

DISS. ETH No. 15978

CMOS-BASED MEDICAL TACTILE SENSORS

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

Tomi Salo

Dipl.-Ing. Helsinki University of Technology (Finland)

Born August 24, 1970

Citizen of Finland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Baltes, examiner

Prof. Dr. O. Brand, co-examiner

Dr. T. Vancura, co-examiner

2005

ABSTRACT

This thesis presents the design of a MEMS-based tactile sensor for medical applications. The monolithically integrated sensor is fabricated using a commercial CMOS process with a minimum number of post-processing steps. The sensor system comprises an array of membrane capacitors, the required readout and interface electronics, as well as packaging. The device is used for the external recording of blood pressure waveforms.

A novel post-processing sequence is developed to produce tightly-packed, mechanically-stable, high-aspect-ratio structures having an accurate etch stop at the CMOS n-well with local openings to the CMOS dielectric layers. To this end, the benefits of the DRIE (deep reactive ion etching) dry etching method are combined with the ECE (electro chemical etch-stop) method for wet anisotropic silicon etching. A grid-like masking pattern is innovated to allow for the fabrication of such micromechanical structures with a large size variation on a multi-purpose CMOS wafer.

A feasibility study of CMOS-sealed membrane capacitors was conducted to realize the prototype sensor. Starting from the medical application requirements, two membrane concepts were developed. The logic of the design flow led to implementations based on through-the-substrate sacrificial layer etching of silicon dioxide or aluminum. The functionality of the membrane constructions was verified by testing them under hydrostatic pressure and area force. A comparison between the two structures gave a candidate for a sensing structure in the integrated tactile microsensor.

Blood pressure waveforms are recorded with the developed sensor system using the principle of arterial tonometry for extravascular detection of the pulsatile force from a blood vessel. The recorded waveforms indicate that the designed tactile sensor has a high sensitivity and is capable of detecting the fine features of the waveform's amplitude and frequency information. Motion artefacts affect the sensor, but redundant landmarks, extractable from the signal, support the trust in device's applicability to mobile patient monitoring. Thus, the presented device serves as a promising starting point for product development.

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wird der Entwurf eines Tastsensors für medizinische Anwendungen präsentiert, der auf MEMS-Technologien basiert. Der monolithisch integrierte Sensor wird in kommerziell verfügbarer CMOS-Technologie, kombiniert mit wenigen zusätzlichen Nachbearbeitungsschritten hergestellt. Das Sensorsystem besteht aus mehreren Messmembranen, der notwendigen Ausleseelektronik, um die Kapazität der Membranstrukturen zu bestimmen, einer elektronischen Schnittstelle, sowie einer geeigneten Verkapselung. Das Sensorbauelement wird zur externen Messung der Blutdruckkurve verwendet.

Ein neuartiger Nachbearbeitungsprozess wurde entwickelt, um eine Anordnung von mehreren nahe beieinander liegenden, mechanisch stabilen Strukturen mit hohem Aspektverhältnis herzustellen. Diese Strukturen zeichnen sich durch einen definierten Ätzstopp an der n-dotierten Wanne des CMOS Prozesses mit lokalen Öffnungen zu den dielektrischen Schichten der CMOS Technologie aus. Um dies zu erreichen, werden die Vorteile des DRIE (deep reactive ion etching) Trockenätzens mit der ECE (electro chemical etch-stop) Methode des Nassätzens verbunden. Eine gitterförmige Ätzmaske wurde eingeführt, um die Herstellung solcher mikromechanischer Strukturen mit sehr unterschiedlichen Strukturgrößen auf dem selben CMOS Wafer zu ermöglichen.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie sind membranförmige Sensorkapazitäten realisiert worden, welche keine Öffnung von der Membranvorderseite aufweisen. Ausgehend von den Anforderungen durch die Anwendung in der Medizin, sind zwei verschiedene Arten von Membranen entwickelt worden. Aufgrund der gegebenen Randbedingungen basieren die Implementierungen auf Opferschicht-techniken, bei denen entweder Siliziumdioxid oder Aluminium weggeätzt wird. In beiden Fällen tritt die Ätzlösung mit der jeweiligen Schicht durch die vorher geöffnete Waferrückseite in Kontakt. Die Funktionalität dieser Membranstrukturen wurde durch Tests mit hydrostatischem Druck und mit einer Flächenlast nachgewiesen. Ein Vergleich der beiden Membranstrukturen ergab einen geeigneten Kandidaten für den integrierten Berührungssensor.

Unter Verwendung der arteriellen Tonometrie wurden Blutdruckkurven mit dem entwickelten Sensor aufgenommen. Bei diesem Verfahren wird die pulsierende

Kraft im Inneren eines Blutgefässes extern gemessen. Aus der erfassten Blutdruckkurve lassen sich sowohl die Feinstrukturen des Amplitudenverlaufes als auch Informationen über das Frequenzspektrum ablesen. Die Messungen zeigen, dass der entwickelte Berührungssensor über eine hohe Empfindlichkeit verfügt. Artefakte aufgrund von Bewegungen beeinflussen das Sensorsignal, aber die Möglichkeit redundante Kenngrößen aus der Blutdruckkurve zu extrahieren, lassen auch eine mobile Patientenüberwachung mit Hilfe des Sensors möglich erscheinen. Folglich können die Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie positiv bewertet werden und stellen einen hoffnungsvollen Ansatz für die Produktentwicklung eines hochintegrierten Blutdrucksensors dar.