

DISS. ETH Nr. 10320

# CMOS Humidity Sensors

A thesis submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Thomas Boltshauser

Dipl. Phys. ETH

Born March 21, 1962

Citizen of Märstetten TG and Baselstadt, Switzerland



submitted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Baltes, supervisor

Prof. Dr. D. D. Denton, co-examiner

*H. Baltes*  
13 Jan 94

---

# Abstract

This thesis reports on the principles, theory, design, fabrication, modelling, packaging and characterization of silicon microsensors for the measurement of humid air. The goal is to explore the potential of CMOS IC technologies combined with post-processing for humidity sensors. Post-processing includes the deposition of humidity-sensitive layers and micromachining. The promise of this approach is the on-chip integration of analog and digital circuitry and low-cost batch fabrication with high reliability.

We explore three operational principles for measuring relative humidity (RH) in air. The first principle is based on the electric capacitance change of a dielectric material sensitive to humidity. All of the lateral, capacitive structures have in common that they are made of the CMOS materials. A photosensitive polyimide is used as humidity-sensitive material, whose application is compatible with the CMOS process. The change of capacitance is translated into a frequency modulation. A sensitivity of 3.2 kHz/%RH is obtained with less than 1% hysteresis and a time constant of about 10 s. Two alternative concepts to increase the performance of the polyimide are reported as well as complete deposition recipes. The experimental investigations were supplemented by numerical 3-D modelling to investigate and optimize the sensor performance.

The second sensing principle makes use of resonant microstructures. Silicon micromachining and polyimide deposition are combined to fabricate resonant humidity sensors. The absorbed moisture induces a mass increase of the hygroscopic material and, thus, modulates the resonance frequency. Best results are achieved with electrothermally excited bipolar membranes etched from the wafer back yielding a sensitivity up to 63 Hz/%RH at 150 kHz for a driving power of 48 mW. The vibrations of the resonators are detected by implanted piezoresistors.

The third sensor effect is based on the elastic deformation of a polyimide-covered structure caused by the environmental humidity. With the piezoresistors embedded in a *Wheatstone* bridge, a sensitivity of 0.44 mV/%RH/V was attained with a hysteresis of 2.9%.

---

The work is completed by developing and studying packaging techniques for humidity sensors, which extend to chemical sensors in general. Aging effects of polyimide are compiled from literature.

---

# Zusammenfassung

Diese Dissertation berichtet über Prinzipien, Theorie, Herstellung, Modellierung, Verpackung und Charakterisierung von Silizium-Mikrosensoren zur Messung von feuchter Luft. Das Ziel ist die Erforschung von Feuchtigkeitssensoren, die in CMOS-Technik in Kombination mit Mikromechanik und Aufbringen dünner, feuchteempfindlicher Schichten hergestellt werden. Diese Fabrikationsmethode verspricht eine hohe und über eine Serie gleichbleibende Fertigungsqualität. Zusätzlich hat man die Möglichkeit, auf demselben Chip die analoge und digitale Signalverarbeitung zu integrieren.

Wir untersuchen drei verschiedene Prinzipien zur Messung relativer Feuchte (RF) in Luft. Der kapazitive Sensor beruht auf einer Änderung der elektrischen Kapazität eines feuchtesensitiven Dielektrikums. Alle lateralen, kapazitiven Strukturen bestehen aus den CMOS-spezifischen Materialien. Als feuchteempfindliches Material verwenden wir ein lichtempfindliches und mit dem CMOS-Prozess verträgliches Polyimid. Die Kapazitätsänderung wird mit Hilfe einer Schaltung in eine Frequenzänderung umgewandelt. Wir erreichen Empfindlichkeiten von 3.2 kHz/%RF bei einer Hysterese von weniger als 1% und einer Zeitkonstante von ungefähr 10 s. Zwei Konzepte zur Verbesserung der Eigenschaften von Polyimiden, sowie vollständige Prozessrezepte, werden vorgestellt. Die Experimente werden mit numerischen 3-D Modellen unterstützt, um das Sensorverhalten zu untersuchen und zu verbessern.

Das zweite Prinzip basiert auf schwingenden Mikrostrukturen. Mit Hilfe von Silizium-Mikromechanik und Aufbringen eines Polyimides werden schwingende Feuchtesensoren freigeätzt und beschichtet. Absorbierte Feuchtigkeit bewirkt eine Massenzunahme des hygroskopischen Materials und moduliert die Resonanzfrequenz. Die besten Resultate erreichen wir mit einer bipolaren Membran, die von der Rückseite einer Siliziumscheibe freigeätzt wird. Die Empfindlichkeit beträgt 63 Hz/%RF bei 150 kHz für 48 mW Heizleistung. Die Schwingungen werden mit Hilfe von Piezo-Widerständen detektiert.

Die durch Feuchtigkeit induzierte elastische Verformung einer mit Polyimid bedeckten Struktur wird beim dritten Sensorprinzip ausgenutzt. Werden die Pie-

---

zo-Widerstände in einer *Wheatstone*-Brücke angeordnet, erreicht man Empfindlichkeiten von  $0.44 \text{ mV}/\% \text{RF}/\text{V}$  bei einer Hysterese von  $2.9\%$ .

Schliesslich werden Techniken zur Verpackung von Feuchtigkeitssensoren vorgestellt. Die erhaltenen Resultate lassen sich für Chemiesensoren verallgemeinern. Alterungseffekte von Polyimiden werden der Literatur entnommen.