητες των MEMS είναι η διστάθεια, γεγονός που τους παρέχει μια ενσωματωμένη "μνήμη". Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη του πίνακα TFT που χρησιμοποιείται συμβατικά στην οθόνη LCD. Περαιτέρω, η διστάθεια επιτρέπει στα δεδομένα να γράφονται και να φυλάσσονται με χαμηλή τάση πόλωσης, εξασφαλίζοντας εξαιρετικά μικρή κατανάλωση ισχύος.

Συμπερασματικά, η λειτουργικότητα των MEMS στις οθόνες iMoD παρέχει την επιλογή χρώματος, τη διαμόρφωση και τη μνήμη [25].

4.3.5 Τεχνολογία Διαθλαστικών MEMS (Diffractive MEMS Technology)

Οδηγούμενοι από τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις στην μετάδοση δεδομένων και φωνής, οι φορείς παροχής υπηρεσιών χρησιμοποιούν όλο και πιο γρήγορα και δυναμικά δίκτυα. Η εμφάνιση πιο εύκαμπτων, πιο αξιόπιστων και πιο οικονομικώς αποδοτικότερων οπτικών συστημάτων οδηγεί σε γρηγορότερη ανάπτυξη των δικτύων. Η βιομηχανία τείνει προς τη χρήση ανασχηματιζόμενων (reconfigurable) οπτικών δικτύων, όπου τα οπτικά μονοπάτια, τα μήκη κύματος και τα ποσοστά δεδομένων αλλάζουν δυναμικά για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των δικτύων, όπως η τροφοδότηση νέων μηκών κύματος, η ισορρόπηση των φορτίων δεδομένων και η αποκατάσταση του δικτύου μετά από δυσλειτουργία.

Καθώς τα συστήματα DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) γίνονται πιο δυναμικά, οι απαιτήσεις για οπτικές διατάξεις που θα ενεργοποιούν και θα ρυθμίζουν αυτά τα δίκτυα αυξάνονται. Για να ικανοποιηθεί αυτή η ανάγκη, έχει αναπτυχθεί μια νέα κατηγορία δυναμικών διατάξεων για να ελέγχουν και να χειρίζονται το φως στα ανασχηματιζόμενα οπτικά δίκτυα. Οι δυναμικές διατάξεις (*Εικόνα 4-14*) συμπληρώνουν τις παραδοσιακές ενεργές διατάξεις (λείζερ, ανιχνευτές, διαμορφωτές) και τις παθητικές διατάξεις (πολυδιαυλωτές, μονωτές, κυκλοφορητές, συζεύκτες) με τον έλεγχο του φωτός για τη βέλτιστη απόδοση των συνδέσεων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί διαμορφώσιμο λογισμικό και ηλεκτρονικά ελεγχόμενο, για να αντισταθμίσει τις αλλαγές στην οπτική απόδοση. Με τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης των συνδέσεων, τα οπτικά μονοπάτια μπορούν γρήγορα να αναδιαμορφωθούν διατηρώντας τη μέγιστη αξιοπιστία των δικτύων.

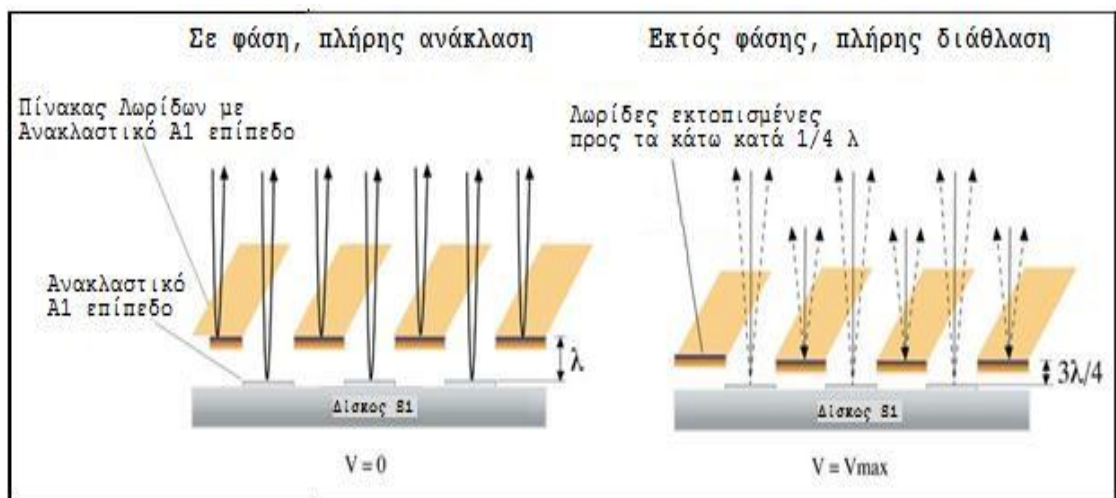


Εικόνα 4-14 :Οι δυναμικές διατάξεις συμπληρώνουν τις παραδοσιακές ενεργητικές και παθητικές διατάξεις [26].

Η πλατφόρμα διαθλαστικών MEMS επιτρέπει την ανάπτυξη δυναμικών διατάξεων που εξασφαλίζουν ανώτερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος. Η μοναδική τους σχεδίαση είναι ιδανική για μια ευρεία κλίμακα, υψηλής απόδοσης, διατάξεων που προσφέρουν σημαντικά οφέλη συγκρινόμενα με τις άλλες σχεδιάσεις βασισμένες σε MEMS.

Η τεχνολογία διαθλαστικών MEMS είναι η βέλτιστη πλατφόρμα για το σχεδιασμό και την κατασκευή δυναμικών συστατικών επειδή είναι βασισμένη στην κυματική φύση της παρεμβολής και διάθλασης του φωτός. Επιτρέπει την επεξεργασία του ενεργοποιητή D-MEMS, ο οποίος λειτουργεί ως ελεγχόμενης-τάσης μεταβλητής-διάθλασης κυκλίδωμα.

Ο ενεργοποιητής D-MEMS αποτελείται από έναν πίνακα αντανakλαστικών λωρίδων, που αιωρούνται πάνω από ένα αντανakλαστικό υπόστρωμα. Όταν το ύψος μεταξύ του πίνακα λωρίδων και του υποστρώματος είναι ένα μήκος κύματος, το φως που ανακλάται από αυτές τις δύο επιφάνειες είναι "σε φάση" και η διάταξη λειτουργεί ως κάτοπτρο. Μια τάση που εφαρμόζεται μεταξύ του πίνακα λωρίδων και του υποστρώματος δημιουργεί μια ηλεκτροστατική δύναμη. Αυτό λυγίζει τον πίνακα λωρίδων, και επομένως μειώνει το ύψος και δημιουργεί μια διαφορά φάσης στο φως που αντανakλάται από τις δύο επιφάνειες.



Εικόνα 4-15 : Ο ενεργοποιητής D-MEMS λειτουργεί ως κυκλίδωμα ελεγχόμενης-τάσης μεταβλητής-διάθλασης [26].

Όταν ο πίνακας λωρίδων μετατοπίζεται κατά το ένα τέταρτο του μήκους κύματος, το φως που αντανakλάται από τις δύο επιφάνειες είναι εντελώς "εκτός φάσης" και εμφανίζεται το φαινόμενο της παρεμβολής στην ανακλασμένη ακτίνα φωτός. Σε αυτό το σημείο, το φως διαθλάται εξολοκλήρου και δεν αντανakλάται καθόλου.

Οι διατάξεις βασισμένες σε D-MEMS έχουν τα έμφυτα πλεονεκτήματα της ταχύτητας, της αξιοπιστίας και της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Δεδομένου ότι ο πίνακας λωρίδων πρέπει μόνο να εκτρέπεται κατά μερικά δέκατα ενός μικρού, η δομή γίνεται πολύ δύσκαμπτη. Αυτή η ακαμψία, που συνδέεται με τη μικρή μάζα, οδηγεί σε μια υψηλά συντονισμένη συχνότητα, γεγονός που οδηγεί σε γρήγορους χρόνους απόκρισης, τυπικά δεκάδες των μικροδευτερολέπτων. Ένα σημαντικό πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η "ανοσία" σε περιβαλλοντικούς ακουστικούς θορύβους και δονήσεις.

Οι διατάξεις που κατασκευάζονται είναι πολύ αξιόπιστες, καθώς με αυτές τις μικρές εκτροπές, το υλικό υπόκειται σε αμελητέα κόπωση. Οι συσκευές έχουν ενεργοποιηθεί περισσότερες από 10 δισεκατομμύρια φορές χωρίς μετρήσιμη αλλαγή στην απόδοση.

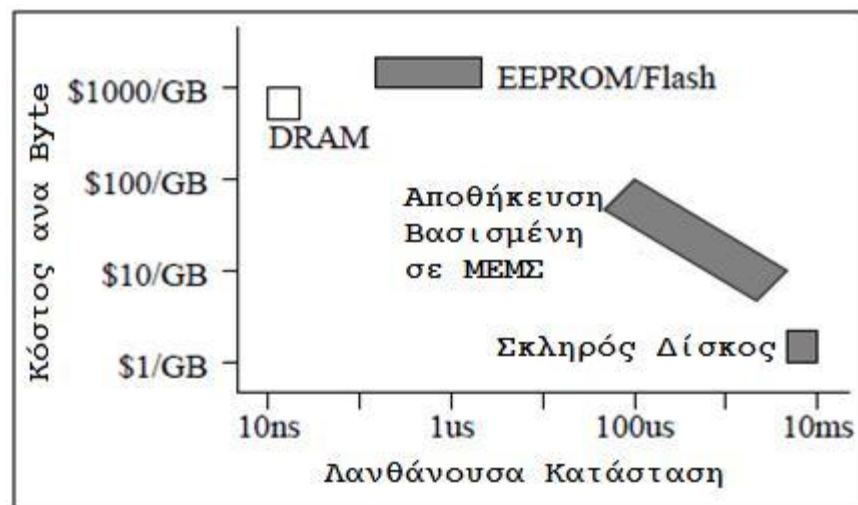
Το κιγκλίδωμα D-MEMS λειτουργεί ως ένας πολύ αποτελεσματικός μικρός πυκνωτής μέσα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, που έχει πολύ χαμηλή απώλεια ενέργειας. Συνεπώς, η συσκευή καταναλώνει λίγη ενέργεια, και δεν χρειάζεται να χάνει υπερβολική δύναμη. Αντιθέτως, οι συσκευές που χρησιμοποιούν θερμικούς ή μαγνητικούς μηχανισμούς ενεργοποίησης, καταναλώνουν αρκετά περισσότερη ενέργεια και μπορεί να απαιτήσουν και διαχείριση της θερμότητας.

4.3.6 Συσκευές Αποθήκευσης MEMS

Για δεκαετίες, η ιεραρχία μνήμης υποφέρει από σημαντικά χάσματα λανθάνουσας κατάστασης, εύρους ζώνης και κόστους μεταξύ επεξεργαστή, RAM και σκληρού δίσκου. Αν και το χάσμα απόδοσης επεξεργαστή-RAM έχει μετριαστεί από τις γρήγορες μνήμες *cache*, το χάσμα RAM-δίσκου έχει παραμείνει κενό, μεγαλώνοντας κατά 6 μεγέθη το 2000 και συνεχίζοντας να μεγαλώνει κατά περίπου 50% ετησίως. Το αποτέλεσμα είναι ένα σημαντικό πρόβλημα απόδοσης σε μια σειρά από εφαρμογές: βάσεις δεδομένων, κεντρικοί υπολογιστές δικτύων, κεντρικοί υπολογιστές ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού, ακόμη και στους χρόνους φόρτωσης του *Microsoft Word*.

Αυτό το χάσμα απόδοσης RAM-δίσκου οφείλεται στα φυσικά χαρακτηριστικά των δίσκων. Αν και οι δίσκοι συνεχίζουν να αυξάνουν τη χωρητικότητα τους πάνω από 60% ετησίως, τα μηχανικά συστήματα προσδιορισμού θέσης περιορίζουν την βελτίωση των χρόνων πρόσβασης τους μόνο σε 7% ετησίως.

Οι τεχνολογίες EEPROM (όπως οι Flash RAM ή τα Memory Sticks) προσφέρουν μια υψηλής απόδοσης εναλλακτική λύση αποθήκευσης, αλλά το τρέχον και μελλοντικό κόστος τους ανά megabyte παραμένει 2 μεγέθη υψηλότερο από την αποθήκευση σε σκληρούς δίσκους (*Εικόνα 4-19*).

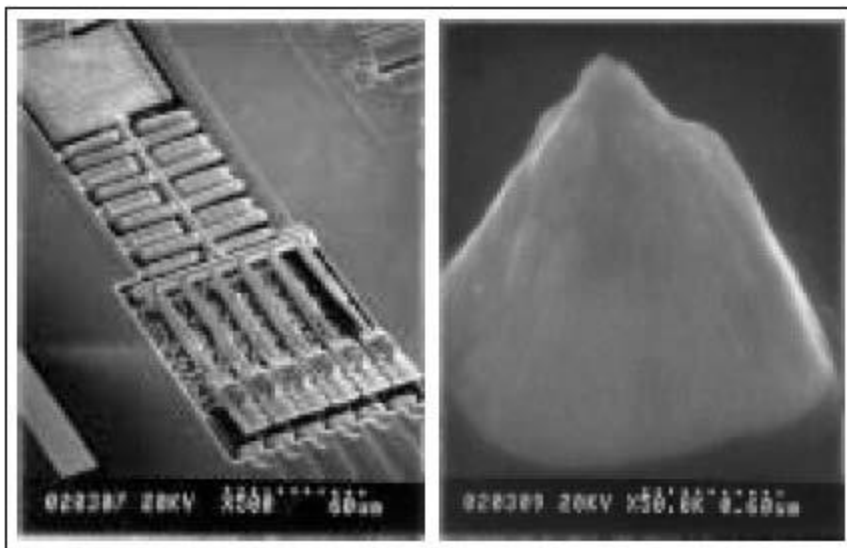


Εικόνα 4-19 : Προβλεπόμενο κόστος και λανθάνουσα κατάσταση για τις τεχνολογίες αποθήκευσης το 2005. Η βασισμένη σε MEMS αποθήκευση καλύπτει το αυξανόμενο κενό ιεραρχίας μνήμης μεταξύ του RAM-σκληρού δίσκου (τα γκριζα πεδία αντιπροσωπεύουν τη μη μεταβλητή αποθήκευση). Το πλατύ κουτάκι των EEPROM εκτείνεται στο χάσμα μεταξύ της λανθάνουσας κατάστασης ανάγνωσης-γραφής. Το πλατύ και ψηλό κουτάκι της βασισμένης σε MEMS αποθήκευσης αντιπροσωπεύει τις πολλές δυνατότητες σχεδίασης για την νέα αυτή τεχνολογία [30].

Η βασισμένη σε MEMS αποθήκευση είναι μια συναρπαστική νέα τεχνολογία που θα μπορούσε να παρέχει σημαντικά κέρδη απόδοσης σε σχέση με την υπάρχουσα τεχνολογία δίσκων με κόστος πολύ χαμηλότερο από τις EEPROM. Η βασισμένη σε MEMS αποθήκευση είναι μια τεχνολογία αποθήκευσης που συγχωνεύει το μαγνητικό υλικό καταγραφής με χιλιάδες κεφαλές εγγραφής για να παρέχει on-line χωρητικότητα αποθήκευσης 1-10 MB δεδομένων σε μια περιοχή του 1 cm². Η προσομοίωση δείχνει ότι αυτές οι συσκευές έχουν χρόνους πρόσβασης 0,5-1,1 ms και ροή εύρους ζώνης μέχρι 320 MB/s. Περαιτέρω, η ενσωμάτωση της βασισμένης σε MEMS αποθήκευσης με τα στοιχεία επεξεργασίας θέτει τα θεμέλια για έναν ενιαίο υπολογιστικό "λίθο" περιέχοντας την επεξεργασία, πρωτεύουσα μεταβλητή και μη μεταβλητή δευτερεύουσα αποθήκευση.

Δεδομένου ότι οι βασισμένες σε MEMS συσκευές αποθήκευσης φτιάχνονται με παραδοσιακές χαμηλού κόστους VLSI τεχνικές παράλληλα με λιθογραφικές διαδικασίες κατασκευής, το κόστος της ενσωμάτωσης στοιχείων επεξεργασίας βασισμένων σε MEMS μαζικής αποθήκευσης στο ίδιο τσιπ θα μπορούσε να αποδειχθεί σημαντικά λιγότερο από μια ισοδύναμη λύση RAM. Διάφοροι μικροεπεξεργαστές ή εκατοντάδες συσκευές (π.χ., κωδικοποιητές/αποκωδικοποιητές MPEG, συστήματα κρυπτογράφησης,

επεξεργασία σήματος) που κατασκευάζονται άμεσα με βασισμένη σε MEMS αποθήκευση θα μπορούσαν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση, την κατανάλωση ισχύος, και το κόστος των συσκευών αυτών εν συγκρίσει με τις παραδοσιακές πολλαπλών διατάξεων λύσεις.



Εικόνα 4-20 : Πρωτότυπο σύστημα τοποθέτησης και άκρη ελέγχου. Επειδή το υλικό καταγραφής δεν είναι τελείως λείο, το σύστημα τοποθέτησης πρέπει να είναι σε θέση να ρυθμίζει ενεργά το ύψος των ακρών ελέγχου. Οι άκρες θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν μία από τις υπάρχουσες σχεδιάσεις καταγραφής, από απλή δακτυλογράφηση" με μόνιμους μαγνήτες, ως τις πιο σύνθετες μαγνητοαντιστατικές τεχνικές αντίληψης που συναντώνται στους τυπικούς δίσκους [30].

Μια κατηγορία βασισμένων σε MEMS συσκευών αποθήκευσης υπό έρευνα υιοθετεί έναν πίνακα χιλιάδων αρθρωτών μαγνητικών κεφαλών ανάγνωσης-γραφής (άκρες ελέγχου, Εικόνα 4-20 :), όπου η κάθε μια έχει πρόσβαση σε ένα πυκνό υπόστρωμα μαγνητικού υλικού περίπου με τον ίδιο τρόπο που οι κεφαλές των δίσκων έχουν πρόσβαση στις μαγνητικές πλάκες.

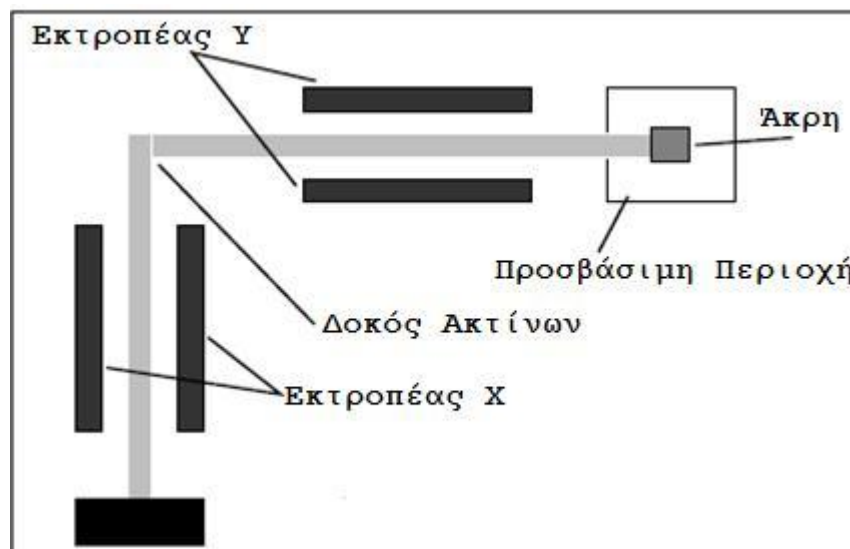
Αυτή η σχεδίαση προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα σε διάφορους τομείς συγκρινόμενη με τη βασισμένη σε δίσκους τεχνική αποθήκευσης, όπως ο χρόνος πρόσβασης, το μέγεθος και η μάζα των συσκευών, η κατανάλωση ενέργειας, το κόστος, οι καταστάσεις αποτυχίας, και η ευαισθησία στις δονήσεις είναι κατά πολύ υψηλότερες. Οι πολλαπλές άκρες ελέγχου μπορούν ταυτόχρονα να έχουν πρόσβαση στα μέσα για να επιτύχουν μια από τις πολλές μορφές παραλληλισμού:

- όλες οι άκρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα στοιχεία πρόσβασης (για να αυξήσουν τη ρυθμοαπόδοση),
- μερικές άκρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και τη διόρθωση λαθών (για να ενισχύσουν την αξιοπιστία),
- ή οι απολύτως ανεξάρτητες προσβάσεις μπορούν να προχωρήσουν παράλληλα.

Επιπλέον, η διαδικασία επεξεργασίας των MEMS μπορεί να ενσωματωθεί στις

τυποποιημένες διαδικασίες CMOS, ανοίγοντας το δρόμο για το συνδυασμό επεξεργαστών και μη μεταβλητών μέσων αποθήκευσης στην κατασκευή μεγάλης κλίμακας αρχιτεκτονικών, σύστημα-σε-ένα-τσιπ.

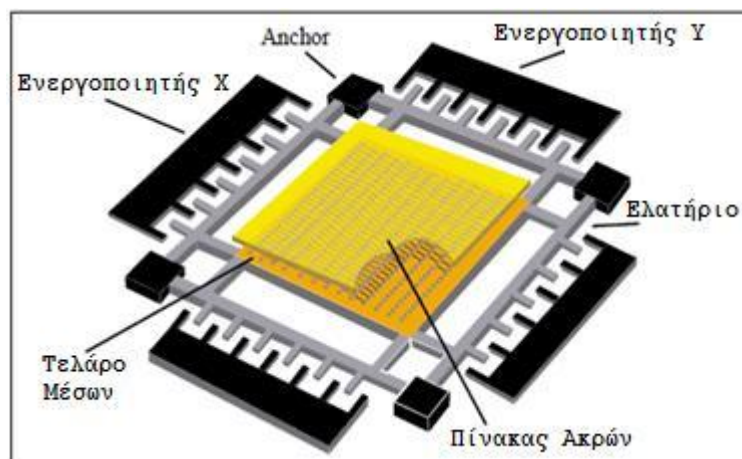
Οι μικροδομές MEMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χτίσουν συσκευές αποθήκευσης με διάφορους τρόπους-οι αποφάσεις σχεδίασης έχουν επιπτώσεις στην κατασκευή, στην αντοχή, στο κόστος, στην χωρητικότητα, στην ταχύτητα πρόσβασης και στη λανθάνουσα κατάσταση αυτών των συσκευών.



Εικόνα 4-21 : Μια άκρη ελέγχου δοκού-ακτίνων στο "σταθερών-μέσων" πρότυπο. Οι X και Y εκτροπέες είναι ικανοί να τοποθετούν γρήγορα την άκρη οπουδήποτε στη μικρή περιοχή πρόσβασης. Η ολική χωρητικότητα αυτού του προτύπου περιορίζεται στις δεκάδες ή ίσως εκατοντάδες megabyte επειδή μόνο το 1% της περιοχής μέσων είναι προσιτό από την άκρη [30].

Η Εικόνα 4-21 :απεικονίζει μια προτεινόμενη σχεδίαση αποθήκευσης βασισμένη σε MEMS. Σε αυτό το πρότυπο "σταθερών μέσων", μικροσκοπικές δοκοί-ακτίνων σχήματος L συγκρατούν μια άκρη ελέγχου πάνω από ένα σταθερό μαγνητικό υπόστρωμα. Οι τάσεις που εφαρμόζονται στους εκτροπέες παράγουν ηλεκτροστατικές δυνάμεις προς τη X και Y κατεύθυνση, κινώντας γρήγορα την άκρη προς διαφορετικές θέσεις bit. Οι τυποποιημένες τεχνικές μαγνητικής καταγραφής χρησιμοποιούνται για να διαβάσουν ή να γράψουν τα bits, με τον ίδιο απεριόριστο αριθμό κύκλων ανάγνωσης-εγγραφής που συναντούνται στους οδηγούς δίσκων. Η σχεδόν χωρίς μάζα δοκός-ακτίνων επιτρέπει πολύ γρήγορους χρόνους προσδιορισμού της θέσης (της τάξης των δεκάδων έως εκατοντάδων μικροδευτερολέπτων) αλλά η χωρική απόδοση είναι μικρή - περίπου μόνο το 1% της προσβάσιμης περιοχής του μέσου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση. Σε σύγκριση, οι συμβατικοί οδηγοί δίσκων χρησιμοποιούν το 50% της

περιοχής για την αποθήκευση δεδομένων. Αυτή η σχεδίαση είναι χρήσιμη για τις βασισμένες σε ΜΕΜΣ συσκευές αποθήκευσης, αλλά η χωρητικότητα των μόνο δέκα έως εκατό megabyte ανά συσκευή περιορίζει την πρακτικότητά της σε σύγκριση με τις Flash RAM, τα ROM που τροφοδοτούνται από μπαταρία, και άλλες μη μεταβλητές πρωτεύουσες διατάξεις αποθήκευσης.



Εικόνα 4-22 : Πρότυπο "κινούμενων μέσων". Το τελάρο μέσων συγκρατείται κάτω από τις σταθερές άκρες. Το τελάρο μπορεί να κινηθεί κατά μήκος του άξονα X και Y, επιτρέποντας στα σταθερά άκρα να έχουν πρόσβαση στο 30-50% του συνόλου της περιοχής [30].

Οι ερευνητές στο Carnegie Mellon ερευνούν μια περισσότερο αποδοτική σχεδίαση (Εικόνα 4-22). Σε αυτό το πρότυπο "κινούμενων μέσων", ένα ορθογώνιο τελάρο συγκρατείται με ελατήρια πάνω από έναν πίνακα αρκετών χιλιάδων σταθερών ακρών ελέγχου. Το ίχνος μιας συσκευής είναι $14 \times 14 \text{ mm}$, με χρησιμοποιήσιμη περιοχή περίπου $8 \times 8 \text{ mm}$. Μέχρι 10.000 άκρες μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτήν την $8 \times 8 \text{ mm}$ περιοχή. Υποθέτοντας ένα κύτταρο bit χρειάζεται $0.0025 \mu\text{m}^2$ (50 nm ανά πλευρά) και κωδικοποίησης/ECC 2 bit ανά byte, η χωρητικότητα μιας τέτοιας συσκευής είναι περίπου 4 GB. Ένας στόχος $0.0009 \mu\text{m}^2$ (30 nm ανά πλευρά) παράγει χωρητικότητα 11 GB ή μεγαλύτερη. Ενώ αυτή η σχεδίαση συσκευών βελτιώνει τη χωρητική απόδοση κατά 30-50 %, η μεγαλύτερη μάζα του τελάρου αυξάνει τους χρόνους προσδιορισμού της θέσης σχετικά με το πρότυπο "σταθερών μέσων" πάνω από ένα όριο για να επιτύχει τις ανάγκες χωρητικότητας των δίσκων [30].

Παρόλο που η βασισμένη σε ΜΕΜΣ αποθήκευση είναι έτη μακριά από την εμπορευματοποίηση, η ενδεχόμενη επιρροή της στο χάσμα της ιεραρχίας μνήμης κάνει αυτήν την τεχνολογία σημαντική και ενδιαφέρουσα για τους αρχιτέκτονες συστημάτων.

4.3.7 MEMS και χάος

Με την ανάπτυξη της νανοεπιστήμης και της νανοτεχνολογίας, άρχισε να εκδηλώνεται και ενδιαφέρον προς τα μη γραμμικά, δυναμικά, μικρής-κλίμακας συστήματα, όπως τα νανοαντηχεία, που είναι ικανά να λειτουργούν σε εξαιρετικά υψηλής συχνότητας φάσματα. Εντούτοις, σε μικρότερα μεγέθη, η παραγόμενη ενέργεια τέτοιων αντηχείων είναι χαρακτηριστικά πιο μικρή και η επίδραση της μη γραμμικότητας γίνεται κρίσιμη. Αυτό συμβαίνει γιατί μερικά θεμελιώδη εξαρτήματα σε ένα αντηχείο, όπως μια ακτίνα cantilever, μπορούν να συμπεριφερθούν μη γραμμικά ακόμη και σε ένα μέσο πλάτος, που οδηγεί, για παράδειγμα, σε χαοτικά δυναμικά. Ενώ έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στις βασικές αρχές των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων και του χάους τις προηγούμενες τρεις δεκαετίες, η έρευνα αυτή δεν έχει επεκταθεί επαρκώς στις μικρής κλίμακας συσκευές, οι οποίες γίνονται όλο και πιο απαραίτητες σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της εφαρμοσμένης μηχανικής.

Σε ορισμένες εφαρμογές, όπως οι αναμείκτες microfluid και οι επικοινωνίες, το χάος είναι επιθυμητό. Ωστόσο, για τις περισσότερες εφαρμογές των υψηλής συχνότητας αντηχείων, το χάος θεωρείται ανεπιθύμητο. Επιθυμούμαι να ελέγξουμε το χάος για να παράγουμε περιοδικά δυναμικά και να επιτύχουμε ισχυρή ενέργεια παραγωγής ακόμη και σε πολύ μικρά μεγέθη.

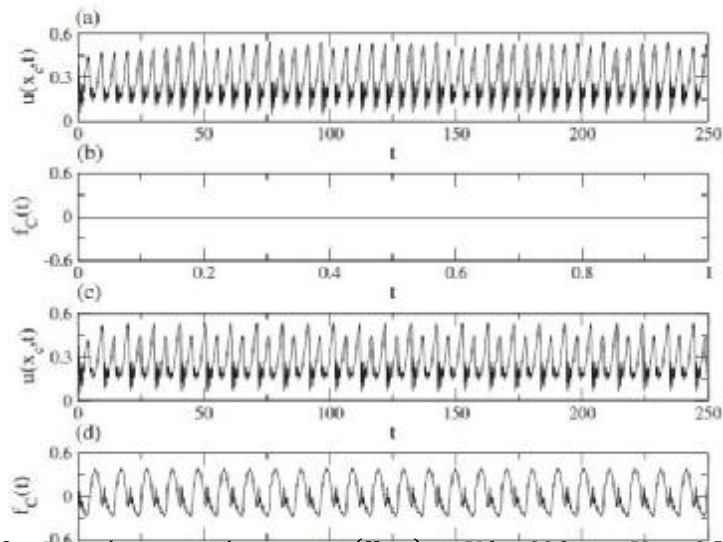
Θεωρούμε ένα σύστημα μικρής κλίμακας, δηλαδή τα MEMS, με μια συντονισμένη ακτίνα. Από μαθηματικής άποψης, ένα τέτοιο αντηχείο περιγράφεται από μια μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση με περίπλοκες συνθήκες ορίων, που προκύπτουν από την ηλεκτροφυσική και μηχανική φύση της συσκευής.

Η συμπεριφορά συντονισμού μιας παραμορφώσιμης, διπλά στερεωμένης δοκού στα MEMS έχει προσελκύσει πολλή προσοχή τελευταία. Μια διπλά στερεωμένη επίπεδη δοκός πάνω από τη πλάκα βάσης των MEMS έχει μια απλή δομή αλλά παρουσιάζει πλούσια δυναμική συμπεριφορά όταν εφαρμόζεται σε αυτή μια εξωτερική τάση.

Η εφαρμοζόμενη τάση παράγει μια πιθανή διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αγωγών, της δοκού και της πλάκας της βάσης, που οδηγούν σε ηλεκτροστατικές φορτίσεις στις επιφάνειές τους. Λόγω της αλλαγής στην απόσταση μεταξύ των αγωγών, οι διανομές φορτίου μπορούν να αλλάξουν αναλόγως, προκαλώντας μια δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ των αγωγών. Ειδικότερα, όταν εφαρμόζεται μια τάση συνεχούς ρεύματος στα MEMS, η προκληθείσα δύναμη αναγκάζει τη δοκό να παραμορφωθεί προς την πλάκα της βάσης. Εάν η τάση υπερβαίνει μια ορισμένη pull-in τιμή, το κέντρο της δοκού μπορεί να παραμορφωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε ακόμη και να αγγίξει την

πλάκα της βάσης. Εάν η εφαρμοσμένη τάση συνεχούς ρεύματος προσεγγίσει αλλά είναι μικρότερη από την pull-in τάση, η δύναμη γίνεται μη γραμμική όσον αφορά τη μετατόπιση της δοκού και οδηγεί σε μη γραμμικά δυναμικά. Σε αυτήν την περίπτωση, όταν εφαρμόζεται μια τάση εναλλασσόμενου ρεύματος, η μη γραμμική αλληλεπίδραση μπορεί να οδηγήσει σε ποικιλία ταλαντώσεων. Τυπικά, η δοκός ταλαντεύεται περιοδικά για μικρό πλάτος εναλλασσόμενου ρεύματος αλλά το χάος μπορεί να προκύψει μέσω διαδοχικών διπλής περιοδικότητας διακλαδώσεων καθώς το πλάτος τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος αυξάνεται.

Ο έλεγχος του χάους και η ενίσχυση της παραγόμενης ενέργειας μπορεί να συμβεί ταυτόχρονα, δηλαδή, όταν το χάος μετατρέπεται σε κάποια περιοδική κίνηση, η ενέργεια παραγωγής του αντηχείου MEMS μπορεί να αυξηθεί. Μια συνήθως εφαρμοζόμενη μέθοδος για την αύξηση της ενέργειας του αντηχείου MEMS είναι να χρησιμοποιηθεί ένας πίνακας ίδιων δοκών *cantilever*, αλλά το μέγεθος ενός τέτοιου συστήματος πινάκων είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερο από αυτό μιας ενιαίας *cantilever* δοκού.



Εικόνα 4-28 : Χρονοσειρά της μετατόπισης για $u(x_c, t)$ για $V_{dc}=66.2V$ και $V_{ac}=6.535V$ (α) όταν ο όρος ελέγχου $f_c(t)$ δεν χρησιμοποιείται. Χρονοσειρά του $f_c(t)$ (β) όταν χρησιμοποιείται και (δ) όταν δεν χρησιμοποιείται [34]

Στον παραδοσιακό έλεγχο του χάους, η διαταραχή του ελέγχου εξαφανίζεται όταν επιτυγχάνεται η περιοδική κίνηση. Η δύναμη ελέγχου ανταποκρίνεται στη μετατόπιση της δοκού MEMS. Κατά συνέπεια, όταν ελέγχεται η δοκός, επιτυγχάνεται περιοδική κίνηση και ο έλεγχος γίνεται περιοδικός. Αυτό απαιτείται για την αύξηση της ενέργειας παραγωγής μέσω του μηχανισμού συντονισμού. Οι εικόνες 4-28 (α)-(δ) παρουσιάζουν μια χρονοσειρά για τη μετατόπιση του κέντρου της δοκού και του ελέγχου $f_c(t)$ για $n=2$. Όταν ο όρος του ελέγχου είναι απών, δηλ., $f_c(t)=0$ η μετατόπιση παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά, αλλά όταν χρησιμοποιείται ο όρος, τόσο η μετατόπιση όσο και ο έλεγχος διαταραχής γίνονται περιοδικές [34].

4.4 Εφαρμογές Στην Αεροδιαστημική

4.4.1 Έλεγχος Ανατάραξης

Οι αναταράξεις είναι ένα πρόβλημα στην αεροδιαστημική βιομηχανία εδώ και πολύ καιρό. Σε μια μηχανή, οι αναταράξεις μειώνουν την ταχύτητα κατά μήκος του άξονα κίνησης και την ορμή ενώ οι αναταράξεις στο φτερό προκαλούν μεγαλύτερη αντίσταση του αέρα.

Με τα MEMS, ο έλεγχος των αναταράξεων μπορεί να γίνει δυνατός σε μικροκλίμακα. Σε ένα πείραμα ελέγχου αναταράξεων σε έναν σωλήνα, οι μικροαισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για να «αισθανθούν» μικρές αλλαγές της πίεσης και της θερμοκρασίας στα τοιχώματα του σωλήνα, και οι μικροενεργοποιητές είναι ικανοί να εξαλείψουν τις περισσότερες από τις αλλαγές [1].

4.4.2 UAVs

Τα UAVs (*Τηλεκατευθυνόμενα Εναέρια Οχήματα*) χρησιμεύουν ως στρατιωτικές τηλεκατευθυνόμενες συσκευές αναγνώρισης και ως διαστημικά οχήματα εξερεύνησης. Δεδομένου ότι το μέγεθος των UAVs δεν περιορίζεται από τους πιλότους, είναι καλύτερο να είναι μικρά για να μειωθεί το κόστος. Η τεχνολογία των MEMS δίνει μια σημαντική ώθηση στα UAVs με την ανάπτυξη των μικρομηχανικών ωθητών που χρησιμοποιούν αέρα, και των ενεργοποιητών και των μηχανών μικροτζέτ [1].

4.5 ΒιοMEMS

Η έρευνα και η ανάπτυξη των MEMS αυξάνονται γρήγορα σε πολλούς διαφορετικούς τομείς. Μια από τις πιο ελπιδοφόρες νέες εφαρμογές της τεχνολογίας των MEMS είναι στη βιοιατρική, ή αλλιώς στην εφαρμογή της γνώσης της βιολογίας στην ανθρώπινη υγεία. Οι νέες συσκευές αποδέσμευσης των φαρμάκων όπως οι μικροαντλίες, αναπτύσσονται για την ελεγχόμενη, μακροπρόθεσμη διοχέτευση των φαρμάκων όπως η ινσουλίνη. Συσκευές MEMS εφευρίσκονται για να βοηθήσουν τις φαρμακοβιομηχανίες να αναπτύξουν νέα φάρμακα. Ολόκληρα μικροσκοπικά εργαστήρια χημείας μπορούν να κατασκευαστούν στην επιφάνεια ενός τσιπ. Οι βιοιατρικές συσκευές MEMS αναπτύσσονται επίσης για να βελτιώσουν τα ηλεκτρονικά χειρουργικά νυστέρια, τα τεχνητά όργανα, και τα τεχνητά άκρα.

4.5.1 Lab-On-A-Chip

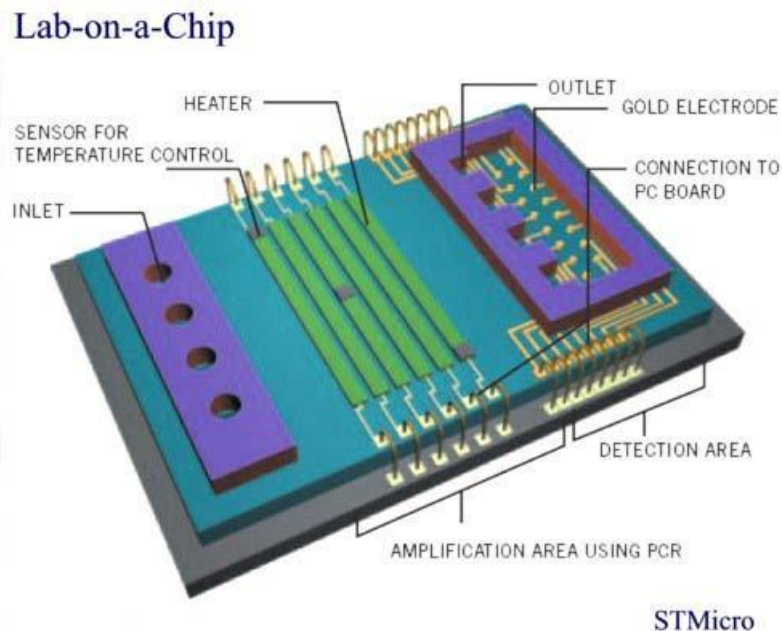
Ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την ανάλυση των πρωτεϊνών στο βιολογικό εργαστήριο του μέλλοντος είναι μια μικρορευστομηχανική συσκευή που καλείται ‘Lab-on-a-chip’.

Αυτά τα ‘εργαστήρια’ είναι κατασκευασμένα χρησιμοποιώντας φωτολιθογραφικές διαδικασίες για τη δημιουργία κυκλωμάτων από μικροσκοπικά κανάλια σε τσιπ από χαλαζία, πυρίτιο ή γυαλί. Αυτά τα τσιπ κατευθύνουν τη ροή των υγρών, χημικών αντιδραστηρίων ακριβώς όπως οι ημιαγωγοί κατευθύνουν τη ροή των ηλεκτρονίων. Μπορούν να αραιωθούν, να συνδυαστούν, να αντιδράσουν με άλλα αντιδραστήρια, ή να διαχωριστούν – όλα σε ένα μοναδικό τσιπ (*Εικόνα 4-29*).

Αυτά τα μικρορευστομηχανικά κυκλώματα μπορούν να σχεδιαστούν για να προσαρμόσουν ουσιαστικά οποιαδήποτε βιοχημική επεξεργασία. Για παράδειγμα, ένα *lab-on-a-chip* για ανοσολογικές αναλύσεις πιθανόν να ενσωματώνει εισαγωγή δείγματος, αραιώση, αντίδραση, και διαχωρισμό, ενώ κάποιο το οποίο είναι σχεδιασμένο για τη χαρτογράφηση ενζυμικών τεμαχίων περιστολής ίσως να έχει ένα θάλαμο ενζυμικής αφομοίωσης ακολουθούμενο από μια σχετικά μακρά στήλη διαχωρισμού.

Το μικρό τους μέγεθος μειώνει τους χρόνους επεξεργασίας και το ποσό των αντιδραστηρίων που είναι απαραίτητα για μια ανάλυση, μειώνοντας σημαντικά τις δαπάνες. Ακριβώς όπως οι μικροηλεκτρονικές συσκευές μπορούν να κατασκευαστούν με πολλά στοιχεία σε ένα μόνο τσιπ, οι μικρορευστομηχανικές συσκευές μπορούν να κατασκευαστούν με πολλά κανάλια, επιτρέποντας τεράστια ποσότητα παράλληλων χημικών αναλύσεων σε λογικό κόστος.

Το Lab-on-a-chip, λοιπόν, θα βοηθήσει τους γιατρούς να κάνουν γρηγορότερες και ακριβέστερες διαγνώσεις καθώς και θα υποδείξουν φθηνότερες και πιο αποτελεσματικές θεραπείες. Θα επιτρέψει στους γιατρούς να προσδιορίσουν γρήγορα και με ακρίβεια νόσους, ενώ ταυτόχρονα θα παίρνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τον ασθενή για να προσαρμόσουν την καλύτερη δυνατή θεραπεία για αυτόν.



Εικόνα 4-29 : Απεικόνιση ενός Lab-on-a-chip [35].

Μια παραπέρα βελτίωση της τεχνολογίας των πρωτεϊνικών τσιπ, είναι μια μέθοδος γνωστή ως γηγενής στιγματισμός (*Native Spotting*) και είναι ήδη προς ανάπτυξη. Ο γηγενής στιγματισμός προϋποθέτει την προσκόλληση των πρωτεϊνών στην επιφάνεια του τσιπ στη 'γγενή' ή φυσική τους κατάσταση. Η φυσική κατάσταση των πρωτεϊνών, ωστόσο, είναι σε υδατοειδές περιβάλλον. Επομένως, οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει την πατενταρισμένη νανοτεχνολογία, γνωστή ως lab – on – a -chip για να βυθίσουν τις σταθερές πρωτεΐνες σε μικροσταγονίδια. Αυτά τα μικροσταγονίδια όχι μόνο κρατούν τις πρωτεΐνες στο τσιπ στη γηγενή τους κατάσταση, αλλά επίσης βελτιώνουν τα αποτελέσματα των εξετάσεων. Τα μικροσταγονίδια ενεργούν ως μικροί δοκιμαστικοί σωλήνες χωρίς τοιχώματα, μειώνοντας έτσι την απώλεια πολύτιμης πρωτεΐνης από τον ασθενή, εξαιτίας της απορρόφησης του υλικού από το δοκιμαστικό σωλήνα.

Οι πρωτεϊνικές αλληλεπιδράσεις μπορούν να είναι χρήσιμες, όχι μόνο για τη έγκαιρη διάγνωση πολλών ασθενειών, αλλά επίσης και για τη μελέτη του μηχανισμού της φαρμακευτικής δράσης στο σώμα ή για τον προσδιορισμό της προσωπικής προδιάθεσης ορισμένων ασθενών στις παρενέργειες των φαρμάκων και στις αλλεργίες.

Όταν τα σωματικά υγρά ενός ασθενούς όπως είναι το σάλιο ή το αίμα έρθουν σε επαφή με το βιοτσίπ, μόρια ρέουν μέσα στα φρεάτια, τα οποία έχουν μέσα τους ειδικά μόρια 'ανίχνευσης'- αισθητήρες. Εάν μια ορισμένη πάθηση είναι παρούσα στα μόρια του ασθενούς, οι αισθητήρες εκπέμπουν φως. Για παράδειγμα, εάν ένας γιατρός θέλει να εξετάσει έναν ασθενή για συμπτώματα πυρετού, θα είναι ικανός να εξετάσει το

σάλιο ή το αίμα του ασθενούς χρησιμοποιώντας ένα βιοτσίπ ‘πυρετού’ το οποίο, με τη σειρά του, εξετάζει τις πιθανές αιτίες του πυρετού.

Μετά το τεστ, ο γιατρός μπορεί να εξετάσει τη διαμόρφωση του φωτός του τσιπ για να επιβεβαιώσει την ανάλυσή του.

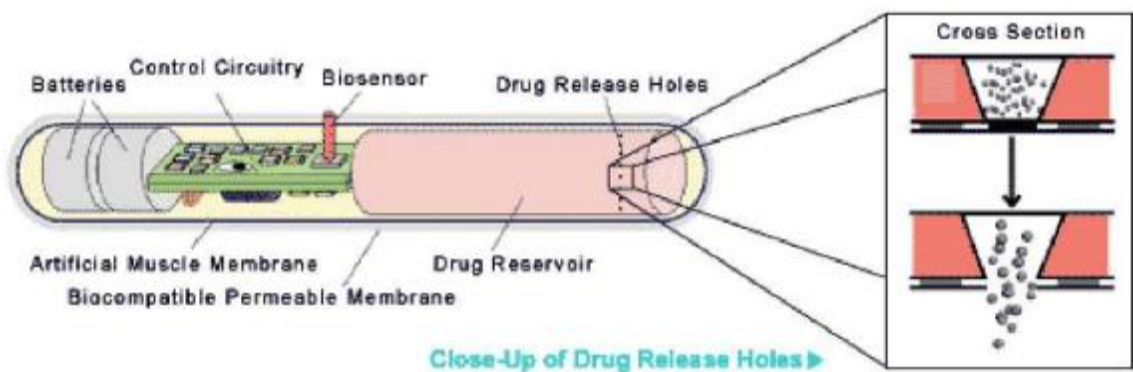
Καθώς τα διαφορετικά φρεάτια στο βιοτσίπ αντιδρούν σε διαφορετικές γενετικές παθήσεις, ένας ασθενής που πάσχει από σφοδρό και οξύ αναπνευστικό σύνδρομο θα παρουσιάσει μια διαφορετική διαμόρφωση φωτός από κάποιον που πάσχει από γρίπη. Εκτός από διάγνωση, τα βιοτσίπ μπορούν επίσης να προσδιορίσουν τη γενετική προδιάθεση του ασθενούς. Το οργανικό προσχέδιο θα επιτρέψει στο γιατρό να εκτιμήσει πόσο καλά ένας ασθενής θα ανταποκριθεί σε διάφορες θεραπείες. Αυτό σημαίνει ότι οι θάνατοι λόγω αλλεργίας σε φάρμακα, μια από τις πρώτες 10 αιτίες θανάτου στο κόσμο σήμερα, θα ανήκουν στο παρελθόν, και πλέον δεν θα ξανακούσουμε το γιατρό να μας λέει να γυρίσουμε σε μια βδομάδα εάν τα χορηγούμενα φάρμακα δεν φέρουν τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Θα ξέρει ήδη στα σίγουρα τη θεραπεία στην οποία ανταποκρινόμαστε καλύτερα.

Σχετικά απλά labs – on – a - chip χρησιμοποιούνται ήδη για ορισμένες αναλύσεις νουκλεϊκού οξέος και πρωτεϊνών, αλλά η τεχνολογία ρευστομηχανικών σύντομα θα επιτρέψει την εκτέλεση εκατομμυρίων αυτόματων βιοχημικών πειραμάτων την ημέρα χρησιμοποιώντας μικροσκοπικές ποσότητες αντιδραστηρίων [36].

4.5.2 Ιατρικές Εμπορικές Εφαρμογές

Οι συσκευές χορήγησης φαρμάκων του μέλλοντος παίρνουν μερικά σημαντικά παραδείγματα από τις ολοκληρωμένες συσκευές μικρορευστομηχανικής. Αυτή η πρόκληση της ενσωμάτωσης ενεργών στοιχείων ‘αίσθησης’ μέσα σε συνεπτυγμένα, χαμηλής ενέργειας μικρορευστομηχανικά συστήματα παροχής φαρμάκων είναι ένα από τα στοιχεία που έχει μεγάλη απήχηση στις εταιρίες βιοτεχνολογίας, οι οποίες ψάχνουν να αναπτύξουν αυτορυθμιζόμενα μικροσυστήματα ως την απόλυτη θεραπευτική λύση στις χρόνιες ασθένειες όπως ο διαβήτης ή το HIV.

Προς το παρόν είναι υπό εξέλιξη μια ολοκληρωμένη, αυτορυθμιζόμενη αντιδραστική θεραπευτική συσκευή, Εικόνα 4-30.



Εικόνα 4-30 : Ένα σχηματικό αυτορυθμιζόμενης ανταπόκρισης θεραπευτικό σύστημα [37].

Περιγράφεται ότι διαθέτει πλήρως ενσωματωμένους βιοαισθητήρες, ηλεκτρονική ανάδραση και διάχυση φαρμάκων. Αυτή η συσκευή έχει σχεδιαστεί για να ανιχνεύει τα φυσιολογικά επίπεδα των μεταβολιτών, όπως η γλυκόζη. Όταν εντοπίζεται μια μεταβολή, στέλνεται ένα σήμα από τον αισθητήρα στις μπαταρίες, οι οποίες εκπέμπουν ηλεκτρικό φορτίο. Το ηλεκτρικό φορτίο τότε πυροδοτεί το άνοιγμα ενός αντιδραστικού υλικού, που επιτρέπει τη διάχυση του επιθυμητού θεραπευτικού παράγοντα (πχ. ινσουλίνη) από τη δεξαμενή. Όταν τα επίπεδα της γλυκόζης επιστρέψουν στα φυσιολογικά, ο αισθητήρας σταματά την απελευθέρωση του ηλεκτρικού φορτίου από τη μπαταρία, κλείνοντας τη δεξαμενή και εμποδίζοντας τη διάχυση περισσότερης ινσουλίνης. Αυτός ο τύπος της συνεχόμενης παρακολούθησης, των ολοκληρωμένων συστημάτων χορήγησης θα επιφέρει πραγματικά επανάσταση στην περίθαλψη του ασθενούς.

Η διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω αναπτύχθηκε για τη χρήση εξωτερικών και εμφυτευμένων συστημάτων για την παροχή πρωτεϊνών, ορμονών, φαρμακευτικής αγωγής κατά του πόνου, και άλλων φαρμακευτικών συστατικών.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα αποθήκευσης και απελευθέρωσης πολλαπλών φαρμάκων ή χημικών από μια μόνο συσκευή. Με αύξηση της ολοκλήρωσης οι διατάξεις αυτές υπόσχονται την ανάπτυξη τους μέσα σε μια έξυπνη συσκευή. Συνδυάζοντας τους μηχανισμούς διάχυσης κάθε αισθητήρα, μπορούν να επιτευχθούν, εάν χρειάζεται, περίπλοκα χημικά σχήματα διάχυσης.

Οι ερευνητές επίσης σχεδιάζουν την τεχνολογία των μικροβελόνων με συστήματα μικρορευστομηχανικής για τη παραγωγή ενός ελάχιστα επεμβατικού συστήματος

κατάλληλης φαρμακευτικής έγχυσης επόμενης γενιάς. Με διαστάσεις κατά προσέγγιση ενός ασημένιου νομίσματος δολαρίου, αυτό το λειτουργικό σύστημα θα αποτελείται από αναλώσιμο πολυμερές υλικό που θα περιέχει το θεραπευτικό μίγμα και τις μικροβελόνες που θα κρατιούνται στο δέρμα με συγκολλητική ουσία. Μια επαναχρησιμοποιήσιμη μονάδα που θα περιέχει μικροκατασκευαστικά λογικά, μετρητικά και διαβιβαστικά κυκλώματα μπορεί να διασυνδεθεί με το αναλώσιμο στοιχείο για να σχηματίσει ένα εντελώς ενιαίο σύστημα χορήγησης. Ενώ οι περισσότερες συσκευές ρευστών βασίζονται σε αντλίες για την παροχή των υγρών, αυτή η συσκευή περιλαμβάνει μια δεξαμενή ρυθμιζόμενης πίεσης που χρησιμοποιείται για την κίνηση του διαλύματος διαμέσου ενός κλειστού ρευστού δικτύου, μέχρι να συμβεί η ένεση κατά μήκος των στρωμάτων του δέρματος. Επιπρόσθετα ενσωματώνεται, ένα μετρητικό σύστημα στα ρευστά συστατικά για να εξασφαλίσει ακριβή παροχή. Όπως οι *'Lab-on-a-Chip'* συσκευές, έτσι και αυτή επιχειρεί να σχεδιάσει μικρορευστομηχανικά συστήματα για φαρμακευτική χορήγηση υψηλής ολοκλήρωσης [37].

4.5.3 Υπό Ανάπτυξη Συσκευές MEMS

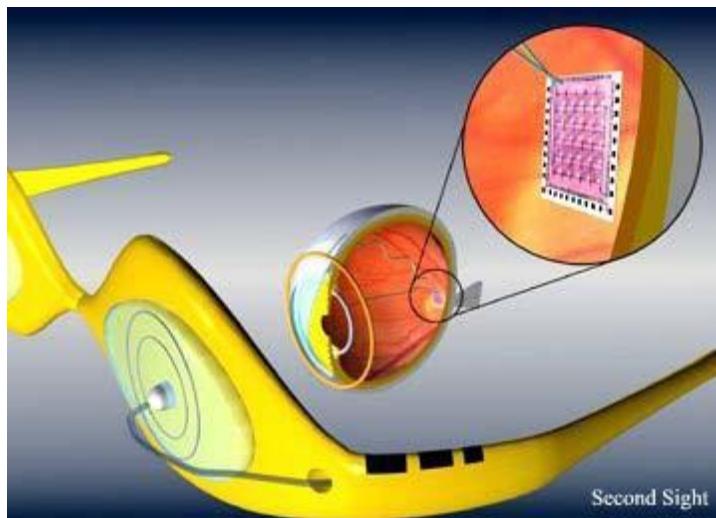
4.5.3.1 Βοηθήματα Ακοής

Τα εργαστήρια Starkey χρησιμοποιούν τη Νανοτεχνολογία στα βοηθήματα ακοής. Το τσιπ χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα GMR. Οι αισθητήρες είναι βασισμένοι σε ένα τσιπ που χρησιμοποιεί τη στροφορμή των ηλεκτρονίων για να αποθηκεύει πληροφορίες και μπορεί να ταξινομηθεί στις Νανοηλεκτρονικές συσκευές. Ο αυτόματος διακόπτης μας απαλλάσσει από την ανάγκη ενός χειροκίνητου διακόπτη. Ο αισθητήρας, το ένα τρίτο σε μέγεθος του πηνίου του διακόπτη, κατασκευάζεται από στρώματα μαγνητικών λεπτών μεμβρανών. Τα μικροσκοπικά μικρόφωνα MEMS είναι επίσης εμπορικά διαθέσιμα από διάφορες εταιρείες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα βοηθήματα ακοής.

Εντούτοις, μπορούμε να αναμένουμε να δούμε μοσχεύματα ακοής στο μέλλον. Ένα βασισμένο στα MEMS μόσχευμα αυτιού έχει σχεδιαστεί από το πανεπιστήμιο του Μίτσιγκαν και μοιάζει με έναν κοχλία αυτιού. Πρόκειται για το πρώτο τσιπ ακοής με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά. Χρησιμοποιεί μικρομηχανικές δέσμες προβολής για την αναπαραγωγή του ήχου. Δέσμες διαφορετικών μηκών χρησιμοποιούνται για να διακρίνουν τις συχνότητες, ενώ ένας πιεζοηλεκτρικός δονητής αλληλεπιδρά με το αυτί [35].

4.5.3.2 Βοηθήματα Όρασης

Έρευνες για εμφυτεύματα αμφιβληστροειδούς βασισμένα σε MEMS πραγματοποιείται από διάφορα εργαστήρια συμπεριλαμβανομένων των *Εθνικών Εργαστηρίων Sandia* από κοινού με τα *Εθνικά Εργαστήρια DOE*, το *Οφθαλμικό Ίδρυμα Doheny* και τη *Second Sight Corp*, Εικόνα 4-31.



Εικόνα 4-31 : Εμφύτευμα τεχνητής όρασης [35].

Αναπτύσσονται τεχνολογίες που επιτρέπουν σε ένα προσαρμοσμένο υψηλής πυκνότητας πίνακα ηλεκτροδίων να εμφυτευθεί σε έναν τεχνητό αμφιβληστροειδή. Ο στόχος είναι να παρασχεθεί κάποιο επίπεδο όρασης σε ασθενείς με σοβαρές ασθένειες όπως ο Εκφυλισμός Ώχρας Κηλίδας και η Μελάγχρωση Αμφιβληστροειδούς. Αυτήν τη στιγμή υπάρχουν διάφορα πρότυπα μοσχευμάτων που αναπτύσσονται στις ΗΠΑ και στο εξωτερικό αλλά υπάρχουν σημαντικά εμπόδια στη σχεδίαση όπως ήταν αναμενόμενο. Η *Second-Sight and The Doheny Eye Institute* διεξάγουν κλινικές μελέτες σε ένα μόσχευμα χαμηλής-ανάλυσης δικής τους σχεδίασης. Τα BioMEMS προσφέρουν χαρακτηριστικά που είναι ευεργετικά σε ένα τεχνητό μέλος [35].

4.5.3.3 Νεφρό

Μπορούν να κατασκευαστούν τσιπ νεφρών βασισμένα σε MEMΣ; Το νεφρό είναι το νούμερο ένα όργανο που απαιτεί αντικατάσταση. Υπάρχουν 15.000 μεταμοσχεύσεις νεφρών στις Ηνωμένες Πολιτείες κάθε έτος ενώ υπάρχουν 58.000 σε αναμονή. Αλλά θα έπρεπε το τεχνητό νεφρό να είναι οργανικό, μια ανόργανη δομή, ή ένα βιολογικό υβρίδιο;

Αφού οι διαδικασίες ημιαγωγών που χρησιμοποιούν τεχνικές MEMΣ μπορούν τώρα να δημιουργήσουν τρισδιάστατες δομές, γιατί να μη δημιουργήσουν ένα μικρο-φίλτρο ή ίσως ακόμη και ένα νανοφίλτρο. Το σύστημα τεχνητών νεφρών θα μπορούσε να καταλήξει να είναι ένας ολόκληρος δίσκος πυριτίου ή ένας πίνακας από τσιπ για λόγους χωρητικότητας. Οι περισσότεροι από τους ερευνητές θεωρούν ότι, το τεχνητό νεφρό χρειάζεται να είναι έξω από το σώμα, αλλά στο μέλλον, θα μπορεί να μεταμοσχευθεί στο σώμα.

Η τεχνητή συσκευή αντιμετωπίζει μια πρόκληση καθώς τα νεφρά φιλτράρουν 180 λίτρα αίματος την ημέρα. Τα εργαστήρια *Draper* έχουν μακροχρόνια παράδοση στην ανάπτυξη MEMΣ συμπεριλαμβανομένων και αυτών για τα ρευστά, και δοκιμάζουν να κλιμακώσουν το φιλτράρισμα χρησιμοποιώντας συσκευές μικρορευστών.

Κάθε στρώμα έχει ένα μικρο-κανάλι χαραγμένο πάνω σε ένα τσιπ και η κλιμάκωση περιλαμβάνει την προσθήκη περισσότερων στρωμάτων χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας των MEMΣ. Το Γενικό Νοσοκομείο της Μασαχουσέτης εργάζεται επίσης πάνω σε αυτό το θέμα. Χρησιμοποιεί τους δίσκους πυριτίου ως το κυρίως καλούπι και κάνει αντίγραφα από πλαστικό. Το επόμενο βήμα είναι να αναπτυχθούν τα πραγματικά κύτταρα στο πλαστικό. Ο τελικός στόχος είναι ένα πλήρως οργανικό νεφρό, αλλά ένα ανόργανο σύστημα αντλιών και φίλτρων θα μπορούσε να είναι ένα ενδιάμεσο βήμα [35].

Κεφάλαιο 5

Το μέλλον των MEMΣ

5.1 Εισαγωγή

Τα MEMΣ αντιπροσωπεύουν μια τεχνολογία που υπόσχεται να μεταμορφώσει ολόκληρες βιομηχανίες και να οδηγήσει στην επόμενη τεχνολογική επανάσταση. Αυτές οι συσκευές μπορούν να αντικαταστήσουν τους ογκώδεις ενεργοποιητές και αισθητήρες με τα αντίστοιχα εξαρτήματα στη μικροκλίμακα, και μπορούν να παραχθούν σε μεγάλες ποσότητες με τις τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αυτό μειώνει το κόστος, τον όγκο, το βάρος και την κατανάλωση ισχύος αυξάνοντας την απόδοση, τον όγκο παραγωγής και τη λειτουργικότητα τους.

Επιπλέον, είναι σαφές ότι τα υπάρχοντα προϊόντα MEMΣ είναι απλά πρόδρομοι των εφαρμογών που αναμένονται να έρθουν, συμπεριλαμβανομένης της γενετικής και δοκιμής ασθενειών, των συστημάτων πλοήγησης, της παραγωγής ενέργειας, των συσκευών RF (ειδικά για την τεχνολογία κινητών τηλεφώνων), των οπλικών συστημάτων, της ανίχνευσης βιολογικών και χημικών παραγόντων, και της αποθήκευσης δεδομένων. Οι οπτικοί μεταγωγείς βασισμένοι σε μικροκάτοπτρα έχουν αποδείξει ήδη την αξία τους. Η προοπτική των MEMΣ τραβάει όλο και περισσότερο την προσοχή των νέων και παλαιών βιομηχανιών, καθώς όλο και περισσότερες προκλήσεις επιλύονται με την τεχνολογία των MEMΣ.

5.2 Ζητήματα Δυσλειτουργιών

Το αρχικό εμπόδιο που πρέπει να υπερνικήσουν τα MEMΣ είναι η συγκόλληση, δηλαδή το να κολλήσει ένα κινούμενο μέρος σε ένα άλλο μέρος ή στο επίπεδο της βάσης. Η συγκόλληση εμφανίζεται κάτω από διάφορες συνθήκες. Π.χ. δύο καθαρές επιφάνειες σε επαφή, κατά τη διάρκεια της χάραξης, όπου η μεταβολή του ενός από τα δύο υλικά προκαλεί τάση στις δύο δομές, ή ηλεκτροστατική έλξη λόγω παγιδευμένου φορτίου.

Μερικές λύσεις στο πρόβλημα της συγκόλλησης είναι σχετικά απλές (όπως η αύξηση του αριθμού στρωμάτων πολυπυρίτιου για να ελαχιστοποιηθεί η κίνηση) και

μερικές απαιτούν περισσότερη προσπάθεια (όπως η επένδυση μιας συσκευής με μονοατομικό στρώμα για την αποφυγή τριχοειδών φαινομένων).

Μια άλλη ανησυχία είναι η λειτουργική φθορά στους ενεργοποιητών. Αν και μερικά MEMΣ έχει αποδειχθεί ότι λειτουργούν για δισεκατομμύρια κύκλων λειτουργίας, η διάβρωση των επιφανειών ολίσθησης – και της μόλυνσης που προκύπτει από τέτοια δράση – πρέπει να ελεγχθεί για τα MEMΣ για να μπορούν να πραγματοποιηθούν οι εμπορικές τους δυνατότητες.

Διάφορες λύσεις περιλαμβάνουν : τη χρήση σκληρότερων δομικών υλικών (διαμάντι αντί του πολυπυριτίου), υγρά και στερεά λιπαντικά, βελτιστοποίηση σχεδίασης συσκευών, και βελτιστοποίηση της συχνότητα του κύκλου λειτουργίας. Δυστυχώς, η αποτελεσματικότητα των περισσότερων από αυτές τις προσεγγίσεις καθορίζεται από τη δοκιμή και το λάθος, τα αποτελέσματα, των οποίων ποικίλλουν από εφαρμογή σε εφαρμογή, ενώ μπορεί να εισαχθούν και νέες, απροσδόκητες δυσκολίες.

Ένα τρίτο σημαντικό ζήτημα είναι η συσκευασία-πακετάρισμα, ένα πρόβλημα που φαίνεται να είναι η αιτία πολυάριθμων λειτουργικών αποτυχιών.

Η κανονική συσκευασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος σφραγίζεται ερμητικά για να αποτρέψει τη μόλυνση. Μερικές συσκευές MEMΣ (όπως τα επιταχυνσίμετρα) μπορούν να συσκευαστούν με τον παραπάνω τρόπο, αλλά άλλες απαιτούν την αλληλεπίδραση με εξωτερικούς παράγοντες – π.χ. ανιχνευτές αερίου, τα ιατρικά συστήματα ‘Lab-On-A-Chip’ και οι οπτικοί μεταγωγείς (απαιτείται οπτικό παράθυρο) – και επομένως είναι εκτεθειμένες στην επίδραση ανεπιθύμητων παραγόντων μέσω εκείνων των ανοιγμάτων.

Ένας κόκκος σκόνης μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά σε έναν ενεργοποιητή συγκρίσιμου μεγέθους, και η ακτινοβολία μπορεί ομοίως να βλάψει τα ευαίσθητα εξαρτήματα. Οι λύσεις πρέπει να διατηρήσουν τη λειτουργικότητα ελαχιστοποιώντας την ευπάθεια. Ομοίως, μια μικρομηχανή που απαιτεί ελεύθερο χώρο για να λειτουργήσει εκτίθεται σε κίνδυνο μόλυνσης κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Επίσης, μια συσκευή MEMΣ πρέπει να υποστηρίξει την απώλεια θερμότητας, την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, τα σήματα εισόδου και εξόδου και άλλους παράγοντες. Έχουν βρεθεί διάφορες λύσεις για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, όμως πολύ λίγες αν όχι καμία, έχουν τυποποιηθεί (εκτός από εκείνες που είναι κοινές με τη βιομηχανία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων). Τα πρότυπα συσκευασίας πρέπει να αναπτυχθούν περαιτέρω αν θέλουμε τα MEMΣ να γίνουν ευρέως αποδεκτά στα συμβατικά συστήματα.

Αν και αυτές οι προκλήσεις στη συγκόλληση, τη φθορά και τη συσκευασία οδηγούν σήμερα την έρευνα στον τομέα αυτό, οι συσκευές MEMS έχουν συναντήσει πολύ περιορισμένη εμπορική επιτυχία. Τα MEMS απαιτούν χρόνο για να κερδίσουν το ενδιαφέρον – και επομένως πόρους – από τις βιομηχανίες [38], [39].

5.3 Εναπομένουσες Προκλήσεις

Παρά τον ευρέως δημοσιευμένο ενθουσιασμό για τα MEMS και την εμφάνιση των νέων προϊόντων βασισμένων στα MEMS, υπάρχουν ακόμα διάφορες θεμελιώδεις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπισθούν προτού να απολαύσουν τα μικροσυστήματα την ίδια επικράτηση και την ίδια ευκολία κατασκευής όπως αποδίδεται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ένα εμπόδιο στην επικράτηση είναι ο ανεπαρκής χαρακτηρισμός του υλικού στο επίπεδο της μικρο κλίμακας.

Επίσης, ένα σημαντικό θέμα είναι το γεγονός ότι οι διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας παράγουν διαφορετικές ιδιότητες χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό. Χωρίς μια πιο λεπτομερή κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών σε αυτήν την κλίμακα, η τυποποιημένη ανάπτυξη θα είναι βασανιστικά αργή και συνεπώς, η τεχνολογική πρόοδος θα σταματήσει.

Μια άλλη πρόκληση είναι η έλλειψη δεδομένων όσον αφορά τα MEMS, ειδικά η έλλειψη προτύπων και δεδομένων αξιοπιστίας κοινών μεταξύ των υπαρχόντων φορέων της βιομηχανίας. Αν και είναι λογικό να αναμένεται η εταιρεία να φρουρήσει τα στοιχεία της προκειμένου να διατηρήσει το ανταγωνιστικό της πλεονέκτημά, είναι επίσης αλήθεια ότι η συνεργασία θα διευκολύνει την ανάπτυξη προϊόντων μιας εταιρείας πολύ περισσότερο από εάν έχει δουλέψει μόνη της [39].

5.4 Το Πρόβλημα Τυποποίησης

Ένα πράγμα που λείπει από τη βιομηχανία των MEMS είναι η προτυποποίηση. Δεδομένου ότι υπάρχουν τόσες πολλές διαφορετικές εφαρμογές για διατάξεις και τεχνολογίες MEMS, η σύνθεση ενός συνόλου προτύπων είναι αποθαρρυντική, εάν όχι αδύνατος στόχος. Παραδείγματος χάριν, πώς μπορεί κάποιος να ορίσει πρότυπα που καθορίζουν τις συσκευές MEMS που χρησιμοποιούνται τόσο στις ιατρικές όσο και στις εφαρμογές των αυτοκινητοβιομηχανιών;

Η λύση φαίνεται να είναι τα κοινά πρότυπα κατασκευής και τα χωριστά πρότυπα

εφαρμογής. Πολλές από τις διαδικασίες των ΜΕΜΣ είναι παρόμοιες με εκείνες της κατασκευής των ημιαγωγών. Γιατί όμως αυτά τα πρότυπα δεν υπάρχουν για μια βιομηχανία, που υπάρχει ήδη από τη δεκαετία του '60; Τα πρότυπα είναι για ώριμες βιομηχανίες και η βιομηχανία των ΜΕΜΣ δεν είναι ακόμη ώριμη [32].

Βιβλιογραφία

- [1] **Sio Wannok, MEMS (Microelectromechanical System)**. The University of Kansas. www.engr.ku.edu/~rhale/ae510/websites_f02/mems.pdf.
[Ηλεκτρονικό] 2002.
- [2] **George Mason University**. "Components of MEMS",
http://www.gmu.edu/departments/seor/student_project/syst101_00b/team07/components.html. [Ηλεκτρονικό] 04 2009.
- [3] **Kaushik Ashutoch**, "MEMS the next silicon revolution",
Ambala College of Engineering & Applied Research (ACE).
[Ηλεκτρονικό] 04 2009.
- [4] **Nadim Maluf, Kirt Williams**. "An Introduction to MicroElectroMechanical Systems Engineering", Artech House Inc, Norwood, Second Edition, 2004.
- [5] **Wikipedia**. Piezoresistive Effect. http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoresistive_effect.
[Ηλεκτρονικό] 06 2009.
- [6] **P.D. Fallon, A.P. Gerratt, B.P. Kierstead, R.D.White**.
"Shape Memory Alloy and Elastomer Composite MEMS Actuators", Medford, MA, USA : Department of Mechanical Engineering, Tufts University, 2008.
- [7] **Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White**, "*MEMS Mechanical Sensors*", Artech House, Inc., Norwood 2004.
- [8] **L.E Katz**, "*Oxidation in VLSI Technology*", New York : McGraw-Hill, 1983.
- [9] **Memsnet**, "Deposition Processes",
<http://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html>.
[Ηλεκτρονικό] 02 2009.
- [10] **Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim**, "*Microsensors, MEMS, and Smart Devices*", West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [11] **Memsnet**, "Etching Processes".
<http://www.memsnet.org/mems/processes/etch.html>.
[Ηλεκτρονικό] 02 2009.
- [12]. **J. D. Williams, W. Wang**, "Microfabrication of an electromagnetic power relay using SU-8 based UV-LIGA technology", Springer-Verlag, 2004).

- [13] **Lyshevski, Sergey Edward**, "MEMS Synthesis, Microfabrication, Analysis and Optimization" Purdue University Indianapolis: CRC Press LLC, 2002.
- [14]. **Judy, J.**, "MicroElectroMechanical Systems (MEMS): Fabrication, Design and Applications". J. Smart Mater, 2001.
- [15] **Fedder, Gary K.** "MEMS Fabrication", Pittsburgh: Department of Electrical and Computer Engineering, and The Robotics Institute Carnegie Mellon University, 2003.
- [16] **Vijay K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose.** "*RF MEMS and Their Applications*", West Sussex, England : John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [17] **Sequoia Technology Ltd**, "FOP-MIV Medical pressure sensor"
<http://www.sequoia.co.uk/components/product.php?d=2&c=47&f=45&p=133&fmt=grid>. [Ηλεκτρονικό] 04 2009.
- [18] **Millar Instruments.** "Ultra-Miniature Pressure-Volume Catheters",
http://www.millarinstruments.com/products/Pressure_volume/p_v_miniature.php.
 [Ηλεκτρονικό] 04 2009.
- [19]. **R. R. Allen, J. D. Meyer, and W. R. Knight.**
 "Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets"
Hewlett-Packard Journal. May 1985.
- [20]. Computer Desktop Encyclopedia. [Ηλεκτρονικό] MEMSIC, Inc.
- [21] "MEMS in the Machine - BMW_X5",
<http://www.memsindustrygroup.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=3505>. [Ηλεκτρονικό] 05 2009
- [22] **Castro-Cedeno, Mario H**, "The MEMS Applications Engineer", 2001.
- [23] **Bright Adisorn Tuantranont and Victor M.** "Introduction to MicroElectroMechanical Systems (MEMS) with Emphasis on Optical Applications", University of Colorado : NSF Center for Advanced Manufacturing and Packaging of Microwave, Optical, and Digital Electronics, CAMPMODE, 2000.
- [24] **Intermec**, "**MEMS: The new class of bar code scanner**", Global Information Inc., www.memsinfo.jp/whitepaper.
 [Ηλεκτρονικό] 2007.
- [25] **Ana Londergan, Evgeni Gousev, Clarence Chui.** "Advanced Processes for MEMS-based Displays", QUALCOMM MEMS Technologies, 2007.
- [26] **LightConnect White Paper**, "*Diffraction MEMS*",

LightConnect Inc, <http://www.lightconnect.com/>.

[27] **David A. Horsley**, "Image Gallery",
<http://mae.ucdavis.edu/dahorsley/photoalbum.html>.

[Ηλεκτρονικό] 06 2009.

[28] **Light Reading**. Dynamic Gain Equalizers Diversify.

http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=12601.

[Ηλεκτρονικό] 06 2009

[29] **Small Times**, "What Telecon Showdown?",
http://www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?Section=ARCHI&C=Elect&ARTICLE_ID=267718&p=109.

[Ηλεκτρονικό] 06 2009

[30] **Steven W. Schlosser, John Linwood Griffin, David F. Nagle, Gregory R. Ganger**. "Designing Computer Systems with

MEMS-based Storage", Carnegie Mellon University: s.n., 2000. 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems.

[31] **Sandia National Laboratories**. <http://www.mems.sandia.gov/about/rf-mems.html>, "RF MEMS", [Ηλεκτρονικό] 05 2009.

[32] **Dr. Thomas F. Marinis**, "The future of MEMS", Draper Laboratory, 555 Technology Square Cambridge, MA 02139 2007.

[33] **Shinji KOBAYASHI, Hiroshi KAWAI**. "A Capacitive RF MemS Shunt Switch", Nagaokakyo-shi, Kyoto, 617-8555 Japan : Murata Manufacturing Co., Ltd. 26-10, Tenjin 2-chome.

[34] **Kwangho Park, Qingfei Chen, and Ying-Cheng Lai**.

"Energy enhancement and chaos control in microelectromechanical systems", *Journal of Physical Review*, 2008, Iss. E, vol. 77.

[35] **Ken Gilleo, Ph.D.** "MEMS In Medicine", Warwick, RI : ET-Trends LLC, 2007.

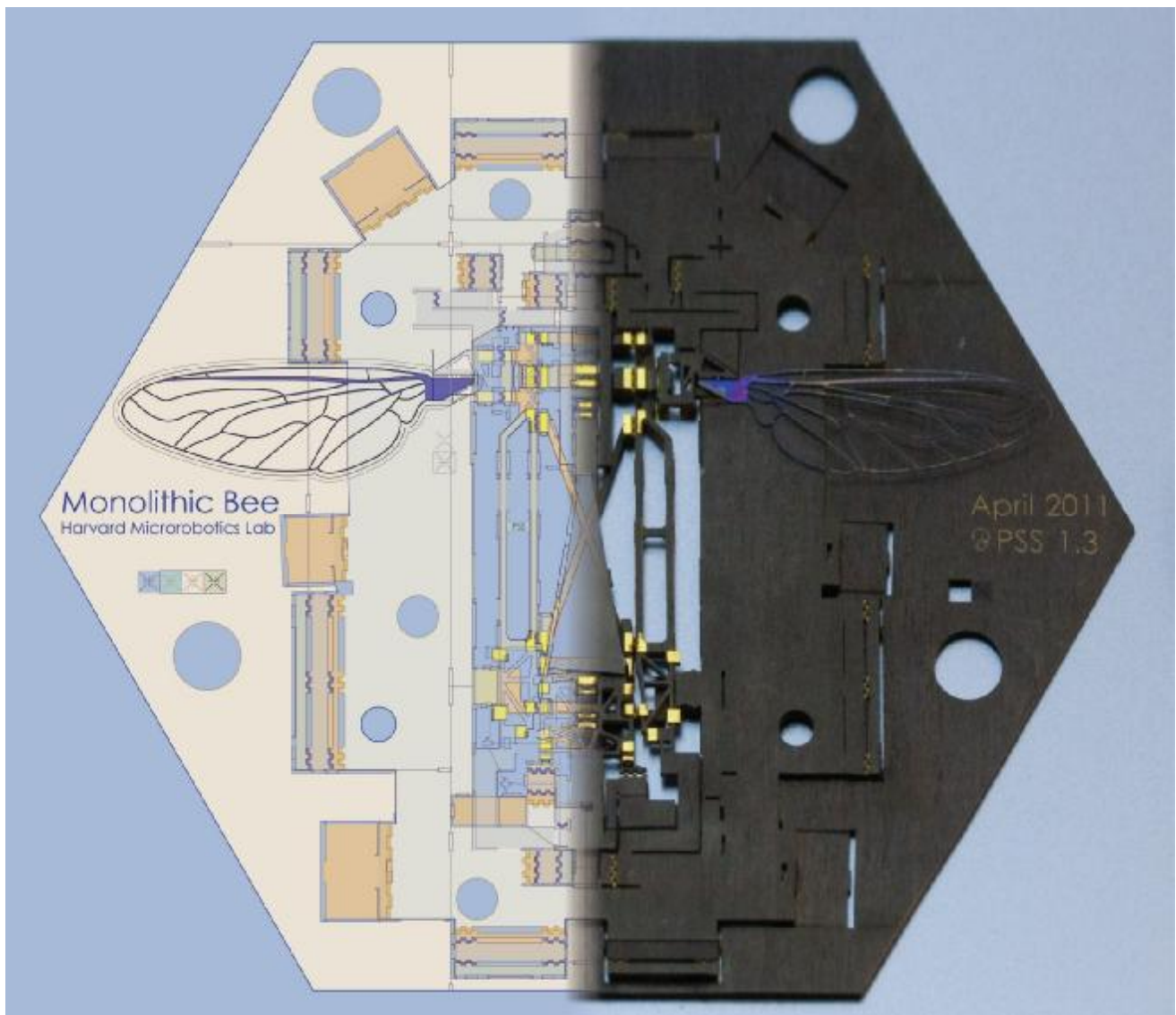
[36] **Achim Wixforth, Jurgen Scriba**. "Nanopumps for Programmable Biochips", *Journal of GIT Laboratory*. 2002, pp. 231-232.

[37] **S. Razzacki, Prasanna K. Thwar, Ming Yang, Victor M. Ugaz, Mark A. BurnsZafar**. "Integrated Microsystems for

Controlled Drug Delivery", Elsevier Science, Shannon, Ireland, 2004.

[38] **Walraven, Jeremy A.** "Future Challenges for MEMS Failure Analysis", Sandia National Laboratories, 2003.

DoD Reability Analysis Center. "MicroElectroMechanical Systems (MEMS) ", Rome, Vol. 8, 2001.



Project που υπέγραψε η American Defence για 800 εκ. δολάρια.

