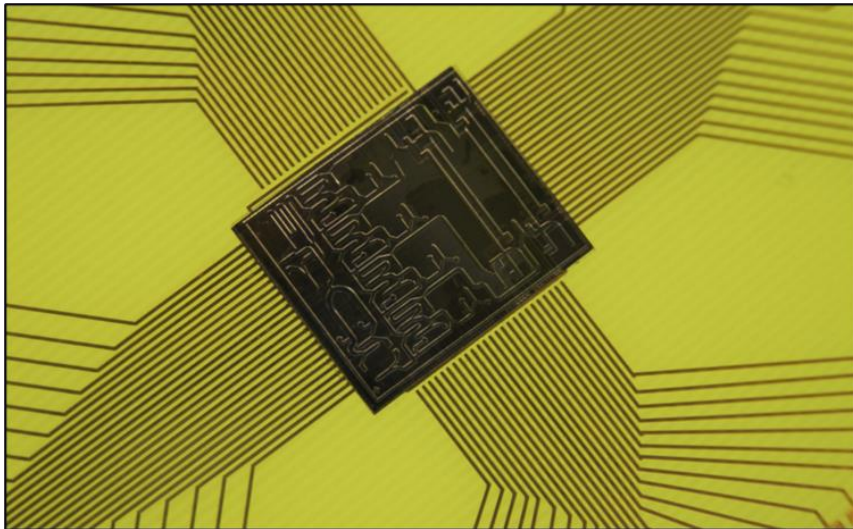




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα και ο ρόλος τους στη σύγχρονη μηχανολογία



ΦΟΙΤΗΤΡΙΕΣ: ΣΥΚΩΤΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ (Α.Μ.7219)
ΣΚΟΥΡΑ ΕΥΔΟΞΙΑ ΕΛΕΝΗ (Α.Μ.7374)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟΣ ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ

ΠΑΤΡΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται ως «Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα και ο ρόλος τους στη σύγχρονη μηχανολογία»

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή, ο οποίος με τις κατάλληλες συμβουλές του, μας βοήθησε στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Επιπλέον θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα μέλη της επιτροπής, τους καθηγητές κύριο Καλαράκη Αλέξανδρο και κύριο Τσίρκα Σωτήρη. . Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όσους μας στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια, συγγενείς και φίλους που χωρίς την βοήθεια τους μπορεί και να μην είχαμε φτάσει ως εδώ.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ:

Οι κάτωθι υπογεγραμμένες σπουδάστριες έχουν επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Η σπουδάστρια

Η σπουδάστρια

ΣΥΚΩΤΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

ΣΚΟΥΡΑ ΕΥΔΟΞΙΑ ΕΛΕΝΗ

.....

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, ή MEMS, είναι μια τεχνολογία που στην πιο γενική της μορφή μπορεί να οριστεί ως μικροσκοπικά μηχανικά και ηλεκτρομηχανικά στοιχεία (δηλαδή συσκευές και δομές) που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τις τεχνικές της μικροκατασκευής. Οι κρίσιμες φυσικές διαστάσεις των συσκευών MEMS μπορούν να ποικίλλουν από πολύ χαμηλό σημείο στο κάτω άκρο του διαστατικού φάσματος, μέχρι και τα χιλιοστά. Παρομοίως, οι τύποι συσκευών MEMS μπορούν να ποικίλουν από σχετικά απλές κατασκευές χωρίς κινούμενα στοιχεία, έως εξαιρετικά περίπλοκα ηλεκτρομηχανικά συστήματα με πολλαπλά κινούμενα στοιχεία υπό τον έλεγχο μιας ολοκληρωμένης μικροηλεκτρονικής. Το ένα βασικό κριτήριο των MEMS είναι ότι υπάρχουν τουλάχιστον ορισμένα στοιχεία, που αποτελούνται από κάποιο είδος μηχανικής λειτουργικότητας, ανεξάρτητα από το αν αυτά τα στοιχεία μπορούν να κινηθούν ή όχι. Ο όρος που χρησιμοποιείται για τον ορισμό των MEMS ποικίλλει σε διάφορα μέρη του κόσμου. Στις Ηνωμένες Πολιτείες καλούνται κατά κύριο λόγο MEMS, ενώ σε ορισμένα άλλα μέρη του κόσμου ονομάζονται «Τεχνολογία μικροσυστημάτων» ή «συσκευές μικρομηχανικής». Η μηχανολογία η οποία αποτελεί έναν από τους κυρίαρχους τομείς στη λειτουργία των MEMS φαίνεται να οδηγεί στην περεταίρω ανάπτυξη όλων των εμπλεκόμενων τεχνολογιών. Παραδείγματα αποτελούν ο έλεγχος ροής στα ρευστά, οι διάφοροι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες αλλά και η ανάλυση της καταπόνησης, μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, η ανάπτυξη των σύγχρονων αυτοκινήτων αποτελεί τις βάσεις της στα MEMS και στη συνδυασμένη λειτουργία τους με άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες.

Λέξεις κλειδιά: Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, MEMS, Microelectronic engineering

ABSTRACT

Microelectromechanical systems, or MEMS, is a technology that in its most general form can be defined as microscopic mechanical and electromechanical components (i.e. devices and structures) manufactured using micro-technical techniques. The critical physical dimensions of MEMS devices can vary from a very low point at the lower end of the dimensional spectrum, up to millimeters. Similarly, types of MEMS devices can range from relatively simple structures without moving elements, to extremely complex electromechanical systems with multiple moving elements under the control of an integrated microelectronics. One key criterion of MEMS is that there are at least some elements, which consist of some kind of mechanical functionality, regardless of whether these elements can move or not. The term used to define MEMS varies in different parts of the world. In the United States they are primarily called MEMS, while in some other parts of the world they are called "Microsystem Technology" or "micromachines". Engineering, which is one of the dominant sectors in the operation of MEMS, seems to lead to the further development of all the technologies involved. Examples are the flow control in the fluids, the various piezoelectric sensors but also the stress analysis, through the finite element method. In addition, the development of modern cars has its basis in MEMS and their combined operation with other available technologies.

Keywords: Microelectromechanical systems, MEMS, Microelectronic engineering

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	11
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	13
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	15
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	17
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	19
Κεφάλαιο 1	21
Εισαγωγή	21
1.1. Τι είναι τα Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα	21
1.2. Γενικά	25
1.3. Ορισμοί και ταξινομήσεις	28
1.3.1. Μετατροπéας	29
1.3.2. Αισθητήρας	29
1.3.3. Ενεργοποιητής	30
1.4. Ιστορική αναδρομή	30
1.5. Microelectronic engineering	36
1.6. MEMS ή NEMS	37
1.7. Προβλήματα στα MEMS και NEMS	41
Κεφάλαιο 2	45
Γενικές αρχές κατασκευής μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων	45
2.1 Τεχνικές κατασκευής	45
1.7.1. Λιθογραφία	49
1.7.2. Φωτολιθογραφία	54
1.7.3. Διαδικασία μετά τη λιθογραφία	56
1.7.4. Ειδικές προσεγγίσεις λιθογραφίας	59
1.8. Υλικά	62
1.8.1. Ιδιότητες του πυριτίου	62
1.8.2. Κρυσταλλογραφία του πυριτίου	64
1.8.3. Ελαττώματα στο πλέγμα πυριτίου	66
1.8.4. Μηχανικές ιδιότητες του πυριτίου	66
1.8.5. Ηλεκτρικές ιδιότητες του πυριτίου	69
1.9. Άλματα προς μια γενική πλατφόρμα κατασκευής	71
1.10. Κόστος κατασκευής	73

1.11. Πρωτοποριακά Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα – κατασκευαστές.....	78
Κεφάλαιο 3.....	85
Γενικές εφαρμογές.....	85
1.12. Εφαρμογές - χρήση.....	85
1.13. Νέες τάσεις.....	88
1.14. MEMS στους εκτυπωτές inkject.....	90
1.15. MEMS στην ιατρική.....	91
1.16. MEMS στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	93
1.17. MEMS στα καταναλωτικά προϊόντα.....	94
1.17.1. Ρολόγια και ηλεκτρονικά είδη ένδυσης.....	94
1.17.2. Κάμερες, οθόνες και προβολείς.....	96
1.18. Mems και smartphones.....	99
1.19. RF MEMS.....	100
Κεφάλαιο 4.....	105
MEMS στη μηχανολογία.....	105
1.20. Έλεγχος της ροής στα ρευστά.....	105
1.21. Μηχανικά συστήματα.....	108
1.22. Μηχανική καταπόνησης.....	109
1.23. Αισθητήρες MEMS.....	113
1.24. Μέλλον – εξέλιξη.....	115
Συμπεράσματα.....	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	145

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AI: Τεχνητή νοημοσύνη

CMOS: Τεχνολογία ημιαγωγών μεταλλικού οξειδίου

IC: Ολοκληρωμένο κύκλωμα

MEMS: Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα

MOEMS: Μικρό- οπτοηλεκτρομηχανικά συστήματα

MOSFET: Ημιαγωγός πεδίου μεταλλικού οξειδίου - τρανζίστορ

MST: Μικροσυστήματα

NEMS: Νάνο- ηλεκτρομηχανικά συστήματα

RIE: Χάραξη πλάσματος

VR: Εικονική πραγματικότητα

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1: Σχέδια συμπεριφοράς καταπόνησης πίεσης από μονό κρύσταλλο πυριτίου χωρίς εξάρθρωση σε υψηλές θερμοκρασίες τ_{xy} = ανώτερη ισχύς απόδοσης, τ_{ly} = χαμηλότερη ισχύς απόδοσης, ε = ένταση [95]	68
Διάγραμμα 2.2: Χαμηλότερη ισχύς από πυρίτιο έναντι θερμοκρασίας παραμόρφωσης [101]	69
Διάγραμμα 2.3: Μείωση των τιμών των MEMS [111]	74
Διάγραμμα 2.4: Μελλοντικές αγορές των MEMS [111]	75
Διάγραμμα 2.5: Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές MEMS (σε αμερικάνικα δολάρια) [126]	83

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Αισθητήρας πίεσης MEMS [5]	22
Εικόνα 1.2: Διαφορετικών τύπων ολοκληρωμένα κυκλώματα [9].....	27
Εικόνα 1.3: Ετικέτα RFID [10].....	28
Εικόνα 1.4: MOSFET [16]	31
Εικόνα 1.5: Βήματα λιθογραφίας με ακτίνες Χ [25]	33
Εικόνα 1.6: Εξαιρετικά μικροσκοπικό επιταχυνσιόμετρο NEMS με καλώδια σύνδεσης [39].....	38
Εικόνα 2.1: Το αποτέλεσμα της μετατόπισης του διαφράγματος για έναν αρχικό σχεδιασμό, b) σχέδιο II, c) σχέδιο III [49].....	46
Εικόνα 2.2: Ροή σχεδιασμού στη σύνθεση των MEMS [50]	47
Εικόνα 2.3: Μάσκα για τη διαδικασία της λιθογραφίας [58].....	50
Εικόνα 2.4: Υπερηχητικός ψεκασμός φωτοανθεκτικού για δισκία MEMS και άλλα υποστρώματα με διάφορες τοπογραφίες [62]	53
Εικόνα 2.5: High-Q-3D σωληνοειδές πηνία για RF ολοκληρωμένα κυκλώματα. Μεταλλικές κατασκευές που δημιουργήθηκαν με χρήση επίστρωσης ψεκασμού [64]	54
Εικόνα 2.6: Διαδικασία φωτολιθογραφίας [74].....	56
Εικόνα 2.7: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της ξηρής χάραξης και της διαδικασίας υγρής χημικής χάραξης που εφαρμόζεται στην κατασκευή καθρεφτών κοιλότητας LDs με βάση το InGaN που καλλιεργούνται σε Si. (α) Η επιταξιακή δομή LD αναπτύχθηκε σε υπόστρωμα Si. (β) Δομή LD που βασίζεται σε InGaN με τους καθρέπτες κοιλότητας που κατασκευάζονται από ICP ξηρή χάραξη. (γ) Τα κάτοπτρα της κοιλότητας όπως προετοιμάστηκαν χημικά και γυαλίστηκαν με διάλυμα TMAH. (δ) Χαρακτηρισμός των LD που βασίζονται σε InGaN που καλλιεργούνται σε Si. [75].....	57
Εικόνα 2.8: Σύγκριση της χημικής χάραξης και της χάραξης πλάσματος [76]	58
Εικόνα 2.9: Σχέδιο στο κάτω μέρος: λιθογραφία έναντι ανύψωσης με χρήση πλαστικών φωτομασκών και επίπεδης μάσκας σκιάς (πάνω) και συμμορφωμένη τρισδιάστατη μάσκα και μάσκα σκιάς (κάτω) [83].....	61
Εικόνα 2.10: Το κελί μονάδας πλέγματος πυριτίου. Τα γκρίζα άτομα πυριτίου βρίσκονται στη θέση fcc και τα άτομα ανοιχτού χρώματος μετατοπίζονται από τις θέσεις fcc προς την κατεύθυνση 111 κατά μήκος μονάδας με 14 της μονάδας [95]	65

Εικόνα 3.1: Διαδικασία ενσωμάτωσης Flip-chip 3D MEMS-IC χρησιμοποιώντας ρευστή αυτοσυναρμολόγηση. [130]	86
Εικόνα 3.2: Υψηλό επίπεδο αποτύπωσης του λειτουργικού μπλοκ (διάγραμμα του MEMS) [132].....	87
Εικόνα 3.3 Οι συσκευές MEMS κινούνται προς τα καταναλωτικά προϊόντα και θα επιτρέψουν την ενσωμάτωση της νοημοσύνης σε ανθρώπινα περιβάλλοντα, δηλαδή στον προγραμματιζόμενο κόσμο [95]	89
Εικόνα 3.4 Μικροποίηση των συσκευασμένων επιταχυνσιόμετρων MEMS από την ST Micr. [134].....	89
Εικόνα 3.5: Τρέχοντες και μελλοντικοί μηχανισμοί MEMS που μπορούν να προσαρμοστούν στο ανθρώπινο σώμα [140]	92
Εικόνα 3.6: Το ρολόι της Apple αποτελούμενο από αισθητήρες και MEMS [148].....	96
Εικόνα 3.7: Προβολέας οθόνης βασιζόμενος σε MEMS [150]	97
Εικόνα 3.8: Κάμερα κινητού τηλεφώνου βασιζόμενη σε MEMS [154].....	98
Εικόνα 3.9: Η εφαρμογή αισθητήρων και διεπαφών ραδιοφώνου στο Nokia Lumia 920 [156]	99
Εικόνα 3.10: Διακόπτης High RF MEMS με ενσωματωμένο ελεγκτή πυλών [160]	101
Εικόνα 4.1: Αισθητήρας ροής MEMS (IDT FS2012) [167].....	106
Εικόνα 4.2: MEMS και πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα [176]	109
Εικόνα 4.3: Προσομοίωση καταπόνησης σε εξάρτημα MEMS [182].....	110
Εικόνα 4.4: Βασική μηχανική δομή ενός αισθητήρα πίεσης: (1) περίβλημα, (2) μεμβράνη, (3) δοκός προβόλου, (4) μετρητής πίεσης SOI, (5) ράβδος μετάδοσης [190]	114
Εικόνα 4.5: Προβλέψεις της αγοράς MEMS από το 2019 έως το 2025 [194]	120

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η νάνο και η μικρό-ηλεκτρομηχανική, η οπτοηλεκτρονική, καθώς και οι νάνο- και οι μικρό - κατασκευές γενικότερα έχουν σημειώσει εκπληκτική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Ο λόγος είναι η ταχεία πρόοδος στις θεωρητικές εξελίξεις, καθώς και οι εξελίξεις των πειραματικών αποτελεσμάτων (χρησιμοποιώντας υπερσύγχρονο εξοπλισμό μέτρησης και οργάνων). Επιπλέον πλέον υπάρχει ένα αρκετά υψηλής απόδοσης λογισμικό σχεδιασμού και αποδοτικά υπολογιστικά περιβάλλοντα. Η πρόσφατη θεμελιώδης και εφαρμοσμένη έρευνα και οι εξελίξεις στη νάνο και τη μικρό-ηλεκτρομηχανική, την πληροφορική και τη νανοτεχνολογία συνέβαλαν σημαντικά στην τρέχουσα πρόοδο. Η βασική έρευνα αιχμής, οι νέες τεχνολογίες, το λογισμικό και το υλικό είναι ενσωματωμένα για την επινόηση νέων συστημάτων και τη μελέτη των υπάρχοντων συστημάτων. Αυτές οι εξέχουσες τάσεις παρέχουν στους ερευνητές, τους μηχανικούς και τους μαθητές τον απαραίτητο ταυτόχρονο σχεδιασμό ολοκληρωμένων πολύπλοκων μικρό-ηλεκτρομηχανικών και νανοηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS και NEMS αντίστοιχα).

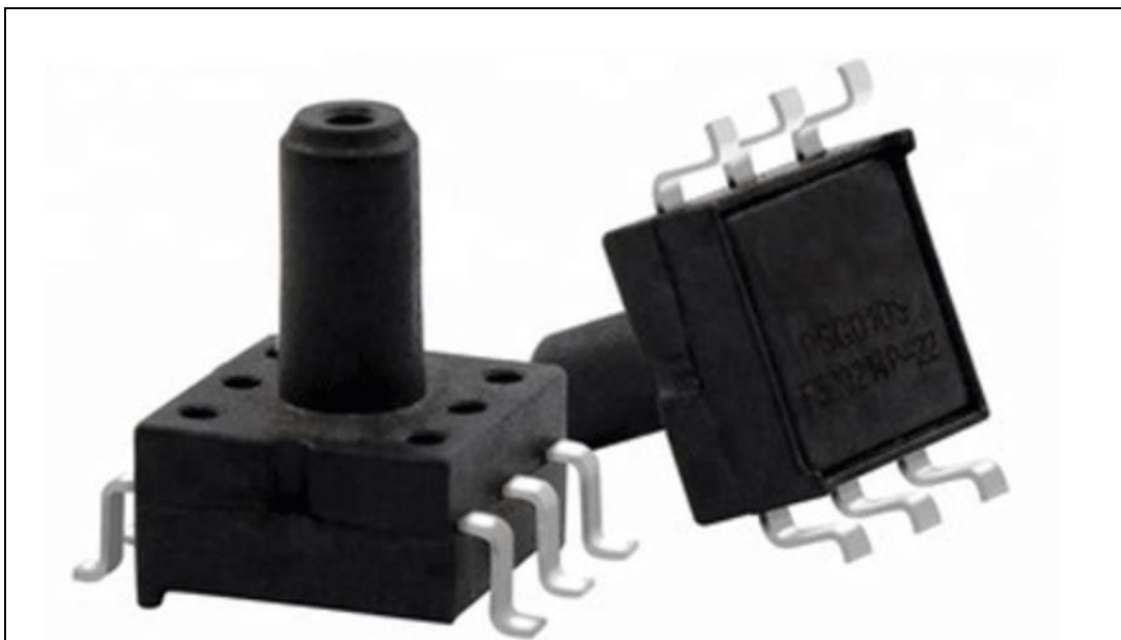
Η συνέργεια της μηχανικής, της επιστήμης και της τεχνολογίας είναι απαραίτητη για την επίτευξη των στόχων. Γίνεται ολοένα και πιο δύσκολη η ανάλυση και ο σχεδιασμός των συστημάτων, των υποσυστημάτων, των συσκευών και δομών micro και νάνο -κλίμακας, χωρίς το ενοποιημένο θέμα και τη διεπιστημονική συνέργεια λόγω της ολοκλήρωσης νέων φαινομένων, σύνθετων διαδικασιών και συμβατότητας. Επομένως, οι θεωρίες micro και νανοηλεκτρομηχανικής πρέπει να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν περαιτέρω. Η μικρο και νανοηλεκτρομηχανική βασίζονται σε θεμελιώδη θεωρία, πρακτική εφαρμοσμένης μηχανικής και τεχνολογίες αιχμής στην κατασκευή συστημάτων, υποσυστημάτων, συσκευών και κατασκευών που έχουν διαστάσεις μικρομέτρων και νανομέτρων.

1.1. Τι είναι τα Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα

Τα Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα «MEMS» (ή μικροηλεκτρονικά συστήματα) και τα σχετικά τους μικρομηχανικά και μικροσυστήματα αποτελούν την τεχνολογία των μικροσκοπικών συσκευών, ιδίως εκείνων που αποτελούνται από κινούμενα μέρη. Συγχωνεύονται συνήθως με τη νανοκλίμακα, δηλαδή με τα νανοηλεκτρομηχανικά συστήματα (NEMS) και τη νανοτεχνολογία όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4 αναλυτικά. Τα MEMS αναφέρονται επίσης ως «μικρομηχανές» στην Ιαπωνία [1] και «τεχνολογία μικροσυστημάτων» (MST) στην Ευρώπη [2].

Τα MEMS αποτελούνται από εξαρτήματα μεγέθους μεταξύ 1 και 100 μικρομέτρων (δηλ. 0,001 έως 0,1 mm). Αυτές οι συσκευές γενικά

κυμαίνονται γενικά σε μέγεθος από 20 μικρόμετρα έως ένα χιλιοστόμετρο (δηλαδή 0,02 έως 1,0 mm), αν και τα κάποια είναι διατεταγμένα σε συστοιχίες (π.χ. οι ψηφιακές συσκευές μικρο-καθρέφτη) που μπορούν να είναι μεγαλύτερες από 1000 mm² [3]. Συνήθως αποτελούνται από μια κεντρική μονάδα που επεξεργάζεται δεδομένα (ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα όπως ένας μικροεπεξεργαστής) και διάφορα στοιχεία που αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον, όπως μικροαισθητήρες [4]. Λόγω της μεγάλης αναλογίας της επιφάνειας ως προς τον όγκο τους, οι δυνάμεις που παράγονται από τον ηλεκτρομαγνητισμό (π.χ. ηλεκτροστατικά φορτία και μαγνητικές δυνάμεις) και η δυναμική του ρευστού (π.χ. επιφανειακή τάση και ιξώδες) είναι οι πιο σημαντικές σχεδιαστικές εκτιμήσεις σε σχέση με τις μηχανικές συσκευές μεγαλύτερης κλίμακας. Η τεχνολογία MEMS διακρίνεται από τη μοριακή νανοτεχνολογία ή τη μοριακή ηλεκτρονική στο ότι η τελευταία, εξετάζει και τη χημεία της επιφάνειας. Γενικότερα τα MEMS μπορούν να έχουν διαφορετικό σχήμα ανάλογα την εφαρμογή. Στην Εικόνα 0.1: Αισθητήρας πίεσης MEMS φαίνεται ένας αισθητήρας πίεσης ενός συστήματος MEMS.



Εικόνα 0.1: Αισθητήρας πίεσης MEMS [5].

Το MEMS είναι το ενσωματωμένο σύστημα μικροκλίμακας «κατά παρτίδες» (κίνηση, ηλεκτρομαγνητική, ακτινοβολούμενη ενέργεια και οπτικές μικρο-συσκευές / μικροδομές - κύκλωμα οδήγησης / ανίχνευσης - έλεγχος / επεξεργασία) που:

1. Μετατρέπει φυσικά ερεθίσματα, συμβάντα και παραμέτρους ηλεκτρικών, μηχανικών και οπτικών σημάτων και αντιστρόφως.
2. Εκτελεί ενεργοποίηση, ανίχνευση και άλλες λειτουργίες.

3. Περιλαμβάνει έλεγχο (νοημοσύνη, λήψη αποφάσεων, εξελικτική μάθηση, προσαρμογή, αυτοοργάνωση, κ.λπ.), διαγνωστικά, επεξεργασία σήματος και έχει δυνατότητες απόκτησης δεδομένων.

4. Επίσης αποτελεί μικροκλίμακα ηλεκτρομηχανικών, ηλεκτρονικών, οπτικών και βιολογικών στοιχείων (δομές, συσκευές και υποσυστήματα). Η αρχιτεκτονική και οι αρχές λειτουργίας είναι τα βασικά στοιχεία της λειτουργίας των MEMS, του σχεδιασμού και της ανάλυσης και της κατασκευής.

Σε σύγκριση με τις μικροδομές, οι οποίες είναι στοιχειώδεις δομές, το πεδίο εφαρμογής των MEMS και των μικροϋπολογιστών επεκτάθηκε περαιτέρω στην επινόηση (σύνθεση) νέων συστημάτων και συσκευών, στην ανάπτυξη νέων παραδειγμάτων και θεωριών, στην ολοκλήρωση σε επίπεδο συστήματος, στη μοντελοποίηση υψηλής πιστότητας, στην ανάλυση των δεδομένων, στον έλεγχο, στη βελτιστοποίηση, στο σχεδιασμό, στην κατασκευή και την υλοποίηση μέσω υπολογιστή. Αυτά έχουν γίνει μέσω της βιομιμοποίησης και των πρωτοτύπων που επιτρέπουν σε κάποιον να επεκτείνει τα υπάρχοντα σχεδιασμένα και τεχνητά συστήματα και συσκευές.

Είναι προφανές, ότι χημικοί και βιομηχανικοί μορφοτροπείς, (ενεργοποιητές και αισθητήρες) μπορούν να σχεδιαστούν, να χρησιμοποιηθούν και να ταξινομηθούν. Ένα παράδειγμα είναι οι ανόργανοι ενεργοποιητές, αισθητήρες αερίου κ.λπ. Αντίστοιχα, υπάρχουν χημικά και βιολογικά Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, συσκευές και δομές. Επομένως, οι παραπάνω ορισμοί μπορούν να επεκταθούν, προσθέτοντας χημικά και βιολογικά / βιομηχανικά συστατικά. Επιπλέον, η βιομιμοποίηση και το πρωτότυπο είναι πολύ σημαντικά παραδείγματα για την επινόηση νέων MEMS αλλά και NEMS.

Πολλά είδη βακτηρίων κινούνται γύρω από το υδατικό τους περιβάλλον, χρησιμοποιώντας μαστίγια που είναι το προεξέχον ελικοειδές νήμα. Αυτό το σύμπλεγμα «bionanomotor-flagella» παρέχει ώθηση στα κύτταρα να κολυμπούν. Οι βιολογικοί (του βακτηρίου) «νανοκινητήρες» μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και έπειτα την ηλεκτρική, σε μηχανική. Οι βιονανοκινητήρες χρησιμοποιούν τη βαθμίδα του πρωτονίου ή νατρίου, που διατηρείται σε όλη την εσωτερική μεμβράνη του κυττάρου ως πηγή ενέργειας. Η κίνηση οφείλεται στην κατιούσα μεταφορά των ιόντων. Η έρευνα σχετικά με τη σύνθετη χημειο-ηλεκτρο-μηχανική μετατροπή ενέργειας επιτρέπει σε κάποιον να κατανοήσει τους μηχανισμούς της παραγωγής ροπής και της μετατροπής της ενέργειας.

Με απώτερο στόχο την επινόηση νέων βιολογικών και ανόργανων μικροοργανισμών μέσω της βιομιμοποίησης και της δημιουργίας πρωτοτύπων, μπορεί κανείς να εφεύρει:

- Μοναδικές ακτινωτές και αξονικές νάνο και μικρομηχανικές τοπολογίες.
- Ηλεκτροστατικούς και ηλεκτρομαγνητικούς μηχανισμούς ενεργοποίησης.
- Ηλεκτροστατικό ρουλεμάν χωρίς επαφή.
- Καινοτόμους μηχανισμούς ελέγχου ανίχνευσης – ανατροφοδότησης.
- Προηγμένες έννοιες διέγερσης.
- Νέες διαμορφώσεις μικρο-και νανομηχανών.

Το δυναμικό των πολύ μικρών μηχανημάτων εκτιμήθηκε προτού υπάρξει η τεχνολογία που θα μπορούσε να τα δημιουργήσει. Ένα παράδειγμα αναφέρεται στη διάσημη διάλεξη του Feynman R. [6]. Το MEMS έγινε πρακτικό όταν μπόρεσε να κατασκευαστεί, χρησιμοποιώντας τροποποιημένες τεχνολογίες κατασκευής συσκευών ημιαγωγών, που συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ηλεκτρονικών [7]. Αυτές περιλαμβάνουν τη χύτευση και επιμετάλλωση, την υγρή χάραξη (KOH, TMAH) και την ξηρή χάραξη (RIE και DRIE), τη μηχανική κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης (EDM) και άλλες τεχνολογίες ικανές να κατασκευάζουν μικρές συσκευές.

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή των MEMS είναι κρίσιμης σημασίας για την οικονομία και την κοινωνία. Αυτό διότι, η μικρομηχανική και η επιστήμη οδηγούν και θα συνεχίσουν να βοηθούν με σημαντικές ανακαλύψεις στην τεχνολογία των πληροφοριών, στους υπολογιστές, στην ιατρική, στην υγεία, στην κατασκευή, στις μεταφορές, στην ενέργεια, στην ηλεκτρονική ασφάλεια, κ.λπ. Για παράδειγμα, τα MEMS και κατ' επέκταση και τα NEMS έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ιατρική και τη βιομηχανία (ανάλυση DNA και γενετικός κώδικας, παράδοση φαρμάκων, διαγνωστική και απεικόνιση), στις βιολογικές έρευνες και στις τεχνολογίες πληροφοριών, στα ηλεκτρονικά και αεροδιαστημικά συστήματα (ενεργοποιητές και αισθητήρες νανο και μικροκλίμακας, έξυπνες επαναδιαμορφώσιμες γεωμετρίες, διαστημικές εύκαμπτες δομές), στα συστήματα αυτοκινήτων και στη μεταφορά (μετατροπείς και επιταχυνσιόμετρα), στις κατασκευές (έξυπνα ρομπότ μικρο και νανοκλίμακας), στην ασφάλεια κ.λπ. Επομένως, τα MEMS θα συνεχίσουν να έχουν τεράστιες θετικές άμεσες και έμμεσες κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Τα νέα MEMS που επινοούνται ήδη χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών (ηλεκτρονικά, ιατρική, μετρολογία, κ.λπ.). Μικρο και νανοκλίμακες δομές, συσκευές και συστήματα έχουν συχνά συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως υψηλής συχνότητας αισθητήρες, ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αισθητήρες τάσης κ.λπ. Ανάλογα με το μέγεθος και την αρχιτεκτονική, το MEMS μπορεί να σχεδιαστεί με χρήση συγκεκριμένης κλίμακας, καθώς η διάσταση των μικροδομών είναι εντός του 0,1 μm. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται προηγμένες έννοιες μοντελοποίησης και ανάλυσης υψηλής πιστότητας για τα διάφορα MEMS. Τα NEMS συνήθως δεν είναι επεκτάσιμα που οδηγούν σε πολλές προκλήσεις. Για να υποστηριχθεί η νανο και η μικρομηχανική, πρέπει να πραγματοποιηθεί βασική,

εφαρμοσμένη και πειραματική έρευνα καθώς και να έρθουν νέες μηχανικές εξελίξεις.

Η νανομηχανική μελετά δομές, συσκευές και συστήματα νανοκλίμακας, των οποίων οι δομές και τα συστατικά παρουσιάζουν νέες φυσικές (ηλεκτρομαγνητικές, ηλεκτρομηχανικές, οπτικές κ.λπ.), χημικές, ηλεκτροχημικές και βιολογικές ιδιότητες, φαινόμενα και αποτελέσματα. Η διάσταση των MEMS και των συστατικών τους (επινοήσεις και μικροδομές) κυμαίνεται από 100 νανόμετρα έως το εύρος των εκατοστών.

1.2. Γενικά

Οι συμβατικές τεχνολογίες μικροηλεκτρονικής χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή των MEMS. Μελετώντας συστήματα νανοκλίμακας, κάποιος επικεντρώνεται στα ατομικά και μοριακά επίπεδα στην κατασκευή, στο σχεδιασμό, στην ανάλυση, στη βελτιστοποίηση, στην ολοκλήρωση, στη σύνθεση κ.λπ. Η μείωση της διάστασης των συστημάτων οδηγεί στην εφαρμογή νέων υλικών (νανοσωλήνες άνθρακα, μοριακά καλώδια κ.λπ.) και νέων τεχνολογιών κατασκευής. Τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν κυμαίνονται από τη μαζική παραγωγή της υψηλής απόδοσης, τη συναρμολόγηση και την αυτοοργάνωση, έως την επινόηση της νέας υψηλής απόδοσης των MEMS. Για παράδειγμα, οι μικροδιακόπτες, οι λογικές πύλες, οι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες πρέπει να επινοηθούν, να μελετηθούν, να βελτιστοποιηθούν και τελικά να κατασκευαστούν.

Όλα τα βιολογικά συστήματα λειτουργούν ως αποτέλεσμα ατομικών αλλά και μοριακών αλληλεπιδράσεων. Κατασκευάζονται διαφορετικά βιολογικά και οργανικά συστήματα, υποσυστήματα και δομές. Τα μοριακά δομικά στοιχεία (πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα, λιπίδια, υδατάνθρακες, DNA και RNA) εφαρμόζονται για να αντιγραφούν και να επινοήσουν νέα MEMS και NEMS. Τα επινοημένα MEMS και NEMS πρέπει να έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες, χαρακτηριστικά και λειτουργικότητα. Πρέπει να αναπτυχθούν αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για την ανάλυση της δυναμικής, της τρισδιάστατης γεωμετρίας, της σύνδεσης και άλλων χαρακτηριστικών των ατόμων και των μορίων. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η ανάλυση, πρέπει να μελετηθούν πολύπλοκες ηλεκτρομαγνητικές, μηχανικές και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες.

Τα μικροσυστήματα και τα νανοσυστήματα θα χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική και την υγεία στο μέλλον [8]. Μεταξύ των πιθανών εφαρμογών τους είναι η σύνθεση φαρμάκων, η παράδοση φαρμάκων, η νανοχειρουργική, η νανοθεραπεία, η σύνθεση γονιδιώματος, η διάγνωση, οι νέοι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες, η διάγνωση και η πρόληψη ασθενειών, ο σχεδιασμός και η εμφύτευση των μη απορριπτέων τεχνητών οργάνων, τα βιοσυμβάτα υλικά και δομές κ.λπ. Για παράδειγμα, με την παράδοση φαρμάκων, η δυναμική των θεραπειών θα αυξηθεί πάρα πολύ λόγω της άμεσης και αποτελεσματικής παράδοσης νέων τύπων φαρμάκων,

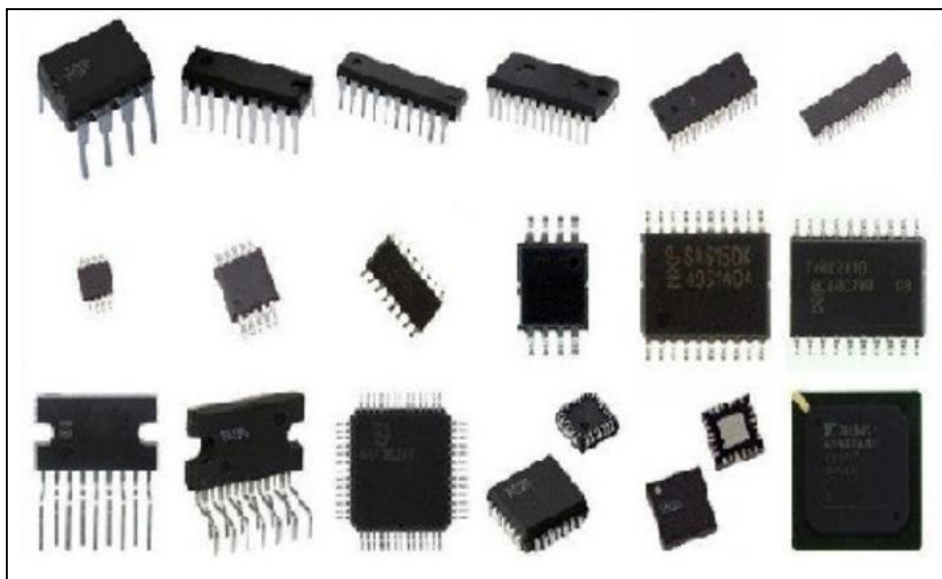
στις συγκεκριμένες περιοχές του σώματος. Τα μοριακά δομικά στοιχεία δομών, πρωτεϊνών, νουκλεϊκών οξέων, λιπιδίων με βάση το DNA, καθώς και των υδατανθράκων και των μη βιολογικών μιμημάτων τους είναι παραδείγματα υλικών, που έχουν μοναδικές ιδιότητες, που καθορίζονται από το μέγεθος, την αναδίπλωση και τα μοτίβα τους στη νανο και στη μικροκλίμακα. Έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος και πρέπει να αναπτυχθούν νέα εργαλεία ανάλυσης, ικανά να χαρακτηρίσουν τις χημικές, ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες των κυττάρων, συμπεριλαμβανομένων διεργασιών όπως η διαίρεση των κυττάρων, η κίνηση και η πρόωση.

Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, τα οποία ενσωματώνουν μικρο-συσκευές κίνησης (ενεργοποιητές και αισθητήρες), μικρο-συσκευές ακτινοβολίας ενέργειας (κεραίες, μικροδομές με περιελίξεις), κυκλώματα οδήγησης / ανίχνευσης μικροκλίμακας και έλεγχος / επεξεργασία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων¹ «IC» (Εικόνα 0.2: Διαφορετικών τύπων ολοκληρωμένα κυκλώματα) χρησιμοποιούνται ευρέως.

Τα βιομιμητικά συστήματα είναι τα τεχνητά συστήματα που βασίζονται σε βιολογικές αρχές ή σε βιολογικά εμπνευσμένα δομικά στοιχεία, που ενσωματώνονται ως δομές συστημάτων, συσκευές και υποσυστήματα. Αυτές οι εξελίξεις επωφελούνται σε μεγάλο βαθμό από την υιοθέτηση στρατηγικών και αρχιτεκτονικών από το βιολογικό κόσμο. Με βάση τις βιολογικές αρχές, τα συστήματα και τα υλικά που εμπνέονται από τα βιολογικά προϊόντα διαμορφώνονται επί του παρόντος με αυτοσυναρμολογούμενες και άλλες μεθόδους σχεδιασμού. Τεχνητά ανόργανα και οργανικά νανοϋλικά εισάγονται σε κύτταρα με διαγνωστικά χαρακτηριστικά καθώς και ενεργές (έξυπνες) δομές.

Ένα από τα κυριότερα υλικά στην κατασκευή των MEMS είναι το πυρίτιο, όπως αναφέρεται λεπτομερώς στον κεφάλαιο 2. Το πυρίτιο παραμορφώνεται ελαστικά και είναι ένα πολύ ανθεκτικό μηχανολογικό υλικό. Το πυρίτιο έχει χαμηλή θερμική διαστολή, υψηλή ταχύτητα ήχου και πολύ χαμηλές εγγενείς μηχανικές απώλειες. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι τόσο για την ισοτροπική όσο και για την ανισοτροπική χάραξη του πυριτίου. Η καλά ελεγχόμενη ανισοτροπική χάραξη του πυριτίου επέτρεψε ειδικά την κατασκευή μηχανικών δομών και συσκευών μικροκλίμακας.

¹ Το ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC), που μερικές φορές ονομάζεται τσιπ ή μικροτσιπ, είναι ένας συνδυασμός ημιαγωγών όπου αποτελείται από χιλιάδες ή εκατομμύρια μικροαντιστάσεις, πυκνωτές και τρανζίστορ. Ένα IC μπορεί να λειτουργεί ως ενισχυτής, ταλαντωτής, χρονοδιακόπτης, μετρητής, μνήμη υπολογιστή ή μικροεπεξεργαστής. Ένα ακριβές IC κατηγοριοποιείται είτε ως γραμμικό (αναλογικό) είτε ως ψηφιακό, ανάλογα με τη μελλοντική του εφαρμογή.

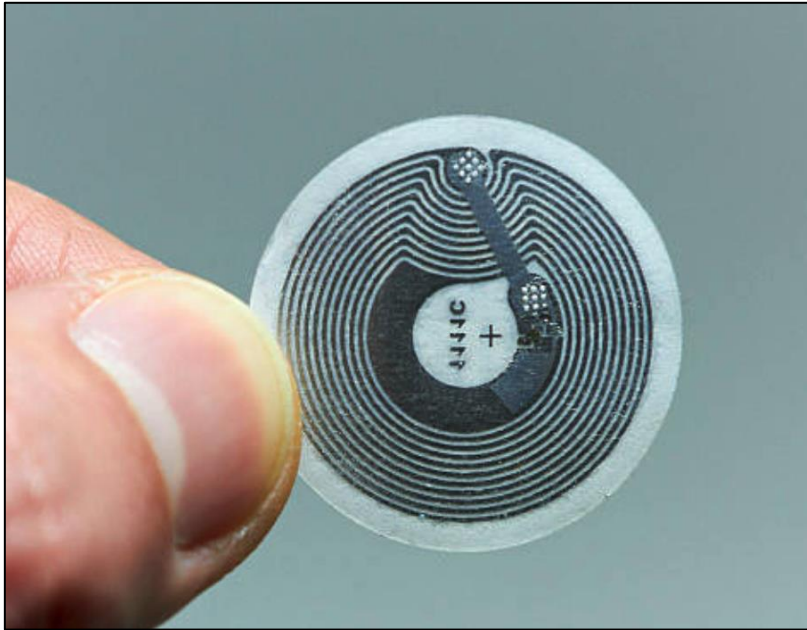


Εικόνα 0.2: Διαφορετικών τύπων ολοκληρωμένα κυκλώματα [9].

Όταν συνδυάζονται αυτά τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η μικρό-κατασκευή με λύσεις μαζικής κλίμακας από τη βιομηχανία των IC, έρχεται ως αποτέλεσμα μια πλατφόρμα για την παραγωγή μικρό-μηχανικών αισθητήρων και ενεργοποιητών σε τεράστιους όγκους με χαμηλό κόστος. Ο πρώτος μηχανικός χαρακτηρισμός και τα πειράματα στη χημική υγρή χάραξη του πυριτίου πραγματοποιήθηκαν στη δεκαετία του 1950. Η βιομηχανική κλίμακα των MEMS γεννήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970.

Σήμερα, οι διάφορες συσκευές και τα ολοένα και μικρότερα αντικείμενα του φυσικού κόσμου συνδέονται εκτενώς με ψηφιακά δίκτυα πληροφοριών και υπηρεσίες «cloud computing». Μπορεί κανείς να πει, ότι ο φυσικός και ψηφιακός κόσμος έχουν συγχωνευθεί. Οι ετικέτες RFID² (Εικόνα 0.3: Ετικέτα RFID και άλλες ψηφιακές ετικέτες μπορούν να ευρετηριάσουν όλο και μικρότερα φυσικά αντικείμενα. Οι μικροί επεξεργαστές και οι δυνατότητες επικοινωνίας μπορούν να ενσωματωθούν σε μια ποικιλία μικρών φυσικών αντικειμένων. Τα μικρό-ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα και συστήματα MEMS που αναπτύχθηκαν τα τελευταία 40 χρόνια αποτελούν μια από τις τεχνολογικές πλατφόρμες που επιτρέπουν την δημιουργία και ακόμη και την ενεργοποίηση σε αυτές τις μικρές συσκευές.

² Το RFID είναι τα αρχικά του όρου «Radio Frequency Identification», η απόδοση του στα ελληνικά ορίζεται ως «ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων». Τα συστήματα RFID αποτελούν ένα υποσύνολο των Συστημάτων Αυτόματου Προσδιορισμού (Automatic Identification Systems). Ειδικότερα, λειτουργεί ως γενικός όρος των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για να προσδιορίσουν αυτόματα ανθρώπους ή αντικείμενα και αποτελεί την τεχνολογική εξέλιξη των ραβδωτών κωδίκων (barcode).



Εικόνα 0.3: Ετικέτα RFID [10].

Η βιομηχανία της κινητής επικοινωνίας υπήρξε ο βασικός εμπορικός μοχλός για την ανάπτυξη των τεχνολογιών MEMS τα τελευταία 10 χρόνια. Οι κινητές συσκευές όπως τα έξυπνα τηλέφωνα (smartphones), τα tablet και οι διάφορες φορητές συσκευές έχουν γίνει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα εξαιρετικά ικανά και χρήσιμα όργανα. Οι συσκευές και οι διεπαφές με το χρήστη έχουν προσαρμοστεί με ευφυή τρόπο. Ενσωματώνουν το πλαίσιο της συμπεριφοράς του χρήστη μέσα από εκατοντάδες διαφορετικές εφαρμογές λογισμικού, με βάση τις πληροφορίες αισθητήρων που είναι διαθέσιμες σε όλες τις πλατφόρμες των φορητών υπολογιστών. Αυτή η δυναμική και σε πραγματικό χρόνο ικανότητα ανίχνευσης των υπολογιστών και της επικοινωνίας σηματοδοτεί μια εντελώς νέα εποχή κινητών συσκευών και συναφών υπηρεσιών που βασίζονται σε ένα «ψηφιακό σύννεφο» (cloud), δηλαδή έναν προγραμματιζόμενο κόσμο.

1.3. Ορισμοί και ταξινομήσεις

Σε αυτό το υποκεφάλαιο καθορίζονται ορισμένες από τις βασικές ορολογίες και ταξινομήσεις που σχετίζονται με τα MEMS. Ένα πιο λεπτομερές γλωσσάριο όρων έχει συμπεριληφθεί στο Παράρτημα.

Υπάρχει ένα συγκεκριμένο είδος ταξινόμησης της τεχνολογίας των μικροσυστημάτων (MST) γενικότερα. Αν και το MEMS αναφέρεται επίσης πολλές φορές και ως MST, αυστηρά μιλώντας, το MEMS είναι μια τεχνολογία διεργασίας που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των μικροσκοπικών μηχανικών συσκευών ή συστημάτων (οπτικά, ηλεκτρονικά, μηχανικά και οπτικό-ηλεκτρονικά, οπτικό-μηχανικά) και ως εκ τούτου, είναι ένα υποσύνολο του MST.

Τα μικρο-οπτοηλεκτρομηχανικά συστήματα (ΜΟΕΜΣ) είναι επίσης ένα υποσύνολο του ΜΣΤ και μαζί με το ΜΕΜΣ σχηματίζουν τα εξειδικευμένα πεδία τεχνολογίας, χρησιμοποιώντας μικροσκοπικούς συνδυασμούς οπτικής, ηλεκτρονικής αλλά και μηχανικής. Τόσο τα ΜΟΕΜΣ όσο και τα ΜΕΜΣ ενσωματώνουν τη χρήση τεχνικών επεξεργασίας μικροηλεκτρονικής για το σχεδιασμό και την κατασκευή τους. Υπάρχουν σημαντικές αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των τομέων όσον αφορά την τεχνολογία ολοκλήρωσης και τις εφαρμογές τους και ως εκ τούτου είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατηγοριοποιηθούν οι συσκευές ΜΕΜΣ (όσον αφορά τον τομέα και / ή το υποσύνολο των ΜΣΤ). Η πραγματική διαφορά μεταξύ του ΜΕΜΣ και του ΜΣΤ είναι ότι το ΜΕΜΣ τείνει να χρησιμοποιεί διαδικασίες ημιαγωγών για να δημιουργήσει ένα μηχανικό μέρος. Αντίθετα, η απόθεση ενός υλικού (πυρίτιο), για παράδειγμα, δεν αποτελεί ΜΕΜΣ αλλά είναι εφαρμογή του ΜΣΤ.

1.3.1. Μετατροπέας

Ένας μετατροπέας είναι μια συσκευή που μετατρέπει μια μορφή σήματος ή ενέργειας σε άλλη μορφή. Ο όρος μετατροπέας μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί για να περιλαμβάνει τόσο αισθητήρες όσο και ενεργοποιητές και είναι ο πιο γενικός και ευρέως χρησιμοποιούμενος όρος στα ΜΕΜΣ.

1.3.2. Αισθητήρας

Ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που μετρά πληροφορίες από ένα περιβάλλον και παρέχει ένα σήμα ηλεκτρικής εξόδου σε απόκριση της παραμέτρου που μετρά. Με τα χρόνια, αυτές οι πληροφορίες έχουν κατηγοριοποιηθεί ως προς τον τύπο των ενεργειακών τομέων, αλλά οι συσκευές ΜΕΜΣ επικαλύπτουν γενικά πολλούς τομείς, ή δεν ανήκουν σε καμία κατηγορία [11]. Αυτά τα ενεργειακά πεδία περιλαμβάνουν:

- Μηχανική - δύναμη, πίεση, ταχύτητα, επιτάχυνση, θέση
- Θερμική - θερμοκρασία, εντροπία, θερμότητα, ροή θερμότητας
- Χημική - συγκέντρωση, σύνθεση, ρυθμός αντίδρασης
- Ακτινοβολία - ένταση ηλεκτρομαγνητικού κύματος, φάση, μήκος κύματος, πόλωση, ανάκλαση, διαθλαστικό δείκτη, διαπερατότητα
- Μαγνητική - ένταση πεδίου, πυκνότητα ροής, μαγνητική ροπή, διαπερατότητα
- Ηλεκτρική - τάση, ρεύμα, φόρτιση, αντίσταση, χωρητικότητα, πόλωση

1.3.3. Ενεργοποιητής

Ένας Ενεργοποιητής είναι μια συσκευή που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε μια ενέργεια. Μπορεί να δημιουργήσει μια δύναμη να χειριστεί τον εαυτό της, άλλες μηχανικές συσκευές ή το περιβάλλον για να εκτελέσει κάποια χρήσιμη λειτουργία.

1.4. Ιστορική αναδρομή

Το 1947, οι William Shockley, John Bardeen και Walter Brattain των «Bell Laboratories» κατάφεραν να κατασκευάσουν το πρώτο τρανζίστορ επαφής σημείου [12]. Αυτό το τρανζίστορ χρησιμοποίησε το γερμάνιο, ένα ημιαγωγικό χημικό στοιχείο. Αυτή η εφεύρεση απέδειξε την ικανότητα κατασκευής των τρανζίστορ με ημιαγωγικά υλικά, επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο της τάσης και του ρεύματος. Άνοιξε επίσης την πόρτα στην κατασκευή όλο και μικρότερων τρανζίστορ. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το τρανζίστορ αυτό (NPN) κατατέθηκε από τον William Shockley το 1948 [13].

Αυτό το πρώτο τρανζίστορ είχε ύψος περίπου μισής ίντσας, το οποίο είναι τεράστιο σε σύγκριση με τα σημερινά πρότυπα. Σήμερα, οι επιστήμονες μπορούν να κατασκευάσουν νανοτρανζίστορ που έχουν διάμετρο περίπου 1 nm [14]. Για αναφορά, μία μόνο ανθρώπινη τρίχα είναι περίπου 60 - 100 μικρόμετρα.

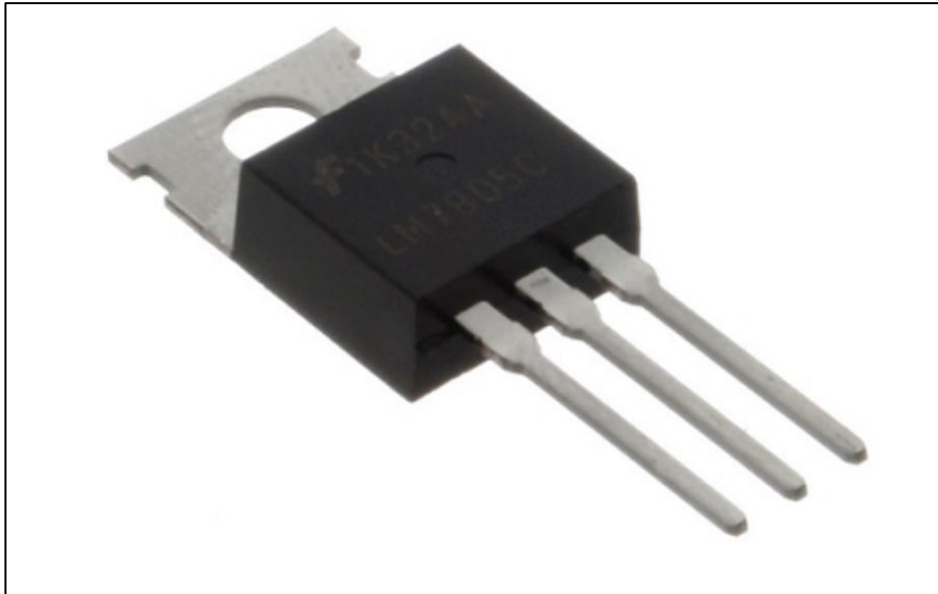
Το 1954, ο Smith C. S. ανακάλυψε το πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα σε υλικό ημιαγωγών όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο. Αυτό το πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα του ημιαγωγού μπορεί να έχει αρκετά μεγέθη μεγαλύτερα σε σχέση με τα μέταλλα. Αυτή η ανακάλυψη ήταν σημαντική για τα MEMS επειδή έδειξε ότι το πυρίτιο και το γερμάνιο μπορούσαν να «αισθανθούν» την πίεση του αέρα ή του νερού καλύτερα από το μέταλλο.

Το 1959 ιδρύθηκε η Kulite ως η πρώτη εμπορική πηγή των στελεχών πυριτίου. Η τεχνολογία των MEMS έχει τις ρίζες της στην επανάσταση του πυριτίου, η οποία μπορεί να εντοπιστεί σε δύο σημαντικές εφευρέσεις ημιαγωγών πυριτίου από το 1959. Όταν εφευρέθηκε το τρανζίστορ, υπήρχε ένα όριο στο πόσο μικρό θα μπορούσε να είναι το καθένα, επειδή έπρεπε να συνδεθεί με καλώδια και άλλα ηλεκτρονικά. Ως αποτέλεσμα, η συρρίκνωση των τρανζίστορ σταμάτησε μέχρι το "ολοκληρωμένο κύκλωμα". Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα θα περιλαμβάνει τα τρανζίστορ, τις αντιστάσεις, τους πυκνωτές και τα καλώδια που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Εάν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα μπορούσε να δημιουργηθεί με όλα μαζί σε ένα υπόστρωμα, τότε ολόκληρη η συσκευή θα μπορούσε να γίνει μικρότερη.

Δύο άτομα ανέπτυξαν ανεξάρτητα ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα σχεδόν ταυτόχρονα. Το 1958, ο Jack Kilby που εργάστηκε για την Texas

Instruments δημιούργησε ένα μοντέλο εργασίας του "Solid Circuit". Αυτό το κύκλωμα αποτελείται από ένα τρανζίστορ, τρεις αντιστάσεις και έναν πυκνωτή, όλα σε ένα τσιπ γερμανίου.

Από την άλλη, εφευρέθηκαν το μονολιθικό τσιπ ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) του Robert Noyce [15] και το MOSFET (μεταλλικού οξειδίου ημιαγωγός πεδίου- τρανζίστορ ή τρανζίστορ MOS) όπως φαίνεται στην Εικόνα 0.4: MOSFET .



Εικόνα 0.4: MOSFET [16].

Η κλιμάκωση του MOSFET και η μικρογραφία των MOSFET σε τσιπ IC, οδήγησε στη μικρογράφιση των ηλεκτρονικών (όπως προβλέπει ο νόμος του Moore και η κλιμάκωση του Dennard). Αυτό έθεσε τα θεμέλια για τη μικρογραφία των μηχανικών συστημάτων, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας της μικρομαγνητικής επεξεργασίας. Αυτή, βασίζεται στην τεχνολογία των ημιαγωγών πυριτίου. Στην ουσία αυτό ξεκίνησε, όταν οι μηχανικοί άρχισαν να συνειδητοποιούν ότι τα τσιπ πυριτίου και τα MOSFET μπορούν να αλληλοεπιδρούν, να επικοινωνούν με το περιβάλλον και να επεξεργάζονται σήματα όπως χημικά, κινήσεις και φως. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, η κατασκευή τρανζίστορ από πυρίτιο επέφερε τη διαδικασία της ισοτροπικής χάραξης του πυριτίου. Η ισοτροπική χάραξη αφαιρεί υλικό από ένα υπόστρωμα, χρησιμοποιώντας μια χημική διαδικασία. Το υλικό αφαιρείται εξίσου σε όλες τις κατευθύνσεις για το λόγο ότι ο ρυθμός χάραξης είναι ομοιόμορφος σε όλες τις κατευθύνσεις. Ένας από τους πρώτους αισθητήρες πίεσης πυριτίου ήταν ισοτροπικά μικρο-επεξεργασμένος από τη Honeywell το 1962 [17].

Ένα πρώιμο παράδειγμα μιας συσκευής MEMS είναι το τρανζίστορ του συντονισμού πυλών, μια προσαρμογή του MOSFET, που αναπτύχθηκε από τους Nathanson H. C. και Wickstrom R. A. [18]. Ένα άλλο πρώιμο

παράδειγμα είναι το «resonistor» ή RGT [19]. Στην ουσία ένας ηλεκτρομηχανικός μονολιθικός resonistor κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας [20]. Το RGT ήταν μια χρυσή δομή πύλης MOS. Είχε μήκος περίπου ένα χιλιοστό και ανταποκρίθηκε σε ένα πολύ στενό εύρος σημάτων ηλεκτρικής εισόδου. Λειτουργούσε ως φίλτρο συχνότητας για ολοκληρωμένα κυκλώματα, μεταδίδοντας μόνο αυτά τα σήματα εντός του σχεδιασμένου εύρους σε κύκλωμα εξόδου αγνοώντας όλες τις άλλες συχνότητες. Το RGT βρισκόταν σε αντίθεση με τα συμβατικά τρανζίστορ στο ότι δεν ήταν στερεωμένο στο οξειδίο της πύλης. Αντ' αυτού, ήταν κινητό και πρόβολο σε σχέση με το υπόστρωμα. Οι ηλεκτροστατικές ελκυστικές δυνάμεις έλεγχαν την απόσταση μεταξύ της πύλης και του υποστρώματος. Το RGT ήταν η πρώτη επίδειξη μικρο-ηλεκτροστατικών ενεργοποιητών. Ήταν επίσης η πρώτη επίδειξη τεχνικών επιφανειακής μικροκατασκευής.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, δημοσιεύθηκε η μελέτη του Waggener H. A. [21]. Σε αυτή απεικονιζόταν η ανισότροπη υγρή χάραξη του πυριτίου. Η υγρή ανισοτροπική χάραξη διαφέρει από την υγρή ισοτροπική χάραξη στο ότι η ηλεκτροχημική απομάκρυνση του υλικού, εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό του πυριτίου. Ο ρυθμός χάραξης (η ποσότητα του υλικού που αφαιρείται ανά μονάδα χρόνου) ποικίλλει σημαντικά για τα διάφορα κρυσταλλικά επίπεδα. Το πυρίτιο μπορεί στη συνέχεια να χαραχτεί επιλεκτικά, δημιουργώντας μια ποικιλία δομών όπως αυλακώσεις σχήματος V, μεσαίες μορφές πυραμίδας και μικρο-θαλάμους. Η ηλεκτροχημική ανισοτροπική χάραξη είναι σημαντική στην κατασκευή μικροσυστημάτων, διότι αποτελεί τη βάση της διαδικασίας μαζικής επεξεργασίας. Η μαζική κατεργασία με μικρομαγνητισμό χαράζει σχετικά μεγάλα τμήματα του υποστρώματος πυριτίου αφήνοντας πίσω τις επιθυμητές δομές. Από την έναρξή της, η μαζική μικροκατασκευή παρέμεινε μια πολύ ισχυρή μέθοδος κατασκευής μικρομηχανικών στοιχείων όπως μικρο-ρευστών, ακροφυσίων, διαφραγμάτων, δοκών ανάρτησης και άλλων κινούμενων ή δομικών στοιχείων.

Τη δεκαετία του 1970, ένας αισθητήρας πίεσης με μικροσυμπιεστή που χρησιμοποιούσε διάφραγμα πυριτίου αναπτύχθηκε από τον Kurt Peterson από το ερευνητικό εργαστήριο της IBM. Έτσι, το λεπτό διάφραγμα επέτρεψε μεγαλύτερη παραμόρφωση και μεγαλύτερη ευαισθησία σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες πίεσης τύπου μεμβράνης εκείνη την εποχή. Αυτοί οι λεπτοί αισθητήρες πίεσης του διαφράγματος έχουν πολλαπλασιαστεί σε συσκευές παρακολούθησης της αρτηριακής πίεσης και μπορεί να θεωρούνται μια από τις πρώτες εμπορικές επιτυχίες των συσκευών των μικροσυστημάτων [22]. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 έως τις αρχές της δεκαετίας του 1980, αναπτύχθηκε ένας αριθμός μικροαισθητήρων MOSFET για τη μέτρηση φυσικών, χημικών, βιολογικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων [23].

Το 1971, η Intel παρουσίασε δημόσια τον πρώτο μικροεπεξεργαστή «single chip» στον κόσμο, τον Intel 4004. Ο 4004 τροφοδότησε την

αριθμομηχανή «Busicom» και ήταν ο πρώτος μικροεπεξεργαστής της Intel. Αυτή η εφεύρεση άνοιξε το δρόμο για τον προσωπικό υπολογιστή. Όπως σημειώνεται παρακάτω, το MEMS αξιοποίησε τεχνολογίες κατασκευής ημιαγωγών. Επιπλέον, αυτή τη δεκαετία δημιουργήθηκε και το πρώτο επιταχυνσιόμετρο πυριτίου. Στο τέλος αυτής της δεκαετίας δημιουργήθηκε επίσης το πρώτο ακροφύσιο ψεκασμού με μικρομαγνητική εστία. Πιο συγκεκριμένα, το 1979 η Hewlett Packard ανακάλυψε μια εναλλακτική λύση στην εκτύπωση «dot matrix» που ονομάζεται «Thermal Inkjet Technology» (TIJ). Αυτή η τεχνική εκτύπωσης θερμαίνει γρήγορα το μελάνι, δημιουργώντας μια μικρή φυσαλίδα. Όταν σκάσει η φυσαλίδα, το σταγονίδιο μελανιού ψεκάζεται μέσα από ένα ακροφύσιο. Μια σειρά από αυτά τα ακροφύσια αποτελούν μέρος της πλήρους κεφαλής εκτύπωσης inkjet και επιτρέπει την ταχεία δημιουργία μιας εικόνας σε χαρτί και άλλα μέσα. Η τεχνολογία του μικρομαγνητισμού του πυριτίου χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ακροφυσίων. Τα ακροφύσια είναι πολύ μικρά και είναι πυκνά συσκευασμένα για την επίτευξη εκτύπωσης υψηλής ανάλυσης. Από τότε που η HP πρωτοεμφανίστηκε με το TIJ, έχουν γίνει βελτιώσεις ώστε τα ακροφύσια να είναι μικρότερα και πιο πυκνά για να βελτιώσουν την ανάλυση. Πολλοί εκτυπωτές που διατίθενται σήμερα χρησιμοποιούν την τεχνολογία θερμικής εκτόξευσης μελανιού.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 μια ομάδα στο Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών της Καρλσρούης στη Γερμανία, ανέπτυξε μια νέα διαδικασία που ονομάζεται LIGA [24]. Το LIGA είναι ένα γερμανικό ακρωνύμιο για τη λιθογραφία ακτίνων X (Εικόνα 0.5: Βήματα λιθογραφίας με ακτίνες X) ή ηλεκτρολυτική επίστρωση (Galvanoformung) και χύτευση (Abformung).



Εικόνα 0.5: Βήματα λιθογραφίας με ακτίνες X [25].

Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική στην κατασκευή μικροσυστημάτων επειδή επιτρέπει την κατασκευή μικρό-δομών υψηλής αναλογίας διαστάσεων. Οι δομές υψηλής αναλογίας διαστάσεων είναι πολύ λεπτές, στενές και ψηλές, όπως ένα κανάλι. Το LIGA μπορεί να επιτύχει αναλογίες έως και 100: 1 και οι δομές LIGA έχουν ακριβείς διαστάσεις και χαμηλή τραχύτητα επιφάνειας.

Το 1982 δημοσιεύθηκε η μελέτη του Petersen K. [26]. Αυτή η μελέτη παρείχε πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού και τα δεδομένα χάραξης για το πυρίτιο και συνέβαλε στην προσέλκυση της επιστημονικής κοινότητας στην εξερεύνηση αυτών των περιοχών. Είναι ένα από τα πιο αναφερόμενα άρθρα στο πεδίο των MEMS.

Ο Grace R. H. ανέπτυξε μια μικροσυσκευή που ονομάζεται μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (AFM) [27]. Το AFM είναι μια συσκευή που χαρτογραφεί την επιφάνεια μιας ατομικής δομής, μετρώντας τη δύναμη που ενεργεί στην άκρη ενός προβόλου μικρό-κλίμακας με μια αιχμηρή άκρη, ή ανιχνευτή στο τέλος του. Ο πρόβολος είναι συνήθως πυρίτιο ή νιτρίδιο του πυριτίου. Η τελική ανάλυση του AFM είναι περίπου 10 Å. Γενικότερα, υπήρξαν πολλές εξελίξεις και νέες εφαρμογές που εμφανίστηκαν στη δεκαετία του 1980. Το 1988 κατασκευάστηκαν οι πρώτοι περιστροφικοί ηλεκτροστατικοί κινητήρες πλευρικής κίνησης [28].

Το 1992 στο Πανεπιστήμιο Cornell, αναπτύχθηκε μια διαδικασία μαζικής επεξεργασίας μικροκατασκευών που ονομάζεται «Ενεργή χάραξη και μεταλλοποίηση (Single Crystal Reactive Etching and Metallization) ή «SCREAM» [29]. Αναπτύχθηκε για την κατασκευή απελευθερωμένων μικροδομών από μονό κρύσταλλο πυριτίου και μονό κρύσταλλο γάλλιου αρσενίδιου (GaAs). Επιπλέον, εισήχθη από την Solgaard O. ο παραμορφώσιμος διαμορφωτής φωτός κιγκλιδώματος (GLM) [30]. Πρόκειται στην ουσία για ένα μικρο-οπτικό, ηλεκτρομηχανικό σύστημα (MOEMS). Από τότε που παρουσιάστηκε, έχει αναπτυχθεί για χρήση σε διάφορες εφαρμογές όπως στην τεχνολογία οθόνης, την γραφική εκτύπωση, τη λιθογραφία και τις οπτικές επικοινωνίες.

Το 1993 το Κέντρο Μικροηλεκτρονικής της Βόρειας Καρολίνας (MCNC) δημιούργησε ένα χυτήριο. Ως στόχο του είχε να κάνει την επεξεργασία μικροσυστημάτων εξαιρετικά προσβάσιμη και οικονομικά αποδοτική για μια μεγάλη ποικιλία χρηστών. Ανέπτυξε μια διαδικασία που ονομάζεται MUMPs (MultiUser MEMS Processes), η οποία είναι μια διαδικασία τριβής πολυπυριτικού επιφανειακού μικρομαγνητισμού. Από την έναρξή του, έχουν γίνει αρκετές τροποποιήσεις και βελτιώσεις για την αύξηση της ευελιξίας της διαδικασίας για το περιβάλλον των πολλαπλών χρηστών.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, τα εξαρτήματα MEMS άρχισαν να εμφανίζονται σε πολλά εμπορικά προϊόντα και εφαρμογές,

συμπεριλαμβανομένων των επιταχυνσιόμετρων, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ανάπτυξης των αερόσακων στα οχήματα, των αισθητήρων πίεσης σε ιατρικές εφαρμογές και των κεφαλών των εκτυπωτών μελάνης [31]. Σήμερα, οι συσκευές MEMS βρίσκονται από τις στις οθόνες προβολής μέχρι και τα συστήματα αποθήκευσης δεδομένων. Ωστόσο, το μεγαλύτερο δυναμικό για τις συσκευές MEMS έγκειται σε νέες εφαρμογές εντός των τηλεπικοινωνιακών (οπτικών και ασύρματων), βιοϊατρικών και ελεγκτικών διαδικασιών.

Το 1998, ξεκίνησε ένα άλλο χυτήριο. Αυτό ξεκίνησε από τα Sandia National Laboratories και η διαδικασία ονομάστηκε SUMMiT IV. Αυτή η διαδικασία εξελίχθηκε αργότερα στο SUMMiT V, το οποίο είναι μια διεργασία μικρο-κατεργασίας της επιφάνειας του πολυκρυσταλλικού πυριτίου πέντε στρωμάτων. Το SUMMiT είναι η συντομογραφία για το «Sandia Ultra-planar, Multi-level MEMS Technology».

Το 1999 η Lucent Technologies ανέπτυξε τον πρώτο διακόπτη οπτικού δικτύου MEMS. Οι οπτικοί διακόπτες είναι οπτικοηλεκτρικές συσκευές, αποτελούμενες από μια πηγή φωτός και έναν ανιχνευτή που παράγει μια έξοδο μεταγωγής. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει μια λειτουργία μεταγωγής σε ένα δίκτυο επικοινωνιών. Αυτοί οι οπτικοί διακόπτες MEMS χρησιμοποιούν μικρο-καθρέπτες για εναλλαγή ή ανάκλαση ενός οπτικού καναλιού ή σήματος από τη μία θέση στην άλλη, ανάλογα με τη σχετική γωνία του μικρο-καθρέφτη. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις του σχεδιασμού.

Τα MEMS έχουν αρκετά διαφορετικά πλεονεκτήματα ως τεχνολογία κατασκευής. Καταρχάς, η διεπιστημονική φύση της τεχνολογίας τους, οι τεχνικές της μικρομαγνητικής επεξεργασίας, καθώς και η ποικιλία των εφαρμογών της, έχει οδηγήσει σε μια άνευ προηγουμένου σειρά συσκευών και συνεργιών σε προηγουμένως άσχετα πεδία (για παράδειγμα βιολογία και μικροηλεκτρονική). Δεύτερον, τα MEMS με τις τεχνικές κατασκευής τους, επιτρέπουν την κατασκευή εξαρτημάτων και συσκευών με αυξημένη απόδοση και αξιοπιστία, σε συνδυασμό με τα προφανή πλεονεκτήματα του μειωμένου φυσικού μεγέθους, του όγκου, του βάρους και του κόστους. Τρίτον, τα MEMS παρέχουν τη βάση για την κατασκευή προϊόντων που δεν μπορούν να κατασκευαστούν με άλλες μεθόδους. Αυτοί οι παράγοντες τα καθιστούν δυνητικά μια πολύ πιο διαδεδομένη τεχνολογία από τα ολοκληρωμένα μικροσίπ κυκλώματος.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλές προκλήσεις και τεχνολογικά εμπόδια που σχετίζονται με τη μικρογραφία, που πρέπει να αντιμετωπιστούν και να ξεπεραστούν προτού τελικά τα MEMS να μπορούν να πραγματοποιήσουν το τεράστιο δυναμικό τους.

1.5. Microelectronic engineering

Η βιομηχανία των ημιαγωγών, με την εφεύρεση του τρανζίστορ το 1947 στα AT&T Bell Labs, και το ντεμπούτο του ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) στις αρχές της δεκαετίας του 1960, γεννήθηκε ως μια πολλά υποσχόμενη βιομηχανία [32]. Σύντομα κατέληξε να είναι μια τεράστια βιομηχανία. Από αυτή τη μέτρια αρχή, στην οποία τα IC χρησιμοποιήθηκαν μόνο σε περιορισμένο αριθμό εξειδικευμένων εφαρμογών, έχει αναπτυχθεί μια τεχνολογία που διαδίδεται στο σημερινό κόσμο. Η εισαγωγή του προσωπικού υπολογιστή (PC) από την IBM το 1980 έκανε τα μικροσίπ των ημιαγωγών ως ένα γνώριμο όρο [33]. Αυτή η μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση συνεχίστηκε κατά τη διάρκεια των δεκαετιών λόγω των καινοτομιών, των προχωρημένων διαδικασιών στη μεταποίηση και λόγω της ταχείας εφαρμογής σε νέα προϊόντα.

Η βιομηχανία των ημιαγωγών αποτελείται από πολλούς ομίλους εταιρειών και ιδρυμάτων, όπου συμβάλλουν στη «ζωτικότητα» του. Στο κέντρο βρίσκονται οι κατασκευαστές τσιπ αλλά υποστηρίζονται από ένα μεγάλο αριθμό εξωτερικών οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων κατασκευαστών επεξεργασίας τσιπ και μετρολογικών εργαλείων, προμηθευτών υλικών και χημικών, αναλυτικών εργαστηρίων, βιομηχανικών ενώσεων, που παρέχουν πρότυπα κατασκευής και οργανώνουν ερευνητικές προσπάθειες συνεργασίας. Επιπλέον μέσα στα χρόνια, σε όλα τα παραπάνω έχουν αρχίσει να εμπλέκονται άμεσα διάφορα κολέγια και πανεπιστήμια που παρέχουν τεχνικά εκπαιδευμένους εργαζόμενους.

Οι ημιαγωγοί κυριαρχούνται από ηλεκτρονικά πυριτίου, και περίπου το ογδόντα τοις εκατό αυτού είναι συμπληρωματική τεχνολογία ημιαγωγών μεταλλικού οξειδίου (CMOS) το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο 2.

Η κατασκευή των μικροηλεκτρονικών σήμερα απασχολεί πιθανώς το πιο καταρτισμένο εργατικό δυναμικό μηχανικής οποιασδήποτε μεταποιητικής βιομηχανίας. Καθώς η πυκνότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αυξάνεται (και συνεπώς μειώνεται το μέγεθος της δυνατότητας της συσκευής), η πολυπλοκότητα των μικροηλεκτρονικών διαδικασιών κατασκευής δημιουργεί ζήτηση για όλο και πιο μορφωμένο και εκπαιδευμένο εργατικό δυναμικό.

Με τις ΗΠΑ θέλοντας να διατηρήσουν το κυρίαρχο μερίδιο αγοράς και το πλεονέκτημα της καινοτομίας, είναι επιτακτική ανάγκη να επενδύουν στην εκπαίδευση ενός εργατικού δυναμικού υψηλής ειδίκευσης. Τα εκπαιδευτικά προγράμματα Microelectronic engineering στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας του Ρότσεστερ είχαν σχεδιαστεί από τις αρχές για να καλύψουν αυτήν την κρίσιμη ανάγκη.

Το πρόγραμμα Bachelor of Science στο Microelectronic engineering στο RIT ξεκίνησε το 1982 μετά από μια μελέτη που αποκάλυψε μια κρίσιμη

εθνική ανάγκη για μηχανικούς κατάλληλους για να οδηγήσουν την επανάσταση στον υπολογιστή που μόλις είχε ξεκινήσει [34]. Το εργαστήριο λιθογραφίας εκείνη την εποχή αποτελούταν από πολύ απλά, βασικά πράγματα.

Με τη διαδοχική πρόοδο της βιομηχανίας των ημιαγωγών, το πρόγραμμα εξελίχθηκε, για να αντιμετωπίσει τις αλλαγές και τις προκλήσεις της βιομηχανίας. Το πρόγραμμα Microelectronic engineering στο RIT παραμένει το πρώτο πιστοποιημένο πρόγραμμα (ABET Bachelor of Science) σε επίπεδο πτυχίου Microelectronic engineering. Τα εργαστήρια στο RIT περιλαμβάνουν το μεγαλύτερο πανεπιστημιακό χώρο για κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το πρόγραμμα έχει περάσει από διάφορες αλλαγές στο πρόγραμμα σπουδών, ως απάντηση στις τεχνολογικές εξελίξεις του κλάδου.

1.6. MEMS ή NEMS

Αυτές τις μέρες υπάρχει τεράστιο ενδιαφέρον για την τεχνολογία μικρο και νανοηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS και NEMS αντίστοιχα). Αναμφίβολα, η προφανής εμπορική δυναμική αντιπροσωπεύει μεγάλο μέρος του πρόσφατου ενδιαφέροντος για τη μικρο και τη νανοτεχνολογία. Η μοντελοποίηση των MEMS και NEMS συνδυάζει τρία συστατικά. Τις απλές περιγραφές των συσκευών MEMS / NEMS, τα μαθηματικά μοντέλα και τις μαθηματικές μεθόδους [35].

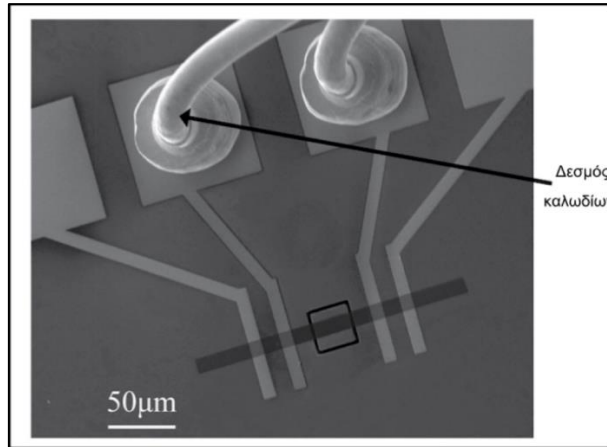
Η νανοτεχνολογία σημαίνει κυριολεκτικά κάθε τεχνολογία που πραγματοποιείται σε μια νανοκλίμακα που έχει εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο. Η νανοτεχνολογία περιλαμβάνει την παραγωγή και εφαρμογή φυσικών, χημικών και βιολογικών συστημάτων σε κλίμακες που κυμαίνονται από μεμονωμένα άτομα ή μόρια έως διαστάσεις υπομικρού, καθώς και την ενσωμάτωση των νανοδομών που προκύπτουν σε μεγαλύτερα συστήματα. Η νανοτεχνολογία έχει σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομία και την κοινωνία από τις αρχές του 21ου αιώνα, σε σύγκριση με εκείνη της τεχνολογίας των ημιαγωγών, της τεχνολογίας πληροφοριών ή της κυτταρικής και μοριακής βιολογίας.

Τα χαρακτηριστικά της κλίμακας του νανομέτρου δημιουργούνται κυρίως από τα στοιχειώδη συστατικά τους. Η χημική σύνθεση, η αυθόρμητη αυτοσυναρμολόγηση των μοριακών συστάδων (μοριακή αυτοσυναρμολόγηση) από απλά αντιδραστήρια σε διάλυμα ή βιολογικά μόρια (π.χ. DNA) χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία για την παραγωγή τρισδιάστατων νανοδομών, συμπεριλαμβανομένων κβαντικών κουκκίδων (νανοκρυστάλλους) αυθαίρετης διαμέτρου (περίπου 10 έως 10⁵ άτομα). Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές εναπόθεσης κενού και χημείας πλάσματος για την παραγωγή πολυστρωματικών νανοσύνθετων και νανοσωλήνων. Ατομικά ελεγχόμενες δομές παράγονται χρησιμοποιώντας

επιταξία της μοριακής δέσμης και επιταξία της οργανικής-μεταλλικής φάσης ατμών.

Τα NEMS εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Σε αντίθεση με τα MEMS, τα NEMS είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία. Τα NEMS ήταν από καιρό εργαλεία αφιερωμένα σε θεμελιώδεις μελέτες για την ανίχνευση φυσικών μηχανισμών. Το εξαιρετικά μικρό τους μέγεθος, τα καθιστά εξαιρετικά ευαίσθητα σε οποιοδήποτε εξωτερικό ερέθισμα.

Η ακραία ευαισθησία τους ανοίγει το δρόμο σε ολόκληρους τομείς εφαρμογών, σε βιοχημικές αναλύσεις, οι οποίες δεν αντιμετωπίστηκαν από τα «μεγάλα αδέρφια» τους, τα MEMS, όπως οι αισθητήρες δύναμης και οι αισθητήρες μάζας και υπερευαισθησίας [36]. Οποιοδήποτε στοιχείο παραμένει στην επιφάνεια του νανο-αισθητήρα προκαλεί αλλαγή συχνότητας, η οποία μετράται συνεχώς (η μάζα και / ή οι επιφανειακοί περιορισμοί αλλάζουν). Αυτό είναι γνωστό ως ένα βαρυμετρικό αποτέλεσμα. Φυσικά, αυτή η αρχή ανίχνευσης μπορεί να συνδυαστεί με μία ή περισσότερες αρχές, όπως η παραλλαγή της αγωγιμότητας του NEMS που προκαλείται από μια παραλλαγή του ηλεκτροστατικού επιφανειακού δυναμικού για πιθανή αύξηση του αριθμού των παραμέτρων μέτρησης και συνεπώς της ακρίβειας. Προωθώντας αυτήν την προσέγγιση, τα NEMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βασικά συστατικά ενός μελλοντικού φασματομέτρου μάζας για πρωτεϊνικές αναλύσεις σε κυτταρική βάση [37]. Βραχυπρόθεσμα, τα NEMS θα χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες σε συστήματα ανάλυσης πολλαπλών αερίων. Με την πάροδο του χρόνου, αυτή η τεχνολογία θα είναι σε θέση να ποσοτικοποιήσει τα αέρια που είναι δυνητικά επικίνδυνα, όπως οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) για την ανάλυση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και ακόμη και να αναγνωρίσουν βιοδείκτες στην αναπνοή [38]. Στην Εικόνα 0.6: Εξαιρετικά μικροσκοπικό επιταχυνσιόμετρο NEMS με καλώδια σύνδεσης φαίνεται ένα εξαιρετικά μικροσκοπικό επιταχυνσιόμετρο NEMS με καλώδια σύνδεσης.



Εικόνα 0.6: Εξαιρετικά μικροσκοπικό επιταχυνσιόμετρο NEMS με καλώδια σύνδεσης [39].

Η τεχνολογία αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αποτελέσει νέους ανιχνευτές για εργαλεία κοντά στο πεδίο (μικροσκοπία δύναμης μαγνητικού συντονισμού και μικροσκοπία ατομικής δύναμης). Ένας μεγάλος αριθμός ομάδων ψάχνουν συγκεκριμένα να μετρήσουν την τελική μετατόπιση μιας δονούμενης νανοβέργας στο κβαντικό όριο. Αυτό το όριο αντιστοιχεί στη θεμελιώδη κβαντική κατάσταση δόνησης των NEMS.

Τα NEMS είναι ενδιαφέροντα τόσο σε επίπεδο βασικών στοιχείων όσο και σε εφαρμογές. Συχνά έχουν υψηλές συχνότητες μηχανικού συντονισμού (συνήθως από 1 έως 100 MHz) και σπαταλούν χαμηλές ποσότητες ενέργειας (μηχανικές και ηλεκτρικές). Είναι αρκετά ευαίσθητα ώστε να επιτρέπουν την πραγματοποίηση μετρήσεων μάζας σε ένα μόνο μοριακό επίπεδο (μέτρηση μορίων), να μετρούν τα ηλεκτρόνια ή τα φωνόνια ένα προς ένα, ή να μετρούν τις δυνάμεις που πλησιάζουν το pico-Newton.

Τα NEMS ανταποκρίνονται σε αιτήματα τόσο γρήγορα, όσο το μέγεθος της νανομπάρας. Ένα νανοσύρμα μήκους 1 μm για τμήμα 50 nm² σε πυρίτιο μπορεί να θερμανθεί σε λιγότερο από 10 ns. Είναι επομένως, δυνατό να ενεργοποιηθεί το NEMS υψηλής συχνότητας με θερμομηχανική δύναμη, κάτι που δεν ήταν δυνατό με τα μικροσυστήματα. Αυτό σημαίνει επίσης, ότι ένας αισθητήρας NEMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση γρήγορων φαινομένων (~ 1 μs ή και λιγότερο).

Η μετάβαση από τα μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα (MEMS) στα νανοηλεκτρομηχανικά συστήματα (NEMS) συνεπάγεται κάτι παραπάνω από την ομοθετική μείωση των ηλεκτρομηχανολογικών ιδιοτήτων των συστημάτων. Εκτός από τους φυσικούς νόμους, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα θεμελιώδη αποτελέσματα που ενυπάρχουν στις νανομετρικές διαστάσεις. Γενικότερα, εξωγενή φαινόμενα, όπως οι επιφανειακές αλληλεπιδράσεις, εμφανίζονται έξω από το υλικό που σχηματίζουν τα NEMS. Συγκεκριμένα, μπορούν να αναφερθούν οι Van der Waals δυνάμεις, οι οποίες δεν είναι πλέον αμελητέες παρουσία ηλεκτροστατικών δυνάμεων ενεργοποίησης και

οι οποίες είναι πιθανό να διαταράξουν τη λειτουργία των NEMS [40]. Στην περίπτωση των NEMS, οι δυνάμεις τριβής ή συμπίεσης των υγρών συμβαίνουν στο καθεστώς της σπάνιας αραίωσης του περιβάλλοντος αέρα. Αυτό το καθεστώς εξαρτάται τόσο από τα διαστήματα που χωρίζουν δύο δομές (σταθερά ή κινητά), όσο και από τις συχνότητες διέγερσης των κινητών μερών. Μπορούν να συμβούν αμέτρητες άλλες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιφανειών διασύνδεσης. Όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις εξαρτώνται από τις συνθήκες χρήσης των NEMS (για παράδειγμα, αέρα και κενού) και τους τρόπους κατασκευής (η γεωμετρία των επιφανειών διασύνδεσης, η τραχύτητά τους σε σχέση με την απόσταση που τους χωρίζει, καθώς και τα υλικά).

Οι φυσικοί νόμοι που συνδέονται συνήθως με τις εγγενείς ιδιότητες των υλικών, όπως οι ηλεκτρικές και θερμικές αγωγές αλλάζουν, ωστόσο, σε μικρές διαστάσεις. Τα νανοσύρματα πυριτίου έχουν διαμέτρους που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 5 και 100 nm και έχουν μήκη στο επίπεδο του *micro*. Για τη μικρότερη διάμετρο, 10 περίπου άτομα πυριτίου μπορούν να αναγνωριστούν κατά μήκος της διαμέτρου του. Το περιβάλλον που εξετάζεται εδώ, συνεπώς, δεν είναι πλέον εντελώς συνεχές με τις επιφανειακές συνθήκες που έχουν ισχυρή επιρροή. Είναι σαφές, ότι τα κλασικά μοντέλα για φαινόμενα θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας πρέπει γενικά να βελτιωθούν. Για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί ένα τεράστιο πιεζο-ηλεκτρικό φαινόμενο σε νανοσύρματα πυριτίου [41].

Όπως έχει αναφερθεί, με φυσικό τρόπο, η τεχνολογία των MEMS συγχωνεύεται στη νανοκλίμακα μέσω των νανοηλεκτρομηχανικών συστημάτων NEMS. Οι πειραματικές δυνατότητες είναι σε αυτήν την περίπτωση ακόμη μεγαλύτερες καθώς το μέγεθος της διάστασης του εργαλείου ή της συσκευής μειώνεται [42]. Η πρόκληση της σημερινής τεχνολογίας των MEMS και NEMS είναι ότι δεν περιλαμβάνει μόνο την εφαρμογή των σύγχρονων τεχνικών μικροκατασκευής, αλλά απαιτεί επίσης τη διεξοδική ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος. Η ανάλυση που βασίζεται στην κλασική φυσική δε μπορεί συχνά να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή και την ερμηνεία των φαινομένων που καθορίζουν τη λειτουργικότητα μιας συσκευής MEMS ή NEMS. Σε αυτές τις κλίμακες διαστάσεων η αναλογία της μεγάλης επιφάνειας προς τον όγκο των συσκευών MEMS, οι επιφανειακές επιδράσεις (ηλεκτροστατικές, μοριακή πρόσφυση) και οι όποιες χημικές αλληλεπιδράσεις, κυριαρχούν σε φαινόμενα όγκου, όπως η αδράνεια ή η θερμική μάζα. Λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων της συσκευής και των μικρών αποστάσεων μεταξύ των εξαρτημάτων της συσκευής, τα οποία μετακινούνται, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κβαντικά φαινόμενα για να περιγραφούν τα καταγεγραμμένα φαινόμενα. Αυτό με τη σειρά του κάνει την ερμηνεία της παρατηρούμενης συμπεριφοράς των MEMS και NEMS ξεχωριστή από την ερμηνεία, που οι μηχανικοί συνηθίζουν σήμερα.

Ο απλούστερος τρόπος κατασκευής των δομών των οποίων το πάχος είναι εκατοντάδες νανόμετρα, είναι να σχηματιστούν από μια λεπτή μεμβράνη. Κατ'αυτόν τον τρόπο η μάζα της δομής μπορεί να μειωθεί όπως στην περίπτωση των μικροσωματιδίων νιτριδίου του πυριτίου [43]. Τα νανοσύρματα πυριτίου είναι ένα από τα επόμενα παραδείγματα των συσκευών NEMS [44]. Όταν απελευθερώνονται από το υπόστρωμα, μπορούν να ενεργήσουν ως νανοσυντονιστές. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι ότι καθένα από τα καλώδια που είναι ενσωματωμένα σε μια συστοιχία, μπορεί να αντιμετωπιστεί ξεχωριστά, γεγονός που αυξάνει την απόδοση της λειτουργίας, καθώς η απόκριση κάθε καλωδίου μπορεί να γίνει αισθητή ξεχωριστά.

Εκτός από τα κλασικά υλικά που χρησιμοποιούνται και εφαρμόζονται στη μικρο και στη νανοηλεκτρονική, υπάρχουν επίσης προσπάθειες εφαρμογής των 2 διαστάσεων (2D) κρυστάλλων ως υλικών για τις συσκευές MEMS και NEMS. Σε μια τέτοια ρύθμιση, οι ατομικά παχιές μεμβράνες σχηματίζουν το μηχανικό τμήμα των NEMS. Οι εξαιρετικές ιδιότητες των υλικών των δισδιάστατων κατασκευών καθιστούν τέτοια συστήματα πολύ ελκυστικά [45].

Καθώς οι συσκευές MEMS και NEMS έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί, παρατηρείται όλο και συχνότερα πρόοδος στη μετρολογία τους. Η μετρολογία ορίζεται ως η επιστήμη της μέτρησης που περιλαμβάνει όλες τις πρακτικές και θεωρητικές πτυχές. Είναι απαραίτητη τόσο για την επιστημονική έρευνα και ανάπτυξη, όσο και για την τεχνολογική καινοτομία. Η μετρολογία υψηλής ποιότητας είναι κρίσιμη για τις σημαντικές εξελίξεις σε όλους τους επιστημονικούς τομείς. Επιπλέον, η μετρολογία υποστηρίζει τη σύγχρονη βιομηχανική ανταγωνιστικότητα και την ανάπτυξη νέων και βελτιωμένων προϊόντων και διαδικασιών.

Ο περιορισμός της σημερινής μετρολογίας είναι ότι οι διαδικασίες που εφαρμόζονται από τα Εθνικά Μετρολογικά Ινστιτούτα (NMIs) και εισάγονται στην καθημερινή πρακτική, βασίζονται κυρίως σε κλασικά θεωρήματα (συμπεριλαμβανομένης της θεωρίας της κλασικής ελαστικότητας, της κλασικής ηλεκτροδυναμικής, της θερμοδυναμικής κ.λπ.). Είναι σαφές, ότι λόγω της προόδου στη μικρογραφία, ο ρόλος της λεγόμενης κβαντικής μετρολογίας θα αυξάνεται συνεχώς. Είναι προφανές ότι τα πρώτα συμπτώματα αυτής της τάσης, που περιλαμβάνουν την εισαγωγή της τάσης Josephson και τα πρότυπα αναφοράς της κβαντικής αντίστασης Hall, απαιτούν μια πιο βασική προσανατολισμένη έρευνα σε αυτόν τον ώστε να γίνουν οι αναφερόμενες θεωρίες προσβάσιμες στην ευρύτερη ομάδα των επιστημόνων και των τεχνικών [46].

1.7. Προβλήματα στα MEMS και NEMS

Τόσο στα MEMS όσο και στα NEMS μπορούν να διατυπωθούν πολλά μηχανικά προβλήματα και να επιλυθούν χρησιμοποιώντας τα μικρο και μη,

ηλεκτροηλεκτρομηχανικά παραδείγματα. Η ηλεκτρομηχανική ασχολείται με συγκριτικά κριτήρια και αναδυόμενα προβλήματα στην ολοκληρωμένη ηλεκτρομηχανική - μηχανολογία – πληροφορική και τεχνολογία. Πολλά από αυτά τα προβλήματα δεν έχουν αντιμετωπιστεί και επιλυθεί και μερικές φορές, οι υπάρχουσες λύσεις δεν μπορούν να αντιμετωπίζονται ως και οι βέλτιστες. Αυτό αντικατοπτρίζει τις προφανείς τάσεις στη θεμελιώδη, εφαρμοσμένη και πειραματική έρευνα ως απάντηση σε μακροχρόνια άλυτα προβλήματα, καθώς και στη μηχανική και την τεχνολογική επιχείρηση και τις παρακλήσεις σταθερών εξελικτικών απαιτήσεων [47].

Η μικρο και νανοηλεκτρομηχανική επικεντρώνονται στην πολυεπιστημονική συνέργεια, στον ολοκληρωμένο σχεδιασμό, στην ανάλυση, στη βελτιστοποίηση, στη βιομιμοποίηση και στο εικονικό πρωτότυπο της υψηλής απόδοσης των MEMS και των NEMS. Επιπλέον, επικεντρώνεται στην ευφυΐα του συστήματος, στη μάθηση, στην προσαρμογή, στη λήψη αποφάσεων και στον έλεγχο μέσω της χρήσης προηγμένου υλικού, που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε υπολογιστικά από αποδοτικό ετερογενές λογισμικό. Ολοκληρωμένα χαρακτηριστικά συγκεντρωμένα από διάφορους τομείς, καθώς και η ανάγκη για συνεργικά παραδείγματα πλησιάζουν γρήγορα. Η δομική πολυπλοκότητα των MEMS και των NEMS έχει αυξηθεί δραστικά λόγω των προδιαγραφών που επιβάλλονται στα συστήματα και τις συσκευές, στις προόδους του υλικού και του λογισμικού. Σε όλα τα παραπάνω συνδέονται και οι αυστηρές επιτεύξιμες απαιτήσεις της απόδοσης. Απαντώντας στις απαιτήσεις της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των συστημάτων, των προδιαγραφών της απόδοσης και της ευφυΐας, η θεμελιώδης θεωρία πρέπει να επεκταθεί περαιτέρω. Συγκεκριμένα, εκτός από την επινόηση των υποσυστημάτων, των συσκευών και των δομών, υπάρχουν και άλλα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν ενόψει της συνεχώς εξελισσόμενης φύσης των MEMS και των NEMS (π.χ. σύνθεση, ανάλυση, σχεδιασμός, μοντελοποίηση, προσομοίωση, βελτιστοποίηση, πολυπλοκότητα, ευφυΐα, λήψη αποφάσεων, διαγνωστικά, κατασκευή, συσκευασία κ.λπ.). Οι ανταγωνιστικές βέλτιστες επιδόσεις των MEMS και των NEMS μπορούν να σχεδιαστούν μόνο εφαρμόζοντας τις προηγμένες έννοιες του υλικού και του λογισμικού.

Ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα στη σχεδίαση των συστημάτων είναι η τοπολογία δηλαδή η σύνθεση της διαμόρφωσης της αρχιτεκτονικής, η ολοκλήρωση του συστήματος, η βελτιστοποίηση, καθώς και επιλογή του υλικού και του λογισμικού (αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι, αλγόριθμοι υπολογισμού, εργαλεία και περιβάλλοντα για την εκτέλεση του ελέγχου, ανίχνευσης, εκτέλεσης, προσομοίωσης, ροής πληροφοριών, απόκτησης δεδομένων, οπτικοποίησης και αξιολόγησης). Όπως υπογραμμίστηκε, οι προσπάθειες σχεδιασμού των προηγμένων MEMS και NEMS υψηλής απόδοσης και διασφάλισης του ολοκληρωμένου σχεδιασμού μπορούν να συνεχιστούν μέσω της ανάλυσης σύνθετων προτύπων και παραδειγμάτων εξελικτικών ανεπτυγμένων βιολογικών συστημάτων. Ακόμη και σε επίπεδο συσκευής, οι συσκευές μικρο και νανοκλίμακας πρέπει πρώτα να

επινοηθούν και η δομική σύνθεσή τους πρέπει να εκτελείται ενσωματώνοντας προβλήματα μοντελοποίησης, ανάλυσης, βελτιστοποίησης και σχεδιασμού.

Κεφάλαιο 2

Γενικές αρχές κατασκευής μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων

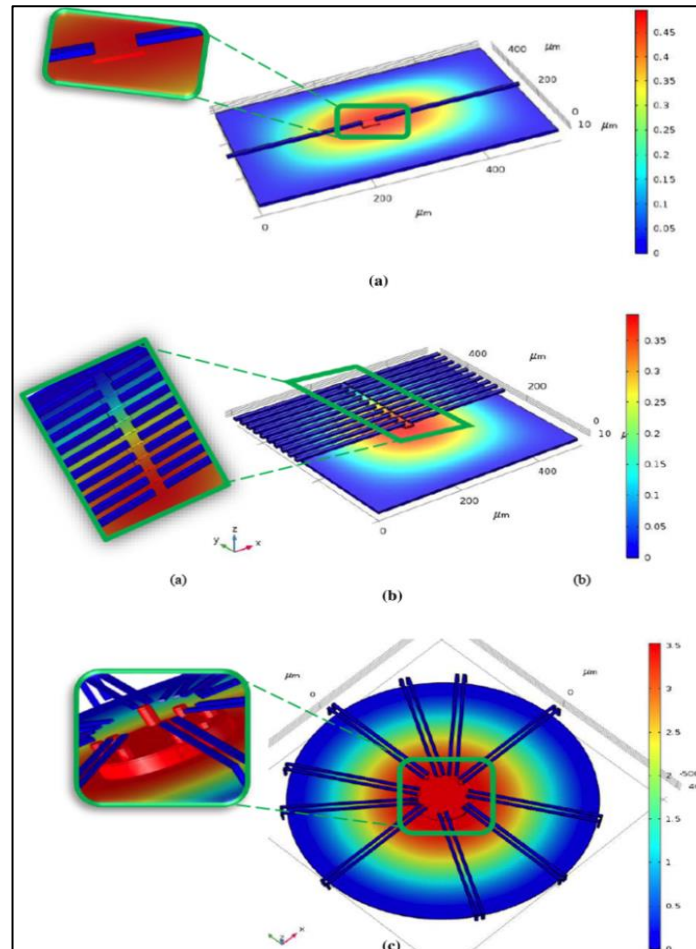
2.1 Τεχνικές κατασκευής

Οι πρόσφατες τάσεις στη μηχανική και την επιστήμη έχουν αυξήσει την έμφαση στην ολοκληρωμένη σύνθεση, ανάλυση, σχεδιασμό και έλεγχο των προηγμένων MEMS. Οι διαδικασίες σύνθεσης, σχεδιασμού και βελτιστοποίησης είναι εξελικτικής φύσης. Γενικά, ξεκινούν με ένα δεδομένο σύνολο απαιτήσεων και προδιαγραφών. Η σύνθεση ενός υψηλού επιπέδου λειτουργικότητας και φυσικής βασίζεται πρώτα για να ξεκινήσει ο σχεδιασμός σε επίπεδο συστήματος, υποσυστήματος, εξαρτήματος, συσκευής και δομής. Χρησιμοποιώντας τα προηγμένα υψηλής απόδοσης υποσυστήματα, εξαρτήματα, συσκευές και δομές που συντίθενται (επινοούνται), εκτελείται ο αρχικός σχεδιασμός και τα MEMS δοκιμάζονται (μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης ή πειραμάτων) έναντι των απαιτήσεων [48]. Εάν δεν πληρούνται οι απαιτήσεις και οι προδιαγραφές, ο σχεδιαστής αναθεωρεί και βελτιώνει την αρχιτεκτονική του συστήματος. Στη συνέχεια, συνθέτει και ενσωματώνει τα νέα στοιχεία και εκτελεί τη βελτιστοποίηση. Επιπλέον, αναζητούνται και εξετάζονται και άλλες εναλλακτικές λύσεις. Στην Εικόνα 0.1: Το αποτέλεσμα της μετατόπισης του διαφράγματος για έναν αρχικό σχεδιασμό, b) σχέδιο II, c) σχέδιο III αποτυπώνεται η προσομοίωση ενός αισθητήρα πίεσης MEMS. Η συγκεκριμένη FEM ανάλυση πραγματοποιήθηκε για να βρεθεί η μέγιστη μετατόπιση και πίεση στο εύρος 0-1 bar.

Σε κάθε επίπεδο της ιεραρχίας του σχεδιασμού, η απόδοση του συστήματος στον τομέα της συμπεριφοράς χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση, τη βελτιστοποίηση και τη βελτίωση των διαδικασιών σύνθεσης και βελτιστοποίησης, καθώς και για την επινόηση νέων λύσεων. Κάθε επίπεδο της ιεραρχίας του σχεδιασμού αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο αφαίρεσης και έχει το καθορισμένο σύνολο των εξελικτικών δραστηριοτήτων και εργαλείων του σχεδιασμού, που υποστηρίζουν το σχεδιασμό σε αυτό το επίπεδο. Η περιεκτική ετερογενής σύνθεση και ο σχεδιασμός απαιτούν την εφαρμογή ενός ευρέως φάσματος παραδειγμάτων, μεθόδων, υπολογιστικών περιβαλλόντων, τεχνολογιών κατασκευής κ.λπ.

Ο αυτόνομος μικρομετατροπέας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μικροϋπολογιστής ή μικροσύστημα (εάν ο μικρομετατροπέας είναι ενσωματωμένος σε ελεγκτές IC). Γενικά, χρησιμοποιούνται διαφορετικά κριτήρια για τη σύνθεση και το σχεδιασμό των μικρομετατροπέων (ενεργοποιητές και αισθητήρες μικροκλίμακας) με IC λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς, των φυσικών ιδιοτήτων, των αρχών λειτουργίας και των κριτηρίων απόδοσης που επιβάλλονται για αυτές τις μικροεφαρμογές.

Πρέπει να τονιστεί ότι απαιτείται να καθοριστεί το επίπεδο της ιεραρχίας. Για παράδειγμα, μπορεί να μην υπάρχει ανάγκη να μελετηθεί η συμπεριφορά των εκατομμυρίων τρανζίστορ σε κάθε τσιπ IC, διότι μάλλον θα πρέπει να αξιολογηθεί η συμπεριφορά «end to end ICs» (από άκρο σε άκρο). Δηλαδή, η μεταβατική δυναμική των IC από άκρο σε άκρο μπορεί να είναι επαρκής από απόψεως επιπέδου συστήματος. Έτσι, τα IC μπορούν να σχεδιαστούν ως αυτόνομα μικροηλεκτρονικά συστατικά MEMS.



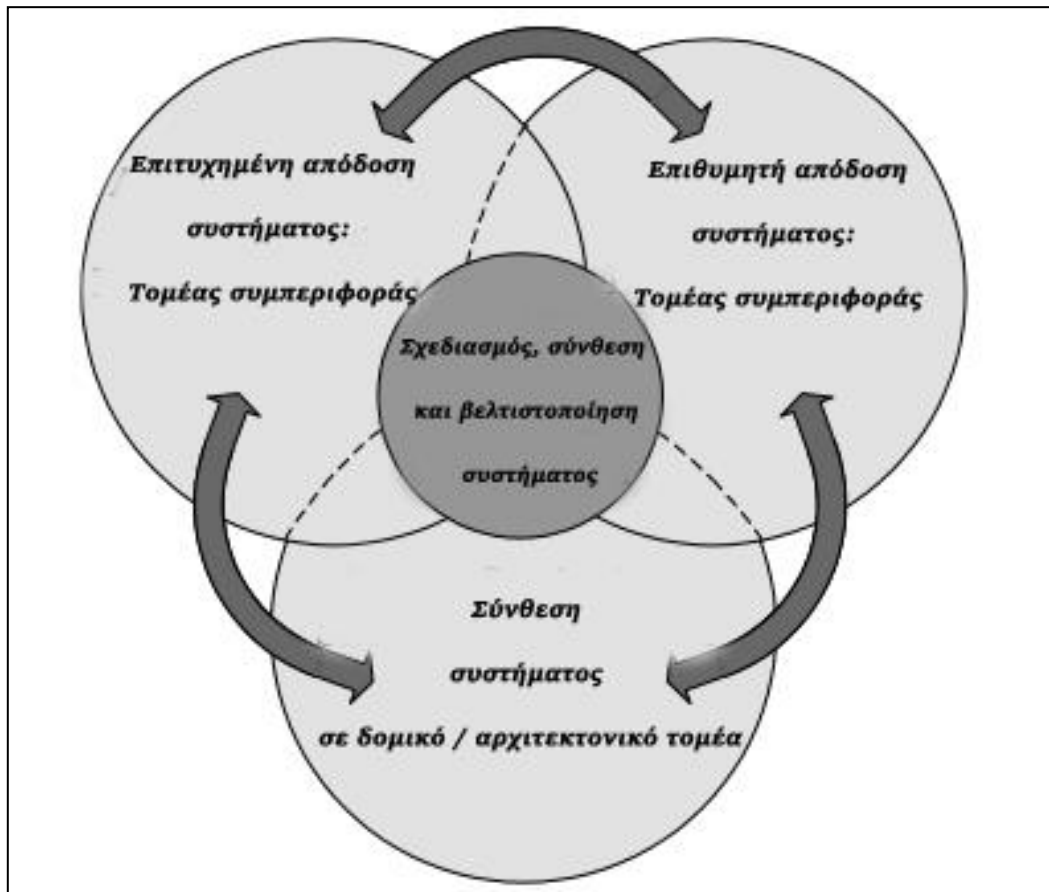
Εικόνα 0.1: Το αποτέλεσμα της μετατόπισης του διαφράγματος για έναν αρχικό σχεδιασμό, b) σχέδιο II, c) σχέδιο III [49].

Τα IC πρέπει να εγγυώνται τις λειτουργίες των MEMS, π.χ. έλεγχο ηλεκτρομαγνητικών, ηλεκτρομηχανικών συσκευών και δομών, διεπαφών εισόδου-εξόδου, μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό και ψηφιακού σε αναλογικό, φιλτράρισμα, απόκτηση δεδομένων κ.λπ. Η ροή του σχεδιασμού απεικονίζεται στην Εικόνα 0.2: Ροή σχεδιασμού στη σύνθεση των MEMS.

Η αυτοματοποιημένη σύνθεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή της ροής του σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός των συστημάτων είναι

μια διαδικασία που ξεκινά από τον καθορισμό των απαιτήσεων και προοδευτικά προχωρά σε μια λειτουργική σχεδίαση και βελτιστοποίηση.

Αυτά τελειοποιούνται σταδιακά μέσω μιας σειράς σταδίων διαδοχικής σύνθεσης. Οι προδιαγραφές συνήθως περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις απόδοσης που προέρχονται από την επιθυμητή λειτουργικότητα του συστήματος, τη λειτουργία, την προσιτή τιμή, την αξιοπιστία και άλλες απαιτήσεις.



Εικόνα 0.2: Ροή σχεδιασμού στη σύνθεση των MEMS [50].

Οι προσεγγίσεις από πάνω προς τα κάτω και από κάτω προς τα πάνω πρέπει να συνδυαστούν για να σχεδιάσουν MEMS υψηλής απόδοσης που αυξάνουν την ιεραρχία, την ακεραιότητα, την κανονικότητα, την αρθρωτότητα, τη συμμόρφωση και την πληρότητα στη διαδικασία της σύνθεσης. Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί τα βασικά θεμέλια, ορισμένες επείγουσες περιοχές δεν έχουν τονιστεί και διερευνηθεί διεξοδικά.

Η σύνθεση συστημάτων πρέπει να εγγυάται μια ενδεχόμενη συναίνεση μεταξύ των συμπεριφορικών και των δομικών τομέων, καθώς και να διασφαλίζει περιγραφικά και ολοκληρωμένα τα χαρακτηριστικά στο σχεδιασμό [51]. Αυτά μπορούν να επιτευχθούν εφαρμόζοντας την εξελικτική μικροηλεκτρομηχανική που επιτρέπει σε κάποιον να επεκτείνει και να αυξήσει τα αποτελέσματα της κλασικής μηχανικής, της ηλεκτρομαγνητικής,

της μικροηλεκτρονικής, της πληροφορικής και των θεωριών ελέγχου, καθώς και να εφαρμόσει ένα προηγμένο ενσωματωμένο υλικό και λογισμικό [52].

Για να αποκτηθεί και να επεκταθεί ο πυρήνας της μηχανικής, της επιστήμης και της τεχνολογίας, υπάρχει ανάγκη αύξησης των διεπιστημονικών τομέων. Επίσης απαιτείται η σύνδεση και η τοποθέτηση των συνεργικών προοπτικών που ενσωματώνουν το υλικό (ενεργοποιητές - αισθητήρες - IC) με την ευφυΐα του συστήματος, τον έλεγχο, τη λήψη αποφάσεων, το σήμα, την επεξεργασία, την απόκτηση των δεδομένων κ.λπ. Απαιτούνται νέες διεπιστημονικές εξελίξεις και η ηλεκτρομηχανική θεωρία πρέπει να θεωρηθεί ως ο ενοποιημένος ακρογωνιαίος λίθος [53].

Η μικροϋπολογιστική και η νανοηλεκτρομηχανική, ως πρωτοποριακά πρότυπα στο σχεδιασμό και την ανάλυση των MEMS, εισήχθησαν για να ενσωματωθούν και να επιλύσουν μια μεγάλη ποικιλία από αναδυόμενα προβλήματα. Η ηλεκτρομηχανική ενσωματώνει αρκετές παραμέτρους (τη σύνθεση των συστημάτων, το σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση, τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση, την ανάλυση, τις εξελίξεις του λογισμικού-υλικού και τη συν-σχεδίαση, τη νοημοσύνη, τη λήψη αποφάσεων, τον προηγμένο έλεγχο, συμπεριλαμβανομένου τόσο του αυτοπροσαρμοσμένου έξυπνου ελέγχου, όσο και των σημάτων, την επεξεργασία εικόνας, τις βιομιμήσεις κ.λπ.).

Στο Κεφάλαιο 1 υπογραμμίστηκε ότι οι μετατροπείς μικρο και νανοκλίμακας (ενεργοποιητές και αισθητήρες) πρέπει να σχεδιαστούν και να ενσωματωθούν με τις αντίστοιχες ενέργειες ελέγχου και επεξεργασίας σήματος, τις συσκευές εισόδου-εξόδου κ.λπ. Οι αρχές της αντιστοίχισης και της συμμόρφωσης είναι οι γενικές αρχές του σχεδιασμού που απαιτούν τη σύνθεση των αρχιτεκτονικών του συστήματος, ενσωματώνοντας όλα τα υποσυστήματα και τα συστατικά. Οι συνθήκες αντιστοίχισης, η λειτουργικότητα και η συμμόρφωση των συστημάτων πρέπει επομένως να καθοριστούν και να διασφαλιστούν. Για παράδειγμα, πρέπει να ικανοποιείται η συμμόρφωση των IC και η λειτουργικότητα τους σε σχέση με τους ενεργοποιητές, τους αισθητήρες και τις συσκευές ενέργειας [54].

Είναι προφανές ότι τα MEMS που σχεδιάστηκαν πρέπει να ελέγχονται και οι ελεγκτές πρέπει να σχεδιάζονται εξίσου. Αυτοί οι ισχυροί νόμοι ελέγχου πρέπει να εξεταστούν και να επαληθευτούν μέσω της μοντελοποίησης, της ανάλυσης και της προσομοίωσης. Το πιο σημαντικό είναι ότι αυτοί οι ελεγκτές πρέπει να εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας το IC. Η έρευνα σχετικά με τον τρόπο ελέγχου των MEMS στοχεύει στην εύρεση μεθόδων για το σχεδιασμό έξυπνων ελεγκτών, τη σύνθεση της αρχιτεκτονικής του συστήματος την εξαγωγή χαρτών ανατροφοδότησης κ.λπ. Άλλα σημαντικά προβλήματα συν-σχεδιασμού περιλαμβάνουν την ανάπτυξη και την επαλήθευση των αλγορίθμων ελέγχου, καθώς και την εξέταση του λογισμικού εκτέλεσης, προσομοίωσης και αξιολόγησης.

Ο σχεδιασμός των MEMS υψηλής απόδοσης συνεπάγεται τη σύνθεση, το σχεδιασμό και τις εξελίξεις των υποσυστημάτων, των εξαρτημάτων, των συσκευών και των δομών. Επιπλέον, αυτός ο σχεδιασμός συνεπάγεται τις αντίστοιχες δοκιμές στις εν λόγω λειτουργίες τόσο συνδυαστικά όσο και αυτόνομα [55]. Μεταξύ μιας μεγάλης ποικιλίας ζητημάτων, πρέπει να επιλυθούν τα ακόλουθα προβλήματα:

- Σύνθεση, χαρακτηρισμός και σχεδιασμός των μικρομετατροπέων, ενεργοποιητών και αισθητήρων σύμφωνα με τις εφαρμογές τους και τις συνολικές απαιτήσεις των συστημάτων, μέσω συγκεκριμένου λογισμικού σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή.
- Σχεδιασμός της ακτινοβολίας υψηλής ενεργειακής απόδοσης, μικροηλεκτρονικών και οπτικών συσκευών.
- Ενσωμάτωση των ενεργοποιητών με αισθητήρες και IC.
- Έλεγχος και διάγνωση.
- Ασύρματη επικοινωνία
- Προσιτές και υψηλής απόδοσης τεχνολογίες και τεχνικές κατασκευής.

Η σύνθεση, η μοντελοποίηση, η ανάλυση και η προσομοίωση είναι διαδοχικές δραστηριότητες. Η σύνθεση ξεκινά με την ανακάλυψη νέων ή την εφαρμογή υφιστάμενων φυσικών αρχών λειτουργίας, εξετάζοντας νέα φαινόμενα, ανάλυση των προδιαγραφών που επιβάλλονται στη συμπεριφορά, μελέτη της απόδοσης του συστήματος, προκαταρκτική μοντελοποίηση, προσομοίωση και αξιολόγηση των διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων. Η ετερογενής προσομοίωση και ανάλυση ξεκινούν με τις εξελίξεις του μοντέλου (βασισμένες στα MEMS). Ο σχεδιαστής μιμείται, μελετά, αναλύει και αξιολογεί τη συμπεριφορά του συστήματος χρησιμοποιώντας την τρέχουσα κατάσταση, την απόδοση, τον έλεγχο, τα συμβάντα, τις διαταραχές, τη λήψη των αποφάσεων και άλλες μεταβλητές. Έτσι, εφαρμόζονται βασικές, εφαρμοσμένες και πειραματικές εξελίξεις έρευνας και μηχανικής.

Η μοντελοποίηση, η προσομοίωση, η ανάλυση και η οπτικοποίηση είναι κρίσιμες και επείγουσες σημαντικές πτυχές για την ανάπτυξη και την πρωτοτυπία των προηγμένων MEMS.

1.7.1. Λιθογραφία

Η οπτική λιθογραφία είναι ο βασικός πυρήνας του σχεδιασμού στα MEMS: (έκθεση επαφής / εγγύτητας και τα βήματα και τα επαναλαμβανόμενα συστήματα μείωσης αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος όλων των βημάτων σχεδιασμού) [56].

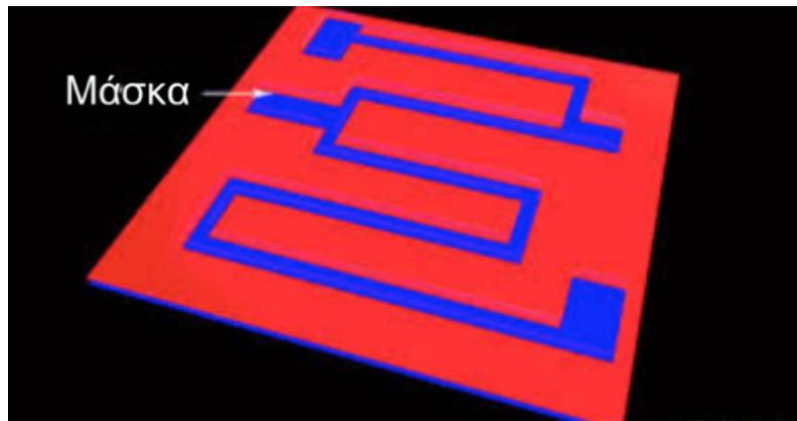
Το μοτίβο των MEMS δεν καθοδηγείται από τη βελτίωση της ανάλυσης όπως στη λιθογραφία IC, αλλά μάλλον από το μεγάλο βάθος εστίασης (DOF), το ανθεκτικό πάχος, την ευθυγράμμιση της διπλής πλευράς,

την ανθεκτικότητα στη διαδικασία, την αντοχή στη χάραξη και τις ειδικές ανάγκες των τρισδιάστατων δομών . Τα σημαντικότερα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, είναι τα ζητήματα που πρέπει να απαντηθούν πριν ξεκινήσει η επεξεργασία του πυριτίου, τα ζητήματα κατά τη διαδικασία της λιθογραφίας, η φωτορευστική συμπεριφορά στη διαδικασία, τα βήματα μετά τη λιθογραφία και οι εφαρμογές διαμόρφωσης των ειδικών προδιαγραφών [57].

Πριν από την έκθεση του πρώτου τμήματος, πρέπει να έχουν καθοριστεί πολλές αποφάσεις σχετικά με τη διαδικασία της διαμόρφωσης. Αυτές περιλαμβάνουν το σχεδιασμό της μάσκας και την πραγματική κατασκευή των φυσικών πλακών της μάσκας που πρέπει να είναι συνεπείς με την επιλεγμένη αντίσταση. Ο σχεδιασμός της διάταξης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις λιθογραφικές ανοχές της ευθυγράμμισης, καθώς και τους κανόνες σχεδιασμού της διάταξης που αφορούν τις ελάχιστες γραμμές και τα κενά, τις απαιτούμενες επικαλύψεις, τα συνιστάμενα ή τα απαγορευμένα σχήματα κ.λπ. για όλα τα βήματα της διαδικασίας.

Το μέγεθος της μάσκας (Εικόνα 0.3: Μάσκα για τη διαδικασία της λιθογραφίας είναι συνήθως 1 ίντσα μεγαλύτερο από το μέγεθος του τμήματος του πυριτίου. Τα τμήματα των 100 mm (4 ίντσες) εκτίθενται σε πλάκες μάσκας 5 ιντσών. Εάν το πάχος των γραμμών είναι μικρότερο από 2 μm, πρέπει να χρησιμοποιηθούν μάσκες χαλαζία αντί για νατρασβέστη.

Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθούν φθηνές πλαστικές μάσκες (μεμβράνες πολυμερούς) του τύπου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των τυπωμένων κυκλωμάτων. Αυτές οι μάσκες παράγονται γρήγορα και κοστίζουν μερικές δεκάδες ευρώ. Το ελάχιστο μέγεθος των χαρακτηριστικών τους κυμαίνεται συνήθως από 20 έως 50 μm. Για ερευνητικούς σκοπούς, αυτό είναι αρκετό σε πολλές περιπτώσεις για μη κρίσιμα επίπεδα όπως τα συγκολλητικά επιθέματα. Εκτός από την κακή ανάλυση, αυτές οι μάσκες έχουν πολύ χειρότερη τραχύτητα στην άκρη της γραμμής από τις μάσκες χρωμίου. Η αδιαφάνειά τους στην υπεριώδη ακτινοβολία πρέπει να ελεγχθεί και ειδικά για παχιά αντίσταση και μεγάλους χρόνους έκθεσης. Οι μάσκες φιλμ έχουν επίσης χαμηλή σταθερότητα έναντι της υγρασίας, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται αυστηρότερος έλεγχος της διαδικασίας.



Εικόνα 0.3: Μάσκα για τη διαδικασία της λιθογραφίας [58].

Διάφορα λογισμικά σχεδιασμού της μάσκας είναι διαθέσιμα, τόσο από το απλό δωρεάν λογισμικό για πανεπιστημιακά συστήματα, έως τα επαγγελματικά σετ πλήρους κλίμακας. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί η μορφή εξόδου του λογισμικού. Για παράδειγμα, δε δέχονται όλα τα καταστήματα μασκών όλα τα σχέδια σχεδίασης. Το GDSII είναι η τυπική μορφή από το σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και είναι ευρέως αποδεκτή [59]. Άλλες κοινές μορφές περιλαμβάνουν το Autocad DXF, HPGL και Gerber. Η μετατροπή μεταξύ των μορφών είναι δυνατή, αλλά συχνά αποτελεί πηγή σφαλμάτων ή στρογγυλοποιήσεων των διαστάσεων [60] [61].

Η αντίσταση στην πολικότητα, αρνητική ή θετική και ο καθρέφτης πρέπει να καθοριστούν σε συνδυασμό με τη σειρά της μάσκας. Ο σχεδιασμός της μάσκας μπορεί να μετατραπεί είτε σε πολικότητα από το κατάστημα της μάσκας, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο γίνεται το σχέδιο και μόλις διορθωθεί η πολικότητα της αντίστασης, θα ακολουθήσει η πολικότητα της μάσκας. Ο τύπος της αντίστασης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη βάσει των απαιτήσεων στο στάδιο λιθογραφίας, όπως η αντίσταση για τη χάραξη πλάσματος, η πρόσφυση σε υγρές διεργασίες, ή για ορισμένες ειδικές απαιτήσεις, όπως η γωνία του πλευρικού τοιχώματος.

Η θετική χημεία των φωτοανθεκτικών ορίζει, ότι δεν είναι μηχανικά πολύ ισχυρά, αλλά μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν. Οι αρνητικές αντιστάσεις έχουν αντίθετες ιδιότητες. Μερικές από αυτές είναι μηχανικά πολύ ισχυρές, αλλά δύσκολο να αφαιρεθούν. Επομένως, αυτές δεν είναι απαραίτητα καλές για τη διαμόρφωση, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά σε εξαρτήματα των MEMS.

Οι αρνητικοί φωτοεσθιστές βασίζονται σε πολλές διαφορετικές χημείες. Για παράδειγμα, τα υλικά από δισαζίδιο, τα εποξειδικά και τα πολυϊμιαδία έχουν χρησιμοποιηθεί ως αρνητικά φωτοανθεκτικά. Η πυκνότητα του υλικού καθορίζεται από τη χημεία των μονομερών που καθορίζει επίσης τις ιδιότητες της τελικής δομής. Με υψηλή πυκνότητα, αυξάνεται η μηχανική αντοχή των υλικών και μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί λόγοι διαστάσεων, υποθέτοντας τη σωστή έκθεση.

Εκτός από τη βασική θετική / αρνητική επιλογή, η επιλογή της αντίστασης μπορεί να εξαρτάται, για παράδειγμα, από την ευαισθησία (ταχύτητα εικόνας), την ανάλυση, το μήκος κύματος της έκθεσης (i-line 365 nm, h-line 405 nm, g-line 436 nm), το γεωγραφικό πλάτος της έκθεσης, την αντίθεση, την ασφάλεια των διαλυτών (βλαβερά οξικά κυτταροδιαλύματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε πολλές αντιστάσεις παλαιότερης γενιάς, αλλά οι σύγχρονες αντιστάσεις έχουν για παράδειγμα MEK ή PGMEA ως διαλύτες), η θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού (συνήθως στην περιοχή των 100 με 150 °C για θετικές αντιστάσεις, αλλά μπορεί να υπερβεί τους 200 °C για αρνητικές και αντοχές ανύψωσης).

Το βήμα της διαδικασίας μετά τη λιθογραφία καθορίζει εν μέρει την επιλογή της αντίστασης. Τα κάθετα πλευρικά τοιχώματα είναι καλά για χάραξη πλάσματος. Τα αρνητικά κεκλιμένα πλαϊνά τοιχώματα (π.χ., οπισθοδρόμηση) είναι κατάλληλα για ανύψωση και τα θετικά κεκλιμένα τοιχώματα αντοχής είναι κατάλληλα για υγρή χάραξη (ή κατάλληλα ως καλούπι για μια διαδικασία χύτευσης). Οι θετικές αντιστάσεις έχουν συνήθως 75° με 85° γωνίες πλευρικού τοιχώματος, ενώ οι αρνητικές αντιστάσεις τείνουν να εμφανίζουν γωνίες πλευρικού τοιχώματος άνω των 90°.

Οι κατασκευαστές αντιστάσεων συνήθως παρέχουν μια σειρά σκευασμάτων αντίστασης που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πάχους χρησιμοποιώντας την ίδια βασική χημεία (και τον ίδιο προγραμματιστή). Για παράδειγμα, οι σειρές AZ με 1505, 1512HS, 1514, 1518, 1529 έχουν αντίστοιχα πάχη 0,5, 1,2, 1,4, 1,8 και 2,9 μm σε ταχύτητα περιστροφής 4000 rpm (και ιξώδες που κυμαίνονται από 6,3 έως 80 cSt στους 25 °C). Ομοίως, οι αρνητικές αντιστάσεις SU-8 2005, 2010, 2015 έχουν πάχη που αντιστοιχούν περίπου στα 5, 10 και 15 μm (και ιξώδες 45, 380 και 1250 cSt, αντίστοιχα). Εκτός από τα διαφορετικά πάχη, αυτές οι συνθέσεις μπορούν να βελτιστοποιηθούν σε σχέση με τη θερμική σταθερότητα, την πρόσφυση σε υγρή χαρακτηριστική και την ταχύτητα έκθεσης. Η διάρκεια ζωής των αντιστάσεων είναι συνήθως 6 με 12 μήνες υπό κατάλληλες συνθήκες αποθήκευσης, αλλά η αντίσταση που περιστρέφεται σε ένα τμήμα πυριτίου πρέπει να εκτίθεται εντός ωρών, για να αποφευχθεί η απορρόφηση του νερού και η απώλεια της ευαισθησίας.

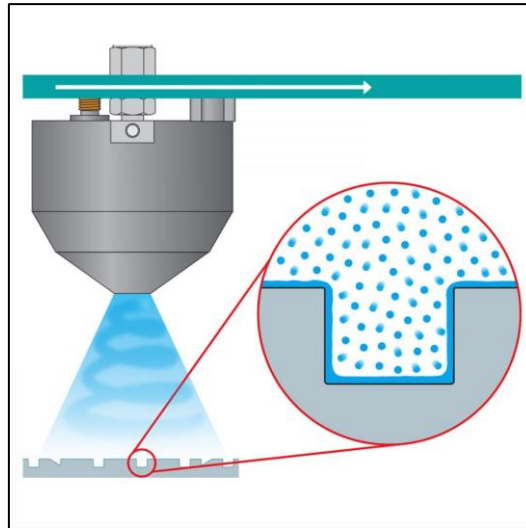
Τα βήματα καθαρισμού εκτελούνται για να παρέχουν γνωστές συνθήκες εκκίνησης, ανεξάρτητα από τα προηγούμενα στάδια της διαδικασίας ή την περίοδο αναμονής. Το ψήσιμο για την αφυδάτωση αφαιρεί τους προσροφούμενους υδρατμούς και από μόνο του διασφαλίζει την καλύτερη πρόσφυση, αλλά συχνά γίνεται και αστάρωμα, ένα ειδικό βήμα προώθησης της προσκόλλησης. Η επίστρωση του ατμού ή της εμβάπτισης HMDS θα κρατήσει την υγρασία μακριά και θα διασφαλίσει ότι η υδρόφοβη αντίσταση θα προσκολληθεί. Μια δημοφιλής αντίσταση, η SU-8, δεν απαιτεί αστάρωμα.

Η επικάλυψη περιστροφής κυριαρχεί στην τυπική εφαρμογή των αντιστάσεων, αλλά η επίστρωση ψεκασμού έχει πλεονεκτήματα στην επικάλυψη των πιο τρισδιάστατων δομών. Οι υγρές χαραγμένες γωνίες $54,7^\circ$ μπορούν να επικαλυφθούν καλύτερα με ψεκασμό, αλλά συνήθως η αντίσταση στο πάχος είναι ομοιόμορφη με το σπρέι. Στην επίστρωση περιστροφής οι βελτιστοποιημένες διαδικασίες μπορούν να έχουν 0,1% ομοιομορφία για επίπεδα δισκία λεπτών αντιστάσεων.

Το επικαλυμμένο υγρό πρέπει να καταλήξει θεωρητικά με μια επίπεδη οριζόντια επιφάνεια. Ωστόσο, για διάφορους λόγους αυτό δεν συμβαίνει πάντα. Η επιφανειακή τάση του υγρού μπορεί να προκαλέσει απόκλιση από το επίπεδο και εάν υπάρχουν μεγάλες χαραγμένες εσοχές στο δισκίο, αυτές δεν θα είναι τέλεια επίπεδες.

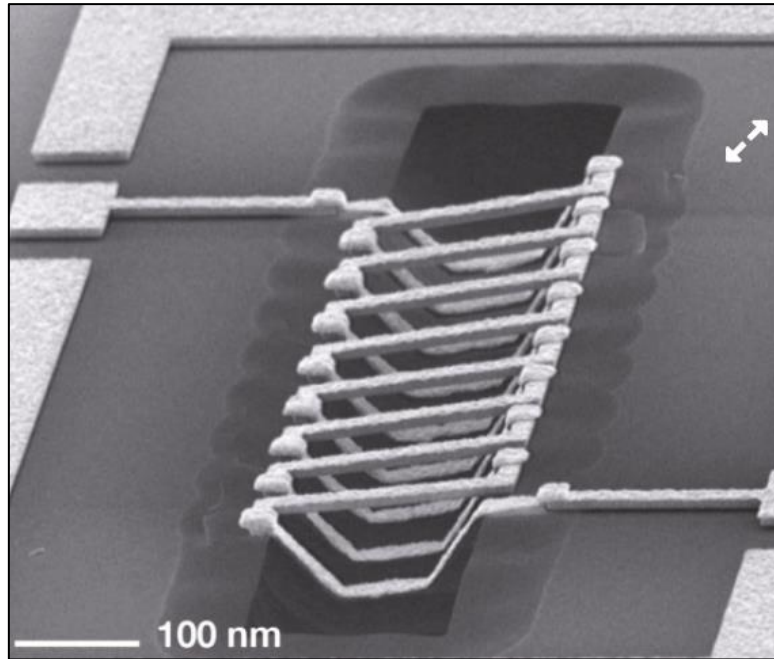
Λόγω της εξάτμισης του διαλύτη, η αντίσταση στεγνώνει γρηγορότερα στο εξωτερικό χείλος του δισκίου με επικάλυψη με περιστροφή. Αυτό οδηγεί σε εξογκώματα γνωστά ως χάντρες. Για παράδειγμα, σε χάραξη του οξειδίου της μάσκας πριν από τη χάραξη του πυριτίου KOH , είναι πλεονεκτικό το ότι η αντίσταση καλύπτει τις άκρες, αφήνοντας το οξείδιο στις άκρες. Αυτό, βελτιώνει τη μηχανική σταθερότητα της που αλλιώς διακυβεύεται από το KOH κατά τη διάρκεια της εκτεταμένης χάραξης. Τις περισσότερες φορές, ωστόσο, πρέπει να αφαιρεθεί η ακμή. Αυτό γίνεται συνήθως με ψεκασμό με διαλύτη των άκρων μετά την επικάλυψη, σε μια διαδικασία που ονομάζεται «EBR», για την αφαίρεση των σφαιριδίων. Αυτή μπορεί να γίνει είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα (μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής σε ταχύτητα που δεν καθιστά πλέον το στρώμα αντίστασης λεπτότερο και διανέμοντας το διαλύτη στην άκρη). Εναλλακτικά, οι χάντρες μπορούν να εξαφανιστούν μηχανικά. Συνήθως το EBR αφαιρεί την αντίσταση από περίπου 1 cm. Αυτή η περιοχή φυσικά χάνεται, αλλά η απόδοση των τσιπ στα άκρα θα ήταν ούτως ή άλλως χαμηλή.

Η επίστρωση ψεκασμού (Εικόνα 0.4: Υπερηχητικός ψεκασμός φωτοανθεκτικού για δισκία MEMS και άλλα υποστρώματα με διάφορες τοπογραφίες ξεπερνά το πρόβλημα βάθους της κοιλότητας στη λιθογραφία των MEMS. Ενώ το πάχος της αντίστασης που έχει περάσει από τη φάση της περιστροφής μπορεί να αλλάξει κατά ένα συντελεστή σε μια χαραγμένη εσοχή, η αντίσταση με επικάλυψη με ψεκασμό έχει σχεδόν πλήρη συμμόρφωση με τις υγρές χαραγμένες γεωμετρίες [63]. Επιπλέον, η επίστρωση ψεκασμού δεν είναι ευαίσθητη στο σχήμα και τη θέση της κοιλότητας πάνω σε ένα δισκίο, με στοιχεία που οδηγούν σε μία ακόμη πιο μη ομοιόμορφα επιστρωμένη μεμβράνη.



Εικόνα 0.4: Υπερηχητικός ψεκασμός φωτοανθεκτικού για δισκία MEMS και άλλα υποστρώματα με διάφορες τοπογραφίες [62].

Η επίστρωση ψεκασμού γίνεται σε ένα αργά περιστρεφόμενο δισκίο (<100 rpm) για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κάλυψη των δομών των διαφορετικών προσανατολισμών. Αν και δεν είναι πραγματικά συμμορφωμένα, τα αντιστατικά εναποτιθέμενα με ψεκασμό είναι ανώτερα από τα ανθεκτικά σε περιστροφή, με επίτευξη έως και 10% ομοιομορφία. Τα προβλήματα στην επίστρωση ψεκασμού έχουν να κάνουν με τη βελτιστοποίηση του ιξώδους. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται χαμηλό ιξώδες (<20 cSt) για τη σωστή παραγωγή σταγονιδίων και λεία στρώματα, αλλά τέτοιες αντιστάσεις θα ρέουν επίσης πιο εύκολα για να γεμίσουν τις εσοχές. Η επιλογή της αντίστασης και οι παράμετροι του μηχανήματος, όπως η πίεση και η γωνία του ψεκαστήρα, επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα. Στην Εικόνα 0.5: High-Q-3D σωληνοειδές πηνία για RF ολοκληρωμένα κυκλώματα. Μεταλλικές κατασκευές που δημιουργήθηκαν με χρήση επίστρωσης ψεκασμού αποτυπώνονται σωληνοειδές πηνία για RF ολοκληρωμένα κυκλώματα, δημιουργημένα με τη χρήση επίστρωσης ψεκασμού.



Εικόνα 0.5: High-Q-3D σωληνοειδές πηνία για RF ολοκληρωμένα κυκλώματα. Μεταλλικές κατασκευές που δημιουργήθηκαν με χρήση επίστρωσης ψεκασμού [64].

1.7.2. Φωτολιθογραφία

Για την κατασκευή μικροδομών κίνησης και ενέργειας ακτινοβολίας, καθώς και μικρο-συσκευών, η τεχνολογία του συμπληρωματικού ημιαγωγού μεταλλικού οξειδίου (CMOS) έχει τροποποιηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια, π.χ., έχουν αναπτυχθεί νέες διαδικασίες και έχουν εφαρμοστεί νέα υλικά. Η μείωση της κλίμακας CMOS ακολούθησε τον νόμο του Moore για δεκαετίες, όπου διάφορα μέρη της δομής του τρανζίστορ μειώθηκαν από έναν σταθερό παράγοντα προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος [65]. Ωστόσο, η τάση της μικροποίησης του CMOS αλλάζει πολύ διαφορετικά στις μέρες μας, όπως καθοδηγείται από έναν διεθνή χάρτη πορείας για συσκευές και συστήματα «IRDS» [66]. Με την είσοδο στην εποχή που επικεντρώνεται στα δεδομένα [67], η κλιμάκωση του CMOS εστιάζει όλο και περισσότερο σε χαμηλές τάσεις, οικονομικά αποδοτικές διαδικασίες και υψηλή απόδοση για την κάλυψη των απαιτήσεων των εφαρμογών για τις κινητές συσκευές προηγμένης τεχνολογίας. Έτσι, αρκετές «νέες τεχνικές» εισήχθησαν στις σύγχρονες συσκευές, π.χ. στέλεχος καναλιού, ενισχυτές πίεσης, μεταλλικές πύλες, διάφορα πυριτίδια κ.λπ. Πέρα από αυτές τις εφευρέσεις, το σχήμα του CMOS έχει ήδη αλλάξει από επίπεδο σε 3D ξεπερνώντας πολλά θέματα ενσωμάτωσης [68].

Με την είσοδο στον κόμβο τεχνολογίας 10 nm, το καθαρό κανάλι με βάση το πυρίτιο αντικαθίσταται σταδιακά με υλικά πυριτίου-γερμανίου³

³ Το SiGe, ή πυρίτιο-γερμάνιο, είναι ένα κράμα με οποιαδήποτε γραμμομοριακή αναλογία πυριτίου και γερμανίου, δηλ. Με μοριακό τύπο της μορφής $Si_{1-x}Ge_x$.

(SiGe) ή γερμανίου (Ge) και III-V, επειδή έχουν καλύτερη κινητικότητα από $40,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ για InGaAs (αρσενίδιο του ινδίου) και $1,900 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ για Ge, συγκρινόμενο με τα $1,400 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ και $450 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ αντίστοιχα του πυριτίου (Lim S. W., 2018). Όχι μόνο αλλάζουν τα υλικά των καναλιών, αλλά και το σχήμα της συσκευής, από τα απλά πτερύγια έως και τα πλήρως εξαντλημένα σε μονωτικά ή σε νανοσύρματα [69].

Ως αποτέλεσμα, οι πιο ελπιδοφόρες αρχιτεκτονικές τρανζίστορ μπορεί να είναι το Fin-on-isolator (FOI) όπως αναφέρεται από τον Zhang Q. [70] ή το Fin Field-Effect Transistor (FinFET) όπως αναφέρεται από τον Cheng K. [71]. Επιπλέον, από τον Xu W. J. αναφέρεται το scalloped fin FinFET [72] και από τον Zhang Q. Z. τα NW πεδία τρανζίστορ (FETs) [73]. Αυτά τα νέα σχέδια τρανζίστορ έχουν δείξει καλύτερο έλεγχο των αποτελεσμάτων του μικρού καναλιού (SCE), χαμηλής διαρροής της διακλάδωσης και υψηλής κινητικότητας του φορέα. Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα του FOI των FinFET είναι το πλεονέκτημα ότι οι μαζικές τεχνολογίες FinFET και SOI συγχωνεύονται σε αυτά τα τρανζίστορ για μια καλύτερη πλατφόρμα στον οδικό χάρτη της τεχνολογίας. Επιπλέον, μια αναφορά από τον Zhang Q. κατέδειξε μια απλή και οικονομικά αποδοτική διαδικασία πλήρους μεταλλικής πηγής και αποστράγγισης (MSD) για FOI FinFETs με μήκος πύλης 20 nm όπου το I_{on} φτάνει τα $547 \mu\text{A} / \mu\text{m}$ και $486 \mu\text{A} / \mu\text{m}$ για NMOS⁴ και PMOS⁵, αντίστοιχα [70]. Αυτά τα αποτελέσματα δίνουν μια εξαιρετική πιθανή λύση για μελλοντικά τρανζίστορ μικρο και νανο-κλίμακας.

Η φωτολιθογραφία (Εικόνα 0.6: Διαδικασία φωτολιθογραφίας) υψηλής ανάλυσης είναι μια τεχνολογία που εφαρμόζεται για τον καθορισμό διαστάσεων και τρισδιάστατων σχημάτων (γεωμετρία).

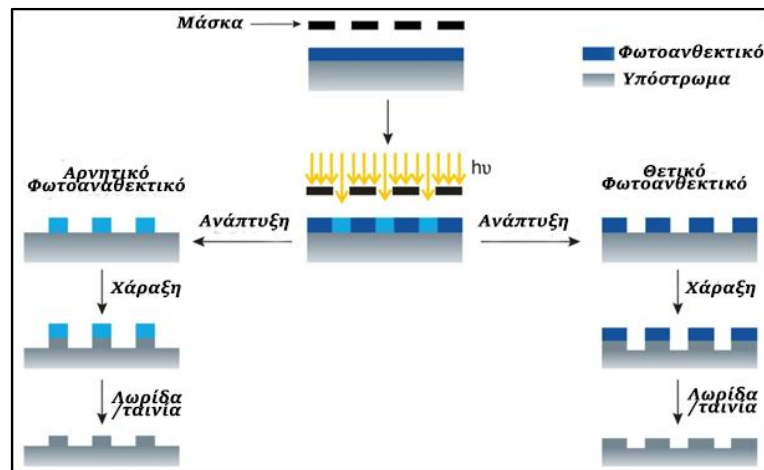
Για παράδειγμα, η γεωμετρία των μικρομετατροπών και των συστατικών τους (στάτορας, ρότορας, ρουλεμάν, πηνία κ.λπ.) ορίζονται φωτογραφικά. Πρώτον, παράγεται μια μάσκα σε μια γυάλινη πλάκα. Το πλακίδιο του πυριτίου στη συνέχεια επικαλύπτεται με ένα πολυμερές ευαίσθητο στο υπεριώδες φως (αυτό το στρώμα ονομάζεται φωτοανθεκτικό). Το υπεριώδες φως λάμπει μέσω της μάσκας στο φωτοανθεκτικό στρώμα. Το θετικό φωτοανθεκτικό τμήμα μαλακώνει και το εκτεθειμένο στρώμα μπορεί να αφαιρεθεί. Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι φωτοανθεκτικών, π.χ. θετικά και αρνητικά. Όπου το υπεριώδες φως χτυπά το θετικό φωτοανθεκτικό, εξασθενεί το πολυμερές. Ως εκ τούτου, όταν αναπτύσσεται η εικόνα, το φωτοανθεκτικό ξεπλένεται όπου το χτύπησε το

Χρησιμοποιείται συνήθως ως υλικό ημιαγωγών σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs) για διπολικά τρανζίστορ ετεροσυνδέσεων, ή ως στρώμα επαγωγής τάσης για τρανζίστορ CMOS. Η IBM εισήγαγε την τεχνολογία στην κύρια βιομηχανία το 1989 [197]. Αυτή η σχετικά νέα τεχνολογία προσφέρει ευκαιρίες στο σχεδιασμό και στην κατασκευή του κυκλώματος μικτού σήματος και αναλογικού κυκλώματος. Το SiGe χρησιμοποιείται επίσης ως θερμοηλεκτρικό υλικό για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας (> 700 K).

⁴ Τα nMOS αποτελούν τρανζίστορ με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας.

⁵ Τα PMOS ή pMOS (από P-channel metal-oxide-semiconductor) είναι μια οικογένεια ψηφιακών κυκλωμάτων που βασίζονται σε τρανζίστορ μέταλλο-οξειδίου-ημιαγωγού.

φως. Χρειάζεται θετική εικόνα υψηλής ανάλυσης και αναπτύσσονται διάφορες διαδικασίες φωτολιθογραφίας με βάση τις βασικές αρχές λιθογραφίας. Αντίθετα, εάν το υπεριώδες φως χτυπήσει το αρνητικό φωτοανθεκτικό, ενισχύει το πολυμερές. Επομένως, προκύπτει μια αρνητική εικόνα της μάσκας.



Εικόνα 0.6: Διαδικασία φωτολιθογραφίας [74].

Διαφορετικές χημικές διεργασίες εμπλέκονται για την αφαίρεση του οξειδίου όπου εκτίθεται μέσω των ανοιγμάτων του φωτοανθεκτικού. Όταν αφαιρείται το φωτοανθεκτικό, εμφανίζεται το μοτίβο του οξειδίου. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων.

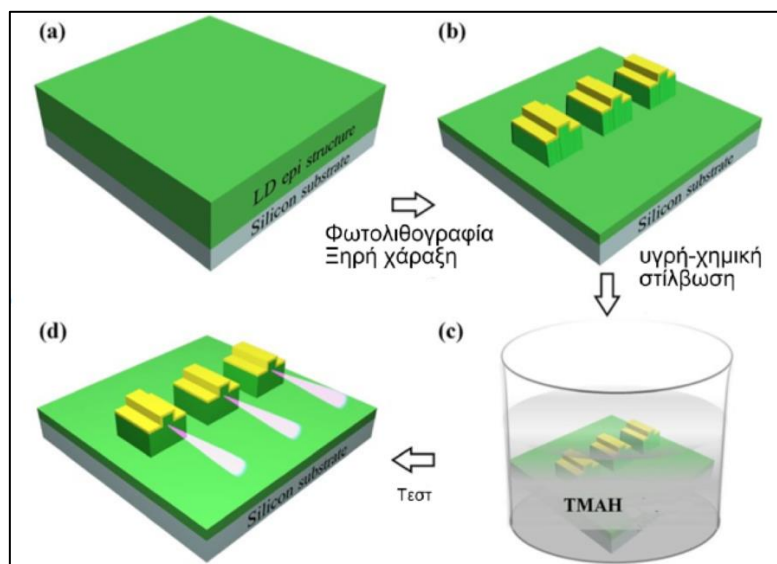
1.7.3. Διαδικασία μετά τη λιθογραφία

Αφού εφαρμοστεί το μοτίβο της αντίστασης, το δισκίο μπορεί να αντιμετωπιστεί σε διάφορα διαφορετικά στάδια, τα οποία έχουν τις δικές τους ειδικές απαιτήσεις για αντιστάσεις. Μετά την επεξεργασία του δισκίου, η αφαίρεση της αντίστασης επηρεάζεται από τις διαδικασίες που υποβλήθηκαν στην αντίσταση.

Η ποιότητα της υγρής χάραξης εξαρτάται καθοριστικά από την αντοχή στην προσκόλληση. Οι υγρές ουσίες δεν αντιστέκονται στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά η διείσδυση του υγρού μεταξύ του υποστρώματος και της αντίστασης οδηγεί σε απώλεια της πρόσφυσης. Οι αντιστάσεις έχουν προσαρμοστεί ειδικά για υγρή χάραξη, με χαμηλό μοριακό βάρος και καλή πρόσφυση. Το ίδιο ισχύει και για την ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση και την ηλεκτρολυτική επένδυση.

Οι διεργασίες υγρής χάραξης (Εικόνα 0.7: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της ξηρής χάραξης και της διαδικασίας υγρής χημικής χάραξης που εφαρμόζεται στην κατασκευή καθρεφτών κοιλότητας LDs με βάση το InGaN που καλλιεργούνται σε Si. (α) Η επιταξιακή δομή LD αναπτύχθηκε σε υπόστρωμα Si. (β) Δομή LD που βασίζεται σε InGaN με τους καθρέπτες κοιλότητας που κατασκευάζονται από ICP ξηρή χάραξη. (γ) Τα κάτοπτρα της κοιλότητας όπως

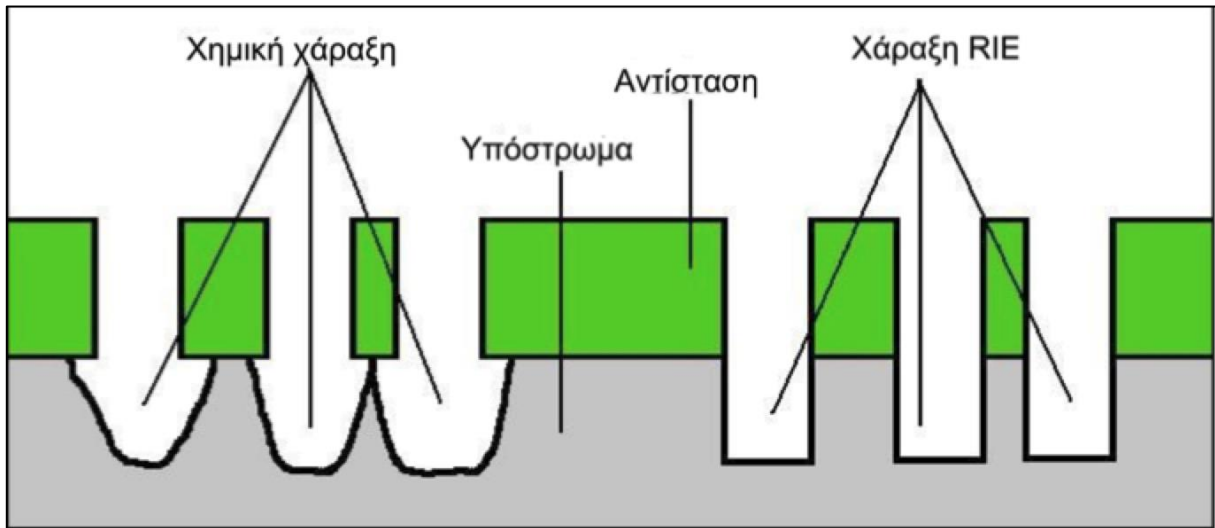
προετοιμάστηκαν χημικά και γυαλίστηκαν με διάλυμα TMAH. (δ) Χαρακτηρισμός των LD που βασίζονται σε InGaN που καλλιεργούνται σε Si.) είναι ως επί το πλείστον διαδικασίες εμβάπτισης, όπου το χαρακτηριστικό «επιτίθεται» και στις δύο πλευρές του δισκίου. Σε πολλές εφαρμογές MEMS η προστασία της μεμβράνης στην πίσω πλευρά είναι απαραίτητη και υπάρχουν μερικές συγκεκριμένες προσεγγίσεις σε αυτό. Η χρήση χάραξης πλάσματος παρακάμπτει το πρόβλημα της χάραξης της πλάτης. Εναλλακτικά, μια προστατευτική επικάλυψη μπορεί να περιστραφεί στο πίσω μέρος του δισκίου. Το «Photoresist» χρησιμοποιείται συχνά για ευκολία, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν φθηνότερα, μη φωτοδραστικά πολυμερή. Τα πολυμερή «Protex» και «CYTOP» χρησιμοποιούνται συχνά σε σκληρά περιβάλλοντα (HF, KOH), ενώ τα ανθεκτικά είναι καλά για πιο αραιά χαρακτηριστικά (π.χ. BHF).



Εικόνα 0.7: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της ξηρής χάραξης και της διαδικασίας υγρής χημικής χάραξης που εφαρμόζεται στην κατασκευή καθρεφτών κοιλότητας LDs με βάση το InGaN που καλλιεργούνται σε Si. (α) Η επιταξιακή δομή LD αναπτύχθηκε σε υπόστρωμα Si. (β) Δομή LD που βασίζεται σε InGaN με τους καθρέπτες κοιλότητας που κατασκευάζονται από ICP ξηρή χάραξη. (γ) Τα κάτοπτρα της κοιλότητας όπως προετοιμάστηκαν χημικά και γυαλίστηκαν με διάλυμα TMAH. (δ) Χαρακτηρισμός των LD που βασίζονται σε InGaN που καλλιεργούνται σε Si. [75].

Η χάραξη πλάσματος (RIE) είναι συνήθως σκληρή σε αντιστάσεις. Οι επιλεκτικότητες 1:1 έως 10:1 είναι τυπικές, περιορίζοντας τα χαραγμένα βάθη σε μερικά μικρόμετρα ή δεκάδες μικρόμετρα. Τα πλάσματα υψηλής πυκνότητας του τύπου που χρησιμοποιείται στο «DRIE» έχουν μικρότερες αποκλίσεις στις τάσεις από το παλιότερο RIE, επιτρέποντας μεγάλη μείωση στον βομβαρδισμό ιόντων. Επομένως, υπάρχουν και πολύ υψηλότερες επιλέξιμες αντιστάσεις, όπως για παράδειγμα 100: 1. Αυτό επιτρέπει τη χάραξη του δισκίου με παχιά μάσκα αντίστασης, η οποία αποτελεί

γενικότερα μια απλοποιημένη διαδικασία σε σύγκριση με τη χάραξη με μάσκα οξειδίου. Στην Εικόνα 0.8: Σύγκριση της χημικής χάραξης και της χάραξης πλάσματος αποτυπώνεται η διαφορά ανάμεσα στην υγρή χάραξη και στη χάραξη πλάσματος.



Εικόνα 0.8: Σύγκριση της χημικής χάραξης και της χάραξης πλάσματος [76].

Η ανύψωση εξαρτάται από το προφίλ της αντίστασης. Το αρνητικό (οπίσθιο) προφίλ είναι πλεονεκτικό για την κακή κάλυψη βημάτων που απαιτείται κατά την ανύψωση. Επομένως, προτιμώνται είτε αρνητικές αντιστάσεις είτε αντίσταση αντιγράφων εικόνας. Ορισμένοι κατασκευαστές ονομάζουν αυτά τα προϊόντα «LOR», για αντιστάσεις ανύψωσης. Αυτά τα προϊόντα προσφέρουν καλή πρόσφυση και υψηλό ρυθμό χαμηλότερης απόδοσης. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε σχήμα διπλής στιβάδας. Ένα παχύτερο LOR εφαρμόζεται πρώτα και ψήνεται (σε υψηλή θερμοκρασία, 150 με 200 °C) για βελτιστοποίηση του ρυθμού ανάπτυξης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια λεπτότερη αντίσταση απεικόνισης πάνω από το LOR. Ο υψηλός ρυθμός ανάπτυξης του LOR θα δημιουργήσει ένα προφίλ σχήματος T, το οποίο είναι πλεονεκτικό για ανύψωση.

Τα θετικά ανθεκτικά, με θετικά κεκλιμένες γωνίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για ανύψωση, αλλά μετά το πάχος του μετάλλου περιορίζονται σε ένα κλάσμα του πάχους της αντίστασης. Με δομή διπλού στρώματος, το LOR πρέπει να είναι παχύτερο από το απαιτούμενο πάχος του μετάλλου, αλλά η αντίσταση απεικόνισης μπορεί να βελτιστοποιηθεί για το πλάτος της επιφάνειας. Χρησιμοποιώντας μια πλάκα διάχυτη για τυχαιοποίηση της έκθεσης σε υπεριώδεις ακτίνες, έχουν χρησιμοποιηθεί θετικές αντιστάσεις για τη δημιουργία αρνητικών, κατάλληλων για ανύψωση [77].

Η διαδικασία ανύψωσης έχει το εγγενές μειονέκτημα της ύπαρξης μιας βρώμικης διαδικασίας. Μεγάλα κομμάτια από ανυψωμένα μέταλλα

επιπλέον στο λουτρό της ανύψωσης. Επίσης, δεν είναι κατάλληλη όταν το μέταλλο πρέπει να περάσει από διάφορα βήματα.

Οι φωτορεσιστές είναι απλά υλικά στρώματος σε μικρομηχανική επιφάνεια, κατάλληλα για συνδυασμούς πολυμερών / πολυμερών και πολυμερών / μετάλλων. Οι αντιστάσεις είναι συμβατές με στρωματοποιημένα και εξατμισμένα δομικά στρώματα [78]. Επίσης, είναι κατάλληλα και για ηλεκτρολυτική επίστρωση [79]. Ανάλογα με το ύψος του τμήματος που «θυσιάζεται», το πάχος του στρώματος της αντίστασης μπορεί να κυμαίνεται από μικρόμετρα έως και εκατοντάδες μικρόμετρα. Η απομάκρυνση των ανθεκτικών στρωμάτων μπορεί να γίνει είτε με ξηρές μεθόδους όπως μέσω της απογύμνωσης του πλάσματος του οξυγόνου (προτιμάται σε δομές μικρών διακένων) είτε με την υπική αφαίρεση του υγρού. Το SU-8 έχει χρησιμοποιηθεί ως ένα καλούπι επιμετάλλωσης το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί ταυτόχρονα και με τα δύο στρώματα θετικής αντίστασης AZ και S-series [80], παρόλο που η αφαίρεση του SU-8 θεωρείται συνήθως ως μία μη βιώσιμη επιλογή διεργασίας. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα ένα δομικό υλικό στην τελική συσκευή. Για την αφαίρεση των δομών SU-8 από ένα υπόστρωμα χρησιμοποιείται ένα στρώμα πολυμερούς PMGI. Αυτό το πολυμερές που προέρχεται από PMMA μπορεί να χαραχθεί σε αραιό διάλυμα TMAH το οποίο δεν προσβάλλει το SU-8 [81].

1.7.4. Ειδικές προσεγγίσεις λιθογραφίας

Εκτός από την οπτική λιθογραφία, έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες τεχνικές διαμόρφωσης. Οι περισσότερες από αυτές παραμένουν εξειδικευμένες, αλλά έχουν κάποια ελκυστικά χαρακτηριστικά σε ορισμένες εφαρμογές των MEMS.

Η λιθογραφία σε έντονα τρισδιάστατες επιφάνειες αποτελεί πρόκληση και για παράδειγμα δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν φωτορεσιστές με επικάλυψη περιστροφής. Είναι δυνατή η χρήση αντιστάσεων επικαλυμμένων με ψεκασμό, που προσφέρουν καλύτερη κάλυψη της αντίστασης στην τοπογραφία. Υπάρχουν όμως και εναλλακτικές προσεγγίσεις. Οι μάσκες απολέπισης (ένθετες μάσκες) χρησιμοποιούν δύο διαφορετικές σκληρές μάσκες και δύο βήματα λιθογραφίας πριν από οποιαδήποτε βαθιά χάραξη.

Οι μάσκες σκιών (διάτρητες) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση του φθοροφωτισμού από τη διαδικασία της σχηματοποίησης [82]. Σε μια τυπική εφαρμογή, η μάσκα σκιάς και η εξάτμιση χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός μοτίβου μεταλλοποίησης απευθείας στο δισκίο. Η τεχνική είναι απλή για μεγάλα μεγέθη χαρακτηριστικών και για μεγάλες ανοχές ευθυγράμμισης, αλλά γίνεται όλο και πιο δύσκολη, εάν οι απαιτήσεις της ανάλυσης ή της ευθυγράμμισης γίνουν πιο αυστηρές. Για παράδειγμα, η κάμψη του διάτρητου λόγω του

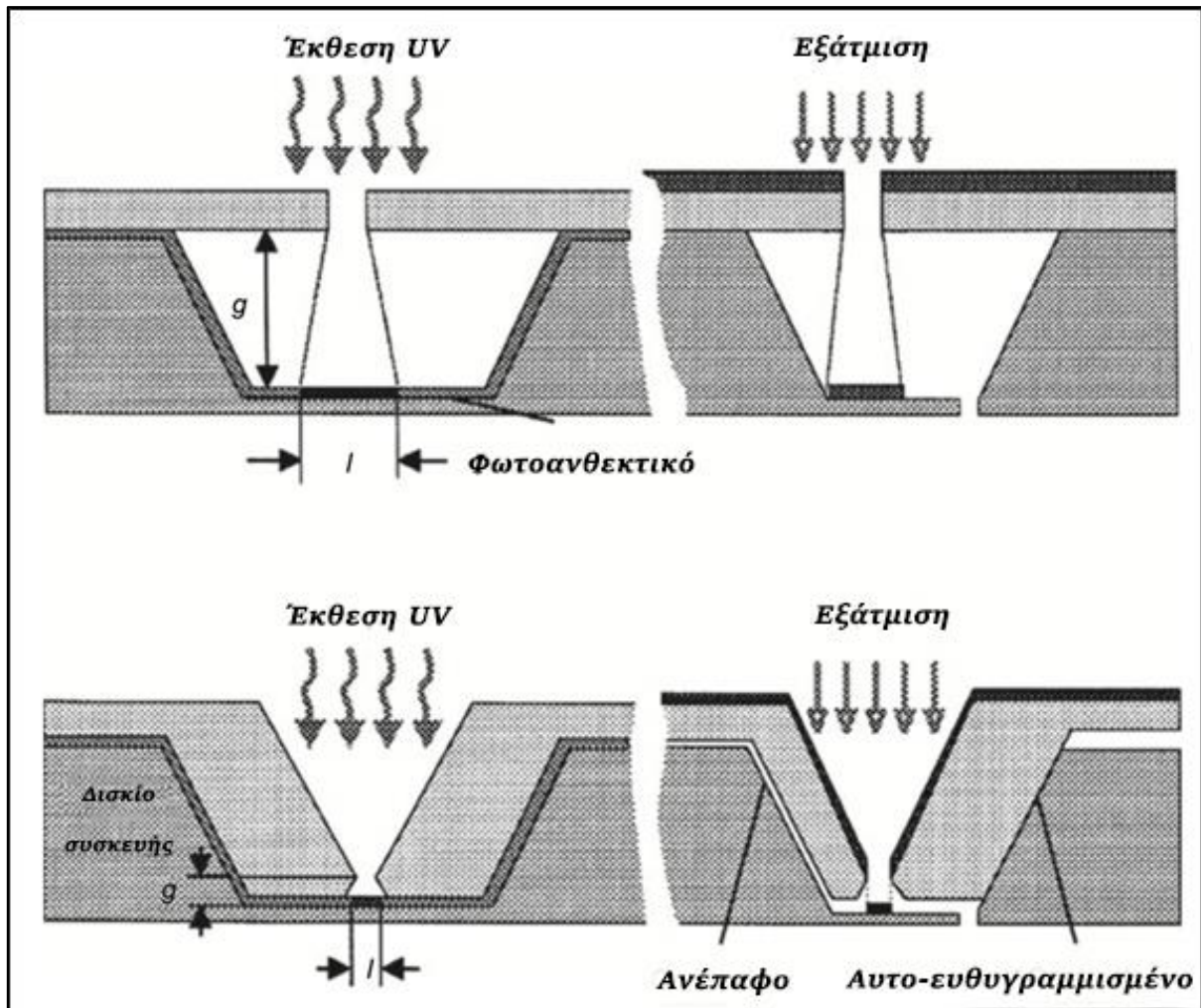
εναποτιθέμενου μετάλλου αλλάζει την φαινομενικά στερεή γωνία που φαίνεται μέσω του διάτρητου, οδηγώντας σε παραλλαγή του πλάτους.

Η μάσκα σκιάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εναπόθεση μετάλλου στο κάτω μέρος μιας βαθιάς δομής, αλλά οι συμπαγείς εκτιμήσεις της γωνίας περιορίζουν την επιτεύξιμη λωρίδα πλάτους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 0.9: Σχέδιο στο κάτω μέρος: λιθογραφία έναντι ανύψωσης με χρήση πλαστικών φωτομασκών και επίπεδης μάσκας σκιάς (πάνω) και συμμορφωμένη τρισδιάστατη μάσκα και μάσκα σκιάς (κάτω)

Η οπτική λιθογραφία διακυβεύεται επίσης, καθώς το χάσμα μεταξύ της μάσκας και της αντίστασης αυξάνεται αναπόφευκτα. Η λεπτή αντίσταση διαμόρφωσης με επικάλυψη με ψεκασμό θα βοηθήσει στη διατήρηση κάποιου ελέγχου του πλάτους της γραμμής, αλλά ένα μεγάλο κενό θα περιορίσει την απόδοση.

Οι μάσκες σκιάς μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να συμμορφώνονται με τρισδιάστατες δομές στο δισκίο, επιτρέποντας τη στενή επαφή μεταξύ του διάτρητου και του δισκίου. Αυτό λειτουργεί τόσο για την οπτική λιθογραφία όσο και για την επιμετάλλωση ανύψωσης. Οι μάσκες σκιάς μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στη χάραξη. Για παράδειγμα, οι μεμβράνες ανίχνευσης των χημικών αισθητήρων που δεν ανέχονται φωτοευαίσθητα υλικά, μπορούν να διαμορφωθούν με αφαίρεση επιλεγμένων περιοχών, με χάραξη πλάσματος, μέσω μάσκας διάτρητου. Ενώ, η εξάτμιση είναι μια μέθοδος οπτική, διασφαλίζοντας ότι δεν εναποτίθεται κάτω από το διάτρητο, η χάραξη στο πλάσμα είναι ένα μείγμα χημικών και φυσικών διεργασιών και απαιτείται αναπόφευκτα κάποια ανάλυση. Αυτό το επίπεδο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία.

Η λιθογραφία λέιζερ λειτουργεί παρόμοια με την οπτική λιθογραφία. Στην ουσία, η αντίσταση εκτίθεται σε υπεριώδες φως (π.χ. 405 ή 413 nm). Η διαφορά είναι στον τρόπο γραφής. Η λιθογραφία λέιζερ είναι μια σειριακή διαδικασία. Η αιτιολόγηση μεταξύ της χρήσης λιθογραφίας λέιζερ για τη σύνταξη μάσκας έναντι της άμεσης εγγραφής στο δισκίο εξαρτάται από παράγοντες, όπως τον απαιτούμενο αριθμό των δισκίων, την εγγράψιμη περιοχή ανά δισκίο και το μέγεθος του μοτίβου. Για ερευνητικά συστήματα μικρής κλίμακας (που κοστίζουν παραπάνω από 100.000 ώρες), οι χρόνοι γραφής για τα δισκία των MEMS είναι συνήθως δεκάδες λεπτά έως και μερικές ώρες. Υπάρχουν, ωστόσο, τεράστιες παραλλαγές μεταξύ των συστημάτων, ανάλογα με τα συγκεκριμένα μοτίβα.



Εικόνα 0.9: Σχέδιο στο κάτω μέρος: λιθογραφία έναντι ανύψωσης με χρήση πλαστικών φωτομασκών και επίπεδης μάσκας σκιάς (πάνω) και συμμορφωμένη τρισδιάστατη μάσκα και μάσκα σκιάς (κάτω) [83].

Από την άλλη πλευρά, απλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα γραμμών και κουκκίδων μπορούν να κατοχυρωθούν με λιθογραφία παρεμβολών με λέιζερ (LIL, ή IL, που ονομάζεται επίσης και ολογραφική λιθογραφία) [84]. Το μοτίβο παρεμβολής παράγεται σε αντίσταση από ακτίνες λέιζερ, για να κάνει ένα περιοδικό μοτίβο γραμμής, και με 90° περιστροφή και άλλη έκθεση, πραγματοποιείται ένα μοτίβο κουκκίδας ή οπής. Υπάρχουν δύο σημαντικά οφέλη στη λιθογραφία παρεμβολών (IL) όπως ονομάζεται η εν λόγω διαδικασία. Η ανάλυσή της είναι ανώτερη από την 1X οπτική λιθογραφία, αφού διαστάσεις των 300 nm είναι άμεσα διαθέσιμες και επιπλέον αποτελεί μια τεχνική χωρίς μάσκα. Στην πραγματικότητα, χρησιμοποιείται συχνά ως εργαλείο για να δημιουργηθεί μια μάσκα, ή αποτελεί την κύρια διαδικασία για άλλες τεχνικές, όπως της εκτύπωσης μικροεπαφών. Οι περιορισμοί της IL περιλαμβάνουν τη σχετικά μικρή περιοχή με σχέδια και τις περιορισμένες εναλλαγές των σχημάτων που μπορούν να κατασκευαστούν (ουσιαστικά μόνο περιοδικές συστοιχίες).

Η απλή εργαστηριακή κλίμακα IL μπορεί να κατασκευαστεί σχετικά φθηνά [85], με διαμορφωμένη επιφάνεια $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Οι μονάδες της λιθογραφίας παρεμβολών μπορούν να προστεθούν σε ευθυγραμμιστές μάσκας επαφής / εγγύτητας 1X, αλλά οι τιμές είναι παρόμοιες με τον το βασικό εξοπλισμό.

1.8. Υλικά

Το πυρίτιο είναι ένα άφθονο στοιχείο που βρίσκεται στο φλοιό της Γης σε διάφορες ενώσεις. Η παγκόσμια παραγωγή πολυπυριτίου μόνο το πρώτο τρίμηνο του 2019 ήταν περίπου 642,000 τόνοι σε σύγκριση με ολόκληρο το 2013 που ήταν περίπου 210,000 τόνοι με μέγεθος αγοράς τότε, 4 δισεκατομμυρίων δολαρίων των ΗΠΑ [86]. Το μεγαλύτερο μέρος του πυριτίου χρησιμοποιείται για φωτοβολταϊκές εφαρμογές και η ποιότητα είναι χαμηλότερη από αυτήν που απαιτείται στη βιομηχανία των ημιαγωγών. Η αγορά του πυριτίου ημιαγωγών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές ημιαγωγών και MEMS ήταν περίπου 1 δισεκατομμύριο δολάρια των ΗΠΑ που αντιπροσωπεύουν περίπου 40.000 τόνους παραγωγής. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος του πυριτίου που χρησιμοποιείται είναι είτε N- είτε P-τύπου, συνδυασμένο με αντιμόνιο, αρσενικό, φώσφορο (N-τύπου) ή βόριο (P-τύπου).

1.8.1. Ιδιότητες του πυριτίου

Η συγκέντρωση του προσμείγματος κυμαίνεται μεταξύ 10^{13} και 10^{20} άτομα / cm^3 Si. Το ενδογενές ή πολύ ελαφρώς ενισχυμένο πυρίτιο υψηλής αντίστασης πάνω από $1 \text{ k}\Omega\text{cm}$ χρησιμοποιείται σε μικρές ποσότητες [87].

Ο χαλαζίας, ή το διοξείδιο του πυριτίου, είναι η πιο κοινή πρώτη ύλη έναρξης για το καθαρισμένο πυρίτιο σε εφαρμογές ημιαγωγών και αισθητήρων. Η διαδικασία Siemens είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στην παραγωγή πυριτίου, σε ημιαγωγούς. Στην κλασική διαδικασία Siemens, το μεταλλικό χειρουργικό πυρίτιο, που κατασκευάζεται πρώτα σε ηλεκτρικό κλίβανο με αναγωγή χαλαζία με οπτάνθρακα, μετατρέπεται σε ενώσεις πυριτίου-υδρογόνου-χλωριδίου σε αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης και αυτές οι ενώσεις μετατρέπονται σε TCS (τριχλωροσιλάνιο ή SiHCl_3). Το TCS καθαρίζεται με απόσταση, κατά τη διάρκεια της οποίας μειώνονται οι συγκεντρώσεις ενώσεων ακαθαρσίας που έχουν είτε χαμηλότερη είτε υψηλότερη θερμοκρασία πτητικότητας από ότι το TCS ($38,4 \text{ }^\circ\text{C}$). Το καθαρισμένο TCS τροφοδοτείται μαζί με υδρογόνο σε έναν αντιδραστήρα. Στον αντιδραστήρα TCS αποσυντίθεται σε θερμές ίνες πυριτίου, σχηματίζοντας μια καθαρή ράβδο πολυπυριτίου. Αυτή η ράβδος στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την ανάπτυξη κρυστάλλων, είτε σε μορφή ράβδου είτε σε θρυμματισμένα κομμάτια [88]. Υπάρχουν εναλλακτικές, νεότερες τεχνικές για τον καθαρισμό του πυριτίου. Μια παραλλαγή είναι παρόμοια με τη διαδικασία Siemens αλλά χρησιμοποιεί σιλάνιο (SiH_4) ως πρόδρομο. Σε ορισμένες διαδικασίες, τα θερμαινόμενα

νήματα πυριτίου αντικαθίστανται από σωματίδια πυριτίου που επιπλέουν σε αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης. Αυτές οι διεργασίες αποδίδουν κοκκώδες πολυπυρίτιο.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας καθαρισμού είναι ένα υψηλής καθαρότητας πυρίτιο που περιέχει πολύ μικρές ποσότητες ξένων διαλυμένων ατόμων. Εάν οι απλοί κρύσταλλοι κατασκευάζονται με τεχνική Czochralski (CZ), η οποία χρησιμοποιείται πιο συχνά (90% των κρυστάλλων), το επίπεδο ακαθαρσίας αυξάνεται, καθώς η ανάπτυξη γίνεται από ένα χωνευτήριο χαλαζία που έχει κάποιες ακαθαρσίες [89]. Το αποτέλεσμα, ωστόσο, παραμένει αποδεκτό. Συνήθως, το μεγαλύτερο μέρος της «μόλυνσης» του πυριτίου λαμβάνει χώρα κατά την πραγματική κατασκευή των συσκευών. Από τις ακαθαρσίες, τα μέταλλα είναι γενικά επιβλαβή, με σπάνιες εξαιρέσεις, η συγκέντρωσή τους πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη, συνήθως πολύ μικρότερη από 10^{12} άτομα / cm^3 Si. Το οξυγόνο που προέρχεται από το στάδιο ανάπτυξης των κρυστάλλων CZ ως ακαθαρσία έχει διπλό ρόλο. Έχει ευεργετικά αποτελέσματα (ενίσχυση του εύρους του πυριτίου σε υψηλές θερμοκρασίες, επίδραση στη χρήση ημιαγωγών), αλλά επίσης και επιζήμια αποτελέσματα (παραγωγή ελαττωμάτων). Το άζωτο είναι ένα δεύτερο παράδειγμα ακαθαρσίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρές ποσότητες για την ενίσχυση των ιδιοτήτων του πυριτίου, ειδικά σε εφαρμογές IC.

Η τρέχουσα υψηλή ζήτηση για χαμηλού κόστους, ηλιακής χρήσης πυριτίου ενθαρρύνει την εκμετάλλευση εναλλακτικών πηγών και νέων τεχνικών καθαρισμού. Επί του παρόντος, αυτές οι μέθοδοι δεν είναι σε θέση να παράγουν πυρίτιο ημιαγωγού αρκετά καθαρού για εφαρμογές MEMS, αν και στις ηλιακές εφαρμογές αυτές οι νέες μέθοδοι δείχνουν ήδη πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα [90] [91].

Το πυρίτιο είναι ένα ιδανικό υλικό για διάφορες εφαρμογές MEMS. Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός του οποίου η αντίσταση μπορεί να ρυθμιστεί με «doping»⁶ από $m\Omega cm$ σε αρκετά $k\Omega cm$. Είναι αρκετά αδρανές σε ένα κανονικό περιβάλλον, σκληρό, διαφανές σε υπέρυθρες συνθήκες και ελαστικό σε θερμοκρασία δωματίου, χωρίς πλαστική παραμόρφωση και με υψηλή αντοχή σε θραύση. Τέλος, μπορεί να αναπτυχθεί ένα σταθερό προστατευτικό διοξείδιο του πυριτίου. Ο κρύσταλλος πυριτίου έχει ανισοτροπικές ιδιότητες (μηχανικές, χημικές και ηλεκτρικές), οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν στα σχεδιαστικά στοιχεία των MEMS. Επίσης, μπορούν να κατασκευαστούν με σχετική ευκολία πολύ μεγάλοι μεμονωμένοι κρύσταλλοι πυριτίου σε διάφορους προσανατολισμούς. Αυτοί οι μοναδικοί συνδυασμοί ιδιοτήτων έχουν τοποθετήσει το υλικό ως το νούμερο ένα στην κατασκευή των MEMS, αν και χρειάστηκαν σχεδόν 30 χρόνια όπως

⁶ Στην παραγωγή ημιαγωγών, το doping είναι η σκόπιμη εισαγωγή ακαθαρσιών σε έναν εγγενή ημιαγωγό με σκοπό τη διαμόρφωση των ηλεκτρικών, οπτικών και δομικών ιδιοτήτων του. Το εμπλουτισμένο υλικό αναφέρεται ως εξωγενής ημιαγωγός. Ένας ημιαγωγός προσβεβλημένος σε τόσο υψηλά επίπεδα που ενεργεί περισσότερο σαν αγωγός από ότι ένας ημιαγωγός αναφέρεται ως εκφυλισμένος ημιαγωγός.

αναφέρθηκε, μετά την εφεύρεση του τρανζίστορ πυριτίου, έως ότου πραγματοποιήθηκε ευρέως το δυναμικό του πυριτίου ως μικροχημικού υλικού.

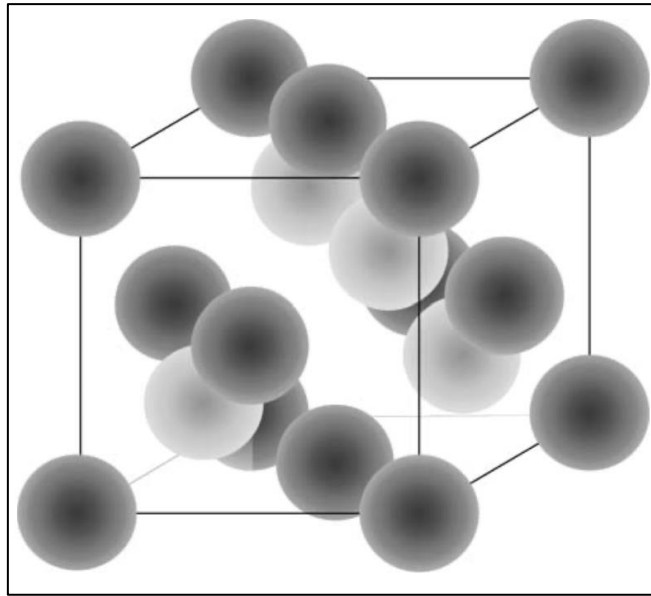
Μια πιο περιεκτική αναφορά σχετικά με τις βασικές ιδιότητες του πυριτίου μπορεί να βρεθεί, για παράδειγμα, σε ένα εγχειρίδιο που εκδόθηκε από τον Hull [92] ή από το Landolt-Bornstein Group III [93].

1.8.2. Κρυσταλλογραφία του πυριτίου

Το πυρίτιο κρυσταλλώνεται σε διαμάντι κυβικού κρυστάλλου (Εικόνα 0.10: Το κελί μονάδας πλέγματος πυριτίου. Τα γκρίζα άτομα πυριτίου βρίσκονται στη θέση fcc και τα άτομα ανοιχτού χρώματος μετατοπίζονται από τις θέσεις fcc προς την κατεύθυνση 111 κατά μήκος μονάδας με $\frac{1}{4}$ της μονάδας) στο οποίο τα άτομα συνδέονται ομοιοπολικά. Άλλα στοιχεία, όπως το γερμάνιο, μπορούν να βρεθούν στον περιοδικό πίνακα με ανάλογες βασικές ιδιότητες σαν αυτές του πυριτίου.

Το πυρίτιο έχει οκτώ άτομα. Αυτά τα άτομα ακολουθούν ένα δικτυωτό πλέγμα Bravais (fcc⁷). Σε κάθε σημείο του πλέγματος fcc υπάρχουν δύο άτομα (μοτίβο). Ένα στο σημείο του πλέγματος και το δεύτερο μετατοπίζεται κατά $\frac{1}{4}$ του μήκους της μονάδας της κυψελίδας (κατεύθυνση 111). Το μήκος της μονάδας σε θερμοκρασία δωματίου είναι 0,357 nm. Στην πραγματικότητα, αυτή η τιμή είναι μία από τις πιο γνωστές μεταξύ των στοιχείων, αφού ο κρύσταλλος πυριτίου μπορεί να αναπτυχθεί σχεδόν τέλεια και η παράμετρος του πλέγματος μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια (αβεβαιότητα της τάξεως του $3 \dots 6 \times 10^{-8}$) [94].

⁷ Κύβος με επίκεντρο το πρόσωπο (συντομογραφία cF ή fcc)



Εικόνα 0.10: Το κελί μονάδας πλέγματος πυριτίου. Τα γκριζα άτομα πυριτίου βρίσκονται στη θέση fcc και τα άτομα ανοιχτού χρώματος μετατοπίζονται από τις θέσεις fcc προς την κατεύθυνση 111 κατά μήκος μονάδας με $\frac{1}{4}$ της μονάδας [95].

Το πυρίτιο είναι ένας καλός υποψήφιος για τις διάφορες αναφορές, για παράδειγμα, στον καθορισμό της σταθεράς του Avogadro. Η πυκνότητα «συσκευασίας»⁸ του πυριτίου σε αυτό το πλέγμα είναι περίπου 34%. Η πυκνότητα «συσκευασίας» είναι αρκετά χαλαρή σε σύγκριση με εκείνη των πλεγμάτων fcc (ορισμένα μέταλλα, όπως ο χαλκός, έχουν αυτή τη δομή), των οποίων η πυκνότητα «συσκευασίας» είναι 74% και αυτή μιας κυβικής δομής με επίκεντρο το σώμα (για παράδειγμα, καθαρό σίδηρο σε θερμοκρασία δωματίου), του οποίου η πυκνότητα συσκευασίας είναι 68%. Ο μεγαλύτερος κενός χώρος στο διαμαντένιο κυβικό πλέγμα είναι η οκταεδρική τρύπα, η οποία μπορεί να καταλάβει ένα άτομο 41% του μεγέθους του ατόμου του ξενιστή. Τα άτομα που διαλύονται στο πλέγμα σε κενούς χώρους ονομάζονται παρενθετικά άτομα και η διαλυτότητα ονομάζεται διάμεση διαλυτότητα.

Το πιο τυπικό άτομο που έχει διαλυθεί (ακαθαρσία) είναι το οξυγόνο. Το μέγιστο περιεχόμενο ισορροπίας οξυγόνου σε κρυστάλλους που αναπτύσσονται στην παρενθετική κατάσταση μπορεί στην πράξη να είναι σχεδόν έως και 20 ppm, που αντιστοιχεί σε έως 10^{18} άτομα / cm^3 Si. Ο άνθρακας είναι η δεύτερη πιο κοινή παρενθετική ακαθαρσία στο πυρίτιο. Στην πράξη, η συγκέντρωση είναι μικρότερη από 0,3 ppm σε υλικό ποιότητας ημιαγωγού. Τα άτομα τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το βόριο, το αντιμόνιο, το αρσενικό και ο φωσφόρος, τα οποία βρίσκονται σε θέσεις υποκατάστασης πλέγματος (δηλαδή, αντικαθιστώντας άτομα πυριτίου), με την εξαίρεση πολύ υψηλών επιπέδων doping (που σημαίνει υψηλής

⁸ Μια πυκνότητα συσκευασίας ή ένα κλάσμα συσκευασίας μιας συσκευασίας σε κάποιο χώρο είναι το κλάσμα του χώρου που γεμίζουν τα σχήματα που αποτελούν τη συσκευασία. Σε προβλήματα συσκευασίας, ο στόχος είναι συνήθως η απόκτηση συσκευασίας με τη μεγαλύτερη δυνατή πυκνότητα.

συγκεντρώσεις άνω των 10^{18} άτομα / cm^3Si , στο οποίο ένα μικρό κλάσμα των στοιχείων doping είναι ηλεκτρικά ανενεργό και σε παρενθετικές θέσεις). Η μέγιστη διαλυτότητα υποκατάστασης εξαρτάται από το μέγεθος του ατόμου και ορισμένους άλλους παράγοντες. Τυπικά, είναι μικρότερο από 10^{21} άτομα / cm^3 . Το γερμάνιο αποτελεί εξαίρεση, αφού είναι εντελώς αναμίξιμο.

1.8.3. Ελαττώματα στο πλέγμα πυριτίου

Παρόλο που το μονό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι σχεδόν τέλειο σε βαθμό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για τον καθορισμό της σταθεράς του Avogadro, μπορούν να υπάρξουν ελαττώματα. Στην πραγματικότητα οι ενιαίοι κρύσταλλοι που κατασκευάζονται είτε με CZ είτε με μεθόδους καλλιέργειας ζώνης float (FZ) περιέχουν ελαττώματα, μερικά από τα οποία είναι χαρακτηριστικά για το συγκεκριμένο μέθοδος ανάπτυξης. Επιπλέον, τα ελαττώματα σχηματίζονται σκόπιμα ή ακούσια κατά την επεξεργασία των πλακιδίων πυριτίου στα τελικά συστατικά. Αυτά τα ελαττώματα μπορούν να ταξινομηθούν ως (i) σημειακά ελαττώματα (ή τα συσσωματώματά τους), (ii) γραμμικά ελαττώματα, (iii) επίπεδα επίπεδα ή (iv) ελαττώματα όγκου.

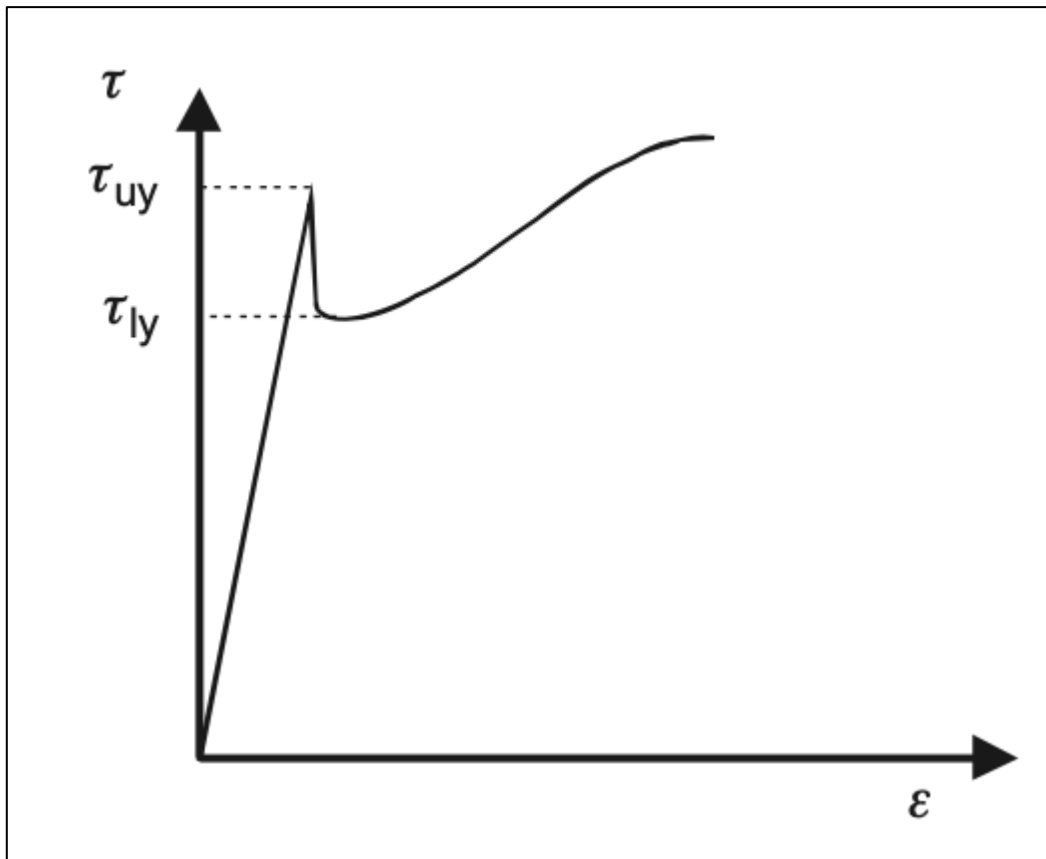
Οι κρύσταλλοι πυριτίου αναπτύσσονται από το τήγμα. Λόγω της χαμηλής διάχυσής τους, πολλά από τα ελαττώματα είναι θερμοδυναμικά σε συγκέντρωση ισορροπίας στο σημείο ψύξης («παγώνουν» στον κρύσταλλο κατά τη φάση ψύξης). Στην τεχνολογία IC για παράδειγμα, τα σωματίδια που προέρχονται από κρυστάλλους (COPs) ή μεγάλα συσσωματώματα κενών θέσεων, έχουν μεγάλη επίδραση στην ακεραιότητα των οξειδίων. Οι κρύσταλλοι που δημιουργούνται με τη μέθοδο CZ περιέχουν επίσης ξένα άτομα, όπως οξυγόνο και άνθρακα. Το οξυγόνο μπορεί επίσης να σχηματίσει ηλεκτρικά ή οπτικά ενεργά ελαττώματα. Επομένως, είναι απαραίτητο να ελέγχονται αυτά τα ελαττώματα όχι μόνο στην κατασκευή των συσκευών αλλά και στο βήμα της κρυσταλλικής ανάπτυξης. Δεδομένου ότι η σχέση της αύξησης των ελαττωμάτων στους κρυστάλλους και των ελαττωμάτων στις τελικές συσκευές είναι περίπλοκη και εξαρτάται από τα στάδια της θερμικής επεξεργασίας, είναι ευεργετικό για τους δημιουργούς των κρυστάλλων να γνωρίζουν (με όσο πιο λεπτομερή τρόπο είναι δυνατόν) τα βήματα κατασκευής της συσκευής, ώστε να βελτιστοποιούν τη συμπεριφορά του πυριτίου [96].

1.8.4. Μηχανικές ιδιότητες του πυριτίου

Το πυρίτιο είναι ένα σκληρό και εύθραυστο υλικό και σε θερμοκρασία δωματίου υπό πίεση, ο μονός κρύσταλλος πυριτίου επιμηκύνεται ελαστικά έως ότου εμφανιστεί τάση κατάγματος, χωρίς μια σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Επομένως, ελαττώματα (γρατσουνιές, βαθουλώματα, μηχανικές βλάβες, κ.λπ.) στην επιφάνεια ή την περιφέρεια της λεπτής επιφάνειάς τους μπορούν να προκαλέσουν πρόωρη ρωγμή υπό πίεση λόγω της εγκοπής. Τα τμήματα πυριτίου που έχουν τραχιά επιφάνεια

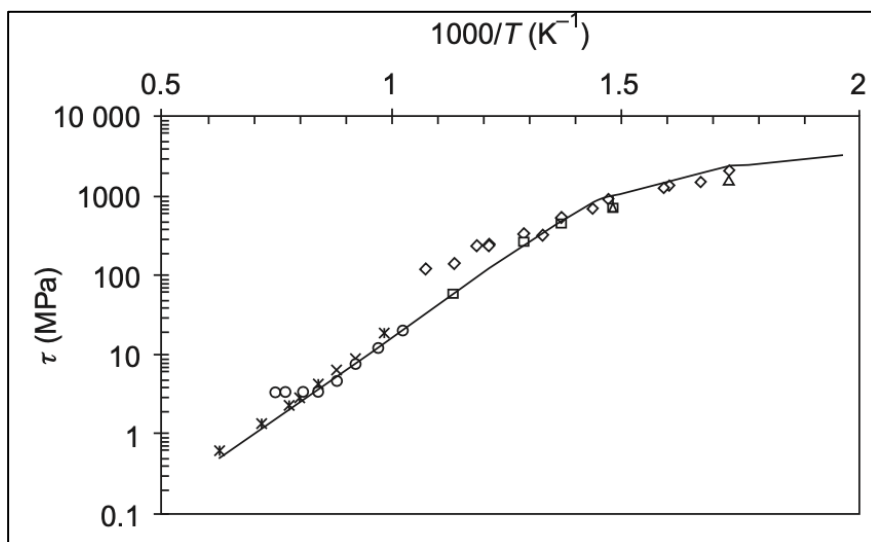
ή υπολειμματική ζημιά στην επιφάνειά τους είναι πιο επιρρεπή σε θραύση, σε σύγκριση με τα γυαλισμένα. Το ιδανικό «ισχυρό» τμήμα είναι γυαλισμένο σε διπλή πλευρά και η άκρη του είναι επίσης γυαλισμένη και στρογγυλεμένη. Ο Samuels και Roberts [97] χρησιμοποίησαν προ-ραγισμένα δείγματα μονού κρυστάλλου σε σχήμα ράβδου σε τεστ τεσσάρων σημείων κάμψης και βρήκαν εύθραυστη όλκιμη θερμοκρασία μετάβασης τους 545 °C. Σε θερμοκρασία δωματίου, μέτρησαν μια τάση θραύσης 270 MPa. Κάτω από πίεση περιορισμού 1,5-GPa, η εύθραυστη όλκιμη θερμοκρασία μετάβασης μπορεί να μειωθεί στους 275 °C [98]. Για σύγκριση, ο Vedde [99] δίνει για μέση αντοχή σε κάταγμα (σε επίπεδο πιθανότητας 50%) κατά τη χρήση μιας μεθόδου δοκιμής κάμψης διπλού δακτυλίου, 1,18 GPa για γυαλισμένη επιφάνεια CZ και 1,01 με 1,12 GPa για επιφάνεια FZ (διαφορετική διεργασία ανάπτυξης), σε σύγκριση με μια κατάσταση αποκοπής από 180 έως 220 MPa ή 270 έως 330 MPa. Ωστόσο, αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται μόνο ως δείκτες, δεδομένου ότι, στην πράξη οι συνθήκες δοκιμής, η αρχική ποιότητα του υλικού, οι διαδικασίες κατασκευής και οι πιθανές μετα-επεξεργασίες επηρεάζουν την τάση του σπασίματος.

Σε υψηλές θερμοκρασίες το πυρίτιο αρχίζει να δείχνει πλαστική παραμόρφωση. Μόλις επιτευχθεί η ανώτερη ισχύς απόδοσης (που ονομάζεται επίσης ανώτερο σημείο απόδοσης), οι εξάρσεις αρχίζουν να δημιουργούνται, πολλαπλασιάζονται και κινούνται σε επίπεδα ολίσθησης, η τάση μειώνεται στην χαμηλότερη ισχύ απόδοσης (σημείο) και προχωρά η πλαστική παραμόρφωση. Όταν η πυκνότητα εξάρθρωσης αυξάνεται, οι εξάρσεις φτάνουν η μία την άλλη, αποτρέπεται η ολίσθηση, το πλέγμα σκληραίνει και η πίεση που απαιτείται για περαιτέρω παραμόρφωση αυξάνεται, έως ότου εμφανιστεί το κάταγμα. Οι απλοί κρύσταλλοι πυριτίου που κατασκευάζονται με τεχνικές CZ ή FZ έχουν παρόμοιο σχήμα στις καμπύλες καταπόνησης της τάσης, υπό την προϋπόθεση ότι οι κρύσταλλοι είναι αρχικά απαλλαγμένοι από τον εκτοπισμό [100] (Διάγραμμα 2.1: Σχέδια συμπεριφοράς καταπόνησης πίεσης από μονό κρύσταλλο πυριτίου χωρίς εξάρθρωση σε υψηλές θερμοκρασίες τ_{xy} = ανώτερη ισχύς απόδοσης, τ_{ly} = χαμηλότερη ισχύς απόδοσης, ε = ένταση).



Διάγραμμα 2.1: Σχέδια συμπεριφοράς καταπόνησης πίεσης από μονό κρύσταλλο πυριτίου χωρίς εξάρθρωση σε υψηλές θερμοκρασίες τ_{uy} = ανώτερη ισχύς απόδοσης, τ_{ly} = χαμηλότερη ισχύς απόδοσης, ϵ = ένταση [95].

Η τιμή της χαμηλότερης ισχύος της απόδοσης ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία, σύμφωνα με το Διάγραμμα 2.2: Χαμηλότερη ισχύς από πυρίτιο έναντι θερμοκρασίας παραμόρφωσης. Στους 900 °C, η κρίσιμη τάση διάτμησης στο επίπεδο (111) που απαιτείται για την κίνηση των εξάρσεων είναι περίπου 8 MPa.



Διάγραμμα 2.2: Χαμηλότερη ισχύς από πυρίτιο έναντι θερμοκρασίας παραμόρφωσης [101].

Το οξυγόνο που περιέχει πυρίτιο CZ έχει στην πράξη, υψηλότερη ανοχή σε σύγκριση με το πυρίτιο FZ χωρίς οξυγόνο. Η διαφορά είναι ότι όταν σταματά η παραμόρφωση, σε οξυγόνο που περιέχει CZ, οι εξάρσεις πυριτίου ασφαλιζονται γρήγορα με τη διάχυση οξυγόνου. Από την άλλη, σε πυρίτιο FZ χωρίς οξυγόνο, δε λαμβάνει χώρα η ίδια λειτουργία και οι εξάρσεις μπορούν να κινηθούν εύκολα. Μόλις παραμορφωθεί, το υλικό CZ εμφανίζει και πάλι ένα ανώτερο σημείο απόδοσης πολύ υψηλότερο σε σύγκριση με την τάση που απαιτείται, για τη μετακίνηση των εκτοπίσεων, ενώ το πυρίτιο FZ αρχίζει να παραμορφώνεται σε επίπεδο τάσης, που απαιτείται για την μετακίνηση των εξάρσεων σε συνεχή παραμόρφωση [100]. Το πυρίτιο FZ μπορεί να «σκληρυνθεί» προσθέτοντας οξυγόνο ή άζωτο, αλλά γενικά το FZ είναι πιο επιρρεπές σε ολίσθηση, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό των βημάτων της θερμικής επεξεργασίας.

Η συγκέντρωση του οξυγόνου σε αποσταγμένους κρυστάλλους πυριτίου έχει σημαντική επίδραση στην ανώτερη απόδοση της αντοχής. Όταν η αρχική πυκνότητα εξάρθρωσης αυξάνεται, η επίδραση του οξυγόνου μειώνεται και η ανώτερη απόδοση της ισχύος μειώνεται. Έτσι, τα τμήματα πυριτίου σε θερμικές επεξεργασίες (και ειδικά στη φάση της ψύξης, όπου οι ακτινικές τάσεις είναι υψηλότερες) είναι πιο ευαίσθητα.

1.8.5. Ηλεκτρικές ιδιότητες του πυριτίου

Το πυρίτιο είναι ένα στοιχείο της ομάδας IV στον περιοδικό πίνακα και είναι ένας ημιαγωγός με διάκενο 1,12 eV. Αυτό σημαίνει, ότι το καθαρό πυρίτιο σε θερμοκρασία δωματίου είναι σχεδόν ένας μονωτής. Με το doping με στοιχεία της ομάδας III ή της ομάδας V του περιοδικού πίνακα, η αντίσταση του πυριτίου μπορεί να ποικίλλει σε μεγάλο εύρος.

Οι ημιαγωγοί είναι στερεά υλικά που έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ αυτών και των μονωτών. Ο φυσικός λόγος που προκαλεί ένα υλικό να συμπεριφέρεται ως αγωγός, ημιαγωγός ή μονωτής έγκειται στη διαθεσιμότητα ή έλλειψη φορέων ελεύθερου ρεύματος στο υλικό. Οι ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται από το στενό εύρος ζώνης μεταξύ των ζωνών σθένους, που καταλαμβάνουν τα ηλεκτρόνια και της ζώνης αγωγιμότητας, στην οποία τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα σύμφωνα με τα εφαρμοσμένα ηλεκτρικά πεδία. Οι ενδογενείς (δηλαδή καθαροί) ημιαγωγοί ενεργούν ως μονωτές σε θερμοκρασίες δωματίου, αλλά η συμπεριφορά τους αλλάζει δραματικά με τη θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει ακόμα περισσότερο στο σημείο με μικρές ακαθαρσίες που υπάρχουν στον κρύσταλλο. Πολύ μικρές ποσότητες ηλεκτρικά ενεργών ακαθαρσιών μπορούν να μεταβάλουν πλήρως τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών όπως το πυρίτιο. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι ηλεκτρικά ενεργές ακαθαρσίες είτε δίνουν εύκολα ηλεκτρόνια σθένους είτε τα δέχονται, δημιουργώντας τρύπες. Αυτά τα ηλεκτρόνια ή οι οπές είναι ελεύθερα (δηλαδή, δε συνδέονται με μεμονωμένα άτομα). Η κίνησή τους λόγω των εφαρμοσμένων ηλεκτρικών πεδίων φέρει ηλεκτρικά ρεύματα, δημιουργώντας τον όρο «φορείς φόρτισης» που χρησιμοποιείται για να τα δηλώσουν.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών υλικών όπως το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο ορίζονται έτσι, από τις συγκεντρώσεις ακαθαρσιών που υπάρχουν στο πλέγμα πυριτίου. Οι ακαθαρσίες εισάγονται στα αρχικά υλικά κατά την ανάπτυξη κρυστάλλων και τροποποιούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας της συσκευής με πρόσθετο doping του υλικού του πυριτίου με ηλεκτρικά ενεργές ακαθαρσίες. Στο σκόπιμο doping του πυριτίου, χρησιμοποιούνται άτομα ακαθαρσίας από την ομάδα III και την ομάδα V.

Ο χειρισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων στις δομές που δημιουργούνται κατά την κατασκευή των συσκευών MEMS ακολουθεί πρακτικές που καθιερώνονται γενικότερα στην κατασκευή συσκευών ημιαγωγών. Οι τεχνικές περιλαμβάνουν και τις δύο πολύ παραδοσιακές μεθόδους, όπως τις βαθιές διασπορές των προσμείξεων, οι οποίες έχουν εγκαταλειφθεί σε διαδικασίες ημιαγωγών, καθώς και τις τρέχουσες τυπικές τεχνικές, όπως η εμφύτευση ιόντων και η επιταξιακή εναπόθεση. Ενώ τα αρχικά υλικά ημιαγωγού είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένα από άλλες ηλεκτρικά ενεργές ακαθαρσίες, η ενσωμάτωση της ακούσιας μόλυνσης στο πυρίτιο, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στις ηλεκτρικές ιδιότητες των κατασκευασμένων συσκευών.

Το ακούσιο doping του πυριτίου περιλαμβάνει την εισαγωγή ανεπιθύμητων στοιχείων στο κρυσταλλικό πλέγμα από το περιβάλλον επεξεργασίας. Αυτές οι ακαθαρσίες μπορούν να είναι είτε άτομα τύπου III / V εσφαλμένα, είτε άλλα μολυσματικά υλικά, όπως ορισμένα μέταλλα μετάβασης.

Η παραγωγή ηλεκτρικών ενεργών ιδιοτήτων πραγματοποιείται επίσης εντός του ίδιου του πυριτίου CZ ενός κρυστάλλου, χωρίς την εισαγωγή πρόσθετων ακαθαρσιών. Το πυρίτιο CZ περιλαμβάνει πάντα μερικά μέρη ανά εκατομμύριο άτομα διαμετρικών ατόμων οξυγόνου, που προέρχονται από το χαλαζία, που χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση του τήγματος κατά την τράβηγμα των κρυστάλλων. Σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, που κυμαίνονται από 400 °C έως 550 °C, αυτά τα διάμεσα άτομα δημιουργούν συσσωματώματα αρκετών ατόμων οξυγόνου εντός του πλέγματος. Αυτοί οι μικροσυσσωρευτές οξυγόνου του πυριτίου είναι γνωστοί ως θερμικοί δότες (TDs), καθώς δίνουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, επηρεάζοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες αναλόγως [102]. Η συγκέντρωση ωστόσο, είναι συνήθως κάτω από $10^{15} \times cm^{-3}$ και επομένως έχει μόνο πολύ οριακά αποτελέσματα σε άλλα από το πυρίτιο υψηλής αντίστασης. Αυτοί οι δότες δεν είναι σταθεροί σε θερμοκρασίες άνω των 600 °C και ακόμη και για εφαρμογές που απαιτούν πυρίτιο υψηλής αντίστασης, το αποτέλεσμα τους μπορεί να κατασταλεί με γρήγορη ψύξη σε όλο το εύρος της θερμοκρασίας παραγωγής. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται θερμική ανόπτηση δότη (TDA) και ενώ είναι αποτελεσματική, δεν εμποδίζει τη δημιουργία νέων TD, εάν οι θερμοκρασίες στο κρίσιμο εύρος χρησιμοποιηθούν αργότερα κατά την επεξεργασία της συσκευής.

Η χρήση των ημιαγωγών βασίζεται στο γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις του φορέα του φορτίου επηρεάζονται εκτός των άλλων και από τυχόν ηλεκτρικά πεδία που μπορεί να υπάρχουν. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί σκόπιμα, όπως για παράδειγμα σε τρανζίστορ, αλλά και λόγω ηλεκτρικών πεδίων που δημιουργούνται από επιφανειακές επιπτώσεις όπως η φόρτιση. Αυτά τα φαινόμενα είναι πιο έντονα στο πυρίτιο υψηλής αντοχής.

Στη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων, τα ηλεκτρονικά που απαιτούνται για την πραγματοποίηση ενός αισθητήρα που βασίζεται σε MEMS, αποτελούνται από τα βασικά δομικά στοιχεία των ηλεκτρονικών ημιαγωγών. Αυτοί οι ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται από τη γέννηση της βιομηχανίας ημιαγωγών με βάση το πυρίτιο και περιγράφονται στα βασικά εγχειρίδια της βιομηχανίας [103]. Σε εφαρμογές MEMS που απαιτούν πολύ υψηλή αντίσταση, σε πεδία όπως τα RF και τα οπτικά, ισχύουν ειδικές εκτιμήσεις. Τα πολύ υψηλής αντοχής υλικά που χρησιμοποιούνται προφανώς επηρεάζονται έντονα ακόμη και από τις μικρότερες συγκεντρώσεις των ανεπιθύμητων φορέων του φορτίου. Αυτοί οι ανεπιθύμητοι φορείς φόρτισης μπορούν να εισαχθούν στο υλικό με μεθόδους όπως η παραγωγή TD, η οξειδωση και η μόλυνση της επιφάνειας. Σε πυρίτιο πολύ υψηλής αντίστασης, αυτά τα αποτελέσματα μπορεί να είναι σοβαρά, σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και να οδηγήσουν σε αντιστροφή.

1.9. Άλματα προς μια γενική πλατφόρμα κατασκευής

Στην αρχή η ανισοτροπική χάραξη του πυριτίου για να σχηματιστούν μικροδομές στο δισκίο πυριτίου ήταν μια αποτελεσματική στρατηγική [104].

Η μαζική μικρομηχανική ωφελείται στα βέλτιστα μηχανικά χαρακτηριστικά του πυριτίου μονού κρυστάλλου. Το doping των δισκίων του πυριτίου και η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών τους για τη χημική χάραξη απαιτούσαν συγκεκριμένη ανάπτυξη από τους κατασκευαστές των δισκίων πυριτίου.

Ακόμη και οι απλούστερες συσκευές MEMS απαιτούν μονωτικά στρώματα. Η επιτυχής πρακτική μέθοδος ήταν η χρήση των πλακιδίων πυριτίου και βοριοπυριτικού γυαλιού σαν «σάντουιτς» [105]. Αυτά τα πλακίδια συνδέονταν μεταξύ τους με τη λεγόμενη διαδικασία ανοδικής σύνδεσης. Ωστόσο, η διαφορά στη θερμική επέκταση των υαλοπινάκων και των πλακιδίων πυριτίου ήταν ένα πρόβλημα, που προκαλούσε ισχυρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία και ακόμη και τη στρέβλωση, ή το κλείσιμο των μικρομηχανικών δομών. Η λύση ήταν η χρήση μόνο πολύ λεπτών μονωτικών γυάλινων στρωμάτων μεταξύ των πλακιδίων πυριτίου. Αργότερα, οι κατασκευαστές γυαλιού, όπως για παράδειγμα οι Corning και Hoya, εισήγαγαν υαλοπίνακες με χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής που ταιριάζουν με το πυρίτιο.

Η μαζική μικρομηχανική επέτρεψε τη σχεδίαση αλλά και την κατασκευή διάφορων προϊόντων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί αυτά τα προϊόντα ήταν οι αισθητήρες πίεσης, τα επιταχυνσιόμετρα κ.λπ. Καθώς η μαζική κατεργασία παρείχε μια εγγενή συσκευασία στο επίπεδο των δισκίων των μικρομηχανικών δομών, ήταν εφικτός ο ακριβής έλεγχος της απόσβεσης των αερίων των επιταχυνσιόμετρων, καθώς και η πίεση αναφοράς των αισθητήρων απόλυτης πίεσης.

Από την άλλη, στόχος ήταν να αναπτυχθεί μια λεπτή μεμβράνη πολυπυριτίου πάνω από ένα στρώμα διοξειδίου του πυριτίου που θυσιαζόταν [106]. Η ταινία πολυπυριτίου ήταν δεμένη στο υποκείμενο δισκίο πυριτίου και σχεδιάστηκε για να σχηματίσει τη συγκεκριμένη μηχανική δομή (για παράδειγμα οι δομές των πυκνωτών ενός επιταχυνσιόμετρου). Όταν αφαιρούνταν το στρώμα του θυσιαζόμενου αργιλοξειδίου, η μηχανική δομή απελευθερωνόταν για να κινηθεί.

Η υπόσχεση της μικρομηχανικής επιφάνειας του πολυπυριτίου ήταν στην ενοποίηση των μηχανικών δομών με τα ηλεκτρονικά CMOS. Η προσέγγιση ήταν πολύ επιτυχής, ειδικά στην ανάπτυξη επιταχυνσιόμετρων για την εφαρμογή των αερόσακων, που δεν ήταν τόσο απαιτητική για την ανάλυση της επιτάχυνσης. Το πάχος του στρώματος πολυπυριτίου καθορίζει τη μάζα του επιταχυνσιόμετρου και η εγγενής ανάλυση της επιτάχυνσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της μάζας. Έτσι, η μικρότερη μάζα των κατασκευών από πολυπυρίτιο έγινε περιοριστικός παράγοντας για την εφαρμογή που απαιτούσε υψηλή ανάλυση επιτάχυνσης.

Ο έλεγχος της εσωτερικής καταπόνησης των μεμβρανών του πολυπυριτίου ήταν δύσκολος και κατέστησε δύσκολη την απελευθέρωση των μικρομηχανικών δομών. Τελικά, αναπτύχθηκε η εναπόθεση ενός παχιού στρώματος πολυπυριτίου. Μετά την επίλυση της πρόκλησης της ενθουλάκωσης του επιπέδου του δισκίου, η μικρομηχανική της επιφάνειας πολυπυριτίου παρείχε μικρότερες διαστάσεις με χαμηλότερο κόστος, καθώς

και τη δυνατότητα της μονολιθικής ολοκλήρωσης με συσκευές CMOS και επέτρεψε περισσότερες σύνθετες μηχανικές δομές.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 εμφανίστηκαν δύο ανατρεπτικές τεχνολογίες. Η βαθιά αντιδραστική χάραξη ιόντων (DRIE) του πυριτίου, χρησιμοποιώντας μια πηγή επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος. Από την άλλη η διαδικασία Bosch, κατέστησε δυνατή τη χάραξη των χαρακωμάτων βαθιάς υψηλής αναλογίας σε πυρίτιο [107]. Δεύτερον, η ανάπτυξη πλακιδίων πυριτίου σε μονωτές (SOI) επέτρεψε υψηλής ποιότητας σχετικά παχιά στρώματα μονοκρυσταλλικού πυριτίου για μικρομηχανικές κατασκευές [108]. Μέσω αυτών των καινοτόμων διαδικασιών, οι τεχνολογίες MEMS αποτελούν μια πραγματική πλατφόρμα γενικής τεχνολογίας και κατασκευής.

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών CMOS με συσκευές MEMS υπήρξε ένα αξιοσημείωτο θέμα έρευνας και ανάπτυξης μέσα στα χρόνια [109]. Τόσο η μία τεχνολογία, όσο και η άλλη έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως πριν αλλά και μετά την ενσωμάτωσή τους. Η βασική πρόκληση ήταν ο διαφορετικός ρυθμός ανάπτυξης των διεργασιών MEMS και CMOS. Επιπλέον, το κόστος της περιοχής ενός δισκίου CMOS γίνεται όλο και πιο ακριβό. Τα εξαρτήματα CMOS γίνονται μικρότερα, αλλά η μικρογραφία των συσκευών MEMS περιορίζεται από την ανάλυση του αισθητήρα και το απαραίτητο φυσικό μέγεθος. Οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν υιοθετήσει μια στρατηγική συστήματος σε ένα πακέτο για να ξεπεράσουν την πρόκληση της ένταξης αυτής.

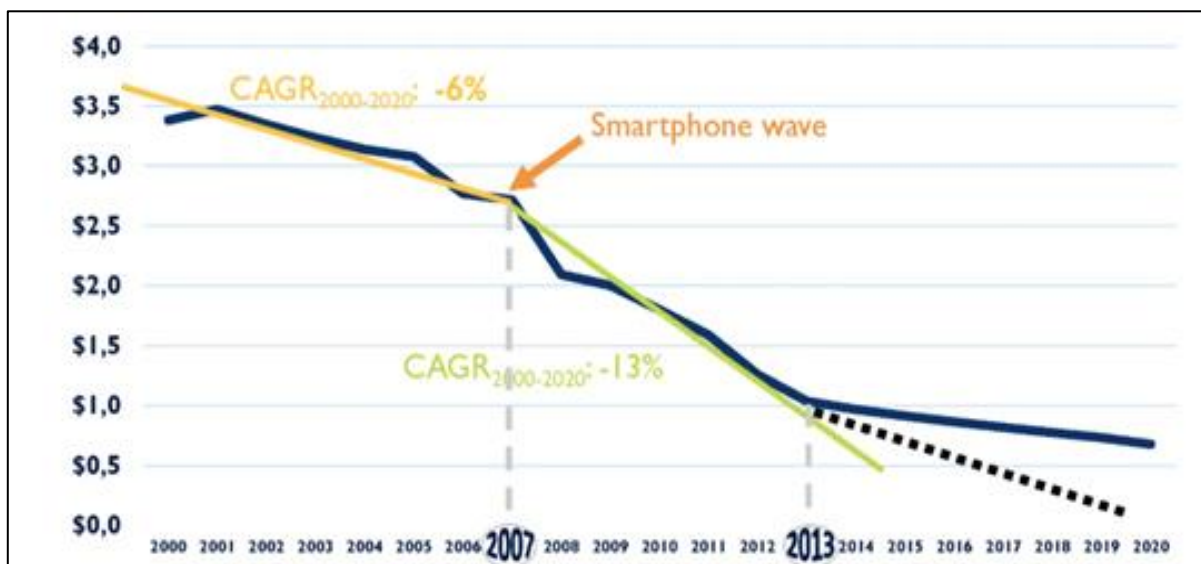
Τα δισκία SOI έχουν επίσης ανοίξει ένα δρόμο προς την ενσωμάτωση των μηχανικών κατασκευών κατά την κατασκευή των δισκίων [110]. Αυτό μπορεί να αποτελεί μια σημαντική αλλαγή στην αλυσίδα της αξίας της κατασκευής των MEMS. Ο κατασκευαστής δισκίων μπορεί να ενσωματώσει τις κύριες μηχανικές δομές στο SOI. Ο κατασκευαστής της συσκευής μπορεί να ενσωματώσει τα κυκλώματα CMOS στο δισκίο αντίστοιχα και τελικά να απελευθερώσει τις μηχανικές δομές με τη διαδικασία DRIE. Γενικότερα, σήμερα υπάρχουν οι δυνατότητες για κατασκευές μεγάλης κλίμακας, ικανές να παράγουν εξαρτήματα σε μεγάλο όγκο.

1.10. Κόστος κατασκευής

Η αγορά των MEMS αναπτύσσεται ταχύτατα. Ενώ υπάρχει αυτή η ανάπτυξη της αγοράς δεν υπάρχει αντίστοιχη ανάπτυξη στα κέρδη. Στα περισσότερα τμήματα της αγοράς, αυτό θα σήμαινε ότι απαιτούνται περισσότεροι αυτοματισμοί και τυποποίηση. Στον κόσμο των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων, οι διορθώσεις δεν είναι τόσο απλές. Ακόμη και όταν κάτι μπορεί να αυτοματοποιηθεί, αυτός ο αυτοματισμός δε λειτουργεί πάντα. Στην πραγματικότητα, ενώ οι συσκευές MEMS είναι εξαιρετικά δύσκολο να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν, η επιχειρηματική πλευρά της αγοράς είναι αναμφισβήτητα ακόμη πιο δύσκολη στη διαχείριση.

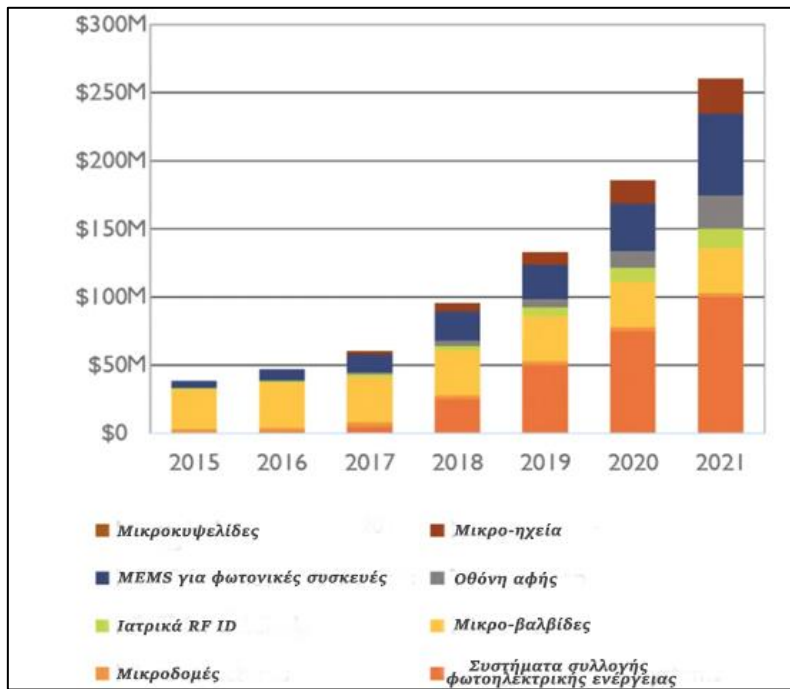
Οι συσκευές MEMS δημιουργούνται μέσω ενός συνδυασμού ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών συστημάτων. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι αδρανειακοί αισθητήρες, όπως τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα. Αυτά τα δύο είναι παρόντα σχεδόν σε κάθε κινητή συσκευή για την ανίχνευση της κίνησης. Ο συνδυασμός των συσκευών MEMS είναι ο τρόπος με τον οποίο το Google Waze, μια δημοφιλής εφαρμογή GPS, μπορεί να δει δεδομένα για την κίνηση στο δρόμο, καθώς και πόσο γρήγορα μετακινείται κανείς, καθώς και πότε είναι πιθανό να φτάσει στον προορισμό του. Όλα αυτά συνδυάζονται με τα τρέχοντα δεδομένα της κυκλοφορίας. Υπάρχουν επίσης πυξίδες, αισθητήρες δόνησης, καθώς και αισθητήρες αφής για την ασφάλεια.

Δισεκατομμύρια από αυτές τις μικροσκοπικές μονάδες πωλούνται κάθε χρόνο. Ωστόσο, αρκετοί κατασκευαστές MEMS αναφέρουν ότι τα κέρδη μειώθηκαν γρηγορότερα από ό, τι την αύξηση του όγκου των πωλήσεων. Η πτωτική πίεση των τιμών κυριάρχησε σε αυτήν την αγορά για σχεδόν μια δεκαετία, από τότε που τα smartphone άρχισαν να αντικαθιστούν τα κινητά τηλέφωνα (Διάγραμμα 2.3: Μείωση των τιμών των MEMS).



Διάγραμμα 2.3: Μείωση των τιμών των MEMS [111].

Εν τω μεταξύ, υπάρχουν και άλλες συσκευές MEMS που πωλούνται σε πολύ χαμηλότερη ένταση, όπως τα ευαίσθητα στην πίεση διαφράγματα για μικρόφωνα, τα μικροσκοπικά ηχεία και οι αισθητήρες των δακτυλικών αποτυπωμάτων με βάση τα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Τα τσιπ για αυτά τα τμήματα της αγοράς παρέχουν σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις στις επενδύσεις, αλλά δε διαθέτουν επαρκή ζήτηση για την επίτευξη οικονομικών κλίμακας. Έτσι, ενώ αυτό το τμήμα της αγοράς είναι δυνητικά προσοδοφόρο για ορισμένες εταιρείες, η επεκτασιμότητα είναι περιορισμένη και ο ανταγωνισμός αυξάνεται (Διάγραμμα 2.4: Μελλοντικές αγορές των MEMS).



Διάγραμμα 2.4: Μελλοντικές αγορές των MEMS [111].

Για την ομάδα των εμπορευμάτων, ο στόχος είναι να δημιουργηθεί μια πιο τυπική προσέγγιση στη μεταποίηση. Για το τελευταίο, το κλειδί παραμένει αρκετά μπροστά από την καμπύλη για να μεγιστοποιήσει τα κέρδη, επειδή ένα μέρος αυτής της τεχνολογίας εξακολουθεί να εξελίσσεται.

Η ποικιλομορφία των δομών των φυσικών συσκευών και των αρχιτεκτονικών διεργασιών που χρησιμοποιούνται για τα MEMS θέτει μια πρόκληση στην τυποποίηση της κατασκευής των MEMS. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξει κάποιο επίπεδο τυποποίησης μέσα σε μια οικογένεια αισθητήρων. Για παράδειγμα, τα αδρανειακά MEMS όπως τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μια κοινή τεχνολογία πλατφόρμας με κάποιο επίπεδο προσαρμογής για τη δημιουργία διαφοροποιημένων λειτουργιών. Μια τέτοια προσέγγιση θα βοηθήσει στη μείωση του κόστους ανάπτυξης, αλλά και του χρόνου στην αγορά.

Μέχρι στιγμής, ωστόσο, κανείς δεν μπόρεσε να χρησιμοποιήσει ένα kit ανάπτυξης διεργασιών για επιταχυνσιόμετρα ή γυροσκόπια όπως υπάρχει για τα ASIC ή τα SoCs. Πολλοί ειδικοί του κλάδου αναφέρουν ότι, σε γενικές γραμμές, οι προσφορές του χυτηρίου μοιάζουν περισσότερο με έναν κατάλογο αντικειμένων από το είδος των καλά ελεγμένων και εξαιρετικά εκλεπτυσμένων διαδικασιών που διατίθενται για τα ASIC και τα SoCs. Αυτός ο κατάλογος μπορεί να περιλαμβάνει, για παράδειγμα, ένα βήμα χάραξης που είναι εκτός λειτουργίας ή εναπόθεση αλουμινίου που είναι εκτός σειράς. Ωστόσο, ο κατάλογος αφορά περισσότερο την αλλαγή της σειράς των βημάτων της διαδικασίας, παρά τη δημιουργία ενός συνόλου κανόνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του κόστους της ανάπτυξης.

Γενικότερα απαιτείται προσπάθεια για τον καθορισμό ενός συνόλου κριτηρίων του σχεδιασμού (π.χ. κανόνες σχεδίασης, ροή διεργασιών, κανόνες τοπολογικής διάταξης, έλεγχος κανόνων σχεδιασμού). Η ανάπτυξη της διαδικασίας δεν είναι αρκετά γρήγορη. Τα MEMS είναι μια περίπλοκη τεχνολογία από κατασκευαστική άποψη και μπορεί να διαφέρει σημαντικά από το ένα χυτήριο στο άλλο.

Κατά μέσο όρο, η ανάπτυξη της επιτυχημένης μαζικής παραγωγής απαιτεί περίπου τέσσερα έως πέντε χρόνια. Υπάρχουν πολλές εξαρτήσεις εργαλείων και περιορισμοί στις διάφορες παραλλαγές του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, η αρχή λειτουργίας ενός γυροσκοπίου απαιτεί κενό, ειδικά εργαλεία και ευτηκτική σύνδεση. Ένα χυτήριο πρέπει να εξετάσει προσεκτικά πόση απόδοση θα μπορούσαν να αποφέρουν αυτά τα πρόσθετα κόσθη και εργαλεία.

Οι συσκευές MEMS εμπνέουν δέος από την πλευρά του σχεδιασμού. Από την πλευρά της δοκιμής και της κατασκευής, προκάλεσαν ένα διαφορετικό είδος αντίδρασης. Πρόκειται, τελικά, για τη διασταύρωση της μηχανολογίας και της ηλεκτρολογικής μηχανικής, την ένωση δύο μικροσκοπικών κόσμων, που αποτελούν τη βάση μιας από τις πιο περίπλοκες τεχνολογίες στον πλανήτη. Όμως, η επαρκής απόδοση αυτών των συσκευών, η κατανόηση του τι λειτουργεί ή δε λειτουργεί και η εξεύρεση της υλοποίησής τους σε συνδυασμό με τις οικονομίες κλίμακας που έχουν καταστήσει τους ημιαγωγούς προσιτούς, παρουσιάζονται μερικές μνημειακές προκλήσεις στον κόσμο των MEMS. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για αυτό:

- Τα τσιπ των MEMS είναι σαν μαύρα κουτιά. Στην πραγματικότητα, συχνά σφραγίζονται ερμητικά επειδή πολλές από αυτές τις συσκευές πρέπει να λειτουργούν σε κενό. Αυτό καθιστά τη δοκιμή πολύ πιο δύσκολη.
- Η απόδοση εξαρτάται από άλλους παράγοντες εκτός από τη συσκευή MEMS. Συχνά αυτές οι συσκευές συσκευάζονται μαζί με άλλες συσκευές από διαφορετικούς δημιουργούς. Ορισμένες είναι ευαίσθητες στη θερμότητα και την πίεση και επειδή είναι δύσκολο να δοκιμαστούν δεν υπάρχει απλός τρόπος για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας.
- Ο ανταγωνισμός για πολλές από αυτές τις συσκευές είναι πολύ υψηλός για να απαιτήσει περισσότερες επενδύσεις, αλλά η διαδικασία δημιουργίας αυτών των συσκευών μπορεί να είναι αργή και ακριβή. Αυτό κάποιες φορές περιορίζει την καινοτομία τόσο στη διαδικασία όσο και στις ίδιες τις συσκευές MEMS.

Οι διαδικασίες γενικά είναι καλά αναπτυγμένες για τα επιταχυνσιόμετρα, τα γυροσκόπια και τους χωρητικούς αισθητήρες πίεσης ή τους αδρανειακούς αισθητήρες που αντιπροσωπεύουν τον υψηλότερο όγκο της αγοράς των MEMS. Από την άλλη όμως, αυτή η διαδικασία είναι περιοριστική. Λόγω της απόδοσης της επένδυσης (ROI), οι κατασκευαστές

διστάζουν να κάνουν μεγάλες αλλαγές στη δημιουργία. Ακόμα και τότε, δεν υπάρχουν εγγυήσεις ότι αυτές οι συσκευές θα λειτουργούν όταν συνδυαστούν σε πακέτα με άλλους αισθητήρες.

Πρέπει να καθοριστεί μια διαδικασία και ένα σύνολο προδιαγραφών για ένα συγκεκριμένο τύπο πακέτου. Οι μικρότεροι πελάτες θα μπορούσαν να ορίσουν κάτι εντελώς νέο, οπότε μπορεί να υπάρχει απώλεια απόδοσης εκεί [112]. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε νέες περιοχές εφαρμογής των MEMS, όπου ο όγκος είναι χαμηλότερος, αλλά τα κέρδη είναι δυνητικά υψηλότερα. Η αγορά των MEMS χωρίζεται μεταξύ των εξαιρετικά αδρανειακών αισθητήρων και άλλων τύπων συσκευών που βασίζονται σε ένα μείγμα προηγμένων υλικών, όπως τα πιεζοηλεκτρικά υποστρώματα και RF-SOI. Πλέον διανύεται η εποχή του IoT, όπου υπάρχει ανάγκη για πολλούς αισθητήρες. Υπάρχει μια έκρηξη του όγκου, η οποία είναι πολλαπλασιαστική για τις επενδύσεις και τη δυναμικότητα.

Μία από τις αναδυόμενες λύσεις για τη βελτίωση της κερδοφορίας περιλαμβάνει νέα σχήματα της συσκευασίας. Σήμερα, η πλειονότητα των αισθητήρων MEMS ενθυλακώνεται σε μια ένωση χύτευσης με πολυμερή βάση, η οποία χρησιμοποιείται για την προστασία τους. Υπάρχουν όμως και άλλες διαθέσιμες επιλογές, όπως τα προκαλούπια και τα πακέτα quad flat no-lead (QFN) χαμηλού κόστους, τα οποία βελτιώνουν τα οικονομικά για τις συσκευές MEMS, αλλά με κάποιους περιορισμούς.

Το σημείο εισόδου σήμερα για αυτά είναι αρκετά χαμηλό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο εξοπλισμός που υπάρχει ήδη σήμερα για τη δοκιμαστική αγορά. Χρησιμοποιώντας ένα πακέτο QFN μπορεί να διατηρηθεί το ίδιο αποτύπωμα, να προστεθούν περισσότερες λειτουργίες και να μην συρρικνωθούν οι συσκευές.

Η συσκευασία σε επίπεδο «επιπέδου ανεμιστήρα» (FO-WLP) είναι μια άλλη επιλογή που προτείνεται για την αύξηση της λειτουργικότητας σε ένα δεδομένο αποτύπωμα, χωρίς να αυξάνεται σημαντικά η τιμή. Αυτή τη στιγμή κοστίζει περισσότερο επειδή αποτελεί μια εξειδικευμένη αγορά. Γενικότερα, είναι δύσκολες οι διαστάσεις κάτω από 0,6 mm για το συνολικό πακέτο. Διαφορετική συσκευασία είναι διαθέσιμη για διαφορετικές εφαρμογές. Επειδή όμως, η αγορά των MEMS είναι τόσο κατακερματισμένη, δεν είναι σαφές ποια από αυτές τις προσεγγίσεις θα γίνει η πιο συχνή ή πώς θα κλιμακωθεί η τιμολόγηση στη συνέχεια.

Η ζήτηση για τις συσκευές MEMS προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια, καθώς απαιτούνται περισσότεροι αισθητήρες για συσκευές που βρίσκονται είτε σε κίνηση, είτε χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της κίνησης. Αυτό περιλαμβάνει τα πάντα, από τα αυτοκίνητα έως τα ρομπότ και τα ηλεκτρονικά γενικότερα (π.χ. αισθητήρες δακτυλικών αποτυπωμάτων).

Ορισμένες από αυτές τις συσκευές παράγονται σε μεγάλο όγκο. Μερικές προσαρμόζονται εύκολα. Ωστόσο, οι προκλήσεις της κατασκευής και των δοκιμών δε γίνονται ευκολότερες, ειδικά καθώς οι πωλητές των συστημάτων απαιτούν περισσότερη αξιοπιστία, μικρότερα πακέτα και με λιγότερα χρήματα από το παρελθόν. Αυτό συνεπάγεται μία πολύ «σκληρή» αγορά και πρόκειται να γίνει ακόμη περισσότερο, επειδή η καινοτομία που απαιτείται για την επίτευξη αυτών των στόχων κοστίζει χρήματα, τόσο όσον αφορά τις εκ των προτέρων επενδύσεις όσο και τον εξοπλισμό.

Όλα τα παραπάνω, τείνουν τους κατασκευαστές να αναθέτουν τμήματα της εργασίας εξωτερικά, απαιτώντας περισσότερη τυποποίηση ή χρησιμοποιώντας εναλλακτικούς, λιγότερο δαπανηρούς τρόπους. Φαίνεται ότι θα υπάρξουν περισσότερες αλλαγές σε αυτήν την αγορά. Απαιτείται όμως ο προσδιορισμός του πώς θα μοιάζουν, τότε θα συμβούν και ποιος τελικά θα επωφεληθεί.

1.11. Πρωτοποριακά Μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα – κατασκευαστές

Την τελευταία δεκαετία έχει παρατηρηθεί μία ανοδική πορεία στην κατασκευή των MEMS, καθώς όλο και περισσότερες εταιρείες εμπλέκονται στην κατασκευή τους αλλά και την εφαρμογή τους σε ποικίλους τομείς της βιομηχανίας. Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στους περισσότερους κατασκευαστές MEMS που ενσωματώνουν στοιχεία έρευνας και ανάπτυξης, καθώς και καινοτομία στην παραγωγή τους.

Η microTEC η οποία ενσωματώνει 3D εκτυπώσεις, είναι ο ηγέτης της αγοράς για τυπωμένες τρισδιάστατες μικροδομές και συσκευασίες τρισδιάστατων μικροσυστημάτων. Με περισσότερα από 20 χρόνια εμπειρίας και έμφαση στη μικρογραφία και την ολοκλήρωση των συστημάτων, η microTEC είναι ένας διεθνώς γνωστός προγραμματιστής συμβολαίων και κατασκευαστής MEMS σε διάφορους κλάδους της επιστήμης της υγείας, της αυτοκινητοβιομηχανίας, των καταναλωτικών ηλεκτρονικών και των τηλεπικοινωνιών. Χρησιμοποιεί μια καινοτόμα τεχνολογία κατασκευής πρόσθετων υλικών με χρήση υπεριώδους φωτός και φωτοσυσκευών για την παραγωγή μεγάλων όγκων από τις πιο ακριβείς (μέχρι το εύρος 1μm) τρισδιάστατες τυπωμένες κατασκευές στην αγορά. Η 3DpmT είναι ο αποκλειστικός συνεργάτης της microTEC, της παγκόσμιας εταιρείας εκτύπωσης 3D με έδρα στη Γερμανία, από το 1996. Μαζί, παρέχουν ένα πλήρες εύρος των υπηρεσιών από την ανάπτυξη προσαρμοσμένων προϊόντων έως τη μαζική παραγωγή. Με διάφορες πλατφόρμες από 5 "έως 14", η τεχνολογία τους προσανατολίζεται σε παρτίδες και επιτρέπει την άμεση παραγωγή με την ίδια ακρίβεια, από 1 - 100 εκατομμύρια μέρη. Για τα MEMS, ενσωματώνουν και συνδέουν ενεργά και παθητικά στοιχεία παράλληλα και στις 3 διαστάσεις [113].

Η AARD Technology είναι ο εκπρόσωπος των ΗΠΑ για τη scia Systems GmbH, η οποία αποτελεί Γερμανό προμηθευτή εξειδικευμένου εξοπλισμού επεξεργασίας πλάσματος και δέσμης ιόντων. Προσφέρει συστήματα για επίστρωση και χάραξη για τις βιομηχανίες των MEMS, της μικροηλεκτρονικής και των οπτικών [114].

Η Accurion παρέχει προηγμένα όργανα για τη δημιουργία λεπτής μεμβράνης και την ενεργή απομόνωση των δονήσεων. Η ελλειψομετρία επιτρέπει ακριβείς μετρήσεις των οπτικών ιδιοτήτων και του πάχους στρώσης έως 0,1 nm. Με το φασματοσκοπικό ελλειψόμετρο απεικόνισης EP4, η Accurion συνδυάζει την ελλειψομετρία με τη μικροσκοπία για να επιτρέψει μετρήσεις σε μικρές δομές με πλευρική ανάλυση έως και 1 μm. Όλα τα pixel μετρούνται παράλληλα. Οι άμεσες ελλειψομετρικές εικόνες αντίθεσης παρέχουν γρήγορη ανίχνευση των ελαττωμάτων. Τα πεδία εφαρμογής είναι υλικά 2D, MEMS, βιοτσιπ, ηλιακά κύτταρα, επίπεδα πάνελ, φιλμ Langmuir-Blodgett, πολυμερή κ.λπ. Στο πεδίο του ποιοτικού ελέγχου, το αναφερόμενο φασματοσκοπικό ελλειψόμετρο RSE συνδυάζει υψηλή ταχύτητα (200 φάσματα ανά δευτερόλεπτο) με την ακρίβεια μιας ελλειψομετρικής μέτρησης. Η βέλτιστη απομόνωση των κραδασμών είναι απολύτως απαραίτητη για τη δημιουργία καθώς και για την ανάλυση των πολύ μικρών κατασκευών. Η ενεργή απομόνωση της δόνησης της Accurion είναι η πιο αποτελεσματική λύση για την απομόνωση του ευαίσθητου εξοπλισμού από τις ενοχλητικές δονήσεις. Παραδείγματα εφαρμογής είναι η λιθογραφία, η μικροσκοπία στους ανιχνευτές σάρωσης, η μικροσκοπία των ηλεκτρονίων σάρωσης, η οπτική επιφανειακή προμετρία, η νανο-εξήγηση, η ελλειψομετρία κ.λ.π. [115].

Η Afore προσφέρει λύσεις στις δοκιμές των αισθητήρων για έρευνα και ανάπτυξη σε εργαστηριακή φάση, παραγωγή μεγάλου όγκου και δοκιμές μετά τη συναρμολόγηση του αισθητήρα. Ένα αρθρωτό σύστημα αδρανειακής δοκιμής, το METIS, κυκλοφόρησε τον Μάιο του 2017, προσφέροντας μεγάλη ακρίβεια ποιότητας στη φάση ανάπτυξης των αισθητήρων. Επιπλέον, παρέχει πλήρως αυτόματους ανιχνευτές με φυσικό ερέθισμα (AIOLOS και KRONOS), καθώς διατίθενται και αισθητήρες περιβάλλοντος και κινήσεων. Αυτοί, επιτρέπουν στους κατασκευαστές των αισθητήρων να χρησιμοποιούν όλα τα οφέλη της τεχνολογίας της συσκευασίας κλίμακας των τσιπ [116].

Οι έξυπνες συσκευές, η ανίχνευση του περιβάλλοντος, η ενδοεγχειρητική ανίχνευση του καρκίνου, τα πτυσσόμενα ηλεκτρονικά χαρτιά και οι φορητές ιατρικές συσκευές είναι μερικά παραδείγματα της τεχνολογίας που βασίζεται σε αισθητήρες. Σε αυτές τις τεχνολογίες πρωτοπορεί το Κέντρο Sensor & Actuator Berkeley, ένα Μεταπτυχιακό Κέντρο Ερευνών Βιομηχανίας / Πανεπιστημίου για Μικρο / Νανοηλεκτρομηχανικούς Αισθητήρες & Συστήματα (MEMS / NEMS). Η τρέχουσα έρευνα στη BSAC θα έχει ακόμη μεγαλύτερο αντίκτυπο σε καταναλωτικά, βιομηχανικά και ιατρικά προϊόντα στο μέλλον [117].

Ο Όμιλος Βιομηχανικών Προϊόντων της Canon προσφέρει εξοπλισμό κατασκευής (PVD, χάραξη, λιθογραφία, εξαρτήματα κενού κ.λπ.) για ημιαγωγούς και άλλες βιομηχανίες. Αυτός ο όμιλος δραστηριοποιείται για περισσότερα από 50 χρόνια στην τεχνολογία κενού και στην κατασκευή σχετικών εξοπλισμών. Η σειρά προϊόντων PVD περιλαμβάνει τεχνολογίες που επιτρέπουν την ακριβή εναπόθεση φιλμ με εξαιρετική ομοιομορφία. Αυτά τα προϊόντα μπορούν να προσαρμοστούν για ένα ευρύ φάσμα μεγεθών των δισκίων πυριτίου. Πρόσφατα, κυκλοφόρησαν προϊόντα και εξοπλισμός για τη συγκόλληση δισκίων με μια πηγή ακτίνων Χ. Ο εξοπλισμός συγκόλλησης χρησιμοποιεί μια νέα τεχνολογία που προσφέρει μόνιμη συγκόλληση σε θερμοκρασία δωματίου και χωρίς εφαρμογή υψηλής πίεσης. Όλα τα είδη δισκίων μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνολογία. Η πηγή των ακτίνων Χ είναι μια πηγή μικρο-εστίασης μεταδοτικού τύπου που έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την απεικόνιση υψηλής ταχύτητας. Προσφέρει υψηλή ανάλυση (4μL / S) στα 10W [118].

Η Kyodo International είναι χυτήριο για MEMS, κατασκευαστής συμβολαίων και πάροχος ολοκληρωμένων λύσεων για συσκευές MEMS. Αυτές οι λύσεις περιλαμβάνουν εξοπλισμό όπως αισθητήρες, συσκευές biomed, συσκευές IOT και οπτικές συσκευές για μια ποικιλία εφαρμογών. Η Kyodo παρέχει επίσης προσαρμοσμένες λύσεις και υπηρεσίες σε λεπτές μεμβράνες, στίλβωση δισκίων (CMP), ξηρή και υγρή χάραξη, σχεδίαση και μοτίβο λιθογραφίας νανοαποτύπωσης, συγκόλληση δισκίων κ.λπ.. Η Kyodo παρέχει επίσης στόχους επιμετάλλευσης και υπηρεσίες σύνδεσης στόχων. Επιπλέον η Kyodo International παρέχει συνολικές υπηρεσίες που σχετίζονται με το νανο-αποτύπωμα από την κατασκευή των καλουπιών, την αντιστατική επίστρωση, την υπηρεσία αποτύπωσης, την αναπαραγωγή του καλουπιού και άλλες τεχνολογίες κατασκευής ημιαγωγών. Γενικότερα, αυτή η εταιρεία προσφέρει πρωτότυπες υπηρεσίες MEMS για μεγάλη παραγωγή σε αισθητήρες. Επιπλέον, παρέχει υπηρεσίες σε νεοσύστατες εταιρείες IOT, σε ακαδημαϊκούς, κυβερνητικούς, αμυντικούς, διαστημικούς, καταναλωτές αλλά και σε βιοϊατρικές βιομηχανίες [119].

Η Lyncée Tec είναι ο παγκόσμιος πρωτοπόρος και ηγέτης της πατενταρισμένης τεχνολογίας «Digital Holographic Microscope» (DHM®), με έδρα τη Λωζάνη της Ελβετίας. Προσφέρει ολογραφικά μικροσκόπια με βάση το DHM® για 4D (χρονο-ακολουθία 3D) προφίλ, με ασυναγώνιστη ταχύτητα λήψης χωρίς σάρωση, ανάλυση υπο-νανομέτρου και «in-situ» χαρακτηρισμό της διεργασίας τόσο για εντός όσο και εκτός του επιπέδου ταυτόχρονα. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την ανάλυση των MEMS, την επιθεώρηση των ημιαγωγών υψηλής απόδοσης, τα μικρορευστά, τον υγρό κρύσταλλο κ.λπ.. Για δυναμικό χαρακτηρισμό των MEMS, το DHM σε συνδυασμό με τη στροβοσκοπική μονάδα επιτρέπει 3D μετρήσεις πλήρους πεδίου χωρίς σάρωση XYZ, συμπεριλαμβανομένης της σάρωσης συχνοτήτων και επιπέδου. Το προηγμένο λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων παρέχει τρισδιάστατο δυναμικό βίντεο, παρακολούθηση 3D εντός του επιπέδου και χάρτες

δόνησης της συσκευής για το εύρος κίνησης στο πλήρες πεδίο, καθώς και κατανομή φάσεων [120].

Η MEMS Foundry προσφέρει τυποποιημένες και εξατομικευμένες διεργασίες χυτηρίου διπολικών και δικύκλων πλακιδίων σε δισκία 100 mm και 150 mm. Η MEMS Foundry έχει την εμπειρία να αναπτύξει προσαρμοσμένες ροές διεργασιών των ημιαγωγών γύρω από έναν έξυπνο αισθητήρα, συντονιστή ή οπτική συσκευή MEMS, ξεκινώντας από μια απλή ιδέα έρευνας και ανάπτυξης έως και τη μαζική παραγωγή σε μεγάλους όγκους. Στην καρδιά της Silicon Valley, το MEMS Foundry είναι ιδανικό για πελάτες που πρέπει να αναπτύξουν ένα πλήρες προσαρμοσμένο προϊόν MEMS που απαιτεί μια μοναδική ροή διεργασιών. Η MEMS Foundry προσφέρει την ενσωμάτωση της διαδικασίας πολλών τύπων αισθητήρων που απαιτούν μη τυπικές ροές διεργασιών. Οι έξυπνοι αισθητήρες MEMS χρησιμοποιούνται στην αεροηλεκτρονική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τις επικοινωνίες, τους υπολογιστές, την άμυνα, την ιατρική, το στρατό, την οπτικοηλεκτρονική, τις τηλεπικοινωνίες, τη διαστημική αλλά και τις ασύρματες εφαρμογές [121].

Η Micralyne είναι ένα κορυφαίο ανεξάρτητο χυτήριο για MEMS και κατασκευαστής όγκου νέων συσκευών MEMS με πάνω από 30 χρόνια εμπειρίας στην ανάπτυξη και την κατασκευή των MEMS. Οι λύσεις κατασκευής της Micralyne έχουν χρησιμοποιηθεί σε αισθητήρες MEMS για συσκευές ακριβείας της μέτρησης, τεχνολογία οπτικής μεταγωγής MEMS, εξαρτήματα εργαστηρίου σε τσιπ, μικρο-βελόνες, αισθητήρες πίεσης, αισθητήρες αερίου, επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες θερμικής απεικόνισης και μικρορευστά. Αυτό το μοντέλο χυτηρίου έχει παράξει με επιτυχία προϊόντα για βιομηχανίες όπως τη βιοϊατρική, την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τις τηλεπικοινωνίες και τους βιομηχανικούς αισθητήρες [122].

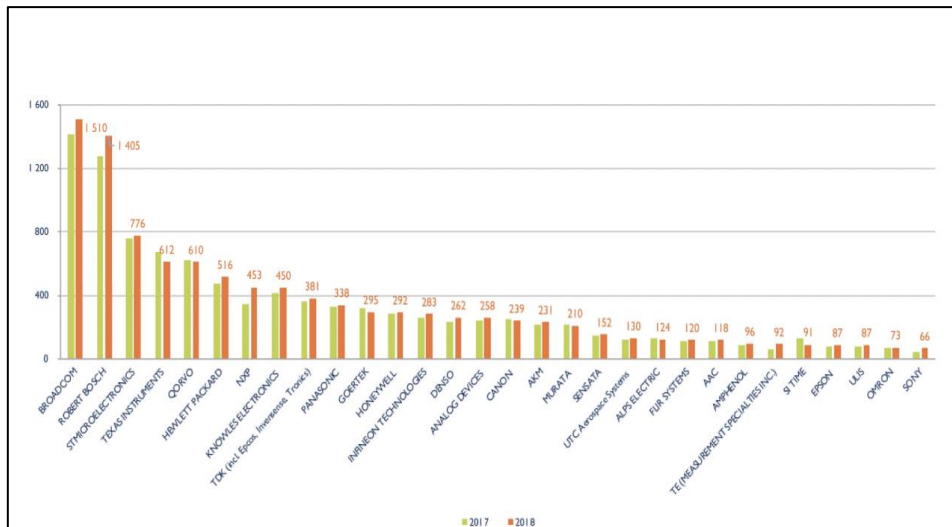
Από το 1980, η Nikon Corporation φέρνει την επανάσταση στη λιθογραφία με καινοτόμα προϊόντα και τεχνολογίες. Η εταιρεία είναι παγκόσμιος ηγέτης στα συστήματα λιθογραφίας ημιαγωγών για τη βιομηχανία της μικροηλεκτρονικής. Έχει εγκαταστήσει περισσότερα από 8.000 συστήματα λιθογραφίας (ημιαγωγών) παγκοσμίως. Η Nikon προσφέρει την πιο εκτεταμένη επιλογή stepper και σαρωτών στην κατηγορία παραγωγής στον κλάδο. Αυτά τα προϊόντα εξυπηρετούν τη βιομηχανία των ημιαγωγών, της επίπεδης οθόνης (FPD) και της μαγνητικής κεφαλής λεπτής μεμβράνης (TFH). Το εκτεταμένο χαρτοφυλάκιο των προϊόντων της Nikon περιλαμβάνει εξειδικευμένες λύσεις λιθογραφίας για εφαρμογές MEMS, LED και συσκευασίας. Η Nikon Precision παρέχει υπηρεσίες, εκπαίδευση, εφαρμογές και τεχνική υποστήριξη, καθώς και πωλήσεις και μάρκετινγκ για τα συστήματα λιθογραφίας παγκοσμίως [123].

Η Plasma-Therm είναι ο κορυφαίος πάροχος προηγμένου εξοπλισμού επεξεργασίας πλάσματος. Τα συστήματα Plasma-Therm εκτελούν κρίσιμα

βήματα στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μικρο-μηχανικών συσκευών, κυψελίδων ηλιακής ενέργειας, φωτισμού και εξαρτημάτων από υπολογιστές και οικιακά ηλεκτρονικά, έως στρατιωτικά συστήματα και δορυφόρους. Συγκεκριμένα, τα συστήματα Plasma-Therm χρησιμοποιούν καινοτόμο τεχνολογία για τη χάραξη και τη δημιουργία λεπτών μεμβρανών. Η σειρά Mask Etcher της εταιρείας για παραγωγή φωτομάσκας ξεπέρασε τα ορόσημα του τεχνολογικού χάρτη για περισσότερα από 15 χρόνια. Τα συστήματα Singulator της Plasma-Therm φέρνουν την ακρίβεια και την ταχύτητα του τεμαχισμού πλάσματος σε εφαρμογές συσκευασίας με τσιπ. Οι κατασκευαστές, τα ακαδημαϊκά και τα κυβερνητικά ιδρύματα εξαρτώνται από τον εξοπλισμό Plasma-Therm, σχεδιασμένο με ευελιξία «lab-to-fab», για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις τόσο της έρευνας και ανάπτυξης, όσο και της παραγωγής. Τα προϊόντα της Plasma-Therm έχουν υιοθετηθεί παγκοσμίως και έχουν κερδίσει τη φήμη τους για την αξία, την αξιοπιστία και την υποστήριξη μιας παγκόσμιας κλάσης [124].

Η ULVAC Technologies, Inc. (ULVAC) ιδρύθηκε το 1992 ως θυγατρική της ULVAC, Inc. των ΗΠΑ. Με έδρα το Methuen της Μασαχουσέτης, η ULVAC παρέχει ένα ευρύ χαρτοφυλάκιο εξοπλισμού κατασκευής για τις βιομηχανίες κενού, υλικών και λεπτών δισκίων. Οι λύσεις της ULVAC περιλαμβάνουν διαφορετικό εξοπλισμό, υλικά, ανάλυση και υπηρεσίες για επίπεδες οθόνες, ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ημιαγωγούς, MEMS και γενικότερα εξοπλισμό βιομηχανίας. Άλλες εσωτερικές υπηρεσίες περιλαμβάνουν τη χυτηριακή χάραξη (για βαθιά οξείδια και σύνθετα υλικά ημιαγωγών), τη θερμική επεξεργασία κ.λ.π.. Η ULVAC υποστηρίζει μια ποικιλία τεχνολογιών παραγωγής MEMS, για εφαρμογές που κυμαίνονται από τους μικροαισθητήρες έως και τις μονάδες καναλιών ροής, τους οπτικούς διακόπτες και τα βιο-MEMS [125].

Στο Διάγραμμα 2.5: Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές MEMS (σε αμερικάνικα δολάρια) αποτυπώνονται οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές των MEMS ανάλογα με τον όγκο των πωλήσεών τους για τα έτη 2017 και 2018.



Διάγραμμα 2.5: Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές MEMS (σε αμερικάνικα δολάρια) [126].

Από το 2017 έως το 2018, οι Broadcom και Robert Bosch (Bosch) παρέμειναν οι παγκόσμιοι ηγέτες των MEMS. Σχεδόν όλες οι εταιρείες παρουσίασαν σταθερή ετήσια ανάπτυξη, αν και λίγο πιο αδύναμη σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο. Αυτή η μικρότερη από την αναμενόμενη ανάπτυξη των εταιρειών των MEMS κατά το 2018 αντικατόπτρισε μια μέτρια αναπροσαρμογή της ανάπτυξης της βιομηχανίας των ημιαγωγών. Το 2018 ήταν η καλύτερη χρονιά μέχρι στιγμής για τη βιομηχανία των ημιαγωγών γενικά. Ωστόσο, η ανάπτυξή της ήταν περίπου 15% μεταξύ του 2017 και του 2018, συγκριτικά μικρότερη από τη σχεδόν 21% αύξηση κατά την περίοδο 2016-2017. Αυτό σχετίζεται πιθανώς, με το γεγονός ότι κατά το τελευταίο τρίμηνο του 2018, οι πωλήσεις των smartphone και των αυτοκινήτων μειώθηκαν, προκαλώντας μια συσσώρευση των αποθεμάτων, τόσο στα τελικά προϊόντα όσο και στα MEMS [126]. Για το 2018, η Broadcom εξακολούθησε να κατέχει την πρώτη θέση στον τομέα των MEMS. Ωστόσο, ακόμη και αν οι αποστολές των κινητών τηλεφώνων επιβραδύνθηκαν κατά τη διάρκεια του 2018, η ανάπτυξη συνεχίστηκε για τα RF λόγω ενός αυξανόμενου αριθμού φίλτρων, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη αξία της μονάδας front-end. Η εισαγωγή του 5G οδηγεί σήμερα σε μεγαλύτερα επίπεδα αυτήν την ευημερία.

Κεφάλαιο 3

Γενικές εφαρμογές

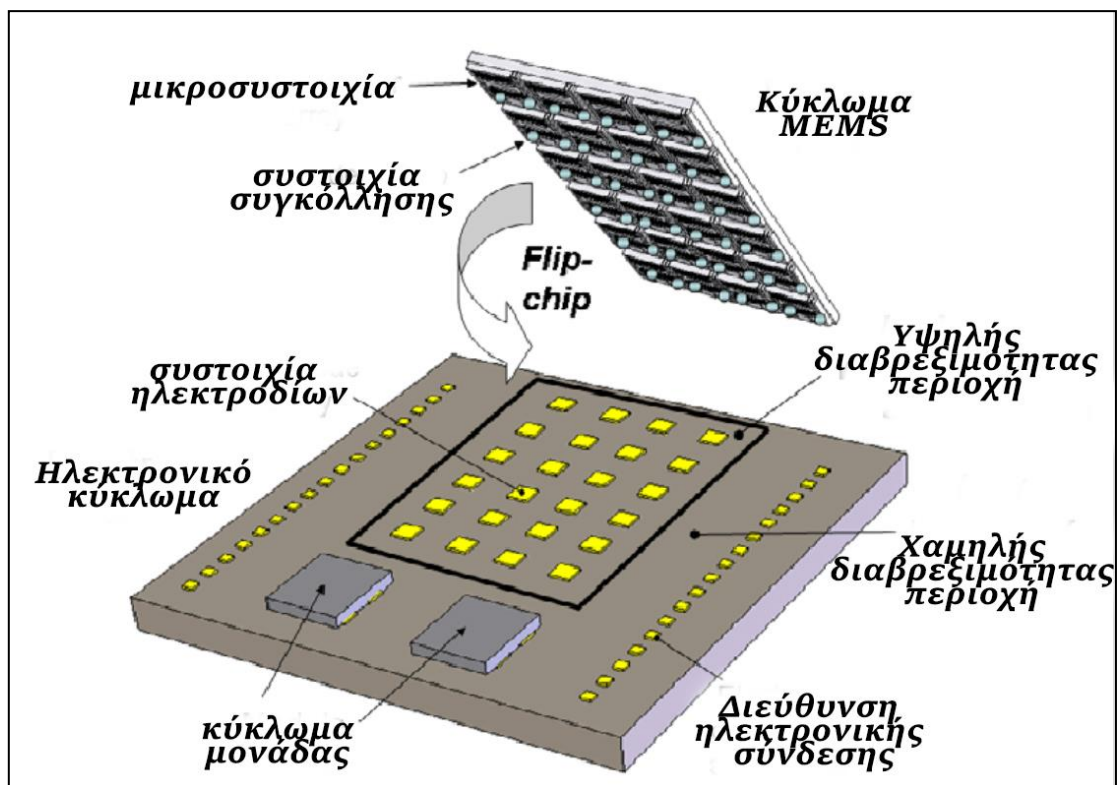
1.12. Εφαρμογές - χρήση

Διαφορετικά MEMS πρέπει να σχεδιαστούν ανάλογα με τις προδιαγραφές, τις απαιτήσεις, τους στόχους και τις εφαρμογές [127]. Έχουν αναπτυχθεί ηλεκτρομηχανικά, ηλεκτρο-οπτο-μηχανικά και ηλεκτρο-χημικο-οπτομηχανικά. Συνήθως, τα οπτικά συστήματα είναι ταχύτερα, απλούστερα, πιο αποτελεσματικά, αξιόπιστα και ανθεκτικά σε σύγκριση με τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα. Ωστόσο, αυτά τα οπτικά συστήματα σχεδιάζονται για διαφορετικές εφαρμογές (π.χ. ασύρματη επικοινωνία, υπολογιστές κ.λπ.). Επιπλέον, έχουν διαφορετικές διαμορφώσεις και γενικά, είναι πολύ δύσκολο να γίνει η αντίστοιχη σύγκριση μεταξύ τους. Για παράδειγμα, τα οπτικά συστήματα δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργοποιητές [128]. Οι απαιτήσεις εφαρμογής πρέπει να μετρηθούν και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η θερμοκρασία, οι δονήσεις και η ακτινοβολία μπορούν να είναι οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να γίνει η προτιμώμενη επιλογή. Ως άλλο παράδειγμα, μπορεί να σκεφτεί κανείς ενεργοποιητές μικρο και νανοκλίμακας. Το μέγεθος του ενεργοποιητή καθορίζεται από την πυκνότητα δύναμης ή ροπής που είναι οι συναρτήσεις των χρησιμοποιούμενων υλικών και του μεγέθους (όγκος). Δηλαδή, το μέγεθος καθορίζεται από τις απαιτήσεις δύναμης ή ροπής και τα υλικά. Καθώς χρησιμοποιούνται MEMS ως συσκευές λογικής πύλης ή αισθητήρα, το ηλεκτρικό σήμα εξόδου (τάση ή ρεύμα) η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (ή πυκνότητα) πρέπει να έχει τις καθορισμένες τιμές. Απαιτούνται γενικότερα μικροηλεκτρονικές συσκευές για την εγγύηση της διεπαφής. Σίγουρα, αυτά τα ηλεκτρονικά, αλλά και τα μοριακά έχουν τεράστια πλεονεκτήματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ασύρματη επικοινωνία, λογική, μνήμες κ.λπ. Έτσι, τα FET και τα MOSFET χρησιμοποιούνται ως τρανζίστορ σταδίου ισχύος και εφαρμόζονται τα IC μικροσκοπικής κλίμακας.

Τα MEMS κατασκευάζονται συνήθως χρησιμοποιώντας τεχνολογία ημιαγωγών συμπληρωματικού μεταλλικού οξειδίου (CMOS), επιφανειακή μικρομαγνητική επεξεργασία και τεχνολογίες και διεργασίες υψηλής αναλογίας (LIGA). Επομένως, τα MEMS αξιοποιούν τις συμβατικές τεχνικές, τις διαδικασίες και τα υλικά μικροηλεκτρονικής.

Τονίστηκε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά MEMS ενσωματώνουν μικροδομές κίνησης ή μικρομετατροπείς που ελέγχονται από IC χρησιμοποιώντας μικροεφαρμογές ακτινοβολίας ενέργειας. Έτσι, πρέπει να ενσωματωθούν μικροδομές / μικρομετατροπείς, συσκευές ακτινοβολίας ενέργειας και IC. Η τεχνική της άμεσης σύνδεσης του τσιπ έχει αναπτυχθεί

ευρέως. Συγκεκριμένα, το συγκρότημα MEMS flip-chip⁹ αντικαθιστά τη ζώνη καλωδίων για τη σύνδεση IC με ενεργοποιητές και αισθητήρες μικρο, αλλά και νανοκλίμακας [129]. Η χρήση της τεχνικής flip-chip επιτρέπει σε κάποιον να εξαλείψει την παρασιτική αντίσταση, χωρητικότητα και επαγωγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα βελτιώσεις των χαρακτηριστικών της απόδοσης. Επιπλέον, το συγκρότημα flip-chip προσφέρει πλεονεκτήματα στην εφαρμογή προηγμένων εύκαμπτων συσκευασιών, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και τη δυνατότητα επιβίωσής τους, μειώνοντας το βάρος, το μέγεθος κ.λπ. Το συγκρότημα flip-chip περιλαμβάνει σύνδεση μικρομετατροπών (ενεργοποιητών και αισθητήρων) απευθείας στο IC. Για παράδειγμα, οι μικρομετατροπείς μπορούν να τοποθετηθούν στραμμένοι προς τα κάτω με προσκρούσεις στα τακάκια που σχηματίζουν ηλεκτρικές και μηχανικές συνδέσεις στο υπόστρωμα των IC. Στην Εικόνα 0.1: Διαδικασία ενσωμάτωσης Flip-chip 3D MEMS-IC χρησιμοποιώντας ρευστή αυτοσυναρμολόγηση αποτυπώνεται ένα MEMS flip chip.



Εικόνα 0.1: Διαδικασία ενσωμάτωσης Flip-chip 3D MEMS-IC χρησιμοποιώντας ρευστή αυτοσυναρμολόγηση [130].

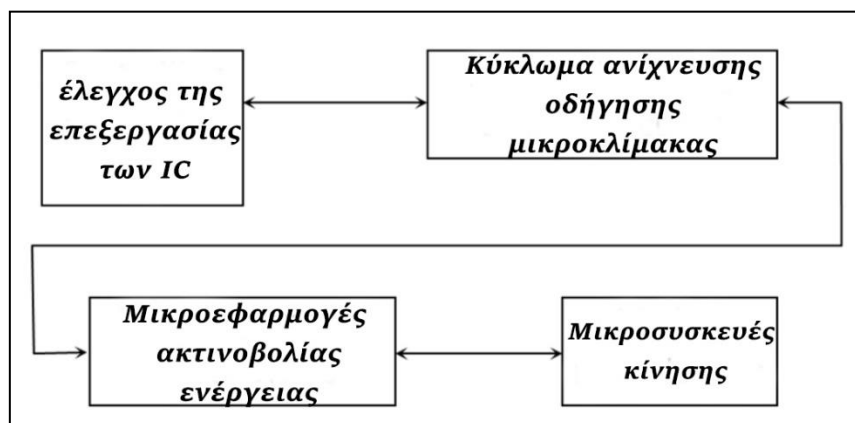
Το ενσωματωμένο MEMS μεγάλης κλίμακας (ένα ενιαίο τσιπ που μπορεί να παραχθεί μαζικά με χαμηλό κόστος χρησιμοποιώντας το CMOS, τη μικρομηχανική, το LIGA και άλλες τεχνολογίες) μπορεί να ενσωματώσει

⁹ Το flip chip, επίσης γνωστό ως ελεγχόμενη σύνδεση chip είναι μια μέθοδος διασύνδεσης συσκευών ημιαγωγών, όπως τσιπ IC και μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS), σε εξωτερικά κυκλώματα με συγκολλήσεις πάνω στο chip [198].

ποίκιλλα διαφορετικά γνωρίσματα, χαρακτηριστικά και τεχνολογίες [131]. Γενικότερα, ενσωματώνει:

- N κόμβους μικρομετατροπών (ενεργοποιητές / αισθητήρες και έξυπνες δομές)
- Συσκευές IC και ακτινοβολίας ενέργειας (κεραίες)
- Οπτικές και άλλες συσκευές για την επίτευξη των δυνατοτήτων ασύρματης επικοινωνίας
- Επεξεργαστή και μνήμες
- Δίκτυα διασύνδεσης (γέφυρες επικοινωνίας)
- Συσκευές εισόδου-εξόδου (IO) κ.λπ.

Μπορούν να δημιουργηθούν διαφορετικές αρχιτεκτονικές και διαμορφώσεις. Τα MEMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των σύνθετων συστημάτων, διαδικασιών και φαινομένων. Για τον έλεγχο των συστημάτων πρέπει να μετρηθούν πολλές μεταβλητές απόδοσης και λήψης αποφάσεων (καταστάσεις, έξοδοι, συμβάντα κ.λπ.). Έτσι, εκτός από την ενεργοποίηση και την ανίχνευση (που εκτελούνται από τους μικρομετατροπείς που είναι ενσωματωμένοι στο IC και τις συσκευές ακτινοβολίας ενέργειας), πρέπει να εκτελούνται υπολογιστικές διαδικασίες, επικοινωνία, δικτύωση, επεξεργασία σήματος και άλλες λειτουργίες. Η Εικόνα 0.2: Υψηλό επίπεδο αποτύπωσης του λειτουργικού μπλοκ (διάγραμμα του MEMS) αντιπροσωπεύει ένα υψηλό επίπεδο αποτύπωσης του λειτουργικού μπλοκ ενός MEMS.



Εικόνα 0.2: Υψηλό επίπεδο αποτύπωσης του λειτουργικού μπλοκ (διάγραμμα του MEMS) [132].

Οι ενεργοποιητές ενεργοποιούν δυναμικά συστήματα. Αυτοί οι ενεργοποιητές ανταποκρίνονται στο ερέθισμα εντολών (σήματα ελέγχου) και αναπτύσσουν ροπή και δύναμη. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός βιολογικών (π.χ. νανοβιοκινητήρων, μέδουσας, ανθρώπινου ματιού, συστήματος κίνησης) και τεχνητών ενεργοποιητών.

Οι βιολογικοί ενεργοποιητές βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικά, μηχανικά-οπτικά-χημικά φαινόμενα και διαδικασίες. Από την άλλη, οι τεχνητοί ενεργοποιητές (ηλεκτρομαγνητικοί, ηλεκτροστατικοί, υδραυλικοί, θερμικοί, ακουστικοί κ.λπ.) είναι συσκευές που λαμβάνουν σήματα ή ερεθίσματα (ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, τάση ή πίεση, θερμότητα κ.λπ.) και αποκρίνονται με ροπή ή δύναμη.

Ένα παράδειγμα είναι τα οχήματα πτήσης. Τα αεροσκάφη, τα διαστημικά σκάφη και οι πύραυλοι ελέγχονται μετατοπίζοντας τις επιφάνειες ελέγχου καθώς και αλλάζοντας την επιφάνεια ελέγχου και τη γεωμετρία των πτερυγίων. Όλα αυτά, μπορούν να ρυθμιστούν και να λειτουργούν με ενεργοποιητές μικροκλίμακας, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία ενός έξυπνου ενεργοποιητή με βάση το MEMS. Αυτή η τεχνολογία του ενεργοποιητή είναι μοναδικά κατάλληλη στις εφαρμογές πτήσης.

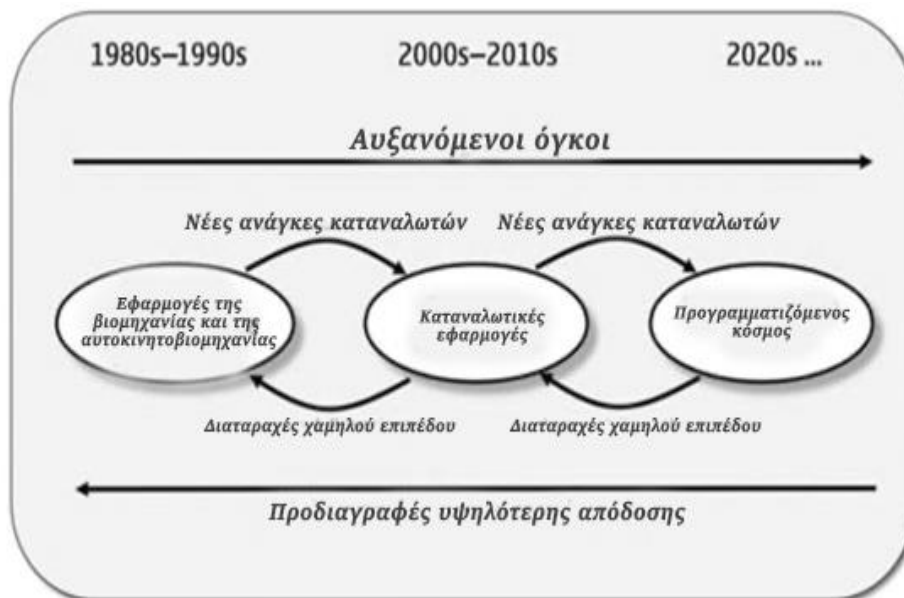
1.13. Νέες τάσεις

Στο τέλος της δεκαετίας του 1990 υπήρχαν μικρομηχανικοί αισθητήρες πίεσης και επιταχυνσιόμετρα σε αποδεκτούς όγκους για την αυτοκινητοβιομηχανία. Τα στοιχεία του αισθητήρα, η ηλεκτρονική ρύθμιση του σήματος και η συσκευασία αναπτύχθηκαν σύμφωνα με το σύστημα του αυτοκινήτου και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Όταν οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης και κινητών τηλεφώνων ενδιαφέρθηκαν για αισθητήρες και άλλες συσκευές MEMS, κατάλληλες για τα προϊόντα τους, αμέσως αντιμετώπισαν ορισμένες προκλήσεις:

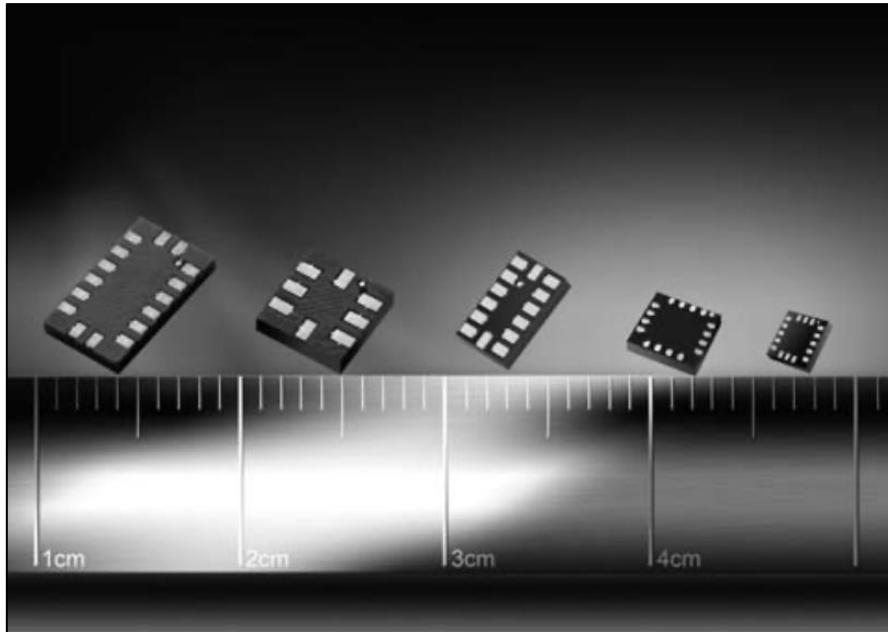
- Δεν υπήρχε η διασύνδεση των ηλεκτρονικών με αρκετά χαμηλή κατανάλωση ισχύος και χαμηλή στάθμη της τάσης της τροφοδοσίας.
- Παρόλο που υπήρχε μεγάλη ποικιλία προτύπων συσκευασίας, η μικρογραφία δεν είχε ακόμα αντιμετωπίσει την κρίσιμη απαίτηση λεπτότητας.
- Οι αυστηρές απαιτήσεις για την απόδοση του αισθητήρα και την αξιοπιστία του, αύξησαν το κόστος και ο έλεγχος και η επαλήθευση τόσο κατά την ανάπτυξη του προϊόντος, όσο και την παραγωγή ήταν πολύ ακριβείς διαδικασίες.
- Ο όγκος παραγωγής δεν ήταν ακόμη επαρκής για εφαρμογές καταναλωτών και η έλλειψη μιας μακροπρόθεσμης δέσμευσης από τη βιομηχανία δεν υποστήριξε τις επενδύσεις για την αύξηση των παραγωγικών δυνατοτήτων.
- Η βιομηχανική δυναμική των καταναλωτικών προϊόντων και των κινητών τηλεφώνων ήταν ενοχλητική για τη λειτουργία των κατασκευαστών των αισθητήρων (δίνοντας έμφαση σε γρηγορότερες αυξήσεις, μικρότερες δεσμεύσεις, ταχύτητα καινοτομίας και ακραίο κόστος).

Η Εικόνα 0.3 Οι συσκευές MEMS κινούνται προς τα καταναλωτικά προϊόντα και θα επιτρέψουν την ενσωμάτωση της νοημοσύνης σε ανθρώπινα περιβάλλοντα, δηλαδή στον προγραμματιζόμενο κόσμο απεικονίζει τις

σημαντικές αλλαγές στη βιομηχανία των MEMS. Τα καταναλωτικά προϊόντα δημιούργησαν μια ζήτηση για συσκευές MEMS χαμηλότερου κόστους με πιο χαλαρές απαιτήσεις απόδοσης. Ειδικά, απαιτείται ηλεκτρονική μέτρηση, βαθμονόμηση, αξιοπιστία και συσκευασία. Η Εικόνα 0.4: Μικροποίηση των συσκευασμένων επιταχυνσιόμετρων MEMS από την ST Micr. απεικονίζει ένα παράδειγμα της μικροποίησης των μονάδων επιταχυνσιόμετρου για καταναλωτικά προϊόντα έως το 2007, καθώς και για ελεγκτές παιχνιδιών και κινητά τηλέφωνα [133]. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000 το έδαφος ήταν πολύ καρποφόρο για νέα καινοτομία και η παγκόσμια βιομηχανία των MEMS ήταν πολύ αισιόδοξη για αυτούς τους νέους τομείς εφαρμογής.



Εικόνα 0.3 Οι συσκευές MEMS κινούνται προς τα καταναλωτικά προϊόντα και θα επιτρέψουν την ενσωμάτωση της νοημοσύνης σε ανθρώπινα περιβάλλοντα, δηλαδή στον προγραμματιζόμενο κόσμο [95].



Εικόνα 0.4: Μικροποίηση των συσκευασμένων επιταχυνσιόμετρων MEMS από την ST Micr. [134].

Οι τρεις πιο σημαντικοί τομείς εφαρμογής είναι τα καταναλωτικά προϊόντα, οι αισθητήρες των αυτοκινήτων και τα ιατροτεχνολογικά προϊόντα. Η αγορά των εφαρμογών του αυτοκινήτου έχει σταθεροποιηθεί αρκετά και οι ιατρικές εφαρμογές γίνονται ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς. Οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για την τεράστια αγορά των καταναλωτικών προϊόντων καθίστανται εφαρμόσιμες στον ιατρικό τομέα, όπου οι νέες έννοιες της απομακρυσμένης υγειονομικής περίθαλψης και των ασύρματων προϊόντων γίνονται όλο και πιο σημαντικές. Οι κορυφαίοι προμηθευτές αυτοκινήτων και των καταναλωτικών κλάδων ήταν διαφορετικοί και η διάβρωση των τιμών και ο ανταγωνισμός δημιούργησαν ενδιαφέροντα νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Ο κλάδος των MEMS φαίνεται να αλλάζει συνεχώς και η αλλαγή της σχετικής σημασίας των τριών πιο σημαντικών τομέων εφαρμογής θα έχει ένα ισχυρό αντίκτυπο στη βιομηχανία των MEMS.

Το επίπεδο ολοκλήρωσης του συνολικού συστήματος σε πακέτο αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Οι αισθητήρες αδρανούς και μαγνητικού πεδίου ενσωματώνονται σε μονάδες 6-αξόνων ή 9-αξόνων με ενσωματωμένη επεξεργασία σήματος, δυνατότητες υπολογιστών και βασικούς αλγόριθμους. Αυτές οι μονάδες «έξυπνων» αισθητήρων (που ονομάζονται και συνδυαστικοί αισθητήρες) αντικαθιστούν τα μεμονωμένα επιταχυνσιόμετρα, μαγνητόμετρα και γυροσκόπια, ειδικά στις εφαρμογές υψηλών προδιαγραφών για καταναλωτές και αυτοκίνητα [135]. Είναι επίσης ορατό ότι η αύξηση του όγκου των αισθητήρων MEMS σε καταναλωτικά προϊόντα είναι κορεσμένη. Τα μικρόφωνα πυριτίου έχουν γίνει η τεχνολογία

που κερδίζει τα καταναλωτικά προϊόντα και το RF MEMS είναι ένας σημαντικός τομέας εφαρμογής. Τα φίλτρα RF duplex και τα ακουστικά κύματος (BAW) είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες υλοποίησης του ραδιοφώνου, καθώς επίσης και άλλα συστατικά των MEMS κερδίζουν μερίδιο αγοράς. Τέλος, οι νέες τεχνολογίες MEMS γίνονται ώριμες για μαζική παραγωγή, όπως για παράδειγμα, τα κυκλώματα χρονισμού που βασίζονται σε συντονιστές MEMS, μικρομετρητές MEMS και μικροεπεξεργαστές MEMS χαμηλής ισχύος.

1.14. MEMS στους εκτυπωτές inkjet

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1, η ικανότητα κατασκευής ακριβών εξαρτημάτων και συστοιχιών μικρομαγνητικών δομών επέτρεψε πρακτικά τη δημιουργία των εκτυπωτών inkjet κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980. Η IBM απέδειξε [136] την αξία της μικρομαγνητικής κατεργασίας του πυριτίου για να επιτύχει την απαραίτητη ακρίβεια εκτύπωσης με τις ενσωματωμένες μεθόδους για τον έλεγχο και τη διαχείριση των μελανιών στην ίδια συσκευή. Δημιουργήθηκε η πρώτη μαζική εφαρμογή μέσω του πυριτίου των MEMS και οι εκτυπωτές inkjet έγιναν το κύριο ρεύμα εκτύπωσης στην αναπτυσσόμενη αγορά της τεχνολογίας των πληροφοριών.

Ο ηλεκτροστατικός έλεγχος των inkjets [137] για σκοπούς εκτύπωσης μελετήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Η ικανότητα χάραξης των ακροφυσίων inkjet μέσα στο δισκίο πυριτίου χρησιμοποιώντας ανισοτροπική υγρή χάραξη KOH και η ενσωμάτωση των ηλεκτροδίων ελέγχου στην ίδια συσκευή (χρησιμοποιώντας λεπτές μεμβράνες και διαδικασίες ημιαγωγών), επέτρεψε μια επαρκή βελτίωση της ποιότητας της εκτύπωσης inkjet στο επίπεδο όπου οι εμπορικές λύσεις ήταν δυνατές.

Ακόμα και σήμερα η εφαρμογή των εκτυπωτών inkjet αποτελεί το ένα τρίτο της συνολικής αγοράς των MEMS. Γενικότερα η εκτύπωση έχει επεκταθεί ως πρότυπο στην κατασκευή ηλεκτρονικών μέσα στα χρόνια [138].

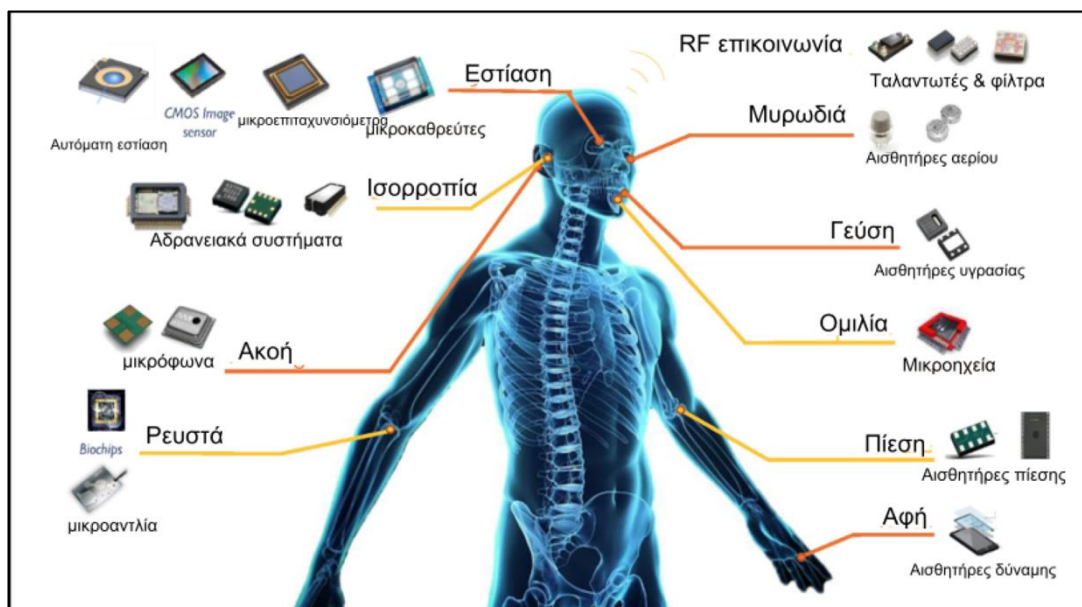
1.15. MEMS στην ιατρική

Ο αυξανόμενος πληθυσμός στις αναπτυσσόμενες χώρες και ο μεγαλύτερος σε ηλικία πληθυσμός στις ανεπτυγμένες χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Κίνας, αμφισβητούν τις υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης παγκοσμίως [139]. Άλλα παγκόσμια φαινόμενα, όπως η παχυσαρκία, απαιτούν νέες λύσεις και επανεξέταση της στρατηγικής της προληπτικής υγειονομικής περίθαλψης. Επιπλέον, η συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο επιτρέπει την πρόσβαση σε προσωπικές πληροφορίες υγείας και απομακρυσμένες υπηρεσίες.

Οι υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης πλησιάζουν πιο κοντά στους καταναλωτές. Οι δικτυακοί επαγγελματίες είναι σε θέση να παρέχουν πιο απαιτητικές θεραπείες. Η διαχείριση των δεδομένων υγείας ενός ατόμου

μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματικά και να υπάρχει πρόσβαση από εξουσιοδοτημένο ίδρυμα ή επαγγελματία υγείας. Η διαχείριση των προσωπικών δεδομένων υγείας μπορεί να γίνει σε καταμετρημένο τρόπο, αλλά και πρόσβαση από το άτομο οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Με βάση αυτά τα πιο εύκολα προσβάσιμα δεδομένα υγείας, οι υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ταιριάζουν στο ιατρικό ιστορικό του ασθενούς.

Επιπλέον, οι ιατρικές θεραπείες μπορούν να μετακινηθούν σε πιο βολικές και λιγότερο δαπανηρές ρυθμίσεις. Ένα μικρότερο σημείο φροντίδας μπορεί να είναι υπεύθυνο για διαγνωστικά και θεραπείες που απαιτούν ένα εξαιρετικά εξελιγμένο περιβάλλον σήμερα. Στην πράξη, αυτό σημαίνει απομακρυσμένες υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης στις ανεπτυγμένες χώρες. Ένα παράδειγμα είναι οι δυνατότητες παροχής υπηρεσίας για χρόνιους ασθενείς ή ηλικιωμένους στο σπίτι. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, η βελτίωση της υγειονομικής περίθαλψης στις αγροτικές περιοχές μπορεί να βασίζεται σε παρόμοιες λύσεις. Οι νοσοκόμες και οι γιατροί σε αγροτικές, απομακρυσμένες τοποθεσίες μπορούν να επωφεληθούν από τη δυνατότητα σύνδεσης με μεγάλα νοσοκομεία και τις δυνατότητες ενημέρωσης και διάγνωσης τους. Στην Εικόνα 0.5: Τρέχοντες και μελλοντικοί μηχανισμοί MEMS που μπορούν να προσαρμοστούν στο ανθρώπινο σώμα αποτυπώνονται όλες οι συσκευές και μηχανισμοί MEMS όπου μπορούν να προσαρμοστούν στο ανθρώπινο σώμα με σκοπό τη βελτίωση ή θεραπεία σε κάποια από τις πέντε αισθήσεις.



Εικόνα 0.5: Τρέχοντες και μελλοντικοί μηχανισμοί MEMS που μπορούν να προσαρμοστούν στο ανθρώπινο σώμα [140].

Ο βασικός παράγοντας για αυτό το είδος αλλαγής είναι η ανάγκη εξεύρεσης λύσεων πολύ χαμηλού κόστους για την υγειονομική περίθαλψη,

χρησιμοποιώντας νέα διαγνωστικά εργαλεία, απομακρυσμένη συνδεσιμότητα και δυνατότητες για αποτελεσματική διαχείριση των προσωπικών δεδομένων υγείας. Τα μικροσκοπικά διαγνωστικά που βασίζονται σε συσκευές MEMS επηρεάζουν με αργούς αλλά σταθερούς ρυθμούς και θα επηρεάσουν δυνητικά τόσο τα μελλοντικά διαγνωστικά όσο και τις θεραπείες. Οι τεχνολογίες MEMS θα είναι επίσης κατάλληλες για συσκευές απομακρυσμένης υγειονομικής περίθαλψης που επεκτείνουν τις υπηρεσίες από τα νοσοκομεία στο σπίτι.

Οι πιο σημαντικές και κλασικές συσκευές MEMS σε ιατρικές εφαρμογές ήταν τα συστήματα μικρορευστών, οι αισθητήρες πίεσης για την παρακολούθηση της αρτηριακής πίεσης και τα επιταχυνσιόμετρα για τους καρδιακούς βηματοδότες. Το μεγαλύτερο δυναμικό για νέες εφαρμογές και επιχειρηματική ανάπτυξη σχετίζεται με τα μικροφάρμακα που χρησιμοποιούνται στη διάγνωση και τη διανομή των φαρμάκων. Οι περαιτέρω ευκαιρίες για MEMS μπορούν να βρεθούν σε διάφορους τομείς της διαγνωστικής, της παρακολούθησης των ασθενών, της χειρουργικής και της θεραπευτικής.

Οι δομές με μικρομαγνητικότητα έχουν καταστήσει δυνατό το χειρισμό πολύ μικρών δειγμάτων υγρών με αξιόπιστο τρόπο. Επιπλέον, η μικρογραφία των MEMS δημιουργεί τη δυνατότητα ταυτόχρονης παράλληλης μέτρησης στο ίδιο σύστημα. Αυτές οι εξαιρετικά ενσωματωμένες λύσεις αλλάζουν τη φύση των «in vitro» διαγνωστικών συσκευών [141].

Πολυκάναλοι ενσωματωμένοι βιοαισθητήρες, προηγμένος χειρισμός των δειγμάτων και νέοι ευαίσθητοι μορφοτροπείς θα επιτρέψουν την ύπαρξη συσκευών στο σημείο φροντίδας που θα είναι ικανές, για τη δημιουργία διαγνωστικών καναλιών ή οποιαδήποτε άλλη ανάλυση (π.χ. ανάλυση των γονιδιωμάτων).

Η συνεχής παρακολούθηση των φυσιολογικών παραμέτρων ενός ασθενούς ανοίγει ευκαιρίες για πιο ακριβή διαγνωστικά. Εκτός από την παρακολούθηση του καρδιακού ρυθμού, οι μετρήσεις του αίματος βοηθούν στην καταγραφή και υπάρχει και η δυνατότητα παρακολούθησης της καθημερινής δραστηριότητας και του πλαισίου του ασθενούς. Κατά τη διάρκεια αυτών των μετρήσεων παρέχονται περισσότερες πληροφορίες που μπορεί να έχουν συσχέτιση με τα φυσιολογικά δεδομένα και που μπορούν να βοηθήσουν στη διάγνωση. Η συνεχής παρακολούθηση και η πιθανή απομακρυσμένη συνδεσιμότητα θα ανοίξουν ένα νέο τμήμα φορητών προϊόντων υγειονομικής περίθαλψης.

Οι συσκευές MEMS χρησιμοποιούνται ήδη στις συσκευές «in vivo». Οι καρδιακοί βηματοδότες χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρα για να ανιχνεύσουν τη δραστηριότητα του ασθενούς, στον έλεγχο του ρυθμού του βηματοδότη [142]. Αυτή η εφαρμογή είναι ένα θαυμάσιο παράδειγμα της

αξιοπιστίας των αισθητήρων των MEMS. Η επόμενη πιθανή εφαρμογή θα μπορούσε να είναι εμφυτεύσιμα συστήματα διανομής φαρμάκων MEMS, όπως οι αντλίες ινσουλίνης [143]. Οι δυνατότητες ενσωμάτωσης του χρονισμού, των αισθητήρων και των ενεργοποιητών των μικρορροιστών σε μια εμφυτεύσιμη συσκευή θα φέρουν επανάσταση στη θεραπεία των διαφόρων χρόνιων ασθενειών, όπως ο διαβήτης.

1.16. MEMS στην αυτοκινητοβιομηχανία

Οι εφαρμογές των αισθητήρων πίεσης και κίνησης στην αυτοκινητοβιομηχανία δημιούργησαν πρακτικά τη βιομηχανία των MEMS. Ο αισθητήρας πίεσης αέρα της πολλαπλής που εισήγαγε η Ford στα μέσα της δεκαετίας του '70 ήταν ο πρώτος μικρομηχανικός αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε ευρέως. Τα επιταχυνσιόμετρα [144] εισήχθησαν για να αντικαταστήσουν τους μηχανικούς διακόπτες στους εκτοξευτές των αερόσακων και αργότερα ενεργοποίησαν τα εξελιγμένα συστήματα ελέγχου.

Η αυτοκινητοβιομηχανία ήδη από τη δεκαετία του 1980 χαρακτηρίστηκε από την προηγμένη διαχείριση των έργων αλλά και τον έλεγχο ποιότητας που περιελάμβανε όλους τους κατασκευαστές και υπεργολάβους των μονάδων. Η διάρκεια ανάπτυξης των προϊόντων ήταν μεγάλη και απαιτούσε δέσμευση για αρκετά χρόνια. Οι προγραμματιστές των MEMS σύντομα έμαθαν να εφαρμόζουν αυτούς τους αυστηρούς κανόνες διαχείρισης του έργου και της ποιότητας. Οι υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας δημιουργήθηκαν μακροχρόνια, με τα προγράμματα ανάπτυξης και με τις προσεκτικές φάσεις δοκιμών και επαλήθευσης.

Οι εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας δημιούργησαν επίσης τις απαιτήσεις για τους ηλεκτρονικούς αισθητήρες, όπως τα επίπεδα τάσης και τις διεπαφές του συστήματος, καθώς και για τη συσκευασία της μονάδας του εκάστοτε αισθητήρα [145]. Δημιουργήθηκαν γενικότερα ισχυρές λύσεις στα συστήματα συσκευασίας. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας και η ανοχή σε κραδασμούς ήταν εξαιρετικά απαιτητικές. Επιπλέον, η εξάρτηση της συχνότητας των αισθητήρων στον έλεγχο του πλαισίου και στους εκτοξευτές των αερόσακων απαιτούσε πολύ προσεκτικό έλεγχο του εγγενούς αερίου και των υπόλοιπων παραμέτρων της δομής.

Οι αισθητήρες κίνησης σε εφαρμογές αυτοκινήτων χωρίστηκαν σύντομα σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορούσε τους αισθητήρες υψηλής απόδοσης 3-5 g για τη μέτρηση της κίνησης του πλαισίου του οχήματος και τους αισθητήρες χαμηλού κόστους 50-200 g για τους εκτοξευτές των αερόσακων. Αυτό δημιούργησε τους διαφορετικούς δρόμους για την ανάπτυξη των κατασκευαστικών λύσεων.

1.17. MEMS στα καταναλωτικά προϊόντα

1.17.1. Ρολόγια και ηλεκτρονικά είδη ένδυσης

Το ρολόι χειρός είναι ένα από τα θαύματα της μικρογραφίας από τις αρχές του 20ου αιώνα. Δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι οι αισθητήρες που μετρούν την κινητική και τη φυσιολογική κατάσταση ενός ατόμου, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες έγιναν μέρος των φορητών συσκευών του καρπού. Αυτοί οι φορητοί υπολογιστές καρπού έγιναν ο μοχλός για την ενσωμάτωση των συσκευών MEMS σε εφαρμογές καταναλωτών (π.χ. στα σπορ και την ευεξία. Το όργανο ελέγχου του καρδιακού ρυθμού, το υψόμετρο, καθώς και το ηλεκτρικό συγκρότημα με το ενσωματωμένο επιταχυνσιόμετρο για την αντιστάθμιση της κλίσης δημιουργούν οφέλη σε κάθε ενεργό άτομο που κάνει σκι ή πεζοπορία. Παρόλο που αυτό το τμήμα των καταναλωτών είναι σχετικά περιορισμένο, οι εφαρμογές αυτές καθόρισαν τις απαιτήσεις των φορητών συσκευών που λειτουργούν με μπαταρία (μικρό πακέτο και πολύ αποδοτική λειτουργία).

Οι συσκευές καρπού δημιούργησαν ένα σημείο εκκίνησης για εφαρμογές φορητών ηλεκτρονικών όπου οι αισθητήρες, οι επεξεργαστές και η διεπαφή του χρήστη ενσωματώνονται σε φορητές συσκευές ή ρούχα [146]. Όλα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της καθημερινής δραστηριότητας ενός ατόμου, τη μέτρηση των φυσιολογικών παραμέτρων, την ανίχνευση του φυσικού περιβάλλοντος και της θέσης ενός ατόμου και για την παρατήρηση των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Η φορητή ηλεκτρονική δημιουργεί μια νέα πλατφόρμα για ψηφιακές υπηρεσίες όταν οι μετρημένες πληροφορίες συνδέονται μέσω του διαδικτύου σε κοινότητες ανθρώπων, που επωφελούνται από την κοινή χρήση των δικών τους δεδομένων με άλλα μέλη [147]. Τα μετρημένα δεδομένα από τα άτομα μπορούν να συγκεντρωθούν σε σημαντικές κοινές πληροφορίες και γνώσεις. Για παράδειγμα, η κοινή χρήση δεδομένων του αθλητισμού, της φυσικής κατάστασης ή της ευεξίας με μια ομάδα αναφοράς, επιτρέπει σε ένα άτομο να συγκρίνει τη δική του απόδοση με την ομάδα αναφοράς.

Η μέτρηση της κίνησης της ανθρώπινης κλίμακας με επιταχυνσιόμετρα και αισθητήρες γωνιακού ρυθμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή και την αναγνώριση σχετικά πολύπλοκων μοτίβων κίνησης, όπως το περπάτημα, το τρέξιμο, την αναρρίχηση, το περπάτημα σε σκάλες κ.λπ.

Ακόμα πιο πολύπλοκα μοτίβα κίνησης (για παράδειγμα, παίζοντας γκολφ ή κάνοντας άσκηση γιόγκα) μπορούν να αναγνωριστούν, να καταγραφούν και να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν το άτομο να μάθει, να επαναλάβει και να διορθώσει αυτά τα πολύπλοκα μοτίβα κίνησης. Οι μέθοδοι επαγγελματικής κατάρτισης καθίστανται επομένως δυνατές για

κάθε σοβαρό ερασιτέχνη αθλητή και τελικά, ο αθλητισμός και τα τυχερά παιχνίδια φαίνεται ότι θα συγχωνευθούν σε διάφορους ενδιαφέροντες συνδυασμούς φυσικής και εικονικής πραγματικότητας.

Τα τελευταία χρόνια, η άνθηση των φορητών συσκευών ευεξίας και των έξυπνων ρολογιών έχει γίνει μια από τις σημαντικότερες επιχειρηματικές ευκαιρίες για τις συσκευές MEMS. Όλοι οι σημαντικοί κατασκευαστές κινητών τηλεφώνων και τα οικοσυστήματα των λειτουργικών συστημάτων των κινητών έχουν διαθέσει στην αγορά τις συσκευές καρπού τους (smartwatches). Στην Εικόνα 0.6: Το ρολόι της Apple αποτελούμενο από αισθητήρες και MEMS αποτυπώνεται ένα smartwatch. Ομοίως, οι μεγάλες αθλητικές μάρκες έχουν αναπτύξει τις ιδέες τους και από την άλλη ένας μεγάλος αριθμός νεοσύστατων εταιρειών έχουν δημιουργήσει τις ιδέες τους. Αυτές οι συσκευές θέτουν νέες απαιτήσεις για τις τεχνολογίες των MEMS.

Τα μικροσκοπικά ηλεκτρονικά, συμπεριλαμβανομένου των MEMS, επιτρέπουν νέους παράγοντες σε μορφή συσκευών (βραχιολάκια, φορητές κάμερες, οθόνες κοντά στα μάτια και έξυπνα γυαλιά) με βασικό περιοριστικό παράγοντα την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται από την κάθε εφαρμογή. Το μέγεθος και το βάρος της μπαταρίας είναι το πιο απαιτητικό ζήτημα στη μικρογραφία των φορητών συσκευών. Συνήθως, οι φορητές εφαρμογές αισθητήρων απαιτούν συνεχώς ενεργές μετρήσεις. Αυτό απαιτεί μια προσεκτικά σχεδιασμένη διαχείριση ενέργειας και ισχύος λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας ορισμένων αισθητήρων και δορυφορικών δεκτών πλοήγησης.

Η χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος επιτυγχάνεται ως αποτέλεσμα ενός προσεκτικού σχεδιασμού συστήματος (ελαχιστοποίηση, συμπίεση, προεπεξεργασία και αποτελεσματική χρήση των βασικών δεδομένων του αισθητήρα) και χρήση συγκεκριμένων προ-επεξεργαστών σήματος του αισθητήρα, που είναι σε θέση να εκτελούν σύντηξη και άλλους βασικούς αλγόριθμους χαμηλού επιπέδου.



Εικόνα 0.6: Το ρολόι της Apple αποτελούμενο από αισθητήρες και MEMS [148].

Η περαιτέρω μικρογραφία των μονάδων MEMS είναι επίσης εξαιρετικά σημαντική για αυτές τις φορητές ασύρματες συσκευές. Απαιτούνται πολύπλοκες μικροσκοπικές μικρομονάδες με επεξεργασία σήματος, μικροελεγκτές και ασύρματη συνδεσιμότητα. Αυτές οι μικροσκοπικές μονάδες αισθητήρων συνδέονται επίσης με τις υπηρεσίες «cloud backend» που έχουν ταυτότητα και πρωτόκολλα επικοινωνίας.

1.17.2. Κάμερες, οθόνες και προβολείς

Οι προβολείς και οι οθόνες προβολής έγιναν ένας νέος οδηγός ανάπτυξης των MEMS μετά την εφεύρεση των συσκευών μικρο-καθρέφτη στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Η τεχνολογία ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (DLP) από την Texas instruments ήταν μπροστά από την εποχή της, σε σχέση με την πολυπλοκότητά της όταν παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1993 [149]. Βασισμένη σε ψηφιακά ελεγχόμενους μικρο-καθρέπτες αλουμινίου, το τσιπ DLP επέτρεψε τη μικρογραφία των βιντεοπροβολέων όταν οι προσωπικοί υπολογιστές έγιναν το κύριο εργαλείο για τη δημιουργία παρουσιάσεων.

Η μικρογραφία των προβολέων, τους έκανε φορητούς. Η περαιτέρω μικροποίηση εξαρτάται κυρίως από την κατανάλωση ισχύος και την απόδοση της πηγής του φωτός, καθώς και τη θερμική διαχείριση της συσκευής. Εκτός από τους προβολείς LED, εμφανίζονται επίσης πηγές λέιζερ (Εικόνα 0.7: Προβολέας οθόνης βασισμένος σε MEMS , ακόμη και πηγές λέιζερ RGB [151].

Ωστόσο, οι συσκευές αντανάκλασης που βασίζονται σε μικρο-καθρέφτες έχουν συναντήσει μεγάλο ανταγωνισμό από άλλες τεχνολογίες, όπως τις ολογραφικές οθόνες που μπορούν να είναι πολύ πιο αποδοτικές [152].



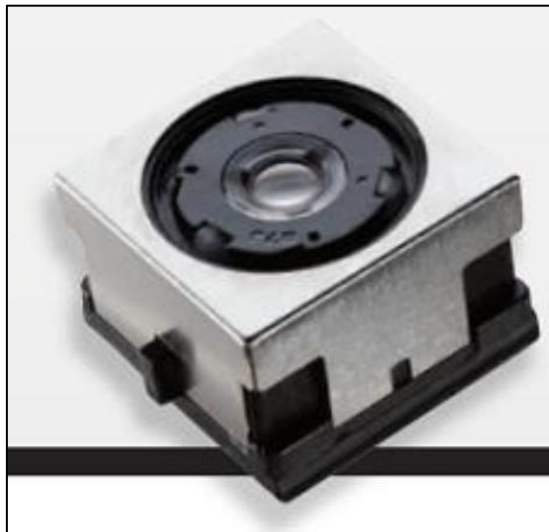
Εικόνα 0.7: Προβολέας οθόνης βασιζόμενος σε MEMS [150].

Γενικότερα έχει παρουσιαστεί μια ποικιλία από οθόνες με τεχνολογία MEMS, με βάση τη χρήση των τεχνολογιών των μικρομέτρων. Σε γενικές γραμμές, οι οθόνες που βασίζονται σε μικρο-καθρέφτες χρειάζονται φωτισμό και φακό [153]. Το φως κατευθύνεται από έναν κινούμενο καθρέφτη μέσω ενός φακού για να σχηματίσει ένα pixel εικόνας. Ένα πολύ ενδιαφέρον προϊόν για παράδειγμα το «mirasol» έχει εισαχθεί από την Qualcomm Inc. Η οθόνη mirasol βασίζεται σε δύο ηλεκτρικά αγώγιμες πλάκες με διάκενο αέρα μεταξύ των πλακών. Η εφαρμογή τάσης μεταξύ των πλακών μπορεί να τροποποιήσει τις παρεμβολές που δημιουργούν τα χρώματα. Αυτός ο τύπος ανακλαστικής οθόνης έχει πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και θα είναι μια πολύ πιθανή λύση για φορητές συσκευές με μικρογραφία σε συνθήκες περιβάλλοντος με χαμηλό φωτισμό.

Η σταθεροποίηση της εικόνας έγινε το βασικό χαρακτηριστικό των φωτογραφικών μηχανών SLR και των οπτικών τους. Τα μικροσκοπικά γυροσκόπια χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κίνησης της κάμερας (και για τον έλεγχο των μηχανικών ενεργοποιητών που αντισταθμίζουν την κίνηση). Οι αισθητήρες πυριτίου γωνιακού ρυθμού γίνονται μια εναλλακτική

λύση για πιεζοηλεκτρικές συσκευές στη σταθεροποίηση της εικόνας. Η ψηφιακή φωτογραφία έχει ήδη ανοίξει νέες εφαρμογές για τους αισθητήρες. Η αυτόματη περιστροφή της εικόνας απαιτεί ένα μηχανικό αισθητήρα. Η προηγμένη σταθεροποίηση της εικόνας, η αυτόματη εστίαση (AF) και οι πιο περίπλοκοι αλγόριθμοι για τη βελτίωση της ποιότητας των φωτογραφιών και των εικόνων βίντεο είναι ευεργετικές, ακόμα και για άτομα που δεν έχουν ιδιαίτερη εμπειρία στη φωτογραφία. Ωστόσο, η καθαρή επεξεργασία της εικόνας μπορεί να εκτελέσει πολλές από αυτές τις λειτουργίες, αλλά οι χαμηλότερες καθυστερήσεις επιτυγχάνονται με ειδικό υλικό, συμπεριλαμβανομένων των γρήγορων αισθητήρων των MEMS. Στην Εικόνα 0.8: Κάμερα κινητού τηλεφώνου βασιζόμενη σε MEMS φαίνεται μια κάμερα κινητού η οποία υπάρχει στα περισσότερα smartphones.

Η αυτόματη δημιουργία μεταδεδομένων για ψηφιακές εικόνες βασίζεται κυρίως σε ημερομηνία, ώρα και τοποθεσία [155]. Ωστόσο, πρόσθετες πληροφορίες του αισθητήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πιο ολοκληρωμένα σύνολα μεταδεδομένων. Η ελαφριά κατάσταση, η βαρομετρική πίεση, η υγρασία, η θερμοκρασία, η κατεύθυνση και η κλίση αποτελούν πολύτιμες πληροφορίες στα μεταδεδομένα για την περαιτέρω χρήση και επεξεργασία των εικόνων. Με βάση τα μεταδεδομένα, η κοινή χρήση και η αναζήτηση των εικόνων έχει καταστεί δυνατή σε παγκόσμια κλίμακα σε διάφορες υπηρεσίες του διαδικτύου.



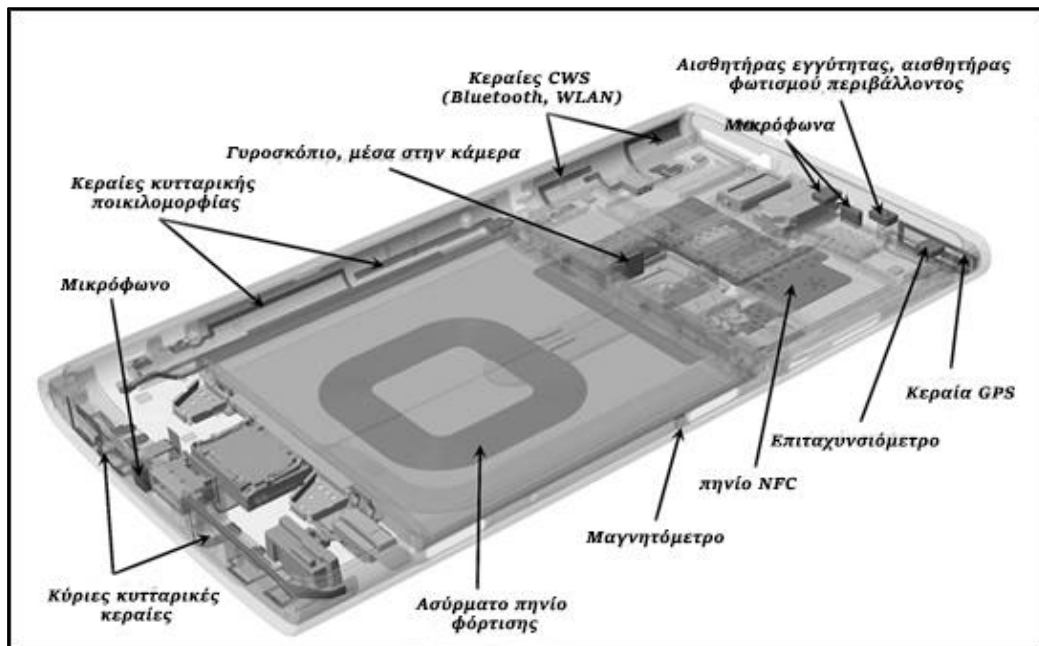
Εικόνα 0.8: Κάμερα κινητού τηλεφώνου βασιζόμενη σε MEMS [154].

1.18. Mems και smartphones

Τα κινητά τηλέφωνα, τα έξυπνα τηλέφωνα (smartphones) και τα tablet αποκτούν συνεχώς μεγαλύτερη κυριαρχία στην ανθρώπινη ζωή. Υπάρχουν σήμερα πάνω από ένα δισεκατομμύριο συνδρομητές ασύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων. Σε αυτήν την τεράστια πλατφόρμα (cloud) που βασίζεται στην αποτελεσματική συνδεσιμότητα σε πραγματικό χρόνο των

φορητών συσκευών, μπορούν να δημιουργηθούν διάφορες υπηρεσίες πληροφοριών.

Ταυτόχρονα, οι φορητές συσκευές έχουν εξελιχθεί σε έξυπνες συσκευές ανίχνευσης. Η Εικόνα 0.9: Η εφαρμογή αισθητήρων και διεπαφών ραδιοφώνου στο Nokia Lumia 920 παρουσιάζει ένα παράδειγμα του εσωτερικού ενός σύγχρονου έξυπνου τηλεφώνου και τις διασυνδέσεις του με το φυσικό περιβάλλον (αισθητήρες και κεραίες).



Εικόνα 0.9: Η εφαρμογή αισθητήρων και διεπαφών ραδιοφώνου στο Nokia Lumia 920 [156].

Σήμερα, όλες οι κινητές συσκευές τελευταίας τεχνολογίας έχουν δυνατότητα ανίχνευσης κίνησης 9 αξόνων και μερικές επιπλέον ένα βαρόμετρο. Οι προηγμένες λύσεις ήχου απαιτούν πολλά ψηφιακά μικρόφωνα εγκατεστημένα στο πλαίσιο της συσκευής. Επιπλέον, οι διάφορες διεπαφές του ραδιοφώνου απαιτούν αποτελεσματικές εφαρμογές πολλαπλών ραδιοφώνων που απαιτούν διάφορα φίλτρα MEMS.

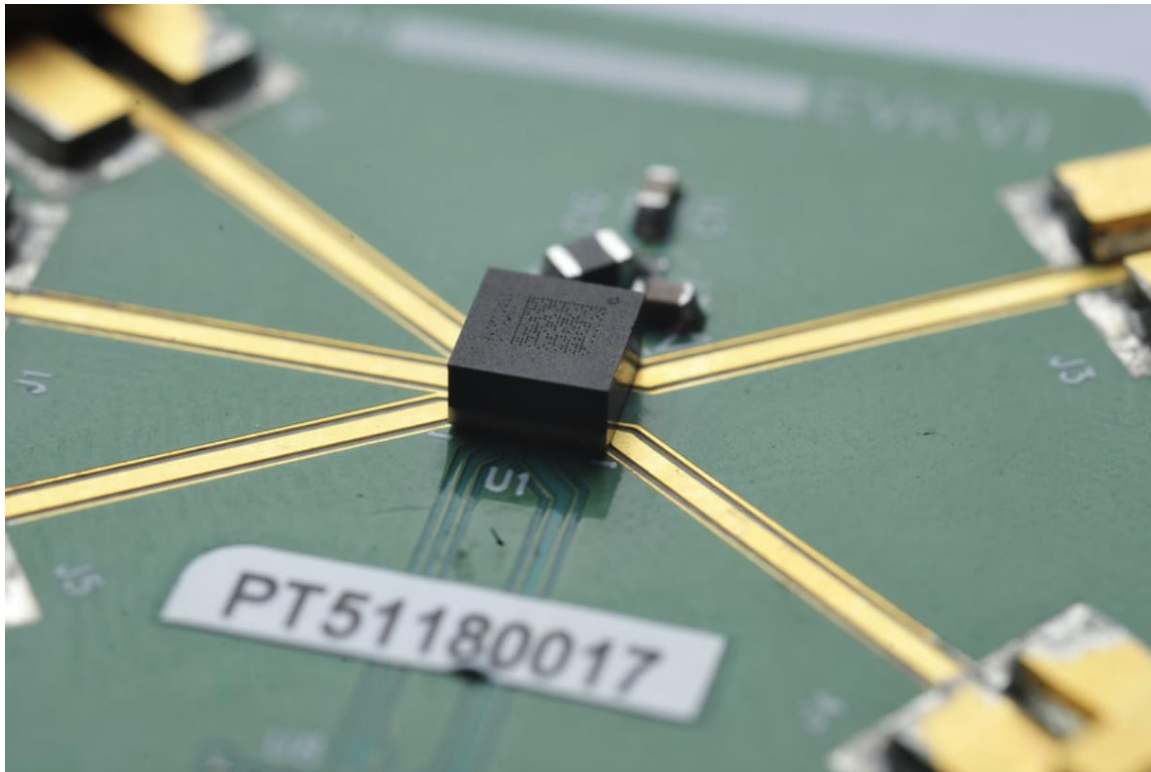
Η πολυπλοκότητα της λειτουργικότητας του αισθητήρα της κινητής συσκευής απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό του συστήματος και των υποσυστημάτων διαχείρισης της ισχύος. Επιπλέον, η τοποθέτηση των εξαρτημάτων του αισθητήρα στην κινητή συσκευή δεν είναι ένα ασήμαντο πρόβλημα. Για παράδειγμα, το γυροσκόπιο έχει ενσωματωθεί στη μονάδα κάμερας για αποτελεσματική σταθεροποίηση της εικόνας και το μαγνητόμετρο σε μια θέση όπου διαταράσσεται ελάχιστα από τις λύσεις υλικού και τα ραδιόφωνα της συσκευής.

Οι μελέτες και οι δοκιμές των εξαρτημάτων των MEMS σε κινητές συσκευές ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 στα εργαστήρια τόσο των κινητών συσκευών όσο και των κατασκευαστών των συστατικών των MEMS. Χρειάστηκαν πάνω από 10 χρόνια για τη δημιουργία των τεχνολογιών, των εφαρμογών και των συσκευών MEMS που κυκλοφορούν σήμερα ευρέως στην αγορά.

1.19. RF MEMS

Το πεδίο των MEMS για εφαρμογές ραδιοσυχνοτήτων (RF), γνωστό και ως RF-MEMS, συγκέντρωσε το ενδιαφέρον από τις πρώτες συζητήσεις σε επιστημονικές λογοτεχνίες πριν από περίπου δύο δεκαετίες [157]. Οι διακόπτες RF-MEMS με αποδεκτή απόδοση γίνονται πλέον διαθέσιμοι στην αγορά, όπως αυτοί από τις Omron και Radant όπου χρησιμοποιούνται υβρίδια και φίλτρα διέλευσης ζώνης για να σχηματίσουν ένα νέο κύκλωμα περιορισμού ισχύος που εξαρτάται από τη συχνότητα [158]. Οι διακόπτες RF-MEMS είναι επίσης ενσωματωμένοι σε πομπούς και κυκλώματα δεκτών, εντός κυψελοειδών σταθμών βάσης σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Εκεί χρησιμοποιούνται για την εναλλαγή φίλτρων για πρόσβαση σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων χωρίς την επανεκκίνηση του συστήματος. Προβλέπεται ότι οι διακόπτες RF-MEMS μπορούν να είναι καλές εναλλακτικές λύσεις και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις κινητές επικοινωνίες λόγω της αύξησης της ζήτησης της υψηλής ταχύτητας σύνδεσης στο διαδίκτυο, η οποία οδήγησε στην ταχεία ανάπτυξη των υποδομών του δικτύου 5G [159].

Αυτό συμβαίνει επειδή σε σύγκριση με τους συμβατικούς διακόπτες RF, οι διακόπτες RF-MEMS (Εικόνα 0.10: *Διακόπτης High RF MEMS με ενσωματωμένο ελεγκτή πυλών*) εμφανίζουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως αμελητέα κατανάλωση ισχύος, λιγότερη χωρητικότητα και αντίσταση, πολύ υψηλή συχνότητα αποκοπής, καλή απομόνωση και υψηλή γραμμικότητα σε ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων.



Εικόνα 0.10: Διακόπτης High RF MEMS με ενσωματωμένο ελεγκτή πυλών [160].

Επίσης, με τις πρόσφατες σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη του διακόπτη RF-MEMS χαμηλής τάσης, η τεχνολογία μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε απομακρυσμένα, ασύρματα ή «πράσινα» αυτόματα συστήματα. Εκτός από αυτά τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά, η αντικατάσταση των τυπικών ομολόγων με διακόπτες RF-MEMS σε συστήματα RF μπορεί να μειώσει την πολυπλοκότητα του υλικού. Αυτό με τη σειρά του μπορεί να μειώσει το κόστος και τους χρόνους παράδοσης, καθώς και την κατανάλωση ισχύος του συστήματος. Η δυνατότητα λειτουργίας του πομποδέκτη, από την άλλη πλευρά μπορεί να επεκταθεί σύμφωνα με πολλαπλά πρότυπα και υπηρεσίες [161]. Τα χαρακτηριστικά ενός υψηλού επιπέδου 5G αντικατοπτρίζουν τις απαιτήσεις και τις αναμενόμενες επιδόσεις των συσκευών RF.

Το ραδιόφωνο και οι εφαρμογές κεραίας στις κινητές συσκευές γίνονται όλο και πιο περίπλοκες. Ο αριθμός των υποστηριζόμενων ραδιοφωνικών προτύπων έχει αυξηθεί, καθιστώντας πιο δύσκολη τη σχεδίαση των σετ των ραδιοφώνων και των κεραίων. Η υπόσχεση των συσκευών των MEMS σχετίζεται με τα ρυθμιζόμενα και εναλλάξιμα εξαρτήματα RF, που μειώνουν τον αριθμό των διακριτών στοιχείων στο μπροστινό άκρο του ραδιοφώνου. Οι διακόπτες MEMS RF, οι συντονισμένοι πυκνωτές MEMS και οι συσκευές που βασίζονται σε αντηχεία MEMS, όπως οι γραμμές καθυστέρησης και τα φίλτρα, αποτέλεσαν το επίκεντρο της εκτεταμένης ανάπτυξης τόσο στα εργαστήρια των πανεπιστημίων όσο και στη βιομηχανία [162].

Ωστόσο, η ανάπτυξη αξιόπιστων συσκευών RF MEMS χρειάστηκε πολύ περισσότερο χρόνο από τον αναμενόμενο στην αρχή. Υπάρχουν ορισμένοι θεμελιώδεις περιορισμοί που καθιστούν δύσκολη την ενσωμάτωση των εξαρτημάτων RF MEMS σε κινητές συσκευές.

Η αγωγιμότητα του πυριτίου ή του πολυπυριτίου ακόμη και με υψηλό βαθμό πρόσμιξης δεν επαρκεί για έναν αρκετά υψηλό συντελεστή ποιότητας για πυκνωτές, επαγωγείς ή διακόπτες στο εύρος συχνότητας των 1 με 5 GHz. Επομένως, απαιτείται η χρήση μικρομηχανικών δομών μεταλλικής μεμβράνης, που οδηγούν σε πολλές άλλες προκλήσεις.

- Η εξάρτηση από τη θερμοκρασία σε συσκευές που αποτελούνται από πολλά υλικά είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί και να μειωθεί.
- Η ενσωμάτωση των συστημάτων RF και IC σε πακέτο παράλληλα με το χαμηλό κόστος (παθητικά εξαρτήματα και συσκευές MEMS) είναι δύσκολη.
- Τα επίπεδα τάσης που απαιτούνται για την ενεργοποίηση των συσκευών RF MEMS είναι συνήθως πολύ υψηλότερα από τα επίπεδα τάσης της τροφοδοσίας των σύγχρονων IC.
- Έχουν αναπτυχθεί ταλαντωτές που είναι βασισμένοι σε συντονιστές MEMS με εύρος συχνοτήτων στα 10 MHz με χαμηλές απώλειες ($Q \sim 200000$) και πολύ καλό επίπεδο θορύβου ($-155 \text{ dBm}/\sqrt{\text{Hz}}$). Ωστόσο, η θερμική σταθερότητα των συσκευών εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση.
- Οι συντονιστές MEMS περιορίζονται παραδοσιακά σε περίπου συχνότητες των 10 MHz. Σε υψηλότερες συχνότητες, όπως για παράδειγμα, στο εύρος των 1-5 GHz, η ανοχή κατασκευής των στενών κενών ηλεκτροδίων, οι πολύ υψηλές τάσεις ελέγχου και οι χαμηλότερες τιμές Q των αντηχείων περιορίζουν την ανάπτυξη πρακτικών συσκευών. Η ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών για συντονιστές MEMS βελτίωσε την απόδοση της ηλεκτρικής ζεύξης.
- Ο πιο σημαντικός αντίκτυπος των MEMS στο κυψελοειδές RF ήταν στα φίλτρα RF και στα duplexers, όπου οι συσκευές MEMS επιτρέπουν την απομόνωση των συντονιστών και των φίλτρων από το υπόστρωμα πυριτίου και συνεπώς τη χρήση υψηλότερης ισχύος εξόδου σε μικρότερους όγκους.

Η πολυπλοκότητα της αλυσίδας της αξίας έκανε επίσης πιο αργή την ανάπτυξη τα προηγούμενα έτη. Οι συσκευές MEMS, τα RF ICs και γενικά οι μονάδες RF έχουν κατασκευαστεί σε πολλές περιπτώσεις από διαφορετικούς κατασκευαστές, σύμφωνα με τις προδιαγραφές των ολοκληρωμένων συστημάτων. Υπήρχαν τόσο τεχνικές όσο και εμπορικές προκλήσεις για τη δημιουργία ολοκληρωμένων λύσεων. Η πρόσφατη ανάπτυξη συνδυάζει σαφώς τις περισσότερες τεχνολογίες μεταξύ τους.

Στα κινητά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, το 5G σημαίνει τεχνολογία πέμπτης γενιάς για τα κινητά. Σε σύγκριση με τις προηγούμενες τεχνολογίες επικοινωνίας (π.χ. 1G, 2G, 3G και 4G), το 5G βελτιώνει

σημαντικά όσον αφορά τον απίστευτα υψηλό όγκο και ρυθμό δεδομένων, τον τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, το μικρότερο λανθάνοντα χρόνο από άκρο σε άκρο (E2E) και το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Με την ανάδυση και την ανάπτυξη του IoT (Internet of Things), που τελικά θα συνδέσει οποιαδήποτε αντικείμενα και περιβαλλοντικές οντότητες στην εμπειρία της καθημερινής μας ζωής, κερδίζοντας τις δικές τους ταυτότητες στον ψηφιακό κόσμο, μέσω του διαδικτύου, τα συστήματα 5G αναμένεται να είναι τα κυρίαρχα. Ο λόγος είναι ότι τα συστήματα αυτά, βρίσκονται στη θέση να παρέχουν έως και 1000 φορές τη χωρητικότητα των τρεχόντων δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Με αυτήν τη νέα τεχνολογία που εφαρμόζεται και χρησιμοποιείται από μια εκτεταμένη κατηγορία εξαρτημάτων (διακόπτες ευρείας ζώνης, μονάδες μεταγωγής, δέκτες σύνθετης αντίστασης πολλαπλών καταστάσεων και φάση πολλαπλών καταστάσεων, μετατοπιστές, αναδιαμορφώσιμα φίλτρα, προγραμματιζόμενοι εξασθενητές βημάτων, υβριδικές συσκευές, καθώς και μικροσκοπικές κεραίες και συστοιχίες) θα απαιτηθεί από τα ίδια τα στοιχεία αυτά η αναβάθμιση για την υποστήριξη την ανώτερης απόδοσης των δικτύων 5G [163].

Τα βασικά υποσυστήματα RF στον πομποδέκτη 5G RF περιλαμβάνουν κεραίες, ρυθμιζόμενα φίλτρα, ενισχυτές ισχύος RF και MIMO (πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων εξαρτήματα) [164]. Σε όλα αυτά τα συστήματα ή υποσυστήματα 5G, μπορεί να φανεί ότι, από την άποψη του υλικού, ο διακόπτης RF είναι ένα από τα πιο θεμελιώδη και κρίσιμα συστατικά που χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση των σημάτων μέσω των διαδρομών μετάδοσης, με υψηλό βαθμό απόδοσης. Τα χαρακτηριστικά RF, ο χρόνος μεταγωγής, ο χειρισμός της ισχύος και η αξιοπιστία μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τις σχετικές ιδιότητες και την απόδοση των εφαρμογών 5G [165].

Υπάρχουν πολλοί εμπορικοί διακόπτες RF που έχουν αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμοι στην αγορά μέχρι τώρα. Για παράδειγμα, το pHEMT (ψευδομορφικό τρανζίστορ υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων) από τη Skywork παρουσιάζει χαμηλή απώλεια εισαγωγής, υψηλή απομόνωση και γραμμικότητα, καθώς και καλό χειρισμό της ισχύος. Βέβαια το εύρος συχνοτήτων της λειτουργίας του περιορίζεται στα 8GHz [166].

Οι ηλεκτρομηχανικοί ρελέ RF διακόπτες από την Pasternack Enterprises παρουσιάζουν πολύ χαμηλή απώλεια εισαγωγής, υψηλή απομόνωση και χειρισμό της ισχύος στο εύρος των συχνοτήτων του κύματος στο πλάτος των χιλιοστών. Ωστόσο, έχει πολύ περιορισμένη διάρκεια ζωής, μεγάλη συναρμολόγηση και υψηλή τάση ενεργοποίησης. Οι διακόπτες RF στερεάς κατάστασης, όπως η δίοδος πυριτίου υψηλής ταχύτητας p-i-n ή FET (τρανζίστορ πεδίου εφέ), επίσης από την Pasternack Enterprises παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής, γρήγορη ταχύτητα μεταγωγής και καλή απομόνωση σε εύρος συχνοτήτων κύματος της τάξεως των mm. Από την άλλη έχουν σχετικά περιορισμένη απώλεια εισαγωγής ειδικά στην περιοχή των kilohertz. Η Keysight Technologies, Inc. προτείνει πολλούς

ηλεκτρομηχανικούς διακόπτες, π.χ. διακόπτες πολλαπλών θυρών, διακόπτες SPDT (μονοπολικοί-διπλοί), διακόπτες παράκαμψης, διακόπτες μήτρας και ούτω καθεξής, με αρκετά καλά RF. Ωστόσο, οι πολύ υψηλές τάσεις λειτουργίας τους δεν είναι πρακτικές με τα κινητά.

Κεφάλαιο 4

MEMS στη μηχανολογία

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη των MEMS απαιτεί γνώση όχι μόνο ενός ενιαίου πεδίου, αλλά και διαφορετικών επιστημονικών κλάδων όπως έχει ήδη αναφερθεί από το πρώτο κεφάλαιο. Αυτή η γνώση περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο την κβαντική μηχανική, τη μοριακή θεωρία της ύλης, τη μηχανική των θερμο-ρευστών και τη χημεία. Η τεχνολογία και οι τεχνικές που εμπλέκονται στα MEMS ομαδοποιούνται σε αυτό που ονομάζεται «μικρομηχανική», που αναφέρεται στις τεχνολογίες και την πρακτική της κατασκευής των τρισδιάστατων δομών και συσκευών με διαστάσεις της τάξης των μικρομέτρων. Ένας κυρίαρχος τομέας στη λειτουργία των MEMS είναι η μηχανολογία. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις εφαρμογές των MEMS στη μηχανολογία καθώς και στα κύρια χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται.

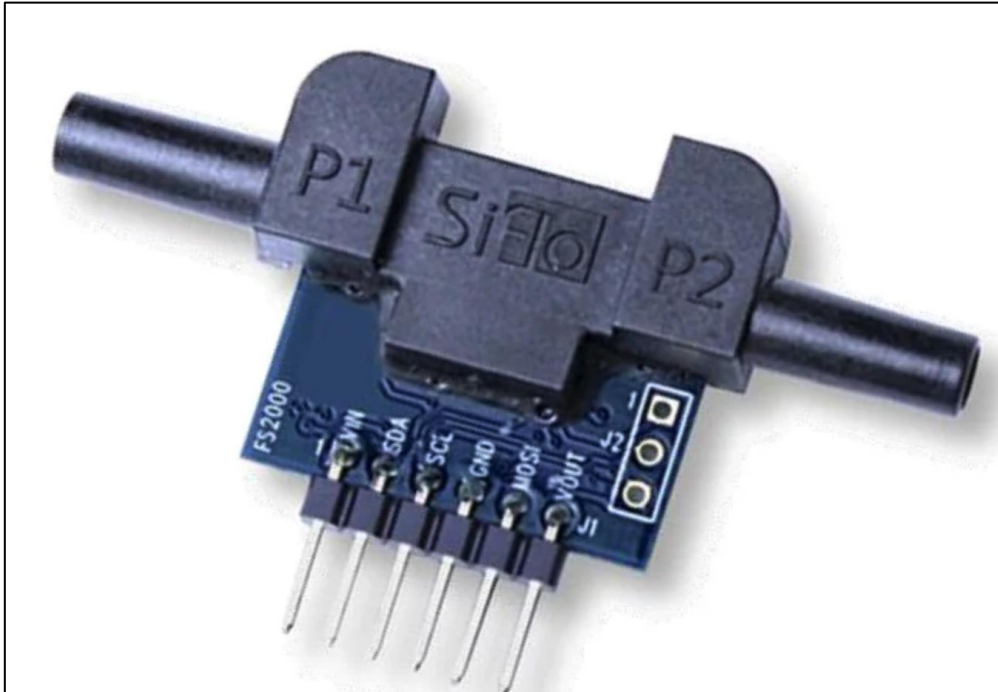
1.20. Έλεγχος της ροής στα ρευστά

Ο τομέας της μηχανολογίας εμπλέκεται στις περισσότερες τεχνολογικές εξελίξεις σήμερα. Τόσο οι πιο γενικοί τομείς όσο και οι πιο εξειδικευμένοι έχουν κάποια βάση στη μηχανολογική επιστήμη. Για παράδειγμα, η απόδοση και η δυνατότητα παρατήρησης των περισσότερων στρατιωτικών οχημάτων επηρεάζονται από τη φυσική των ρευστών είτε άμεσα από την αλληλεπίδρασή τους με τον περιβάλλοντα αέρα / νερό είτε έμμεσα μέσω των πολλών συστημάτων με βάση τα ρευστά που ενσωματώνουν.

Η ικανότητα χειρισμού της ροής ενός ρευστού για τη βελτίωση της απόδοσης είναι τεράστιας τεχνολογικής σημασίας και αυτή τη στιγμή είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στη δυναμική των ρευστών. Τα πιθανά οφέλη του ελέγχου της ροής περιλαμβάνουν τη βελτιωμένη απόδοση και ευελιξία, το αυξημένο εύρος και το ωφέλιμο φορτίο, καθώς και την περιβαλλοντική συμμόρφωση. Ο σκοπός του ελέγχου ροής μπορεί να είναι η προώθηση της μετάβασης, η καταστολή ή και ενίσχυση της αναταραχής. Τα προκύπτοντα οφέλη περιλαμβάνουν επίσης, τη μείωση της οπισθέλκουσας, την αύξηση της ανύψωσης, την ενίσχυση της μεταφοράς της θερμότητας και την καταστολή του θορύβου που προκαλείται από τη ροή. Στην Εικόνα 0.1: Αισθητήρας ροής MEMS (IDT FS2012) αποτυπώνεται ένας MEMS αισθητήρας ροής. Αυτού του τύπου οι αισθητήρες (FS1012) έχουν εντυπωσιακό χρόνο απόκρισης (2 ms).

Η επιθυμία να ελαχιστοποιηθεί η τριβή (τόσο η τριβή της επιφάνειας όσο και η πίεση) και να ελεγχθεί ο διαχωρισμός της ροής προκειμένου να βελτιωθεί η υψηλή ανύψωση και η προωθητική απόδοση ενός ευρέος

φάσματος, παρέχει οδηγό για μια αυξημένη ερευνητική δραστηριότητα σε αυτόν τον τομέα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο διαχωρισμός της ροής κυριαρχείται από το λεπτό στρώμα του υγρού (συχνά πάχους λίγων χιλιοστών), γνωστό ως οριακό στρώμα, που σχηματίζεται στη διεπαφή μεταξύ των εξαρτημάτων μιας συσκευής και του περιβάλλοντος υγρού.



Εικόνα 0.1: Αισθητήρας ροής MEMS (IDT FS2012) [167].

Τα τελευταία 20 χρόνια περίπου, οι γνώσεις σχετικά με την εξέλιξη και τη διάδοση των οριακών στρωμάτων έχουν αυξηθεί σημαντικά. Αυτό, κατέστη εφικτό μέσω της εμφάνισης νέων πειραματικών τεχνικών και της ανάπτυξης και χρήσης εργαλείων υπολογισμού όπως το «Large Eddy Simulation» (LES) [168] και το «Direct Numerical Simulation» (DNS) [169]. Οι διάφορες τεχνολογίες, όπως τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, οδήγησαν επίσης στη δυνατότητα πραγματοποίησης του ενεργού ελέγχου της ροής τόσο στη μακρο όσο και στη μικρο κλίμακα.

Η τεχνολογία των MEMS προσφέρει τη δυνατότητα για ενεργό έλεγχο της μεγάλης κλίμακας των συνεκτικών δομών ροής εντός του οριακού στρώματος. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στη μείωση της τριβής της επιφάνειας ή στο διαχωρισμό της ροής μέσω της χρήσης «έξυπνων εξαρτημάτων» ικανών να ανιχνεύσουν και να αντιδράσουν στην κατάσταση του τοπικού οριακού στρώματος [170].

Προς το παρόν, τα MEMS και ο έλεγχος του στροβιλισμού θεωρούνται μια μεγάλη καινοτομία της μηχανικής των ρευστών. Μία πιθανή εφαρμογή για την τεχνολογία των MEMS είναι ο έλεγχος των ροών των ρευστών μέσω του ενεργού χειρισμού των συνεκτικών δομών που αναπτύσσονται σε ένα οριακό στρώμα. Γενικά, έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι ελέγχου της

ροής σε πρακτικές μηχανικές καταστάσεις, χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνολογίες (αναρρόφηση, εφαπτομενική εμφύσηση, νευρώσεις και γεννήτριες στροβιλισμού). Ωστόσο, όλες οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται μπορούν να θεωρηθούν είτε παθητικές είτε το πολύ ανοιχτού βρόχου ελέγχου με την προσθήκη ενέργειας. Δεν είναι όλες αυτές οι τεχνολογίες απολύτως αποτελεσματικές στον έλεγχο, είτε της στρώσης ελεύθερης διάτμησης, είτε των τυρβωδών ροών. Υπήρξαν επίσης σοβαροί περιορισμοί ως προς την αποτελεσματικότητα των συμβατικών τεχνολογιών του ελέγχου ροής. Για παράδειγμα, στην προσπάθεια μείωσης της τριβής της επιφάνειας με αναρρόφηση (υβριδική στρωτή ροή), οι «κυρώσεις» (βάρος, δαπάνη ενέργειας και κόστος) που σχετίζονται με την τεχνολογία του ελέγχου, συχνά υπερβαίνουν τα οφέλη που απορρέουν από τη χρήση του. Απαιτείται κάποιος τρόπος για τη μείωση όλων αυτών και για την αύξηση των οφελών προκειμένου να επιτευχθεί μια πιο αποτελεσματική στρατηγική ελέγχου.

Ο έλεγχος της ροής είναι πιο αποτελεσματικός όταν εφαρμόζεται σε μια περιοχή της ροής όπου η ευαισθησία είναι υψηλή. Για παράδειγμα, μπορεί να εφαρμοστεί στα κρίσιμα καθεστώτα της ροής όπου οι αστάθειες της ροής μεγεθύνονται γρήγορα. Τέτοιες περιοχές αποτελούν οι περιοχές μετάβασης του οριακού στρώματος και του διαχωρισμού της. Η μείωση της τριβής της επιφάνειας σε ένα σταθερό, μη διαχωριστικό τυρβώδες οριακό στρώμα είναι μια πολύ πιο δύσκολη εργασία. Οι νέες ιδέες για τον έλεγχο της ταραχώδους ροής βασίζονται στο χειρισμό των συνεκτικών δομών που αναπτύσσονται. Στα διάφορα προϊόντα της πρακτικής μηχανικής όπως στα πτερύγια των αεροσκαφών και στα εξαρτήματα των κινητήρων, αυτές οι δομές ροής εμφανίζονται σε κλίμακες δεκάδων έως και εκατοντάδων. Τεχνολογίες όπως οι ραβδώσεις μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία δημιουργίας στροβιλισμού κοντά στο τοίχωμα, για να επιτύχουν μειώσεις της τριβής της επιφάνειας της τάξης του 8% έως και 12%. Ωστόσο, οι νεότερες ιδέες για τον έλεγχο της ταραχώδους ροής χρησιμοποιούν ενεργές τεχνολογίες κλίμακας MEMS, δίνοντας πιθανές μειώσεις της τριβής της επιφάνειας κατά 50% ή και περισσότερο έχουν προωθηθεί από τις πρόσφατες εξελίξεις στην κατανόηση της φυσικής των οριακών επιπέδων, του ελέγχου του χάους και των τεχνολογιών της κατασκευής. Οι φουτουριστικές έννοιες προβλέπονται όπου είναι ενσωματωμένες μεγάλες συστοιχίες φθηνών, έξυπνων, διαδραστικών αισθητήρων ροής και ενεργοποιητών σε αεροδυναμικές επιφάνειες, για να αλληλεπιδρούν με τις οργανωμένες δομές της ροής, που εμφανίζονται τυχαία στο οριακό στρώμα. Μέσω αυτού, επιτυγχάνεται ένας αποτελεσματικός έλεγχος της ροής.

Η έρευνα για την εφαρμογή των MEMS για τον έλεγχο της ροής συνεχίζεται στις ΗΠΑ εδώ και αρκετά χρόνια. Η Ευρώπη συμμετέχει επίσης σε διάφορες δραστηριότητες για τη μελέτη των δυνατοτήτων των MEMS για τον ενεργό έλεγχο της ροής. Αυτές οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν τόσο ακαδημαϊκούς όσο και βιομηχανικούς οργανισμούς. Εκτός από τα ζητήματα της κατασκευής και της εφαρμογής των τεχνολογιών των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, διεξάγονται μελέτες για την ανάπτυξη των βέλτιστων

στρατηγικών ελέγχου και την ανάπτυξη εργαλείων σχεδιασμού και ανάλυσης σε διάφορους τομείς της μηχανολογίας.

1.21. Μηχανικά συστήματα

Σε πολλά συστήματα αισθητήρων, η λειτουργία των συσκευών MEMS περιορίζεται συχνά στη μετάδοση του αρχικού φυσικού σήματος σε μηχανική μετατόπιση ή παραμόρφωση. Αυτή, με τη σειρά της προκαλεί αλλαγή της χωρητικότητας ή της αντίστασης. Συνήθως, οι προκύπτουσες ηλεκτρικές αλλαγές είναι αρκετά μικρές και πρέπει να ενισχυθούν, κάτι που συνήθως γίνεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς ενισχυτές. Ωστόσο, οι θόρυβοι και άλλες πηγές διαταραχής στο μπροστινό άκρο του ηλεκτρονικού ενισχυτή, όπως και οι παρασιτικές χωρητικότητες, καθώς και εσωτερικές πηγές θορύβου του ίδιου του ενισχυτή, αυξάνουν την ευαισθησία τέτοιων συστημάτων των αισθητήρων [171].

Αντί να ενισχυθεί το σήμα της μέτρησης στην ηλεκτρική περιοχή για μια εναλλακτική αλυσίδα απόκτησης δεδομένων, μια κύρια ενίσχυση έχει ήδη πραγματοποιηθεί στον μηχανικό τομέα, χρησιμοποιώντας ένα συμβατό μηχανικό ενισχυτή (mechAMP) [172]. Το σήμα μέτρησης επομένως, ενισχύεται προτού οι ηλεκτρικές διαταραχές του θορύβου να μπορούν να επηρεάσουν το αναλογικό σήμα. Τυπικές εφαρμογές για τέτοιους μηχανικούς ενισχυτές είναι για παράδειγμα οι παθητικοί αισθητήρες, οι οποίοι μετρούν και αποθηκεύουν ένα πρωτεύον σήμα σε μηχανική βάση χωρίς την ανάγκη της ηλεκτρικής ενέργειας [173].

Για αυτούς κυρίως τους μηχανικούς αισθητήρες, ένας ομοίως καθαρά μηχανικός ενισχυτής είναι μια εύκολα ενσωματώσιμη εναλλακτική λύση. Από την άλλη, μπορεί να γίνει η προσθήκη σε ένα διακριτό ηλεκτρονικό ενισχυτή σήματος. Άλλες εφαρμογές είναι οι θερμικοί ενεργοποιητές, οι οποίοι συχνά παράγουν υψηλές δυνάμεις, αλλά εμφανίζουν μόνο μικρές μετατοπίσεις. Προκειμένου να προσαρμοστεί η ακαμψία εξόδου τέτοιων ενεργοποιητών στην ακαμψία εισόδου άλλων υποσυστημάτων, το mechAMP μπορεί να εφαρμοστεί ως μηχανικός μετατροπέας ακαμψίας, παρόμοιος με έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα σύνθετης αντίστασης.

Οι συμβατοί μηχανικοί ενισχυτές είναι γνωστοί για τις εφαρμογές του πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή. Γενικά, αυτοί οι ενισχυτές μπορούν να χωριστούν σε μηχανισμούς με βάση την κάμψη με το μοχλό. Ένας πρώτος ενισχυτής "moonie" με βάση την κάμψη για πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές έχει παρουσιαστεί από δύο παλιότερες μελέτες [174] [175]. Ο μηχανισμός βασίζεται σε μια δομή κελύφους που συγκρατεί έναν πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή κεραμικής δέσμης και στα δύο άκρα, ο οποίος επιτρέπει τη μετατροπή της (μικρής αλλά ισχυρής) διαμήκους μετατόπισης του ενεργοποιημένου πιεζο-κεραμικού σε μια ενισχυμένη εγκάρσια μετατόπιση της δομής του κελύφους. Στην Εικόνα 0.2: MEMS και πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα αποτυπώνονται κάποια πιεζοηλεκτρικά MEMS

επιταχυνσιόμετρα. Τα συγκεκριμένα MEMS μπορούν να λειτουργήσουν σε συνθήκες από -55 °C έως 125 °C.



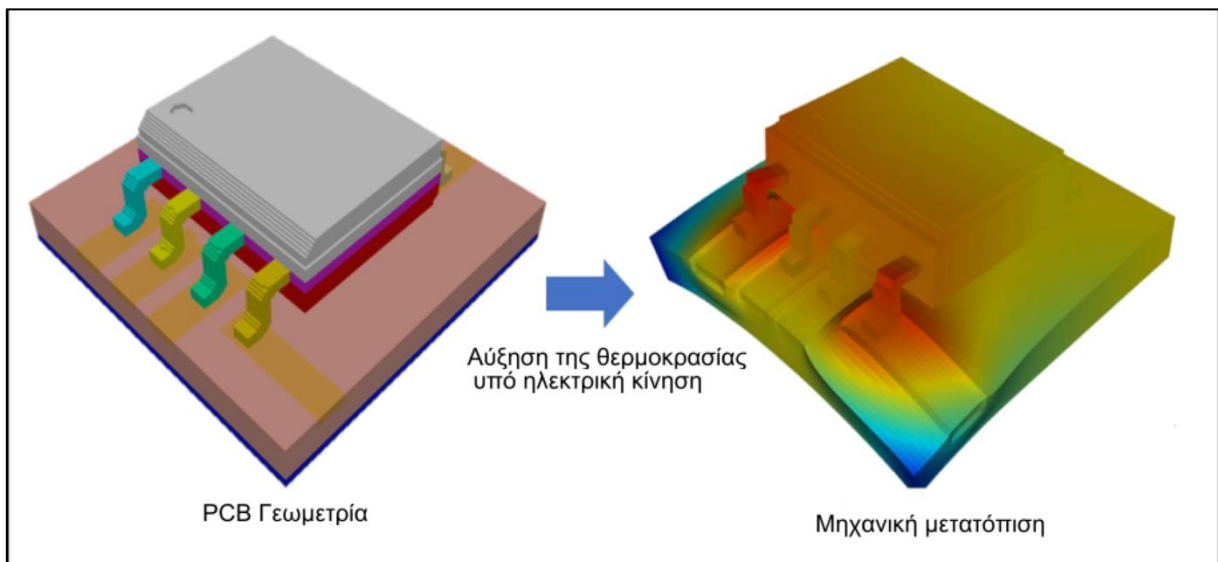
Εικόνα 0.2: MEMS και πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα [176].

1.22. Μηχανική καταπόνησης

Η μηχανική της καταπόνησης είναι μια τεχνολογία αιχμής που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών ειδών για να ακολουθήσει το νόμο του Moore, κάνοντας το τρανζίστορ να εξελίσσεται πιο γρήγορα χωρίς να μειώνεται το μήκος της πύλης του. Η μηχανική της καταπόνησης περιλαμβάνει το «τέντωμα» των ατόμων πυριτίου πέρα από την κανονική διατομική τους απόσταση, η οποία τροποποιεί σημαντικά τις ιδιότητες του πυριτίου. Αυτό μειώνει τις ατομικές δυνάμεις που παρεμβαίνουν στην κίνηση των ηλεκτρονίων μέσω του ημιαγωγού. Επομένως, τα ηλεκτρόνια θα έχουν μεγαλύτερη κινητικότητα, με αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του πυριτίου. Η μηχανική της καταπόνησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικά για την ενίσχυση οποιωνδήποτε συσκευών που βασίζονται σε ημιαγωγούς. Για παράδειγμα, η τεχνολογία της καταπόνησης συμμετείχε νωρίς στην παραγωγή μεγάλου όγκου ημιαγωγών πολλών εταιρειών, όπως της Intel [177], της IBM [178], της Freescale [179] και της Texas Instruments [180].

Αυτή η τεχνολογία έχει λίγες εφαρμογές στη βιομηχανία των MEMS, οπότε ποσοτικά και πειραματικά η συνολική επίδραση του περιορισμού στους πιεζοηλεκτρικούς συντελεστές είναι ζωτικής σημασίας για την

εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στη βιομηχανία των MEMS. Καθώς οι βιομηχανίες των MEMS και των ημιαγωγών μοιράζονται πολλές ιδέες και διαδικασίες κατασκευής, η τεχνολογία της καταπόνησης θα έχει τον ίδιο αντίκτυπο τόσο στα MEMS όσο και στις συσκευές MOS. Για παράδειγμα, το σπάσιμο του κρυστάλλου του πυριτίου προκαλεί ένα σημαντικό γραμμικό ηλεκτρο-οπτικό αποτέλεσμα, το οποίο καθιστά δυνατή την αντικατάσταση του ηλεκτρονικού διαύλου στους σύγχρονους υπολογιστές με μια πολύ ταχύτερη οπτική εναλλακτική λύση, όπως τους διαμορφωτές και τους διακόπτες [181]. Το στέλεχος έχει επίσης σημαντική επίδραση στην πιεζοευαισθησία, έτσι οι συντελεστές ευαισθησίας (PR) χρησιμοποιήθηκαν νωρίτερα για να μελετήσουν την επίδραση του πυριτίου τόσο στις συσκευές ημιαγωγών (PMOS και NMOS) μεταλλικού οξειδίου τύπου p όσο και τύπου n. Στην Εικόνα 0.3: Προσομοίωση καταπόνησης σε εξάρτημα MEMS αποτυπώνεται η καταπόνηση και η τάση σε μια προσομοίωση ενός εξαρτήματος MEMS.



Εικόνα 0.3: Προσομοίωση καταπόνησης σε εξάρτημα MEMS [182].

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τη μόνιμη τάση του πυριτίου. Η πρώτη προσέγγιση προκαλεί μηχανική καταπόνηση σε ένα λεπτό στρώμα πυριτίου μηχανικά, προκαλώντας κάμψη σε αυτό το λεπτό στρώμα. Καθώς αυτός ο τρόπος είναι δύσκολος να εφαρμοστεί στη μαζική παραγωγή, εφαρμόζεται μια νέα μέθοδος που χρησιμοποιεί την υπολειμματική τάση που δημιουργείται κατά τη διαδικασία της μικροκατασκευής, ως αποτέλεσμα θερμικών αναντιστοιχιών, αναντιστοιχιών δικτυωτού πλέγματος και διαδικασιών εναπόθεσης μη ισορροπίας.

Υπάρχουν έρευνες που αναφέρουν τη μηχανική καταπόνηση σε ένα υπόστρωμα πυριτίου. Ένα λεπτό στρώμα διαχωρίζεται από το χύμα υλικό και στη συνέχεια αραιώνεται και συνδέεται με ένα άλλο δισκίο. Αυτό το υπόστρωμα κάμπτεται στη συνέχεια για να προκαλέσει πολύ μεγάλες μηχανικές πιέσεις στο προσκολλημένο στρώμα πυριτίου. Εναλλακτικά, το

δισκίο που είναι φορέας θερμαίνεται έως ότου επεκταθεί ελαφρώς και στη συνέχεια προσκολλάται σε ένα κρύο δισκίο. Όταν κρυώσουν, η θερμική αναντιστοιχία προκαλεί πίεση. Οι Kirk H. R. et al. χρησιμοποίησαν άμεση μηχανική καταπόνηση για την παραγωγή μονοαξονικά τεντωμένου πυριτίου σε μονωτή (SSOI), χρησιμοποιώντας τη σύνδεση πριν από την τάση και τη διαδικασία της ελεγχόμενης διάσπασης [183].

Ένας από τους σημαντικότερους περιοριστικούς παράγοντες για την αξιοπιστία των μικρο-συσκευών και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι η αποτυχία της λεπτής μεμβράνης λόγω υπολειμματικής τάσης. Η εναπομένουσα πίεση στο λεπτό υμένιο μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη παραμόρφωση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της διαδικασίας της μικροκατασκευής. Έτσι, ο χαρακτηρισμός και η μείωση της υπολειπόμενης τάσης σε δομές λεπτού υμενίου είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των μικρο-συσκευών. Η λεπτή μεμβράνη μπορεί να αναπτύξει πολλούς τύπους υπολειμματικής καταπόνησης κατά τη διαδικασία της μικροκατασκευής, όπως θερμική, επιταξιακή και εγγενή πίεση. Η θερμική τάση παράγεται λόγω της ασυμφωνίας της θερμικής διαστολής μεταξύ του λεπτού υμενίου και των υποστρωμάτων, ενώ η ασυμφωνία του πλέγματος που συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια της επιταξιακής διαδικασίας παράγει επιταξιακή πίεση. Σε αντίθεση με τις θερμικές και επιταξιακές καταπονήσεις, η εγγενής τάση προκύπτει κατά την εναπόθεση ενός υμενίου σε συνθήκες μη ισορροπίας, όπως το νιτρίδιο του πυριτίου που εναποτίθεται από την εναπόθεση χημικών ατμών ενισχυμένων στο πλάσμα (PECVD). Από την άλλη πλευρά, η υπολειμματική τάση είναι το κλειδί για την πρόκληση της προ-καταπόνησης για τα άτομα πυριτίου, η οποία μειώνει τις ατομικές δυνάμεις που αλληλοεπιδρούν με την κίνηση των ηλεκτρονίων μέσω του ημιαγωγού. Έτσι, τα ηλεκτρόνια θα έχουν μεγαλύτερη κινητικότητα, με αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Η πιο κοινή υπολειμματική τάση προέρχεται από την αναντιστοιχία της θερμικής διαστολής κατά τη διαδικασία της υψηλής θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, οι ουσιαστικές θερμικές υπολειπόμενες τάσεις (200-800MPa), δημιουργήθηκαν λόγω της αναντιστοιχίας θερμικής διαστολής μεταξύ του μετάλλου και του περιβάλλοντος στρώματος [184]. Αυτό το υψηλό επίπεδο θερμικής υπολειμματικής τάσης προκαλεί αστοχία των μεταλλικών λεπτών φιλμ. Έχει αναπτυχθεί μια αναλυτική έκφραση για την πρόβλεψη αυτής της ανακατανομής της θερμικά υπολειμματικής τάσης σε μια παθητικοποιημένη διασύνδεση [185]. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η αρχική κατάσταση της θερμικής υπολειμματικής τάσης επηρεάζει έντονα την ανακατανομή της θερμικής τάσης. Επιπλέον, αυτή η θερμική υπολειμματική τάση στη διεπαφή προκαλεί ρωγμές στη διασταύρωση μεταξύ του υποστρώματος και του εναποτιθέμενου φιλμ. Για λόγους επίλυσης αυτού του προβλήματος στη μεμβράνη και τη βελτίωσή της, η κατανομή της θερμικής τάσης μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση έχει δείξει ότι η κύρια αιτία αυτού του τύπου ρωγμών είναι η

μεγάλη ακτινωτή και αξονική τάση εφελκυσμού στην άνω επιφάνεια του φιλμ.

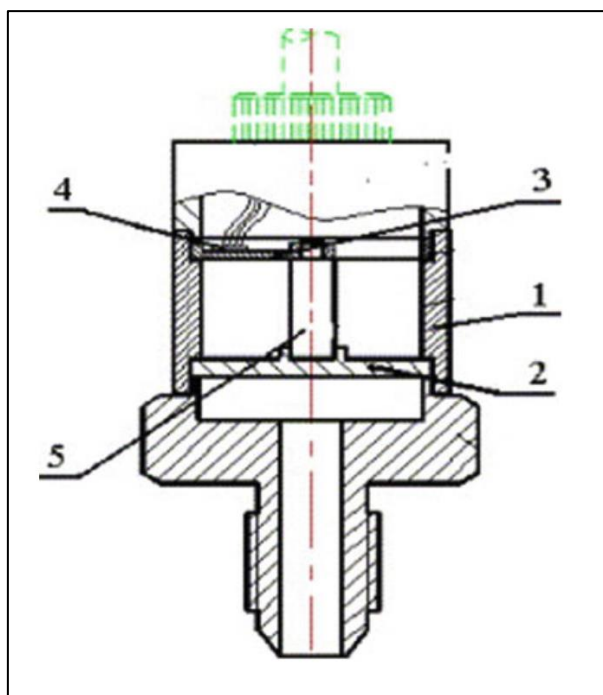
Μια θερμική αναντιστοιχία δεν είναι η μόνη αιτία για την υπολειμματική τάση. Μπορεί να αναπτυχθεί μεγαλύτερη ποσότητα υπολειμματικής τάσης σε μεμβράνες που εναποτίθενται υπό συνθήκες μη ισορροπίας (εσωτερική ένταση). Η συχνότητα διέγερσης του πλάσματος είναι η βασική παράμετρος του ελέγχου της τάσης που προκαλείται από τις ταινίες PECVD, μέσω της ενέργειας βομβαρδισμού ιόντων. Μια μελέτη αναφέρεται στη διακύμανση της τάσης στις μεμβράνες νιτριδίου του πυριτίου που εναποτέθηκαν από τον συντονισμό PECVD-ηλεκτρονίων [186]. Σε αυτή τη μελέτη, μελετήθηκε η υπολειμματική τάση στο φιλμ νιτριδίου έναντι των παραμέτρων απόθεσης, όπως η θερμοκρασία εναπόθεσης, η συνολική πίεση, η μορφολογία της επιφάνειας και το πάχος της μεμβράνης. Με στόχο την ανάπτυξη φωτονικών συσκευών, οι Marini D. et al. (2014) αξιολόγησαν θεωρητικά και πειραματικά την παραμόρφωση του πλέγματος στη δομή του πυριτίου που προκαλείται από ένα στρώμα νιτριδίου [187]. Ο Arghavani R. (2004) απέδειξε ότι δύο διηλεκτρικά φιλμ που ενσωματώνονται μαζί, μπορούν να παράγουν σημαντικό βαθμό καταπόνησης στο κανάλι μιας συσκευής υπο-90 nm [188].

Είναι απαραίτητο για τη μικροκατασκευή να μετρηθεί η υπολειμματική τάση, καθώς το ξεφλούδισμα του λεπτού υμενίου κατά την κατασκευή έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση της διαδικασίας. Ακόμα και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, η υπολειμματική πίεση μειώνει τη διάρκεια ζωής του τσιπ. Για αυτούς τους λόγους, πολλές έρευνες έχουν αξιολογήσει την υπολειπόμενη τάση που συνδέεται με τις διαδικασίες μικροκατασκευής, όπως η υψηλή θερμοκρασία και η διαδικασία εναπόθεσης στο πλάσμα. Το κλειδί για την εύρεση αυτών των τάσεων είναι πάντα η μοντελοποίηση των σχέσεων μεταξύ της παραμόρφωσης, του μεγέθους και της γεωμετρίας των συγκεκριμένων μικρομηχανικών κατασκευών και των τάσεων που δρουν σε αυτές. Η υπολειμματική τάση μετρήθηκε από πολύ νωρίς μέσω της καμπυλότητας ολόκληρου του δισκίου. Αυτή η τεχνική δεν είναι σε θέση να χαρτογραφήσει την τάση σε ολόκληρο το υπόστρωμα. Έτσι έχουν αναπτυχθεί και άλλες τεχνικές μικροκατασκευής για την καταγραφή του χάρτη των υπολειπόμενων τάσεων. Για να εκτιμηθεί η εφελκυστική τάση, έχουν σχεδιαστεί πιο πολύπλοκες διαγνωστικές δομές που μπορούν να τη μετατρέψουν σε συμπιεστική. Μια τέτοια δομή είναι ένας δακτύλιος προσαρτημένος στο υπόστρωμα σε δύο διαμετρικά αντίθετα σημεία. Ένα διαφορετικό σύνολο μικρομηχανικών δομών, όπως η δομή τύπου «T», έχει μοντελοποιηθεί και κατασκευαστεί για επιτόπια μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του λεπτού υμενίου υπό τάση εφελκυσμού. Ο περιορισμός στην ανάλυση της μέτρησης προκαλεί ανακριβή εκτίμηση της τάσης εφελκυσμού. Χρησιμοποιώντας παρόμοιες προσεγγίσεις, βρέθηκε η κλίση της υπολειμματικής τάσης σε μια ποικιλία υλικών και διαδικασιών, όπως το θερμικό οξειδίο, το LPCVD νιτρίδιο του πυριτίου και το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.

1.23. Αισθητήρες MEMS

Η αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί ένα αναπόσπαστο τμήμα της μηχανολογίας. Όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο του κεφαλαίου 3 υπάρχει μια ιδιαίτερη ανάπτυξη των αισθητήρων στον τομέα αυτό. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον στην περιοχή φέρνει περισσότερες ευθύνες για να κάνει τα οχήματα πιο εκλεπτυσμένα με κάθε νέο σχέδιο / μοντέλο που κυκλοφορεί στην αγορά. Αυτή είναι μια τεράστια πρόκληση από την άποψη του κατασκευαστή καθώς ο ανταγωνισμός αυξάνεται εκθετικά και όλοι οι πελάτες είναι ανοιχτοί στην αγορά για την επιλογή οποιουδήποτε νέου οχήματος.

Κατά τη συζήτηση της εφαρμογής του MEMS στην αυτοκινητοβιομηχανία, το MEMS επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους του αισθητήρα σε χαμηλότερο κόστος. Επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση πολλών μικρομεταβλητών στοιχείων ηλεκτρονικών ημιαγωγών / ολοκληρωμένης τεχνολογίας τσιπ. Οι αποκλειστικοί σκοποί επιδιώκονται συμπεριλαμβάνοντας μικρές τροποποιήσεις ή πρόσθετα εξαρτήματα στο γενικό κύκλωμα. Η ανίχνευση της πίεσης ήταν η πρώτη επιτυχημένη συσκευή αισθητήρων που ενσωματώθηκε γενικά στις βιομηχανίες και αυτοκινητοβιομηχανίες. Η κάθε τέτοια συσκευή αποτελείται από ένα ή περισσότερα εξαρτήματα ευαίσθητα στην πίεση για την ανίχνευσή της. Αυτές οι μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν είτε μέσω μικρομαγνητικής κατεργασίας είτε μέσω μικροεπεξεργασίας της επιφάνειας και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πίεσης του εύρους των 10 kPa (πίεση κενού) -180 MPa. Ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης του περιβάλλοντος, χρησιμοποιούνται όπως έχει ήδη αναφερθεί διάφοροι τύποι αισθητήρων πίεσης. Οι διάφορες εφαρμογές τους ποικίλουν (υδραυλικό τιμόνι, φρένα / ανάρτηση) και χρησιμοποιούνται κυρίως χωρητικοί κεραμικοί αισθητήρες, ενώ για την πίεση του καυσίμου του κινητήρα ντίζελ, χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πολυπυριτίου-χάλυβα. Οι αισθητήρες πίεσης που βασίζονται σε MEMS χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπως στην πολλαπλή / βαρομετρική πίεση αέρα, στην πίεση λαδιού, στην πίεση του κυλίνδρου, στην πίεση των φίλτρων του αερίου και στην ανίχνευση πίεσης των πλευρικών αερόσακων, με εξαιρετική αξιοπιστία χρησιμοποιώντας κυρίως χωρητικά / πιεζοστατικά συστήματα ανίχνευσης [189]. Η Εικόνα 0.4: Βασική μηχανική δομή ενός αισθητήρα πίεσης: (1) περίβλημα, (2) μεμβράνη, (3) δοκός προβόλου, (4) μετρητής πίεσης SOI, (5) ράβδος μετάδοσης δείχνει τη βασική αρχιτεκτονική του αισθητήρα πίεσης, ο οποίος περιλαμβάνει μεμβράνη, SOI (Silicon on Insulator) και ράβδο μετάδοσης στο πλήρες περίβλημα.



Εικόνα 0.4: Βασική μηχανική δομή ενός αισθητήρα πίεσης: (1) περίβλημα, (2) μεμβράνη, (3) δοκός προβόλου, (4) μετρητής πίεσης SOI, (5) ράβδος μετάδοσης [190].

Δημιουργείται περιοδικά ποικίλο μαγνητικό πεδίο μέσω μαγνητικού πολλαπλού τροχού και ο αισθητήρας GMR (Giant magnetoresistance) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του παραγόμενου πεδίου, το οποίο μετατρέπεται περαιτέρω στην αντίστοιχη ταχύτητα του τροχού.

Διάφοροι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της ταχύτητας είναι αισθητήρες επαγωγικού τύπου. Οι αισθητήρες γωνιακής και γραμμικής θέσης μετρούν τη γραμμική μετατόπιση / θέση ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος και η γραμμική μετατόπιση έως 1 μm έχει μετρηθεί μέσω αισθητήρων με βάση τα MEMS [191]. Οι αισθητήρες θέσης έχουν την εφαρμογή τους στη μέτρηση της γωνίας του τιμονιού, της γωνίας της ράβδου του ύψους του πλαισίου, της γωνίας του βραχίονα του πλωτήρα (για τη μέτρηση της στάθμης του καυσίμου) και το πιο σημαντικό είναι η γωνία του γκαζιού του κινητήρα [192]. Για τη μέτρηση της θέσης, χρησιμοποιούνται διάφοροι αισθητήρες (μεταξύ αυτών είναι ο ποτενσιομετρικός τύπος αισθητήρων) οι οποίοι εξαρτώνται από την ιδιότητα, ότι η αντίσταση της μεμβράνης ποικίλλει ανάλογα με το μήκος.

Οι αισθητήρες της θερμοκρασίας είναι οι άλλες σημαντικές κατηγορίες των αισθητήρων MEMS των αυτοκινήτων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε όλες σχεδόν τις συσκευές ανίχνευσης για να εκφράσουν τα ακριβή χαρακτηριστικά. Τα IC που βασίζονται σε πυρίτιο χρησιμοποιούνται για μέτρηση θερμοκρασίας έως 150 ° C μέσω αγωγής του φορτίου με βάση την αντίσταση ή τη διαφορά της τάσης.

Οι αισθητήρες της ροής μάζας / αέρα τοποθετούνται στο κανάλι παράκαμψης της εισαγωγής αέρα για τη μέτρηση της ροής μάζας αέρα στον κινητήρα του αυτοκινήτου, εξαιρουμένης της παλμικής αντιστροφής του αέρα. Εάν πρέπει να συμπεριληφθεί μια παλλόμενη αντιστροφή του αέρα για ανίχνευση, πρέπει να εγκατασταθούν αισθητήρες ανίχνευσης θερμικής ροής. Εκτός από αυτούς τους αισθητήρες, υπάρχουν πολλοί περισσότεροι αισθητήρες που ενσωματώνονται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την επίτευξη διαφορετικών λειτουργιών, όπως οι αισθητήρες καυσαερίων, οι αισθητήρες χτυπήματος του κινητήρα, οι αισθητήρες γραμμικής επιτάχυνσης, γωνιακού ρυθμού κ.λπ. Ανάλογα με την απαίτηση για την ανίχνευση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της αυτοκινητοβιομηχανίας, διαφορετικοί αισθητήρες από τους προαναφερθέντες αισθητήρες τοποθετούνται ξεχωριστά ή σε συνδυασμό.

Η διαχείριση του κινητήρα με βάση τους αισθητήρες ξεκίνησε το 1979 για τη μείωση των εκπομπών των σωλήνων εξαγωγής. Αυτό έγινε με τη χρήση μιας μονάδας ελέγχου του κινητήρα με βάση μικροεπεξεργαστή για τον έλεγχο της αναλογίας του σταθερού αέρα προς καύσιμο (στοιχειομετρική), η οποία, με τη σειρά της, μπορούσε να μειώσει αποτελεσματικά την ποσότητα του μη καύσιμου καυσίμου. Αυτός ο τύπος παρακολούθησης πραγματοποιήθηκε μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων ανάδρασης για την ανίχνευση εισόδου αέρα και εξόδου καυσαερίων. Οι βαρομετρικοί αισθητήρες απόλυτης πίεσης με βάση το πυρίτιο χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της άμεσης ροής του αέρα για την αντιστάθμιση του υψομέτρου (συστήματα ανακυκλοφορίας καυσαερίων κλειστού βρόχου).

Οι αισθητήρες πίεσης χρησιμοποιούνται επίσης για τη μέτρηση της πίεσης εντός του κυλίνδρου στο σύστημα ελέγχου καύσης του κινητήρα. Το σήμα ανάδρασης βάσει την πίεση βοηθά στη ρύθμιση της λειτουργίας του υπερσυμπιεστή, του χρονισμού του ψεκασμού του καυσίμου στον κύλινδρο και της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων. Η εφαρμογή του συστήματος ελέγχου μπορεί να παρατηρηθεί ότι μειώνει τις εκπομπές NOx, μειώνοντας τη θερμοκρασία καύσης μέσω του συστήματος ελέγχου. Ο πιεζοηλεκτρικός κεραμικός αισθητήρας χρησιμοποιείται επίσης στους κινητήρες ντίζελ για την παρακολούθηση της πίεσης του κυλίνδρου σε περίπτωση υψηλότερης πίεσης. Η αυξανόμενη πίεση του κυλίνδρου δημιουργεί πίεση στον προθερμαντήρα και το βύσμα θέρμανσης ενεργεί καθώς ο πείρος μεταφοράς πίεσης ασκεί πίεση στον πιεζοηλεκτρικό κεραμικό αισθητήρα.

1.24. Μέλλον – εξέλιξη

Τα αυτόνομα οχήματα χρειάζονται δεκάδες αισθητήρες για να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους. Αυτοί οι αισθητήρες πρέπει επίσης να είναι όσο το δυνατόν μικρότεροι, ώστε να μην καταλαμβάνουν χώρο που απαιτείται για τον υπόλοιπο εξοπλισμό που μεταφέρει τα άτομα αλλά και τις μπαταρίες. Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι συνεπώς ένας από τους τομείς

στους οποίους η παραγωγή και η χρήση των αισθητήρων MEMS αναμένεται να αυξηθεί περισσότερο.

Υπάρχουν συγκεκριμένοι αισθητήρες που έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε συστήματα IoT συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών όπως η εσωτερική πλοήγηση, η σταθεροποίηση των οπτικών εικόνων, τα συστήματα εικονικής πραγματικότητας και οι κάμερες με drone. Όπως φαίνεται στο προηγούμενο παράδειγμα, ένα πακέτο αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλά αυτοκίνητα και έτσι να μειώσει το κόστος εφαρμογής.

Ένα άλλο πεδίο στο οποίο διερευνάται η χρήση της τεχνολογίας MEMS είναι τα μικρόφωνα. Ένα μικρόφωνο MEMS επιτρέπει, για παράδειγμα, τη μείωση του μεγέθους των συσκευών ανοιχτής ακρόασης για τα κινητά τηλέφωνα και τη δημιουργία πολύ μικρότερων και πιο διακριτικών βοηθημάτων, ειδικά για άτομα με προβλήματα ακοής.

Το πιο εντυπωσιακό και ταυτόχρονα εκτεταμένο και ενδιαφέρον σενάριο χρήσης τους είναι ίσως η βιοτεχνολογία και η ιατρική τεχνολογία. Εδώ για παράδειγμα, μια διαδικασία όπως η γαστρεντερική εξέταση, η οποία γίνεται επί του παρόντος με κάμερα και σωλήνα, μπορεί να εκτελεστεί με ένα μικρό καθοδηγημένο ρομπότ. Υπάρχει ήδη ένα τέτοιο παράδειγμα σήμερα με το Sono pill, το οποίο βέβαια δεν αποτελεί αυτόνομη συσκευή και πρέπει να καθοδηγείται από έναν εξωτερικό ρομποτικό βραχίονα που λειτουργεί από τεχνητή νοημοσύνη, καθώς κινείται μέσω του παχέος εντέρου.

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) μπορεί να αξιοποιήσει πολλές βασικές λειτουργίες και οφέλη των MEMS. Οι συσκευές MEMS μπορούν να ικανοποιήσουν αποτελεσματικά τις απαιτήσεις πολλών εφαρμογών IoT:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Οι αισθητήρες και οι πύλες IoT απαιτούνται συχνά για ασύρματη σύνδεση και συνοδευόμενα από μπαταρία. Λόγω του χαμηλού κόστους ανά μονάδα, είναι συνήθως φθηνότερο να αντικατασταθεί ολόκληρη η μονάδα παρά να επαναγκατασταθεί μια νέα μπαταρία. Έτσι, οποιαδήποτε μείωση της χρήσης της ισχύος παρατείνει τη διάρκεια ζωής των συσκευών. Ορισμένα MEMS αντιμετωπίζουν τις ίδιες απαιτήσεις ισχύος με τους μεγαλύτερους ομολόγους τους. Άλλα εκμεταλλεύονται διαφορετικές δυνάμεις στον ηλεκτρομαγνητισμό ή τη δυναμική των υγρών για να μειώσουν τη χρήση ισχύος τους, χωρίς να θυσιάζουν τη λειτουργικότητα (για παράδειγμα η περίπτωση της επιφανειακής τάσης που μεταφέρει νερό μέσω μικρών σωλήνων).

- Μικρός παράγοντας μορφής: Οι χρήστες γενικά θέλουν οι συσκευές IoT να είναι μικρές και διακριτικές στις ρυθμίσεις γραφείου και σπιτιού. Τα MEMS είναι εξ' ορισμού διακριτικά. Αλλά πέρα από τις ανάγκες των χρηστών, σε ορισμένες εφαρμογές IoT, η συσκευή μπορεί να χρειαστεί να προστεθεί σε ένα υπάρχον μηχάνημα (όπως ένα αυτοκίνητο το οποίο έχει περιορισμένο χώρο για περισσότερο υλικό). Σε άλλες περιπτώσεις όπως τα

φορητά συστήματα και οι βιοϊατρικές εφαρμογές, το μικρό μέγεθος είναι μια κρίσιμη απαίτηση που πρέπει να ικανοποιηθεί. Λόγω της μικρής τους φύσης, τα MEMS πληρούν και υπερβαίνουν αυτές τις απαιτήσεις.

- Αποτελεσματικότητα κόστους: Κατά την ανάπτυξη μιας λύσης IoT, η κλίμακα είναι συνήθως μια σημαντική ανησυχία. Για παράδειγμα, όταν τοποθετούνται αισθητήρες για την παρακολούθηση του καιρού και της στάθμης της υγρασίας σε ένα αγρόκτημα, θα πρέπει να υπάρχουν πολλές συσκευές σπαρμένες σε κάθε στρέμμα. Σε άλλες εφαρμογές, όπως η αποστολή, μια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο μία φορά. Τα MEMS λόγω της δημιουργίας τους (φωτολιθογραφία) αποτελούν μια εύκολη και οικονομική επιλογή σε σχέση με την απόδοσή τους στην παραγωγή και σε μαζικές ποσότητες.

Καθώς προστίθενται περισσότερες συσκευές και εφαρμογές στο IoT, το MEMS θα καταστεί μια πιο βιώσιμη λύση. Φαίνεται πως και οι δύο αυτές τεχνολογίες θα αναπτυχθούν και θα επηρεάσουν η μία την άλλη στο σύντομο μέλλον.

Σύμφωνα με την εταιρεία συμβούλων έρευνας και στρατηγικής αγοράς του Yole Développement (Yole) [193], το συνολικό μέγεθος της αγοράς των MEMS, των αισθητήρων και των ενεργοποιητών θα διπλασιαστεί από τα 48 δισεκατομμύρια δολάρια που ήταν το 2018 σε 93 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2024. Η καταναλωτική αγορά θα συνεχίσει να αυξάνει τον όγκο, με εφαρμογές όπως τα smartphone που αντιστοιχούν σε όγκο που δε διαθέτουν τη μέση τιμή πώλησης (ASP). Η ισχυρότερη ζήτηση σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας, της βιοϊατρικής / υγείας και της βιομηχανικής χρήσης θα υποστηρίξουν αυτή την ανοδική πορεία. Με την τόσο αναμενόμενη ανάπτυξη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των MEMS συμβαδίζει με τη ζήτηση της βιομηχανίας για υψηλότερα επίπεδα καινοτομίας και ολοκλήρωσης, με το χαμηλότερο κόστος και τη χαμηλότερη ισχύ, καθώς και με τα μικρότερα αποτυπώματα και τους γρηγορότερους κύκλους σχεδιασμού. Όλα τα παραπάνω θα πρέπει να ικανοποιούν τα αποδεκτά σημεία των τιμών.

Αρκετοί εμπειρογνώμονες του κλάδου βλέπουν τεράστια πρόοδο στην αλυσίδα εφοδιασμού της κατασκευής των MEMS. Ταυτόχρονα, αναγνωρίζουν το σημαντικό κενό που εξακολουθεί να υπάρχει στην ικανότητα σχεδιασμού για τη δημιουργία των δισεκατομμυρίων διασυνδεδεμένων αισθητήρων που απαιτούνται για τις μελλοντικές εφαρμογές. Θα πρέπει να βρεθούν τα κατάλληλα πρότυπα, οι απαιτήσεις του οικοσυστήματος και οι συνεργατικές λύσεις σχεδιασμού, τα οποία θα επιτρέψουν στη βιομηχανία των μικρο-αισθητήρων, ώστε να καλυφθεί η ζήτηση για τα φορητά προϊόντα της επόμενης γενιάς, τα προϊόντα Internet of Things (IoT) και οι ιατρικές συσκευές.

Από τους χιλιάδες αισθητήρες και ενεργοποιητές που υπάρχουν μόνο σε ένα αεροπλάνο έως τους εκατοντάδες σε ένα αυτοκίνητο ή ένα τμήμα του

εργοστασιακού εξοπλισμού και αυτούς που πλέον αποστέλλονται σε καθένα από τα smartphone του κόσμου, απέχει αρκετά το σημείο κορεσμού για αυτές τις έξυπνες συσκευές.

Η καταναλωτική αγορά είναι και θα συνεχίσει να είναι η μεγαλύτερη αγορά για τα MEMS. Οι κορυφαίες εταιρείες των MEMS είχαν κάποιες μικρές αυξήσεις το 2019, ακόμα κι αν οι σχετικές κύριες τελικές αγορές / τελικά προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των smartphone και της αυτοκινητοβιομηχανίας δεν ήταν τόσο ισχυρές. Τα συστήματα παραγωγής και οι αλυσίδες εφοδιασμού θα μπορούσαν να αλλάξουν σημαντικά μετά την κρίση. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι αρνητικές επιπτώσεις του COVID-19 είναι εμφανείς με μείωση -27,5% το 2020. Τα βιομηχανικά MEMS θα επωφεληθούν από την πανδημία του COVID-19, καθώς αναπτύσσονται και παράγονται θερμικοί απεικονιστές και ανιχνευτές για την ανίχνευση της αυξημένης θερμοκρασίας του σώματος. Τα ιατρικά MEMS ακολουθούν την ίδια τάση ανάπτυξης με τις συσκευές πίεσης, ροόμετρου και μικρορευστών που ενισχύονται από τη ζήτηση λόγω του COVID-19 τόσο για αναπνευστήρες, όσο και για τα διαγνωστικά τεστ PCR.

Η αγορά της άμυνας και της αεροδιαστημικής είχε υποχώρηση το 2020, λόγω της «παράλυσης» της πολιτικής αεροπορίας. Σίγουρα δεν επηρεάστηκαν όλες οι αγορές των MEMS με τον ίδιο τρόπο από την πανδημία. Όλα τα παραπάνω, θα μπορούσαν να θεωρηθούν και μια ευκαιρία για τα MEMS να χρησιμοποιηθούν σε πολύ διαφορετικές εφαρμογές. Ενώ από τη μία πλευρά η εργασία από το σπίτι ευνόησε την αγορά κέντρων δεδομένων και επιταχύνει παράλληλα την ανάπτυξη του 5G, από την άλλη έχει περιορίσει αγορές όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και σε ένα μικρότερο βαθμό, τις καταναλωτικές συσκευές λόγω της δραματικής πτώσης της ζήτησης.

Σύμφωνα με τη νέα κατάσταση της έκθεσης «MEMS Industry 2020», οι καταναλωτικές συσκευές θα υποστηρίζονται κυρίως από τα RF MEMS. Θα συνεχίσει να υπάρχει αύξηση και μετά το 2020, λόγω της επεκτεινόμενης διάθεσης της ζώνης του 5G και των 6 GHz που επιταχύνουν την ανάγκη για φίλτρα BAW6. Συμπεριλαμβανομένων των RF MEMS, η καταναλωτική αγορά συστέλλεται μόνο κατά 2,6%, αλλά χωρίς να αναμένεται υποχώρηση των RF MEMS. Αναμένεται γενικότερα ανάκαμψη στα επίπεδα πριν από τον COVID-19 το 2021 και η ανάπτυξη θα συνεχιστεί και αργότερα [194].

Ένα άλλο τμήμα της αγοράς που πρέπει να ακολουθηθεί είναι οι συσκευές MEMS για τις ιατρικές εφαρμογές. Ως εκ τούτου, η ιατρική αγορά των MEMS κυριαρχείται κυρίως από πίεση και μικρορευστογόνα και θα συνεχίσει με αυτόν τον τρόπο. Οι περιοχές που συνδέονται άμεσα με τον COVID-19, συμπεριλαμβανομένων των αναπνευστικών, της αναπνευστικής διάγνωσης, των ερευνητικών εργαλείων για τη μελέτη του ιού και η παρακολούθηση των ασθενών επηρεάζονται θετικά, ενώ άλλες περιοχές της υγειονομικής περίθαλψης έχουν μέτρια έως και καθόλου επίδραση.

Επιπλέον, οι διαγνωστικές δοκιμές των μικρορρευστών είναι υψίστης σημασίας για τη διάγνωση του COVID-19. Στο μετασχηματισμό της οργάνωσης της υγειονομικής περίθαλψης, η πανδημία COVID-19 πιθανότατα θα επιταχύνει τις τεχνολογικές απαιτήσεις προς μια προσέγγιση που εστιάζει στον ασθενή. Θα υπάρξει περισσότερη τηλεθεραπεία, καθώς θα υπάρξουν ακουστικά και συνδεδεμένα ιατρικά βοηθήματα και περισσότερη πρόληψη για μια συνεχή απομακρυσμένη παρακολούθηση.

Οι παραδοσιακοί αισθητήρες MEMS συμπεριλαμβανομένης της πίεσης και της αδράνειας θα μπορούσαν να επηρεαστούν αρνητικά, καθώς παρεμποδίζονται οι παραγγελίες νέων αεροσκαφών. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα, οι θερμικοί απεικονιστές που βασίζονται σε μικροβολτόμετρα παρουσιάζουν μια καλή ευκαιρία σε εφαρμογές άμυνας καθώς συνεχίζουν να αντικαθιστούν τις παλαιότερες θερμικές κάμερες, χρησιμοποιώντας παλαιότερες τεχνολογίες που βασίζονται σε κρυοψύκτη. Σε γενικές γραμμές, η άμυνα δεν επηρεάζεται τόσο πολύ από τον COVID-19, όσο συνεχίζονται τα κυβερνητικά προγράμματα.

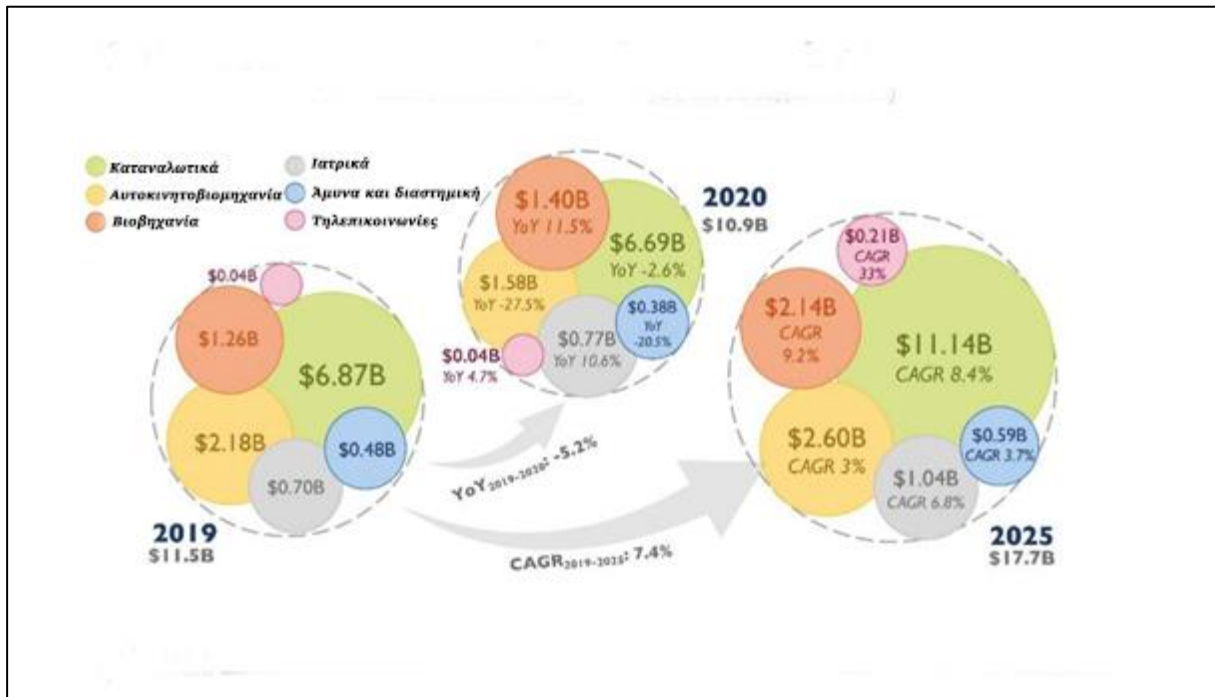
Όσον αφορά τις τάσεις των MEMS, σε επίπεδο εφαρμογής και μεσοπρόθεσμα, θα υπάρξει μετάβαση σε πιο φορητές, εξαιρετικά ευαίσθητες συσκευές, συσκευάζοντας πολλούς αισθητήρες. Επίσης θα υπάρξει μια μετάβαση σε περισσότερη υγειονομική περίθαλψη για τους καταναλωτές. Όλα όσα σχετίζονται με τις φωνητικές διεπαφές θα συνεχίσουν να αυξάνονται έντονα, αυξάνοντας τη ζήτηση για μικρόφωνα MEMS, με καλύτερη ποιότητα και υψηλής πιστότητας φωνητική λήψη. Οι συσκευές MEMS μεταβαίνουν σε νέες, με υψηλότερη ακρίβεια, εξαιρετικά χαμηλή ισχύ, ενσωματωμένη ευφυΐα και πιθανώς κάποια βιοσυμβατότητα για τις ιατρικές εφαρμογές.

Από την πλευρά τους, οι εταιρείες των MEMS προσπαθούν να ξεφύγουν από τον κύκλο εμπορευματοποίησης και να αποκτήσουν περισσότερη αξία από τους αισθητήρες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους:

- Βρίσκοντας νέες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης των αισθητήρων (για παράδειγμα το AR / VR)
- Συγκεντρώνοντας λειτουργίες και βελτιώνοντας τις υπάρχουσες περιπτώσεις χρήσης μέσω αλγορίθμων και λογισμικού. Η τιμή βρίσκεται στα chip / ASIC που εκτελούν αυτούς τους αλγόριθμους / λογισμικό.

Από την άλλη πλευρά, άλλες εταιρείες ενισχύουν τις περιπτώσεις χρήσης στις εφαρμογές των πελατών τους με επιπλέον λειτουργικότητα, που επιτυγχάνεται με καλύτερους αλγόριθμους και λογισμικό. Η Bosch συνεργάζεται με την Qualcomm, ενώ η ST έχει προσθέσει έναν πυρήνα μηχανικής εκμάθησης στους αδρανειακούς αισθητήρες της. Στην Εικόνα 0.5: Προβλέψεις της αγοράς MEMS από το 2019 έως το 2025

αποτυπώνονται οι προβλέψεις για την αύξηση των κεφαλαίων στον κάθε κλάδο για τα MEMS.



Εικόνα 0.5: Προβλέψεις της αγοράς MEMS από το 2019 έως το 2025 [194].

Σίγουρα, οι προκλήσεις της αγοράς για τα MEMS εξελίσσονται. Σήμερα, επισημαίνεται η σημασία του προσδιορισμού των προβλημάτων και των διαφορετικών εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται η σύντηξη διαφορετικών αισθητήρων με το λογισμικό και τη μείωση ισχύος, ειδικά για τις εφαρμογές που είναι πάντα ενεργοποιημένες (π.χ φωνή HMI).

Τώρα είναι ο καιρός για την κλιμάκωση των MEMS, αλλά αυτό θα είναι δυνατό μόνο εάν οι εταιρείες ακολουθήσουν κάποιους χρυσούς κανόνες, όπως την υψηλότερη ακρίβεια και τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, η ιστορία αφορά την αξία. Η τιμή βρίσκεται στα δεδομένα. Υπάρχει μια αυξανόμενη κίνηση προς ένα συνδυασμό ικανοτήτων είτε σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού, από την κατασκευή front-end έως τη συσκευασία, τις μονάδες και την ολοκλήρωση των συστημάτων.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Τα μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα (MEMS) αποτελούν την ολοκλήρωση των ηλεκτρικών και μηχανικών εξαρτημάτων στις διαστάσεις νανοκλίμακας και μικροκλίμακας. Τα MEMS και οι νανοτεχνολογίες θεωρούνται συνήθως ως ένα από τα πιο εντυπωσιακά θέματα της τεχνολογίας λόγω των πιθανών εφαρμογών τους τόσο σε βιομηχανικές, όσο και σε καταναλωτικές πτυχές. Τα MEMS αποτελούνται από εξαρτήματα μεγέθους των 1-100 μm και οι αισθητήρες MEMS ορίζονται γενικά σε ένα εύρος μεγέθους από 20 μm έως 1 mm. Τα MEMS εξελίσσονται κυρίως από την τεχνολογία κατασκευής των ημιαγωγών, δηλαδή από τη συμπληρωματική διαδικασία μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (CMOS). Για παράδειγμα, οι βασικές τεχνικές περιέχουν την απόθεση υλικών στρώσεων, τη διαμόρφωση με φωτολιθογραφία και τη χάραξη για τη διάταξη της συσκευής. Οι τεχνολογίες κατασκευής MEMS χωρίζονται σε επιφανειακή μικρομηχανική και μαζική μικρομηχανική. Η μικρομηχανική της επιφάνειας χρησιμοποιεί την εναπόθεση στρωμάτων στην επιφάνεια ενός υποστρώματος αντί να χρησιμοποιεί το ίδιο το υπόστρωμα, ενώ η χύδην μικρομηχανική κατεργασία είναι το παλαιότερο παράδειγμα των MEMS με βάση το πυρίτιο για την κατασκευή των μικρομηχανικών δομών.

Για τον εντοπισμό των αλλαγών των παραμέτρων στα περιβάλλοντα, οι αισθητήρες των MEMS και NEMS αναπτύχθηκαν μετρώντας τις μηχανικές, μαγνητικές, χημικές, οπτικές, ακουστικές, θερμικές ή ηλεκτρομαγνητικές πληροφορίες. Στα μέσα της δεκαετίας του 1950, οι ερευνητές άρχισαν να ερευνούν την τεχνολογία MEMS για ένα τρανζίστορ. Μετά από αυτό, δημιουργήθηκε ένα ευρύ φάσμα εμπορικών συσκευών που βασίζονται στους αισθητήρες MEMS, όπως οι εκτυπωτές inkjet, τα μικρόφωνα MEMS, τα επιταχυνσιόμετρα MEMS, τα γυροσκόπια MEMS, οι αισθητήρες πίεσης MEMS / NEMS, οι αισθητήρες οθόνης, οι διακόπτες MEMS / NEMS και οι βιοαισθητήρες MEMS / NEMS.

Οι μηχανισμοί της ανίχνευσης MEMS / NEMS περιέχουν την πιεζοηλεκτρική μέθοδο, τη χωρητική μέθοδο, την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, τη θερμοηλεκτρική μέθοδο κ.λπ. Μεταξύ των διαφορετικών ειδών των αισθητήρων με βάση τα MEMS, τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων πυριτίου περιλαμβάνουν το μικρό μέγεθος, την υψηλή αναλογία σήματος ως προς το θόρυβο, τη χαμηλή υστέρηση, την ικανότητα λειτουργίας σε ένα ακραίο περιβάλλον και την υψηλή επαναληψιμότητα στην κατασκευή τους. Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, οι συμβατικοί αισθητήρες των MEMS εφαρμόστηκαν ευρέως στον αυτοματισμό, την αεροναυτική, τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, την άμυνα, τη βιομηχανική κατασκευή, τον ιατρικό εξοπλισμό, τη βιοεπιστήμη και τις τηλεπικοινωνίες. Ωστόσο, προς τη νέα εποχή, οι αισθητήρες MEMS αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις όσον αφορά την ευφυΐα και την τροφοδοσία ρεύματος κατά τη λειτουργία τους.

Κάποιες από αυτές τις προκλήσεις είναι η ευελιξία τους για φορητές εφαρμογές, η δυνατότητα φιλικής και αμοιβαίας αλληλεπίδρασης στις εφαρμογές δι'επαφής ανθρώπου-μηχανής και γενικότερα η ευφυΐα που απαιτείται από τη μεγάλη ανάγκη για ανάλυση των δεδομένων. Για τη μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, υπάρχει η τεχνολογία διακόπτη των MEMS / NEMS και η τεχνολογία συλλογής της ενέργειας, προς όφελος των αισθητήρων MEMS (που ονομάζονται αισθητήρες βάσει συμβάντων ή αισθητήρες βάσει ατυχημάτων). Με αυτά τα εξαρτήματα MEMS / NEMS, οι αισθητήρες MEMS θα μπορούσαν να λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αυτο-τροφοδοτούμενη λειτουργία. Ως βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων, οι φορητοί αισθητήρες και οι διεπαφές ανθρώπου-μηχανής αναγνωρίστηκαν ως μια σημαντική κατεύθυνση ανάπτυξης για μελλοντικούς αισθητήρες με αρκετά ευέλικτη και πολυλειτουργική ανίχνευση. Εν τω μεταξύ, σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη (AI) και την εικονική πραγματικότητα (VR), οι αισθητήρες επόμενης γενιάς θα παρουσιάσουν ένα σαφές ίχνος ανάπτυξης και θα βοηθήσουν τους ανθρώπους να αλληλοεπιδρούν με άλλα αντικείμενα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και σεναρίων.

Η νανοτεχνολογία, από την επιστημονική και την τεχνολογική πλευρά που ασχολείται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και την εφαρμογή των συστημάτων των οποίων οι διαστάσεις ή οι ανοχές ανήκουν στον τομέα των νανομέτρων, καθίσταται όλο και πιο σημαντική σε πολλούς βιομηχανικούς και επιστημονικούς τομείς. Οι νανοτεχνολογίες και οι νανοεπιστήμες ενεργοποιούνται από διαφορετικά πεδία και εφαρμογές, αλλά από την άλλη πλευρά, ενεργοποιούν από μόνες τους μελλοντικές βιομηχανικές και πρακτικές λύσεις. Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που παρατηρούνται σήμερα στη νανοτεχνολογία είναι η οδήγηση των διαδικασιών κατασκευής σε επίπεδο ακρίβειας κάτω από το nm για κρίσιμα χαρακτηριστικά και εργασίες τοποθέτησης.

Η πρόοδος στη νανοτεχνολογία συνδέεται άμεσα με την πρόοδο στην τεχνολογία των MEMS, η οποία σε πολλές χώρες ονομάζεται επίσης ως τεχνολογία μικροσυστημάτων. Σε γενικές γραμμές μπορεί να περιγραφεί ως η τεχνολογία των μικροσκοπικών ηλεκτρομηχανικών συσκευών και κατασκευών που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τεχνολογίες παρόμοιες με αυτές της κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ημιαγωγών (IC). Στα MEMS ανήκουν απλές συσκευές, όπως υποστηριζόμενες δοκοί (προβολείς), μικροσυγκολλητές και μεμβράνες διπλής σύσφιξης, καθώς και περίπλοκες δομές με κινούμενα μηχανικά εξαρτήματα, των οποίων η εκτροπή ανιχνεύεται και ελέγχεται με ακρίβεια. Στην πιο ώριμη μορφή τους τα ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα είναι ενσωματωμένα σε μικροελεγκτές, οι οποίοι εκτελούν όχι μόνο απλές λειτουργίες αλλά επιτρέπουν επίσης την εφαρμογή αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (AI).

Οι κρίσιμες φυσικές διαστάσεις των MEMS μπορεί να κυμαίνονται από τα micro έως και τα χιλιοστά. Η ελκυστικότητα της τεχνολογίας των

MEMS είναι διαισθητική, αφού οι μικρές διαστάσεις των συσκευών MEMS κάνουν την εκάστοτε συσκευή ευαίσθητη σε φαινόμενα που συμβαίνουν στη μικρο, αλλά και στη νανοκλίμακα. Με άλλα λόγια, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η μικρότερη δομή που επιθυμεί να παρατηρήσει το μικρότερο εργαλείο. Επιπλέον, καθώς τα MEMS κατασκευάζονται στις λεγόμενες διαδικασίες παρτίδας, το κόστος τους μπορεί να μειωθεί και η κλίμακα ολοκλήρωσης να αυξηθεί, οδηγώντας σε αύξηση της απόδοσης της παρατήρησης. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι τα MEMS διαφέρουν από την ιδέα της μοριακής ηλεκτρονικής και της μοριακής νανοτεχνολογίας. Κατ 'αρχήν, τα MEMS κατασκευάζονται στις λεγόμενες διαδικασίες από πάνω προς τα κάτω. Σε αυτές τις διαδικασίες μια συσκευή συναρμολογείται με διάφορους τρόπους και βήματα που διαμορφώνουν την τελική μορφή της μηχανικής και της ηλεκτρικής συσκευής. Αντιθέτως, οι διεργασίες από κάτω προς τα πάνω, βασίζονται στις χημικές ιδιότητες των μεμονωμένων ειδών, οι οποίες προκαλούν την αυτο-οργάνωση και / ή την αυτοσυναρμολόγηση των συστατικών ενός μορίου σε κάποια χρήσιμη διαμόρφωση. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι τα MEMS επιτρέπουν το χειρισμό με μεμονωμένα μόρια και από αυτή την άποψη έχουν τεράστια σημασία για την τεχνολογία από τα κάτω προς τα πάνω.

Γενικότερα τόσο τα MEMS όσο και τα NEMS αποτελούν τεχνολογία, η οποία αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς σε όλους τους εμπλεκόμενους τομείς. Το μέλλον των περισσότερων καινοτομιών βασίζεται σε αυτή την τεχνολογία. Η μηχανολογία η οποία αποτελεί έναν από τους κυρίαρχους τομείς στη λειτουργία των MEMS φαίνεται να οδηγεί στην περαιτέρω ανάπτυξη όλων των εμπλεκόμενων τεχνολογιών. Τόσο ο έλεγχος ροής στα ρευστά, όσο και οι διάφοροι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες αλλά και η ανάλυση της καταπόνησης, μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν κάποια παραδείγματα αυτής της ανάπτυξης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Fujita H., "Research activities of optical MEMS in Japan," in *Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS*, 2001.
- [2] Elders J., Spiering V., Walsh S., "Microsystems technology (MST) and MEMS applications: An overview," *MRS Bulletin*, vol. 26, no. 10, p. 1557/mrs2001.69., 2001.
- [3] Gabriel K., Jarvis J., Trimmer W., "Small Machines, Large Opportunities: A Report on the Emerging Field of Microdynamics: Report of the Workshop on Microelectromechanical Systems Research," *National Science Foundation (sponsor). AT&T Bell Laboratories*, 1988.
- [4] Waldner J., "Nanocomputers and Swarm Intelligence," *ISTE John Wiley & Sons*, p. 205. ISBN 9781848210097, 2008.
- [5] "circuitdigest," [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/tutorial/what-is-mems-various-mems-devices-and-applications> . [Accessed 4 12 2020].
- [6] Feynman R., "There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics," *Annual American Physical Society meeting*, 1959.
- [7] Angell J. Terry S., Barth P., "Silicon Micromechanical Devices," *Sci. Am.*, no. 248 (4), pp. Bibcode:1983SciAm.248d..44A. doi:10.1038/scientificamerican0483-44, 1983.
- [8] Ciuti G., Ricotti L., Menciassi A., Dario P., "MEMS Sensor Technologies for Human Centred Applications in Healthcare, Physical Activities, Safety and Environmental Sensing: A Review on Research Activities in Italy," *Sensors (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 6441–6468. doi: 10.3390/s150306441, 2015.
- [9] "elprocus," [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/how-integrated-circuits-work-physically>. [Accessed 4 12 2020].
- [10] "istockphoto," [Online]. Available: <https://www.istockphoto.com/photos/rfid-chip>. [Accessed 7 2 2021].

- [11] Kovacs G.T.A., *Micromachined Transducers Sourcebook*, New York, NY: McGraw-Hill, 1998.
- [12] PBS, "Point Contact Transistor," *ScienCentral, Inc. and the American Institute of Physics*, p. <http://www.pbs.org/transistor/science/events/pointctrans.html>, 1999.
- [13] Ward J., "Historic Transistor Photo Gallery," Transistor Museum, 2004. [Online]. Available: http://semiconductormuseum.com/PhotoGallery/PhotoGallery_M1752.htm.
- [14] Inman M., "Atom Thick Material Runs Rings Around Silicon". Daily News. New Scientist," *Science*, p. DOI: 10.1126/science.1154663. <http://bit.ly/2pe7nW5>, 2008.
- [15] Berlin L. R., "Robert Noyce and Fairchild Semiconductor," *Cambridge University Press*, vol. 75, no. Special 1 (Special Issue: Computers and Communications Networks), 2011.
- [16] tutorialspoint, "Basic Electronics - MOSFET," [Online]. Available: https://www.tutorialspoint.com/basic_electronics/basic_electronics_mosfet.htm. [Accessed 24 12 2020].
- [17] Rai-Choudhury P., "MEMS and MOEMS Technology and Applications," *SPIE Press*, vol. 10, no. 3, p. ISBN 9780819437167, 2000.
- [18] Nathanson H. C. & Wickstrom R. A., "A Resonant-Gate Silicon Surface Transistor with High-Q Band-Pass Properties," *Appl. Phys. Lett*, vol. 7, no. 4, pp. 84-86. doi:10.1063/1.1754323, 1965.
- [19] Nathanson H.C., Newell W.E., Wickstrom R.A., Davis J.R., "The resonant gate transistor. IEEE Transactions on Electron Devices," vol. 14, no. 3, pp. DOI: 10.1109/T-ED.1967.15912, 1967.
- [20] Wilfinger R. J., Bardell P. H., Chhabra D. S., "The Resonistor: A Frequency Selective Device Utilizing the Mechanical Resonance of a Silicon Substrate," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 12, no. 1, p. 113. doi:10.1147/rd.121.0113, 1968.

- [21] Waggener H. A., "Electrochemically Controlled Thinning of Silicon," *The Bell System Technical Journal*, pp. 473-475, 1970.
- [22] Johnson R. K., "A pioneer charts MEMS' trajectory," *News & Analysis. EETimes*, 2017.
- [23] Bergveld P., "The impact of MOSFET-based sensors," *Sensors and Actuators*, vol. 8, no. 2, pp. 109-127, doi:10.1016/0250-6874(85)87009-8. ISSN 0250-6874, 1985.
- [24] Becker E. W., Ehrfeld W., Münchmeyer D., Betz H., Heuberger A., Pongratz S., Glashauser W., Michel H. J., Siemens R., "Production of Separation-Nozzle Systems for Uranium Enrichment by a Combination of X-Ray Lithography and Galvanoplastics," *Naturwissenschaften*, vol. 69, no. 11, pp. 520-523, doi:10.1007/BF00463495, 1982.
- [25] "slideshare," [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/aman1312/liga-process-70140147>. [Accessed 7 2 2021].
- [26] Petersen K., "Silicon as a mechanical material," in *Proceedings of the IEEE*, 1982.
- [27] Grace R. H., "Current and Future High Volume "Killer"," *Automotive Applications of Microsystems Technology (MST)*, 1986.
- [28] Kristofer S. J., "Introduction to MEMS Design and Fabrication," *Pister Berkeley Sensor and Actuator Center*, 1988.
- [29] Kevin A. S., Zhang L., MacDonald N. C., "SCREAM I: a single mask, single-crystal silicon, reactive ion etching process for microelectromechanical structures," 1992.
- [30] Solgaard O., Sandejas F. S. A., Bloom D. M., "Deformable grating optical modulator," 1992.
- [31] PRIME Faraday Partnership, "An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)," *Technology Watch*, pp. ISBN 1-84402-020-7, 2002.
- [32] Noyce R. , "Microelectronics," *Scientific American*, vol. 237, no. 3, 1977.

- [33] Cuthbert C. H., "Early Computers at IBM," *Annals of the History of Computing*, vol. 3, no. 2, 1981.
- [34] Fuller I., "Microelectronic Engineering: A New Program at Rochester Institute of Technology," in *Proceedings of the 5th IEEE/ISHM University/ Industry/ Government Microelectronics Symposium*, Texas , 1983.
- [35] Pelesko J. A., Bernstein D. H. , *Modeling MEMS and NEMS*, Chapman & Hall_CRC, 2003.
- [36] EOM K., PARK H.S., YOON D.S. , "Nanomechanical resonators and their applications in biological/chemical detection: nanomechanics principles," *Physics Reports*, vol. 503, p. 115–163, 2011.
- [37] HANAY M.S. , "Single-protein nanomechanical mass spectrometry in real time," *Nature Nanotechnology*, vol. 7, pp. 602–608,, 2012.
- [38] FANGET S. , "Gas sensors based on gravimetric detection – a review," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 160, p. 804–821, 2011.
- [39] «flex,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://flex.icconnect007.com/index.php/article/119317/worlds-smallest-accelerometer-points-to-new-era-in-wearables-gaming/119320/?skin=flex>. [Πρόσβαση 8 2 2021].
- [40] CHAN H.B., AKSYUK V.A., KLEIMAN R.N. , "Nonlinear micromechanical Casimir oscillator," *Physical Review Letters*, vol. 87, 2001.
- [41] HE R. & YANG P., "Giant piezoresistance effect in silicon nanowires," *Nature Nanotechnology*, vol. 1, p. 42–46, 2006.
- [42] Ko WH , "Trends and frontiers of MEMS," *Sens. Actuators*, vol. 136, no. 1, p. 62–67, 2007.
- [43] Moczyła M., Kopiec D., Sierakowski A., Dobrowolski R., Grabiec P., Gotszalk T. , "Investigations of mechanical properties of microfabricated resonators using atomic force microscopy related techniques," *Microelectronic Eng.*, vol. 119, p. 164–168, 2014.

- [44] Zaborowski M., Dumania P., Tomaszewski D., Czupryniak J., Ossowski T. , "Development of Si nanowire chemical sensors," *Proc. Eng.* , vol. 47, p. 1053–1056 , 2012.
- [45] Chen C., Hone J., "Graphene nanoelectromechanical systems," in *Proc IEEE*, 2013.
- [46] Barba P. D. & Wiak S., *MEMS Field Models and Optimal Design*, Springer International Publishing, 2020.
- [47] Spengen W., Modlinski R., Puers R., Jourdain A., "Failure Mechanisms in MEMS/NEMS Devices," *Springer Handbook of Nanotechnology*, pp. 1663-1684, 2007.
- [48] Idris A., "Modeling and Simulation of MEMS Components: Challenges and Possible Solutions. Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nano Structures," *IntechOpen*, pp. ISBN: 978-953-307-906-6. DOI: 10.5772/1364.
- [49] Paliwa S. & Yenuganti S. , "Design and Simulation of Digital Output MEMS Pressure Sensor," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, pp. 6661-6673, 2020.
- [50] Lyshevski S. E., "MEMS AND NEMS Systems, Devices and structures," *CRC Press*, 2002.
- [51] National Research Council, "Microelectromechanical Systems: Advanced Materials and Fabrication Methods," *National Academies Press*, 1998.
- [52] Lyshevski S. E., "Nano- and Micro-Electromechanical Systems Fundamentals of Nano- and Microengineering," *CRC Press*, 2005.
- [53] Plander I. & Stepanovsky M., "Interdisciplinary considerations on the design of MEMS actuators from a perspective of their optimality," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 269, no. 10, p. 1016/j.sna.2017.11.007, 2017.
- [54] Bell D., Tian L., Fleck N., Spearing S., "MEMS Actuators and Sensors: Observations on Their Performance and Selection for Purpose," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. S153, pp. 10.1088/0960-1317/15/7/022, 2005.

- [55] Muhammad S., Hamid N. H., Malik A. F., Ali N. B., Tariq M., "A Review on Key Issues and Challenges in Devices Level MEMS Testing," *Journal of sensors*, p. <https://doi.org/10.1155/2016/1639805>, 2016.
- [56] Mao Y., Li S., Sun G., Duan L., Bu Y., Wang X., " Modeling and optimization of lens heating effect for lithographic projector," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, vol. 17, no. 2, 2018.
- [57] Wataru I., Toshihiro T., Yao P., Hiroaki O., Hiromasa S., Yuji K., Ryutaro M., Renshi S. , "Maskless Lithographic Fine Patterning on Deeply Etched or Slanted Surfaces, and Grayscale Lithography, Using Newly Developed Digital Mirror Device Lithography Equipment," *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012.
- [58] "elveflow," [Online]. Available: <https://www.elveflow.com/microfluidic-reviews/soft-lithography-microfabrication/introduction-about-photomask-in-microfluidic/>. [Accessed 10 2 2021].
- [59] Loomis J., Ratnayake D., McKenna C., Walsh K. M., "Grayscale lithography— automated mask generation for complex three-dimensional topography," *J. of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 15, no. 1, 2016.
- [60] Rizvi S. (Ed.), *Handbook of Photomask Manufacturing Technology*, 2005.
- [61] Eynon B.G., Wu B. , *Photomask Fabrication Technology*, McGraw-Hill, 2005.
- [62] "sono-tek," [Online]. Available: <https://www.sono-tek.com/industry/semiconductor/mems-semiconductor/>. [Accessed 7 2 2021].
- [63] Yu L., Lee Y.Y., Tay F.E.H., Iliescu C., "Spray coating of photoresist for 3D microstructures with different geometries," *J. Phys.: Conf. Ser*, vol. 34, pp. 937-942, 2006.
- [64] "evgroup," evgroup, [Online]. Available: <https://www.evgroup.com/technologies/resist-processing-technology/spray-coating-technology/>. [Accessed 7 2 2021].

- [65] Dennard R.H., Gaensslen F.H., Yu H.N., Rideout V., Bassous E., LeBlanc A.R., "Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions," *IEEE J. Solid State Circuits*, pp. 256-267, 1974.
- [66] IEEE, "International Roadmap for Devices and systems 2017 Edition More Moore," 2017. [Online]. Available: https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2017/2017IRDS_MM.pdf. [Accessed 16 11 2020].
- [67] Chamness L., "Dawn of The Data-Centric Era," *MANUFACTURING, PACKAGING & MATERIALS*, pp. Available online: <https://semiengineering.com/dawn-of-the-data-centric-era/>, 2018.
- [68] Radamson H. H., Zhang, Y. B., He X. B., Cui H. S., Li J. J., Xiang J. J., Liu J. B., Gu S. H., Wang G. L., "The Challenges of Advanced CMOS Process from 2D to 3D," *Appl. Sci*, vol. 1047, 2017.
- [69] Radamson H. H., Simoen E., Luo J., Zhao C., "Past, Present and Future of CMOS," *Elsevier*, pp. 95-114. ISBN 978-008-102-139-2, 2018.
- [70] Zhang Q., Yin H., Luo J., Yang H., Meng L., Li Y., Wu Z., Zhang Y., Zhang Y., Qin C., "FOI FinFET with ultra-low parasitic resistance enabled by fully metallic source and drain formation on isolated bulk-fin," in *In Proceedings of the IEDM*, San Francisco, CA, USA, 2016.
- [71] Cheng K., Seo S., Faltermeier J., Lu D., Standaert T., Ok I., Khakifirooz A., Vega R., Levin T., Li J., «Bottom oxidation through STI (BOTS) a novel approach to fabricate dielectric isolated FinFETs on bulk substrates,» σε *In Proceedings of the 2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers*, Honolulu, HI, US , 9n12 June 2014; pp. 1n2, 2014.
- [72] Xu W. J., Yin H. X., Ma X. L., Hong P. Z., Xu M., Meng L. K., "Novel 14-nm Scallop-Shaped FinFETs (S-FinFETs) on Bulk-Si Substrate," *Nanoscale Res*, vol. 10, pp. 1-7, 2015.
- [73] Zhang Q. Z., Yin H. X., Meng L. K., Yao J. X., Li J. J., Wang G. L., Li Y. D., Wu Z. H., Xiong W. J., Yang H., "Novel GAA Si Nanowire p-MOSFETs With Excellent Short-Channel ect Immunity via an Advanced Forming Process," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 39, pp. 464-467, 2018.

- [74] Nanolithography, "Photolithography," nanolithography, 2020.
- [75] He J., Feng M., Yaozong Z., Wang J., Zhou R., Gao H., Zhou Y., Sun Q., Liu J., Huang J., Zhang S., Wang H., Ikeda M., Yang H., "On-wafer fabrication of cavity mirrors for InGaN-based laser diode grown on Si," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, 2018.
- [76] "research.utdallas," [Online]. Available: <https://research.utdallas.edu/cleanroom/manuals/reactive-ion-etching-tool-and-wafer-etching>. [Accessed 7 2 2021].
- [77] Lee H.S., Yoon J.-B., "A simple and effective lift-off with positive photoresist," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 15, pp. 2136-2140, 2005.
- [78] Van Kessel P.F., Hornbeck L., Meier R. , Douglas M., "A MEMS based projection display," in *Proc. IEEE* , 1998.
- [79] Yoon J.-B., Han C.-H., Yoon E., Kim C.-K., "Monolithic fabrication of electroplated inductors using three-dimensional photolithography of a thick photoresist," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 7081-7085, 1998.
- [80] Song I.-H., Ajmera P.K. , "Use of photoresist sacrificial layer with SU-8 electroplating mold in MEMS fabrication," *J. Micromech. Microeng*, vol. 13, pp. 816-821, 2003.
- [81] Nakajima A., Kim P., Honda N., Hikichi K., Esashi M., Tanaka S. , "Fabrication and high-speed characterization of SU-8 shrouded two-dimensional microimpellers," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 17, pp. 230-236, 2007.
- [82] Graff M., Mohanty S.K., Moss E., Frazier A.B. , "Microstenciling: a generic technology for microscale patterning of vapor deposited materials," *J. Microelectromech. Syst.* , vol. 13, pp. 956-962, 2004.
- [83] Brugger J., Andreoli C., Despont M., Drechsler U., Rothuizen H., Vettiger P. , "Self-aligned shadow mask technique for patterning deeply recessed surfaces of micro-electro-mechanical systems devices," *Sens. Actuators*, no. 76, pp. 329-334, 1999.

- [84] Seo J.-H., Park J.H., Kim S.I., Park B.J., Ma Z., Choi J. , "Nanopatterning by laser interference lithography: applications to optical devices," *J. Nanosci. Nanotechnol*, vol. 14, pp. 1521-1532, 2014.
- [85] Byun I., Kim J. , "Cost-effective laser interference lithography using a 405 nm AlInGaN semiconductor laser," *J. Micromech. Microeng*, vol. 20, 2010.
- [86] Xiamen Wanhos Solar Technology , "Overview Of The Development Of Leading Polysilicon Companies In China And Abroad," Xiamen Wanhos Solar Technology Co.,Ltd , 5 9 2019. [Online]. Available: <https://www.wanhossolars.com/news/overview-of-the-development-of-leading-polysil-27003154.html>. [Accessed 21 12 2020].
- [87] U. G. Survey, "Silicon," *Minerals Yearbook*, 2008.
- [88] Hazeltine B. & Fero C., "Advancements in the commercial production of polysilicon," *Solar*, vol. 2, no. 3, 2010.
- [89] Sarukura S., Fukuda T., Handbook of Crystal Growth: Bulk Crystal Growth (Second Edition). Czochralski Growth of Oxides and Fluorides, P. Rudolph, Ed., Elsevier B.V., 2015, pp. 1351-1381.
- [90] Woditsch P., Koch W., "Solar grade silicon feedstock supply for PV industry," *Sol. Energ. Mate. Sol. Cells*, vol. 72, pp. 11-26, 2002.
- [91] Istratov A.A., Buonassini T., Pickett M.D. , Heuer M., Weber E.R., "Control of metal impurities in "dirty" multicrystalline silicon for solar cells," *Mat. Sci. Eng. B*, vol. 134, pp. 282-286, 2006.
- [92] Hull R. (Ed.), Properties of Crystalline Silicon, London: Inspec, 1999.
- [93] Landolt-Boörnstein Group III, Condensed Matter, vol. 41A2a and 41A1b, Springer, 2002.
- [94] Martin J., Kuetsgens U., Stumpel J., Becker P., "The silicon lattice parameter—an invariant quantity of nature?," *Metrologia* 35, pp. 811-817, 1998.

- [95] Tilli M., Motooka T., Airaksinen V.M., Franssila S., Krockel M.P., Lindroos V., "Micro & nano technologies - Handbook of Silicon based MEMS materials and technologies," *Elsevier*.
- [96] Falster R., Voronkov V.V., Quast F., "On the properties of the intrinsic point defects in silicon: a perspective from crystal growth and wafer processing," *Phys. Status Solidi B*, pp. 219-244, 2000.
- [97] Samuels J. , Roberts S.G. , "The brittle-ductile transition in silicon," *Experiments, P. Roy. Soc. Lond*, pp. 1-23, 1989.
- [98] onscale, <https://onscale.com/blog/simulating-packaging-induced-thermal-stress-in-mems/>, [Accessed 2 11 2021]
- [99] Vedde J. & Gravesen P., "The fracture strength of nitrogen doped silicon wafers," *Mater. Sci. Eng. ,* pp. 246-250, 1996.
- [100] Sumino K. , Yonenaga I., Yuasa A., "Mechanical strength of oxygen doped float-zone silicon crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 763-766, 1980.
- [101] Sumino K., Harada H., Yonenaga I. , "The origin of the difference in the mechanical strengths of Czochralski-grown silicon and float-zone-grown silicon," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 49-52, 1980.
- [102] Takeno H., Aihara K., Hayamizu Y., Masui T. , "Influence of rapid thermal annealing on thermal donor formation and oxygen precipitation in Czochralski silicon," *The electrochemical society*, vol. 99, no. 1, pp. 150-161, 1999.
- [103] Sze S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, NY,, 1981.
- [104] Kovacs G.T.A., Maluf N.I. , Petersen K.E. , "Bulk micromachining of silicon," in *Proc. IEEE*, 1998.
- [105] Seidel H., Csepregi L. , "Design optimization for cantilever-type accelerometers," *Sens. Actuators ,* pp. 81-92, 1984.

- [106] Bustillo J.M., Howe R.T., Muller R.S., "Surface micromachining for microelectromechanical systems," in *Proc. IEEE*, 1998.
- [107] S. A. Laermer F., "Method of Anisotropically Etching Silicon". U.S. Patent Patent 5,501,893..
- [108] Kanda Y., "What kind of SOI wafers are suitable for what type of micromachining purposes?," in *6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'91)*, San Francisco, CA, 1991.
- [109] Madou M.J. , " Fundamentals of Microfabrication," *CRC Press*, pp. 280-282, 2002.
- [110] Noworolski J.M., Klaassen E., Logan J. , Petersen K., Mafluf N., "Fabrication of SOI wafers with buried cavities using silicon fusion bonding and electrochemical etchback," in *8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '95)*, Stockholm, Sweden, 1995.
- [111] Yole development, "yole," 4 6 2016. [Online]. Available: http://www.yole.fr/2016_press_releases.aspx. [Accessed 24 12 2020].
- [112] MEMS TECHNOLOGY SYMPOSIUM, "Advancing MEMS and Sensors for Today's Exploding Demands," in *MEPTEC*, 2016.
- [113] "3dprintedmicrotec," [Online]. Available: <https://3dprintedmicrotec.com/>. [Accessed 26 12 2020].
- [114] "AARD Technology," AARD Technology, [Online]. Available: <https://www.aardtechnology.com/>. [Accessed 26 12 2020].
- [115] "accurion," accurion, [Online]. Available: <https://www.accurion.com/solutions-for-science>. [Accessed 26 12 2020].
- [116] "Afore," Afore, [Online]. Available: <https://aforeoy.com/>. [Accessed 26 12 2020].
- [117] "Berkeley Sensor & Actuator Center," BSAC, [Online]. Available: <http://bsac.berkeley.edu/>. [Accessed 26 12 2020].

- [118] "Canon," CANON, [Online]. Available: <https://www.usa.canon.com/internet/portal/us/home>. [Accessed 26 12 2020].
- [119] "Kyodo," Kyodo, [Online]. Available: <https://www.kyodo-inc.co.jp/english/>. [Accessed 26 12 2020].
- [120] "LyncéeTec," LyncéeTec, [Online]. Available: <https://www.lynceetec.com/>. [Accessed 26 12 2020].
- [121] "MEMS FOUNDRY," MEMS FOUNDRY, [Online]. Available: <http://mems-foundry.com/>. [Accessed 26 12 2020].
- [122] "Teledyne micralyne," Teledyne micralyne, [Online]. Available: <http://www.micralyne.com/>. [Accessed 26 12 2020].
- [123] "Nikon," Nikon Precision, [Online]. Available: <https://www.nikonprecision.com/>. [Accessed 26 12 2020].
- [124] "Plasma-Therm," Plasma-Therm, [Online]. Available: <http://www.plasmatherm.com/index.html>. [Accessed 26 12 2020].
- [125] "ULVAC MEMS FOUNDRY," ULVAC Technologies, [Online]. Available: <https://www.ulvac.com/services/MEMS-Foundry.cfm>. [Accessed 26 12 2020].
- [126] Yole Development, "Status of the MEMS Industry report," 2019.
- [127] Titu B., Titu M., Marius B., "MEMS Manufacturing and Reliability," in *Journal Proceedings in Manufacturing Systems*, 2012.
- [128] Wibool P. & Zhen Q., "Optical MEMS. Microelectromechanical Systems and Devices," p. 10.5772/27612. DOI: 10.5772/27612, 2011.
- [129] Schuettler M. & Stieglitz T., "Microassembly and micropackaging of implantable systems," *Implantable Sensor Systems for Medical Applications*, 2013.

- [130] Chapuis Y. A., Debray A., Jalabert L., Fujita H., "Alternative approach in 3D MEMS-IC integration using fluidic self-assembly techniques," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 10:105002, pp. DOI: 10.1088/0960-1317/19/10/105002, 2009.
- [131] Li S. S. & Cheng C. M., "Analogy among microfluidics, micromechanics, and microelectronics," *Lab on the chip*, 2013.
- [132] Bajenescu T. & Marius B., "MEMS Manufacturing and Reliability," *Journal Proceedings in Manufacturing Systems*, vol. 7, pp. 79-82, 10.5281/zenodo.2640042, 2012.
- [133] Vigna B. , "More than moore: micro-machined products enable new applications and open new markets," *IEEE International Electron Devices Meeting Technical Digest*, pp. 3-10, 2005.
- [134] Vigna B., *MEMS. ST Microelectronics*, Microelectronics, 2007.
- [135] ITRS, MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS (MEMS), INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS, 2013.
- [136] Bassous E. , Taub H.H., Kuhn L. , "Ink jet printing nozzle arrays etched in silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 135, 1977.
- [137] Kamphoefner K.J. , "Ink jet printing," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 584, 1972.
- [138] Chabinyk M.L., Wong W.S. , Arias A.C., Ready S., Lujan R.A., Daniel J. H. , "Printing methods and materials for large-area electronic devices," *Proc. IEEE*, vol. 93, 2005.
- [139] Frew S.E., Sammut S.M. , Shore A.F., Ramjist J.K, Al-Bader S., Rezaie R. , "Chinese health biotech and the billion-patient market," *Nat. Biotechnol*, vol. 26, pp. 37-53, 2008.
- [140] Yole development, "Sensors for wearable electronics & mobile healthcare," 2015. [Online]. [Accessed 4 2 2021].

- [141] Geschke O., Klank H., Telleman P. , "Microsystem Engineering of Labona-Chip Devices," *Wiley-VCH*, 2008.
- [142] Webster J.G., "Design of Cardiac Pacemakers," *IEEE Press*, 1995.
- [143] Castoldi L., "The MEMS Revolution," *SEMI Networking Day*, p. 41, 2012.
- [144] Kuisma H., "Inertial sensors for automotive applications," in *Proceedings of Transducers'01: Eurosensors XV*, 2001.
- [145] Aziz S., "Applications of MEMS Sensors in Automotive Industry," *EasyChair Preprint*, no. 3337, 2020.
- [146] Weber W., "Ambient intelligence-industrial research on a visionary concept," in *Proceedings of the 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, 2003.
- [147] Aylward R., Paradiso J.A. , "A compact, high-speed, wearable sensor network for biomotion capture and interactive media, in: Proceedings of 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks," in *IPSN*, 2007.
- [148] Chapman M., "campaign," 18 3 2016. [Online]. Available: <https://www.campaignlive.co.uk/article/smartwatches-seize-quarter-wearable-device-market-apple-watch-launch/1387939>. [Accessed 24 12 2020].
- [149] van Kessel P.F., Hornbeck L.J., Meier R.E., Douglass M.R. , "A MEMS-based projection display," *Proc. IEEE*, vol. 86, 1998.
- [150] Tauschek S., "macnica," 21 1 2020. [Online]. Available: <https://www.macnica.eu/news-archive/2020-01-21-ricoh-stellt-zwei-laserdiodentreiber-ics-fuer-head-displays-und-pico>. [Accessed 18 12 2020].
- [151] Hallstein S., Carey G.P., Carico R., Dato R., Dudley J.J., Earman A.M., "RGB laser light sources for projection displays," in *Proceedings of the 20th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2007.

- [152] Huebschman M.L., Munjuluri B., Garner H.R. , "Dynamic holographic 3-D image projection," *Image Express* , vol. 11, pp. 437-445, 2003.
- [153] Liao C., Tsai J. , "The evolution of MEMS displays," *IEEE Trans. Ind. Electron*, pp. 1057-1065, 2009.
- [154] Schenk S. , "Pocketnow," 9 10 2013. [Online]. Available: <https://pocketnow.com/oppo-mems-cameras>. [Accessed 18 12 2020].
- [155] Holleis P., Kranz M., Gall M., Schmidt A., "Adding context information to digital photos," in *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'05)*, 2005.
- [156] Microsoft Mobile, *Nokia Lumia 920*, Microsoft Mobile, 2012.
- [157] Iannacci J. , "RF-MEMS technology as an enabler of 5G: Low-loss ohmic switch tested up to 110 GHz," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 279, p. 624–629, 2018.
- [158] Van Spengen W. M. , "Capacitive RF MEMS switch dielectric charging and reliability: A critical review with recommendations," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, no. 7, 2012.
- [159] Shekhar S., Vinoy K., Ananthasuresh G. , "Low-voltage highreliability MEMS switch for millimeter wave 5G applications," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 28, no. 7, 2018.
- [160] Refurvo, "Refurvo LCC," 4 1 2019. [Online]. Available: <https://www.refurvo.com/high-rf-switch-is-now-available-menlo-micro/>. [Accessed 18 12 2020].
- [161] Iannacci J., "RF-MEMS technology: An enabling solution in the transition from 4G-LTE to 5G mobile applications," in *Proc. IEEE Sensors*, 2017.
- [162] Ermolov V., Nieminen H., Nybergh K., Ryha T., Silanto S. , "MEMS for mobile communications, Part I," *Circuit Assembly*, pp. 42-44, 2002.
- [163] Iannacci J. , "'Internet of Things (IoT); Internet of everything (IoE); tactile Internet; 5G—A (not so evanescent) unifying vision empowered by EHMEMS

- (energy harvesting MEMS) and RF-MEMS (radio frequency MEMS)," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 272, pp. 187-198, 2018.
- [164] Yu Y.-W., Zhu J., Jia S.-X., Shi Y. , "'A high isolation series-shunt RF MEMS switch,'" *Sensors*," vol. 9, no. 6, 2009.
- [165] Ma Li., Soin N., Daut M.H.M, Hatta S.F.M , "Comprehensive Study on RF-MEMS Switches Used for 5G Scenario," *IEEE Access*, 2019.
- [166] Skyworks, "General purpose RF switches, in Select RF Switches Available From Stock for Prototype or High-Volume Production.," *Woburn, MA, Skyworks Solutions*, 2017.
- [167] "allaboutcircuits," 4 12 2017. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/news/calorimetric-principle-new-high-performance-mems-flow-sensor-modules/>. [Accessed 10 2 2021].
- [168] Smagorinsky M., "General Circulation Experiments with the Primitive Equations," *Monthly Weather Review*, vol. 91, no. 3, pp. 99-164, 1963.
- [169] Orszag S. A. , "Analytical Theories of Turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 41, p. 363–386, 1970.
- [170] Löfdahl L. & Mohamed G., "MEMS Applications in Turbulence and Flow Control," *Progress in Aerospace Sciences - PROG AEROSP SCI.*, vol. 35, pp. 101-203, 1999.
- [171] Yasin F. M., Nagel D., Korman C. , "Noise in MEMS," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, 2009.
- [172] Schmitt P., "Engineering a Compliant Mechanical Amplifier for MEMS Sensor Applications," *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, vol. 29, no. 2, 2020.
- [173] Schmitt P., Mehner H., Hoffmann M., "A micromechanical binary counter with MEMS-based digital-to-analog converter," in *Proc. Multidisciplinary Digit. Publishing Inst*, 2018.

- [174] Newnham R., Dogan A., Xu Q., Onitsuka K., Tressler J., Yoshikawa S., "Flexensional 'moonie' actuators," in *in Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, 1993.
- [175] Xu Q., Dogan A., Tressler J., Yoshikawa S., Newnham R. , "Ceramicmetal composite actuator," *Ferroelectrics*, vol. 160, no. 1, p. 337–346, 1994.
- [176] "Te connectivity," [Online]. Available: <https://www.te.com/usa-en/products/sensors/vibration-sensors/embedded-accelerometers.html?tab=pgp-story>. [Accessed 10 2 2021].
- [177] Thompson S. E., Armstrong M., Auth C., "A 90-nm logic technology featuring strained-silicon," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 51, no. 11, p. 1790–1797, 2004..
- [178] Ouyang Q., "Investigation of CMOS devices with embedded SiGe source/drain on hybrid orientation substrates," in *Symposium on VLSI Technology*, 2005.
- [179] Wang Y. G. G. , "Effects of uniaxial mechanical stress on drive current of 0.13 um MOSFETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 50, no. 2, p. 529–531, 2003.
- [180] Chidambaram P. R. R., Bowen C., Chakravarthi S., Machala C., Wise R., "Fundamentals of silicon material properties for successful exploitation of strain engineering in modern CMOS manufacturing," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 53, no. 5, p. 944–964, 2006.
- [181] Marini D., "Lattice deformations in strained-silicon rib structures for photonic devices," in *Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies*, 2014.
- [182] onscale, [Online]. Available: <https://onscale.com/blog/simulating-packaging-induced-thermal-stress-in-mems/>. [Accessed 11 2 2021].
- [183] Kirk H. R., Malik I. J., Sullivan J., Kang S., "Wafer-level uniaxially strained s-SOI by direct mechanical stress," in *IEEE International SOI Conference (IEEE Cat No04CH37573)*, 2004.

- [184] Korhonen M., Paszkiet C., Li C. Y., "Mechanisms of thermal stress relaxation and stress-induced voiding in narrow aluminum-based metallizations," *Journal of Applied Physics*, vol. 69, no. 12, p. 8083, 1991.
- [185] Liu C. L., Tang D. P., "Numerical Analysis of Thermal Residual Stress in Diamond Film Deposited on Molybdenum Substrate," *Advanced Materials Research*, vol. 139–141, p. 456–459, 2010.
- [186] Besland M. P., Lapeyrade M., Delmotte F., Hollinger G., "Interpretation of stress variation in silicon nitride films deposited by electron cyclotron resonance plasma," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 22, no. 5, p. 1962, 2004.
- [187] Marini D., Montanad B., Mancarellal F., Ferril M., Balbonil R., "Lattice deformations in strained-silicon rib structures for photonic devices," in *in Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies*, 2014.
- [188] Arghavani R. , "Stress management in sub-90-nm transistor architecture," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 51, no. 10, p. 1740–1743, 2004.
- [189] Shaw M., Ziglioli F., Combi C., Baldo L., "Package design of pressure sensors for high volume consumer applications," in *Proceedings—electronic components and technology conference*, 2008.
- [190] Yulong Z., Libo Z., Zhuangde J., "A novel high temperature pressure sensor on the basis of SOI layers," *Sens Actuators, Phys.*, p. 108–111, 2003.
- [191] Fleming W.J. , "Overview of automotive sensors," *IEEE Sens J.*, vol. 1, pp. 296–308 , <https://doi.org/10.1109/7361.983469>, 2001.
- [192] Fleming W.J., "New automotive sensors—a review," *IEEE Sens J.*, vol. 8, p. 1900–1921. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.2006452>, 2008.
- [193] Vetrano M., "MEMS Manufacturing for 2020 and Beyond," 2020.
- [194] Yole Development, "MEMS industry: the headwinds from COVID-19 and the way forward. 1," Press release, Yole Development, 2020.

- [195] Atalla M. M. & Dawon K., "Stabilization of Silicon Surfaces by Thermally Grown Oxides," *Bell System Technical Journal*, vol. Vol. 38, pp. 749-783, May 1959.
- [196] Lim S. W., "Toward the Surface Preparation of InGaAs for the Future CMOS Integration," *Solid State Phenom*, vol. 282, pp. 39-42, 2018.
- [197] Ouellette J., "SiliconñGermanium Gives Semiconductors the Edge," *Wayback Machine, The Industrial Physicist*, 2002.
- [198] Rymaszewski E. J., Walsh J. L., Leehan G. W., "Semiconductor Logic Technology in IBM," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 25, no. 5, 1981.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Διηλεκτρικό: Ένα πολώσιμο μέσο, συνήθως μονωτής.

Ημιαγωγός: Ένα κρυσταλλικό στερεό που συμπεριφέρεται κάπου μεταξύ ενός αγωγού (όπως σίδηρο) και ενός μονωτή (όπως γυαλί). Οι ημιαγωγοί είναι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται σε ενεργές ηλεκτρονικές και οπτικές συσκευές.

Καλούπι: Ένα μονό κομμάτι του ημιαγωγού που περιέχει ολόκληρο το τσιπ του ολοκληρωμένου κυκλώματος, το οποίο δεν έχει ακόμα συσκευαστεί.

Ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC): Ένα τσιπ που περιέχει ηλεκτρικά εξαρτήματα όπως τρανζίστορ, αντιστάσεις και πυκνωτές που συνδέονται με καλωδίωση, για να σχηματίσουν ένα κύκλωμα σχεδιασμένο να εκτελεί συγκεκριμένες εργασίες.

Ολοκληρωμένος αισθητήρας: Ένας αισθητήρας που είναι ενσωματωμένος σε κυκλώματα επεξεργασίας σήματος σε ένα μόνο πακέτο (συνήθως ένα τσιπ σιλικόνης).

Πύλη: Ένα από τα τρία ηλεκτρόδια ενός τρανζίστορ πεδίου. Η πύλη είναι η σύνδεση που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του τρανζίστορ, μεταβάλλοντας την τάση (ή το ρεύμα) μέσω αυτής.

Σιδηροηλεκτρικά: Τα σιδηροηλεκτρικά υλικά (συνήθως οξείδια) έχουν μια αυθόρμητη ηλεκτρική πόλωση απουσία εφαρμοσμένου πεδίου που μπορεί να αντιστραφεί με εφαρμογή ενός πιθανού πεδίου. Όλοι οι σιδηροηλεκτρικοί κρύσταλλοι είναι ταυτόχρονα πυροηλεκτρικοί και πιεζοηλεκτρικοί.

Τρανζίστορ πεδίου: Μια τάξη τρανζίστορ στην οποία το ρεύμα ρέει από μια πηγή σε μέσω ενός καναλιού του οποίου η αντίσταση μπορεί να ελεγχθεί εφαρμόζοντας μια τάση σε μια πύλη.

Τσιπ: Ένα κομμάτι ημιαγωγών που περιέχει το ολοκληρωμένο κύκλωμα.

