

Diss. ETH ex. B

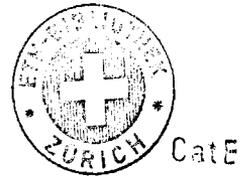
DISS. ETH No. 11567

THERMAL CONVERTERS BY CMOS TECHNOLOGY

A thesis submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Dominik Jaeggi
Dipl. El. Ing. ETH Zurich
Born June 29, 1965
Citizen of Switzerland



submitted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Baltes, supervisor
Prof. Dr. J. Weiler, co-examiner
Dr. O. Paul, co-examiner

1996

ABSTRACT

This thesis reports on thermal true root mean square (rms) converters fabricated by industrial CMOS technology followed by silicon micromachining. Thermo-electric based CMOS thermal converters with cointegrated analog and digital circuitry fulfill the demand for cost-effective, accurate, and high-bandwidth true rms detection in ac instrumentation. For reliable batch fabrication of such thermal sensors we developed an industrial post-processing technology based on the anisotropic etching of entire six-inch wafers.

The thermal converters detect the true rms value of an unknown ac signal by converting the signal in a resistor into heat and measuring the resulting temperature increase. The converters presented in this thesis consist of polysilicon heaters and n- and p-doped polysilicon thermopiles sandwiched between the CMOS dielectric layers. Thermal insulation is obtained by anisotropic etching from the rear of the wafer, removing the bulk silicon under the heater and the “hot” thermopile junctions to form freestanding membranes. For the industrial fabrication of these membranes we optimized etch protection layers for the wafer front, applied an isotropic etch of the wafer back to achieve good mask adhesion, and studied the influence of silicon bulk crystal defects on the lateral underetching. We characterized the mechanical properties of the CMOS layers and solved the buckling problem of CMOS dielectric membranes by finding a silicon nitride passivation suitable for the fabrication of low-stress membranes. The overall membrane yield after dicing of the micromachined six-inch wafers is higher than 98 %.

Three different thermal converter designs are analyzed using thermal and electrical analytical models and optimized using thermal finite element simulations. The fabricated devices have sensitivities up to 130 V/W in air and input dynamic ranges up to 54 dB. By using industrial gold bumping technology for thermal capacitors we increased the time constant of the converters, and thus extended their low frequency range by a factor of three. At frequencies between 1 kHz and 1 MHz the converters provide ac-dc voltage transfer differences below 30 ppm. Moreover, a high ± 1 % bandwidth of the order of 100 MHz was achieved.

To compensate the nonlinearity at high power levels, the ambient temperature dependence, as well as the sensitivity drift of the CMOS thermal converter, we implemented a thermal converter microsystem on a chip including two converters operated at the same power level in a closed loop configuration. An oversampled A/D converter with an adaptive bitstream level, embedded in the feedback loop, extends the dynamic range and provides a digital output proportional to the mean square value of the input signal. The A/D converter has 12 bit resolution and 10 bit linearity.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Dissertation befasst sich mit Thermoumformern zur Messung des echten Effektivwertes von elektrischen Wechselsignalen, die mit industrieller CMOS-Technologie in Kombination mit nachfolgender Silizium-Mikrostrukturierung hergestellt wurden. Thermoelektrische CMOS-Thermoumformer, zusammen mit analoger und digitaler Auswerte-Elektronik auf demselben Chip, befriedigen die Nachfrage nach preisgünstiger, genauer und breitbandiger Echteffektivwertbestimmung in der Wechselsignal-Messtechnik. Für die zuverlässige Herstellung von solchen thermischen Sensoren in grossen Stückzahlen haben wir eine industrielle Technologie entwickelt, die auf dem anisotropen Ätzen von ganzen Sechszoll-Siliziumscheiben beruht.

Thermoumformer messen den echten Effektivwert eines unbekanntes Wechselsignals durch dessen Umwandlung in einem Widerstand in Wärme und durch Messung der resultierenden Temperaturerhöhung. Die Thermoumformer, die in dieser Dissertation vorgestellt werden, bestehen aus Polysilizium-Heizwiderständen und n- und p-dotierten Polysilizium-Thermosäulen, welche in die dielektrischen CMOS-Schichten eingeschlossen sind. Die thermische Isolierung wird durch eine rückseitige, anisotrope Ätzung erreicht, bei der das Silizium unter dem Heizwiderstand und den "heissen" Thermosäulen-Kontakten entfernt wird und damit freistehende Membranen entstehen. Für die industrielle Herstellung dieser Membranen haben wir eine Ätzschutzschicht für die Vorderseite der Siliziumscheiben verbessert, eine isotrope Ätzung der Rückseite für gute Adhäsion angewendet und den Einfluss von Siliziumkristallfehlern auf die seitliche Unterätzung untersucht. Wir haben die mechanischen Eigenschaften der CMOS-Schichten gemessen und das Problem des Verbeulens von CMOS-Membranen gelöst, indem wir eine geeignete Nitridpassivierung für die Herstellung von spannungskompensierten Membranen entwickelten. Die Membranausbeute nach dem Sägen der mikrostrukturierten Wafer ist höher als 98 %.

Drei verschiedene Entwürfe von Thermoumformern wurden mit thermischen und elektrischen analytischen Modellen untersucht und mit thermischen Finite-Ele-

ment-Simulationen optimiert. Die hergestellten Thermoumformer haben Empfindlichkeiten von bis zu 130 V/W und einen dynamischen Bereich von bis zu 54 dB. Durch Verwendung industrieller “Goldbumping”-Technologie für thermische Kapazitäten erhöhten wir die Zeitkonstante der Thermoumformer und erweiterten damit ihren Bereich bei tiefen Frequenzen um einen Faktor drei. Zwischen 1 kHz und 1 MHz liegt die AC-DC Transferdifferenz der Thermoumformer unterhalb von 30 ppm. Des weiteren erreichen sie eine ± 1 % Bandbreite von ungefähr 100 MHz.

Um die Nichtlinearität bei hohen Signalpegeln, die Temperaturabhängigkeit und den Empfindlichkeitsdrift der CMOS-Thermoumformer zu kompensieren, haben wir ein Thermoumformer-Mikrosystem auf einem Chip implementiert, das zwei Thermoumformer in einem Regelkreis enthält, welche bei gleicher Leistung betrieben werden. In den Regelkreis ist ein auf dem Prinzip des “Oversamplings” beruhender A/D-Wandler mit einer adaptiven Bitstream-Amplitude eingebaut. Dieser A/D-Wandler erweitert den dynamischen Bereich und liefert ein digitales Signal proportional zum quadratischen Mittelwert des Eingangssignals. Die Auflösung des Systems beträgt 12 Bit und seine Linearität 10 Bit.