
2η Συνεδρίαση: **A. Σχεδίαση - έρευνα νέων αισθητήρων.**

Προεδρείο: Δ. Τσουκαλάς, Β. Αποστόλου, Δ. Βέντζας, Ν. Βλάχος.

Πρόεδρος: Παρακαλούμε τον κύριο Αβαριτσιώτη, καθηγητή του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, με θέμα: Ευφυείς αισθητήρες: «state of the art», να ξεκινήσουμε την ημερίδα μας με την πρώτη ομιλία. Παρακαλούμε τους επόμενους ομιλητές, επειδή δεν

γνωρίζομαστε μεταξύ μας, να δηλώνουν στο προεδρείο ότι παρευρίσκονται και ότι θα παρουσιάσουν την εργασία τους, για προφανείς λόγους, ώστε να κατανείμουμε το χρόνο σωστά.

Αβαριτσιώτης: Κυρίες και κύριοι, καλημέρα σας. Θα κάνω μια γενική παρουσίαση, της καταστάσεως στην οποία βρίσκεται από πλευράς τεχνολογικής, ένας μεγάλος αριθμός από αισθητήρες.

Ήδη, από τους προηγούμενους ομιλητές, έχει δοθεί ο ορισμός του τι εστί αισθητήρας, όπως επίσης, έχει αναφερθεί η αναγκαιότητα - από την κυρία που μίλη-

σε - ένας αισθητήρας να γίνει ευφυής, να μπει ευφυΐα κάπως σε έναν αισθητήρα και όλα αυτά, νομίζω, έφτιαξαν το κατάλληλο περιβάλλον για να πω και εγώ μερικά πράγματα, στα δέκα επόμενα λεπτά. Η ομιλία θα είναι στα ελληνικά, συγγνώμη όμως, οι διαφάνειες θα είναι στα αγγλικά.

Θέμα: Ευφυείς αισθητήρες: state of the art.

Εισηγητής: **I. Ν. Αβαριτσιώτης**, καθηγητής Μικροηλεκτρονικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Γίνεται μια ανασκόπηση της προόδου που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα, των κατασκευαστικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται και των τεχνολογικών προβλημάτων που πρέπει να επιλυθούν.

1. Εισαγωγή

Ο όρος «ευφυής αισθητήρας» σήμερα προσδιορίζει έναν αισθητήρα, ο οποίος έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά[1]:

- ψηφιακή έξοδος
- αμφίπλευρη επικοινωνία με συγκεκριμένο bus

- δυνατότητα προσπέλασης σε συγκεκριμένη θέση μνήμης

- δυνατότητα εκτέλεσης συγκεκριμένων εντολών και λογικών λειτουργιών.

Επιπλέον, είναι επίσης επιθυμητό ένας ευφυής αισθητήρας να περιλαμβάνει λειτουργίες όπως:

- αντιστάθμιση δευτερεύουσων παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασίας),
- ανίχνευση λάθους
- αυτο-έλεγχο, και
- αυτο-ρύθμιση

Οι προαναφερθείσες λειτουργίες επιτυγχάνονται είτε με την εισαγωγή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στο πακέτο του αισθητήρα, είτε με τη σύγχρονη κατασκευή του αισθητήρα στο ίδιο κομμάτι πυριτίου με το συμπαρομαρτούν ηλεκτρονικό κύκλωμα.

Από πλευράς οικονομικών μεγεθών στην περιοχή των αισθητήρων η παγκόσμια αγορά αυξάνεται συνεχώς με ρυθμό 8.8% κατά έτος [2] που είναι παρόμοιος με αυτόν των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Εκτιμάται ότι η αγορά για εφαρμογές καταναλωτού θα αναπτυχθεί από \$20.5 δισεκατομμύρια το 1990 σε \$48 δισεκατομμύρια το 2000.

Ζήτηση για αισθητήρες είναι έντονη στις ΗΠΑ αντικατοπτρίζοντας ένα μερίδιο 38.7% της παγκοσμίου ζήτησεως το 1990. Ακολουθεί η Ιαπωνία με 23%, η τότε Δ. Γερμανία με 13%, και η Γαλλία, Ιταλία και U.K. με 7.2%, 6.7% και 5.6% αντιστοίχως.

Οι τομείς που χρειάζονται αισθητήρες είναι: process engineering που κατανάλωσε αισθητήρες αξίας \$5.8 δισεκατομμυρίων το 1990. Ακολουθούν ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας με \$4.3 δισεκατομμύρια και ο τομέας των μεγάλων βιομηχανικών εγκαταστάσεων με \$3.8 δισεκατομμύρια.

Υπάρχει μια συνεχής αναζήτηση για νέα υλικά, υψηλότερες ευαισθησίες και διακριτικές ικανότητες, αλλά ένα ζεστό πρόβλημα είναι η αξιοπιστία των αισθητήρων μαζικής παραγωγής. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι οι αναμενόμενες καινοτομίες θα προέλθουν από την αλληλεπίδραση της φυσικής των αισθητήρων με άλλες τεχνολογίες και επιστήμες. Ως παράδειγμα θα μπορούσε να αναφερθεί η συνεργασία μεταξύ τεχνολογίας αισθητήρων και βιοτεχνολογίας που δίνει νέους αισθητήρες. Παρομοίως, τεχνολογία αισθητήρων μαζί με τεχνολογία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων έχει δώσει νέους αισθητήρες πίεσης και επιτάχυνσης με ενδιαφέρουσες επιδόσεις, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Την τελευταία εικοσαετία ο υψηλός βαθμός ολοκλήρωσης που επιτεύχθηκε στη μικροηλεκτρονική έχει οδηγήσει αφενός σε πολύπλοκα προϊόντα και αφετέρου σε νέες κατασκευαστικές τεχνικές, με βάση τις οποίες περιφερειακές συσκευές, όπως οι αισθητήρες (που μετατρέπουν φυσικές ή χημικές παραμέτρους σε ηλεκτρικό σήμα), οι actuators (που μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα σε μηχανική κίνηση) και οι transducers (που μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα σε οπτικά με τη χρήση οπτικών ινών) έχουν αρχίσει να κατασκευάζονται σε εξαιρετικά μικρές διαστάσεις, με αποτέλεσμα την εισαγωγή ενός νέου τεχνολογικού κλάδου, αυτού της μικρο-μηχανικής και μικρο-συστημάτων (micromechanics and microsystems technology).

2. Αρχιτεκτονικές και λειτουργίες

Οι αισθητήρες έχουν εξελιχθεί μέσα από διακριτές γενιές. Η πρώτη γενιά δεν είχε συμπαρομαρτούν ηλεκτρονικό σύστημα. Η δεύτερη γενιά αισθητήρων περιελάμβανε αναλογικά ηλεκτρονικά συστήματα μακριά όμως από τον αισθητήρα. Η τρίτη γενιά, η οποία

αφορά και την πλειονότητα των αισθητήρων που διατίθενται σήμερα στην αγορά, τουλάχιστον η πρώτη βαθμίδα ενίσχυσης βρίσκεται στο ίδιο πακέτο ή στο ίδιο κομμάτι ημιαγωγού με τον αισθητήρα. Ως εκ τούτου, η έξοδος από τα συστήματα τρίτης γενιάς είναι ένα αναλογικό σήμα είτε σαν τάση, είτε σαν συχνότητα παλμών. Το σήμα αυτό ψηφιοποιείται στην άλλη άκρη από ένα μικροεπεξεργαστή. Η τέταρτη γενιά αισθητήρων που αναπτύσσεται σήμερα περιλαμβάνει τα αναλογικά και τα ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα στο ίδιο κομμάτι ημιαγωγού με τον αισθητήρα, δίνοντας τη δυνατότητα αμφίπλευρης επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρα και υπολογιστή. Τελευταία άρχισαν να εμφανίζονται οι έξυπνοι αισθητήρες της πέμπτης γενιάς στους οποίους η μετατροπή των δεδομένων επιτελείται στον αισθητήρα, έτσι ώστε η αμφίπλευρη επικοινωνία με το μικροϋπολογιστή να είναι ψηφιακή. Ένας αισθητήρας 5ης γενιάς που αποτελεί παράδειγμα μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (VLSI) μπορεί να μετρά την έξοδο διαφόρων αισθητήρων, μπορεί να κάνει επεξεργασία σήματος και να στέλνει την ουσιαστική πληροφορία σε υψηλότερου επιπέδου επεξεργαστή. Σαν παράδειγμα, ένας αισθητήρας αερίων μπορεί να μετρά πίεση αερίου, θερμοκρασία, ροή και να περιλαμβάνει ένα σύστημα αισθητήρων για καλύτερη της διακριτικότητας και ευαισθησίας.

Η εφαρμογή των ευφυών αισθητήρων για πολλές εφαρμογές απαιτεί την υλοποίηση τριών βασικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Αυτά είναι: επεξεργασία σήματος, ψηφιακός έλεγχος και εξωτερική επικοινωνία, όπως περιγράφονται λεπτομερώς στη συνέχεια.

2.1. Επεξεργασία σήματος

Τα σήματα στην έξοδο του αισθητήρα τις περισσότερες φορές είναι ασθενή, ενώ συγχρόνως η αντίσταση εξόδου του στις συχνότερες ενδιαφέροντος είναι υψηλή. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η παρουσία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων πολύ κοντά στον αισθητήρα, τα οποία επιτελούν έναν αριθμό λειτουργιών μεταξύ των οποίων ενίσχυση, προσαρμογή αντίστασης, φίλτράρισμα, απομόνωση και πολυπλεξία.

Ενίσχυση του σήματος πλησίον του αισθητήρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου σήμα προς θόρυβο και πλήρη αξιοποίηση της δυναμικής περιοχής μετατροπέα A/D που συνήθως ακολουθεί. Για τους περισσότερους μονολιθικούς αισθητήρες ο ενισχυτής είναι κατασκευασμένος με την τεχνολογία CMOS που δίνει υψηλή απολαβή ανοιχτού βρόγχου και σχετικά υψηλή αντίσταση εισόδου.

2.2. Ψηφιακός έλεγχος - επεξεργασία

Μια από τις κύριες απαιτήσεις των ευφυών αισθητήρων είναι η συμβατότητά τους με ψηφιακό έλεγχο και συστήματα μικρο-επεξεργαστών. Από τη στιγμή που το σήμα του αισθητήρα έχει ψηφιοποιηθεί είναι δυνατή η εφαρμογή ποικιλίας μεθόδων επεξεργασίας σήματος για τη διόρθωση ενός μεγάλου αριθμού λαθών και προβλημάτων. Όπως π.χ. μηδενισμός του offset, αυτο-έλεγχος, αναγνώριση λάθους και αυτόματη διόρθωσή του καθώς και γραμμικοποίηση σήματος εξόδου.

Το σημαντικότερο όλων όμως είναι η δυνατότητα που προκύπτει για αυτορρύθμιση στο πεδίο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνικών που ανεπτύχθησαν τελευταία για τη ρύθμιση επιταχυνσιόμετρων ^[3] και υπερευαίσθητων αισθητήρων πίεσης ^[4].

2.3. Εξωτερική επικοινωνία

Ένας ευφυής αισθητήρας πρέπει να έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με ρυθμιστή υψηλότερου επιπέδου που διαχειρίζεται ένα συνολικό σύστημα και ως εκ τούτου ένα τμήμα του κυκλώματος του αισθητήρα θα πρέπει να αποτελεί το σύνδεσμο (interface) με το bus του controller. Με την εξωτερική επικοινωνία είναι δυνατόν να επιτελεσθούν λειτουργίες όπως: ρύθμιση, αντιστάθμιση δεδομένων, δεδομένα μετρήσεων και προγραμματισμός μέσω του controller.

3. Κατασκευαστικές τεχνολογίες

Οι έξυπνοι αισθητήρες δεν είναι αναγκαίο να κατασκευάζονται σε μονολιθική μορφή μαζί με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Στην περίπτωση αυτή τα ηλεκτρονικά κυκλώματα πακετάρονται μαζί με τον αισθητήρα και αναφερόμαστε σε ευφυή αισθητήρα, που η ευφυΐα του έχει πακεταρισθεί μαζί με τον αισθητήρα.

Τέτοιοι είδους αισθητήρες σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σήμερα στο ΕΜΠ στα πλαίσια προγράμματος STRIDE-HELLAS, στο οποίο συμμετέχουν και έξι ελληνικές εταιρίες: AMBIT, ATC, DOMUS, ERGON, HITEC και MICREL και το οποίο αφορά στη δημιουργία Κέντρου Έξυπνων Αισθητήρων Στερεάς Κατάστασης στο ΕΜΠ.

Είναι όμως γνωστή η προσπάθεια που γίνεται διεθνώς για την ανάπτυξη μονολιθικών ευφυών αισθητήρων με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογικής και διεπιστημονικής περιοχής που ονομάζεται «Τεχνολογία Μικροσυστημάτων» και η οποία ουσιαστικά ως τεχνολογική πλατφόρμα έχει υιοθετήσει κατασκευαστικές τεχνικές και διαδικασίες γνωστές κυρίως από τη μικροηλεκτρονική. Αυτές είναι η τεχνολογία διπολικών τρανζίστορς, η τεχνολογία MOS και η τεχνολογία CMOS (Complementary MOS).

Η επιλογή της τεχνολογίας κατασκευής εξαρτάται από τις απαιτούμενες επιδόσεις και φυσικά το κόστος κατασκευής σε μαζική παραγωγή.

4. Παραδείγματα

Μία από τις πρώτες προσπάθειες κατασκευής μονολιθικών ευφυών αισθητήρων ^[5] αφορούσε στην κατασκευή αισθητήρα πιεζοαντίστασης βασισμένου στη χρήση γέφυρας αντιστάσεων κατασκευασμένων με θερμική διάχυση στο ίδιο κομμάτι πυριτίου με ενισχυτή διπολικών τρανζίστορς. Το τμήμα της γέφυρας μετετρέπη σε μεμβράνη με τη βοήθεια ιστροπικής υγρής χάραξης.

Έκτοτε, η ανάπτυξη ήταν σχετικά ραγδαία με αποτέλεσμα σήμερα να πωλούνται στην αγορά μονολιθικά

επιταχυνσιόμετρα, μονολιθικοί αισθητήρες για συνδυασμένη μέτρηση πίεσης, θερμοκρασίας και ροής.

Επίσης, παράλληλα υπάρχει μία έντονη δραστηριότητα, κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο, για την ανάπτυξη ευφυών in vivo βιο-αισθητήρων.

5. Συμπεράσματα

Παρατηρείται μια εξαιρετική ανάπτυξη και πρόοδος στην τεχνολογία των μονολιθικών αισθητήρων στερεάς κατάστασης την τελευταία δεκαετία. Η ανάπτυξη αυτή είναι αποτέλεσμα βασικά της τεχνολογικής πρόοδου της μικρο-μηχανικής του πυριτίου, η οποία με τη σειρά της βασίζεται σε γνωστές τεχνικές της μικροηλεκτρονικής που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Υπάρχουν όμως αρκετά προβλήματα που πρέπει να λυθούν για την πλήρη επικράτηση των μονολιθικών αισθητήρων όπως: μείωση του κόστους με την αύξηση, αφενός της απολαβής που χαρακτηρίζει τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες και ελάττωση αφετέρου του κόστους παραγωγής με την ανάπτυξη ειδικών γραμμών παραγωγής αντιστοίχων εκείνων των χυτηρίων πυριτίου.

6. Βιβλιογραφία

1. K. Najafi, «Smart Sensors», Journal of Micromechanics and Microengineering, 1 (1991), p. 86.
2. J. Gosch, «Good Days for Sensors», ELECTRONICS Febr. 1991, p. 32.
3. H. V. Allen et al. «Self-testable Accelerometer Systems», IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (Salt Lake City, Utah, 1989) Technical Digest p. 113.
4. S.T. Cho, et al, «Scaling and Dielectric Stress Compensation of Ultra-sensitive Boron - doped Silicon Microstructures», IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (Napa, CA, 1990) Technical Digest p. 50.
5. J. M. Borky and K. D. Wise, «Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors», IEEE-ED 29 (1979), p. 1906.

Πρόεδρος: Ευχαριστούμε πολύ τον κύριο Αβαριτσιώτη για την εισαγωγική του ομιλία στους ευφυείς αισθητήρες. Αφήσαμε λίγο περισσότερο χρόνο, γιατί υπάρχει κάποιο πρόβλημα με κάποιους ομιλητές, που ναι μεν έχουν στείλει τις εργασίες τους και υπάρχουν στα πρακτικά, αλλά για υπηρεσιακούς λόγους δεν μπόρεσαν να βρεθούν στην ημερίδα.

Ο κ. Ζεκεντές για δέκα λεπτά. Ο κ. Χριστοφόρου είναι εδώ; Ο κ. Μπίρμπας; Ο κ. Μαυρογιαννάκης; Ο κ. Χανιωτάκης;