

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ.

Οι αισθητήρες αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στην επιστήμη των ηλεκτρονικών, εφόσον συνδέουν οποιοδήποτε κύκλωμα ελέγχου με το εξωτερικό περιβάλλον. Τα πεδία εφαρμογής βρίσκονται όπου απαιτείται η αλληλεπίδραση ενός κυκλώματος ελέγχου ή ενός αυτοματισμού με τον εξωτερικό περιβάλλον. Οι συνηθέστερες εφαρμογές είναι οι βιομηχανικοί αυτοματισμοί, τα συστήματα ελέγχου αυτοκινήτων, πλοίων, αεροπλάνων, σε αυτοματισμούς οικιακών συσκευών κλπ. Παραδοσιακά οι αισθητήρες αποτελούν αρκετά ογκώδεις συσκευές με συνηθέστερους τους αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, ροής και τους ανιχνευτές ακτινοβολίας. Τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας της μικρομηχανικής, η ανάπτυξη τόσο των αισθητήρων όσο και των εφαρμογών τους έχει γνωρίσει ραγδαία αύξηση (με προοπτικές ακόμα μεγαλύτερης ανάπτυξης). Η μικρομηχανική αποτελεί την επέκταση της μικροηλεκτρονικής στον χώρο των αισθητήρων, εκμεταλλευόμενη τις τεράστιες τεχνολογικές δυνατότητες που η μικροηλεκτρονική προσφέρει. Με την ανάπτυξη των μικρομηχανικών τεχνικών αφενός βελτιστοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων και κυρίως μειώθηκε δραματικά το κόστος και το μέγεθος τους. Έτσι κατέστη εφικτή η ανάπτυξη νέων πρωτότυπων μικρομηχανικών δομών, σχεδιασμένων για ειδικές εφαρμογές όπως ιατρικά εμφυτεύματα, νέοι αυτοματισμοί οικιακών συσκευών καθημερινής χρήσης, ανάπτυξη καινούργιων συστημάτων ασφαλείας και περιβαλλοντικής προστασίας στα αυτοκίνητα κλπ. Επιπρόσθετα υπάρχει η τάση αντικατάστασης των συμβατικών αισθητήρων, από μικροσυστήματα νέας τεχνολογίας καθαρά για τεχνοοικονομικούς λόγους.

Οι αισθητήρες πίεσης αποτελούν μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες αισθητήρων, εφόσον η μέτρηση και έλεγχος της πίεσης απαιτείται σε μεγάλη πληθώρα εφαρμογών. Τέτοιες είναι σχεδόν κάθε είδους βιομηχανικός αυτοματισμός (υδραυλικά – πνευματικά συστήματα), στα μέσα μεταφοράς, σε οικιακές συσκευές και τέλος στην ιατρική. Στην ιατρική ιδίως η ανάπτυξη μικρομηχανικών αισθητήρων πίεσης τα τελευταία χρόνια έχει προσφέρει την ανάπτυξη πολλών νέων διαγνωστικών και θεραπευτικών τεχνικών (καθετήρες, εμφυτεύματα μέτρησης – ελέγχου καρδιακής πίεσης), κυρίως χάρη στην μοναδικότητα που προσφέρει η μικρομηχανική στην κατασκευή αισθητήρων αξιόπιστων και πολύ μικρών σε όγκο και κατανάλωση ενέργειας.

Σε αυτή τη διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται μια πρωτότυπη κατασκευαστική διαδικασία υλοποίησης αισθητήρων πίεσης από κρυσταλλικό πυρίτιο, σχεδιασμένοι κατάλληλα για εμφύτευση στον άνθρωπο ώστε να μετρούν την αρτηριακή πίεση. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι αισθητήρες να είναι τύπου χωρητικότητας, δηλαδή οι μεταβολές της ασκούμενης πίεσης να μεταβάλλουν την χωρητικότητα του αισθητήρα. Η κατανάλωση σε ενέργεια είναι η ελάχιστη δυνατή, γεγονός που τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις παθητικής τηλεμετρίας (passive telemetry), δηλαδή διατάξεις που δεν απαιτούν την παροχή ενέργειας από μπαταρία.

Επιπρόσθετα η όλη κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί την χρήση μόνο τριών λιθογραφικών βημάτων (lithography step) και είναι αυτοευθυγραμμιζόμενη, γεγονός που απαντάται για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία. Έτσι η όλη διεργασία επιτρέπει την χαμηλή κοστολόγηση των αισθητήρων και κυρίως εγγυάται την υψηλή τους αξιοπιστία, λόγω της κατασκευαστικής τους απλότητας. Η αξιοπιστία τους ενισχύεται και από το ότι οι αισθητήρες υλοποιούνται μόνο από καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο (όχι πυρίτιο σε γυαλί ή

πολυκρυσταλλικό πυρίτιο), υλικό το οποίο έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Παράλληλα το γεγονός ότι η κατασκευαστική διαδικασία είναι αυτοευθυγραμμιζόμενη εγγυάται την χαμηλή της ευαισθησία στα κατασκευαστικά σφάλματα. Τέλος η όλη διεργασία επιτρέπει την υλοποίηση αισθητήρων πίεσης σε πολύ μικρό όγκο ( $\sim 0.5\text{mm}^3$ ), γεγονός πολύ σημαντικό σε εφαρμογές όπου ο χώρος είναι πολύ περιορισμένος.

Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** της εργασίας δίνεται μια περιληπτική περιγραφή των αισθητήρων και τα μέρη από τα οποία αποτελείται

Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιγράφονται περιληπτικά οι βασικές τεχνικές της μικροηλεκτρονικής που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του αισθητήρα και αναλυτικά οι μικρομηχανικές διεργασίες κλειδιά που απαιτούνται για την υλοποίησή του. Αυτές είναι η ανισοτροπική υγρή εγχάραξη με προκαθορισμένη φραγή εγχάραξης (Anisotropic wet Etching with Etch Stop) και η θερμική συγκόλληση δισκιδίων πυριτίου (Silicon Fusion Bonding). Τέλος αναφέρονται οι βασικές κατηγορίες μικρομηχανικών τεχνικών, δηλαδή οι μικρομηχανικές τεχνικές όγκου (Bulk Micromachining) και οι αντίστοιχες επιφανείας (Surface Micromachining).

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναλύονται οι μέθοδοι μέτρησης πίεσης καθώς και τα αντίστοιχα είδη των αισθητήρων συμβατικής τεχνολογίας. Περιγράφονται αναλυτικά τα δύο κύρια είδη μικρομηχανικών αισθητήρων δηλαδή οι αισθητήρες πίεσης τύπου πιεζοαντίστασης και αυτοί τύπου χωρητικότητας. Οι δομές αυτές αποτελούνται από μια εύκαμπτη μεμβράνη η οποία σφραγίζει μια κοιλότητα η οποία περιέχει μια σταθερή πίεση αναφοράς. Η μεταβολή στην εξωτερικά ασκούμενη πίεση επιφέρει αντίστοιχη παραμόρφωση στην εύκαμπτη μεμβράνη. Στους αισθητήρες πίεσης τύπου πιεζοαντίστασης αυτή η παραμόρφωση υπολογίζεται έμμεσα με την μεταβολή της αγωγιμότητας τεσσάρων πιεζοαντιστάσεων οι οποίες ολοκληρώνονται πάνω στην μεμβράνη. Στους αισθητήρες πίεσης τύπου χωρητικότητας, αυτή η παραμόρφωση μετράται άμεσα μέσω της μεταβολής της χωρητικότητας που δημιουργείται μεταξύ της μεμβράνης και του υποστρώματος. Επίσης εξάγονται οι αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν την απόκρισή τους (περιοχή λειτουργίας, ευαισθησία, θερμοκρασιακή εξάρτηση κλπ.). Έτσι είναι εφικτός ο σχεδιασμός των κρίσιμων παραμέτρων του ανάλογα με τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Τέλος περιγράφεται ενδεικτικά μια τυπική κατασκευαστική διαδικασία των βασικών μικρομηχανικών δομών αισθητήρων πίεσης (πιεζοαντίστασης και τύπου χωρητικότητας κατασκευασμένου με τεχνικές όγκου ή επιφανείας). Σε κάθε κατηγορία αναφέρονται τα αντίστοιχα προβλήματα που συνήθως παρουσιάζει.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται η πρωτότυπη κατασκευαστική διαδικασία του αισθητήρα πίεσης που υλοποιήσαμε. Αρχικά παρουσιάζονται οι λόγοι που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τεχνική καθώς και ο σχεδιασμός των κρίσιμων παραμέτρων του αισθητήρα, ανάλογα με τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει. Ο σχεδιασμός γίνεται τόσο θεωρητικά όσο και επιβεβαιώνεται πειραματικά, ώστε να αποσαφηνισθούν οι συνθήκες των ενδιάμεσων κατασκευαστικών βημάτων. Για την κατασκευή επιλέχθηκε να κρατηθεί σταθερό το πάχος της μεμβράνης και το διάκενο της μεμβράνης με το υπόστρωμα, ενώ μεταβάλλαμε την επιφάνεια της μεμβράνης του αισθητήρα (το οποίο είναι και τεχνολογικά ευκολότερο). Έτσι υλοποιήσαμε οκτώ διαφορετικούς αισθητήρες, 4<sup>εις</sup> τετράγωνους και 4<sup>εις</sup> κυκλικούς με μήκος πλευράς ή διαμέτρου 300μm, 400μm, 500μm και 600μm αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν τόσο κατά την

κατασκευαστική διεργασία όσο και κατά την λειτουργία του αισθητήρα. Τέλος εξετάστηκε η μη προβλέψιμη και επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά του σύμφωνα με την αρχική του σχεδίαση, καθώς και διάφορα φαινόμενα ολίσθησης (drift) που παρουσίασε. Για την επίλυση των προβλημάτων σχεδιάστηκαν μια σειρά από ανεξάρτητα πειράματα ώστε να αποσαφηνισθεί η φύση των παρουσιασθέντων ανωμαλιών. Τέλος δίνονται όλες οι απαραίτητες τροποποιήσεις στην αρχική κατασκευαστική διαδικασία, ώστε να καταστεί ο αισθητήρας αξιόπιστος.

Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού των αισθητήρων. Ο κύριος χαρακτηρισμός που πραγματοποιήθηκε ήταν ηλεκτρικός, μετρώντας τις μεταβολές της χωρητικότητας του για ελεγχόμενες μεταβολές της ασκούμενης πίεσης και της θερμοκρασίας. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένας πρωτότυπος σταθμός χαρακτηρισμού αισθητήρων πίεσης βασιζόμενος στο πρόγραμμα αυτόματης συλλογής δεδομένων με H/Y, LabView ver.4.0. Μετά από την παρουσίαση των μετρούμενων δεδομένων, μελετάται η σχέση των αισθητήρων διαφορετικού σχήματος και διάστασης ανάλογα με την απόκρισή τους (ευαισθησία, περιοχή λειτουργίας και θερμοκρασιακή εξάρτηση). Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται βάση των θεωρητικών εξισώσεων που εξήχθησαν στο 3ο κεφαλαίο. Τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού μπορούν να μας περιγράψουν μόνο έμμεσα τα μηχανικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα (αρχική καμπυλότητα μεμβράνης, αναπτυσσόμενες τάσεις), βάση θεωρητικών μοντέλων. Για πληρέστερη ανάλυση πραγματοποιήσαμε και οπτικές μετρήσεις, όπως μελέτη της αρχικής καμπυλότητας των μεμβρανών (μέσω της απόκλισης μιας εστιασμένης δέσμης Laser) και φασματοσκοπία micro-Raman. Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίστηκαν με το θεωρητικό μοντέλο των αισθητήρων, έτσι ώστε να ελεγχθεί το εάν οι ηλεκτρικές μετρήσεις, ο οπτικός χαρακτηρισμός και το θεωρητικό μοντέλο αποτελούν ένα αυτοσυμβιβαστό σύνολο.

Στο **6<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα του αναπτυχθέντος αισθητήρα, καθώς και η μελλοντική εργασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί ώστε να αξιοποιηθεί ο αισθητήρας σαν ένα βιομηχανικό προϊόν. Τέλος εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε, στην ανάπτυξη εφαρμογών και αισθητήρων διαφορετικού τύπου.



## ABSTRACT

Sensors constitute an important part in the science of electronics, since they connect the control circuit with the external environment. Their most usual applications are the industrial automation, the control systems of cars, ships, airplanes, household appliance etc. Traditionally, the sensors are devices, with dimensions in the centimeters range, with the most usual ones the temperature, pressure, flow sensors and the radiation detectors. The last decades, due to the technological progress of the micromechanics, the development of both the sensors and their applications has met a rapid increase (with prospects of even greater development). The micromechanics that can be considered as the expansion of microelectronics in the field of sensors, benefit from the utilization of the huge technological potential that is provided by microelectronics. Due to this development the cost and size of sensors were decreased dramatically. This has enabled the development of new ingenious micromechanical structures, designed for special applications in the fields of medicine, automotive and telecommunications.

The pressure sensors represent one of the most significant categories of sensors, since the measurement and control of pressure is needed in many applications. These are almost in any industrial automation (hydraulic – pneumatic systems), in automotive, household appliances and finally in medicine. Especially in medicine, the development of micromechanical pressure sensors during the last years has offered to the development of many new diagnostic and therapeutic techniques, mainly due to the uniqueness offered by micromechanics in the fabrication of reliable sensors of very small mass and energy consumption.

This dissertation presents an original manufacturing process for implementation of pressure sensors from single crystal silicon, designed properly for implant to human. To achieve that we have selected a capacitive type pressure sensor that translates the changes of the external pressure to changes of the sensor capacitance. The energy consumption in this configuration is as minimum as possible, a fact that allows them to be used to arrangements of passive telemetry, arrangements which do not require the energy supply from a battery.

Additionally, the whole fabrication process requires the use of only three lithography steps and it is self-aligned, a fact that is met for the first time in the international literature. So, the whole process allows the low fabrication cost of sensors and mainly it guarantees their high reliability, due to their manufacturing simplicity. Their reliability is also reinforced by the fact that the sensors are realized only by single crystal silicon (not silicon on glass or polysilicon), a material which has excellent mechanical properties. Also, the fact that the manufacturing process is self-aligned guarantees that the process is robust, that means insensitive to manufacturing errors. Finally the process permits the implementation of pressure sensors with small volume ( $\sim 0.5 \text{ mm}^3$ ), a very important fact for applications of limited space.

In the **1<sup>st</sup> chapter** of this dissertation, a brief description of sensors is given.

In the **2<sup>nd</sup> chapter**, the basic microelectronics techniques, which are used for the fabrication of the sensors, additionally to the micromechanical key-processes that are required for its implementation are briefly described. These techniques are the Anisotropic

Wet Etching with Etch Stop and the Silicon Fusion Bonding. Finally, the basic categories of micromechanical techniques are presented such as the Bulk Micromachining and the Surface Micromachining.

In the **3<sup>rd</sup> chapter**, the conventionally fabrication methods of pressure sensors are analyzed. The two main kinds of micromechanical sensors are described analytically, these are the piezoresistive pressure sensors and the capacitive type sensors. These structures are composed of a flexible membrane that hermetically seals a cavity, which contains a known reference pressure. The change in the external applied pressure brings a corresponding deflection to the flexible membrane. This deflection in the piezoresistive pressure sensors is estimated indirectly by the change of the conductivity in four pressure resistances, which are integrated on the membrane. In capacitive type pressure sensors, this deflection is measured directly through the change of the capacitance, between the membrane and the substrate. For the above type of sensors we have also extracted the analytical equations that describe their response (operation range, sensitivity, temperature dependence etc.). Finally, a typical manufacturing process of the basic micromechanical structures of pressure sensors is presented (those of piezoresistive type and capacitive type manufactured with bulk or surface micromachining techniques). In both categories we present the corresponding problems that are usually met.

The **4<sup>th</sup> chapter** presents the patented manufacturing process of the pressure sensor that we have implemented. First, we present the reasons for which this specific technique was selected and also the design of the critical parameters of the sensor, according to the requirements we have set. For the fabrication, we decided to fix the thickness of the membrane and the gap of the membrane with the substrate, whereas we change the surface of the sensor membrane (which is technologically easier). So, we have implemented eight different sensors, with square or circular shape, with side or diameter 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  and 600  $\mu\text{m}$ . In the following we present the problems that have been faced during the manufacturing process as well as during the operation of the sensor. Finally, the sensors behavior was examined, according to their initial design, and various phenomena such as drift, were investigated. For the solution of the problems, a series of independent experiments was designed in order to clarify the nature of the presented irregularities. At last, all the necessary modifications in the initial manufacturing process are given in order to have a reliable sensor.

The **5<sup>th</sup> chapter** presents the results of the sensor characterization. The main characterization of the sensors performed was electrical, to measure the changes of their capacitance for controlled changes of the applied pressure and temperature. For this purpose, an original characterization station for pressure sensors was developed based on Labview ver. 4.0. After the presentation of the measured data, the relation among sensors with different shapes is studied, depending on their response (sensitivity, operation range and temperature dependence). These results are discussed on the basis of the theoretical equations, which are conducted in the **3<sup>rd</sup> chapter**. The results of the electrical characterization can outline indirectly the mechanical characteristics of the sensor (initial curvature of membrane, developed stresses), based on theoretical models. For a more complete analysis, we carried out also optical measurements, such as initial curvature study of the membranes (through deviation of a collimated Laser beam) and micro-Raman spectroscopy. These results were related to the theoretical model of sensors, in order to

---

check if the electrical measurements, the optical characterization and the theoretical model are consistent.

In the **6<sup>th</sup> chapter**, the results of the developed sensor are briefly presented, as well as the future work, which has to be accomplished in order to utilize the sensor as an industrial product. Finally, we examine the possibility of utilization of the developed technology to other applications of different sensor kinds.