

DISS. ETH No. 15412

CMOS READOUT AND CONTROL ARCHITECTURES FOR MONOLITHIC HOTPLATE AND CANTILEVER MICROSYSTEMS

A thesis submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by
DIEGO RUBEN BARRETTINO
DIPL.-ING. UNIVERSITY OF BUENOS AIRES
BORN FEBRUARY 29, 1972
CITIZEN OF ARGENTINA AND ITALY

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. Baltes, examiner
Prof. Dr. K. Najafi, co-examiner
Prof. Dr. P. Malcovati, co-examiner

2004

ABSTRACT

The focus of this thesis is on the design, implementation, and test of CMOS monolithic microsystem architectures for readout and control of microhotplates and microcantilevers. The first single-chip metal-oxide gas sensors, portable material characterization units, and an atomic force microscope (AFM) comprising micro-electro-mechanical devices (hotplates or cantilevers) and associated readout and control circuitry were fabricated using an industrial 0.8 μm , double-metal, double-polysilicon CMOS process combined with some post-CMOS micromachining.

Feedback architectures for improving the performance of monolithic microsystems (i.e., robust designs for parameter variations, improved transient and steady-state response, etc.) are realized in all designs developed in this thesis in order to meet the currently demanding microsystem specifications (i.e., low cost, low power, short time-to-market, etc.). The design methods and monolithic implementations of microsystem controllers are described in detail.

In developing single-chip gas sensors, four chips featuring one or three microhotplates and all necessary readout and control electronics were fabricated and tested. The microhotplates were covered with tin dioxide (SnO_2), which is well known to exhibit high sensitivity to environmentally relevant gases such as carbon monoxide (CO) or methane (CH_4). The SnO_2 sensitive layer is operated at temperatures between 200 and 500°C and changes its conductivity upon gas exposure. The resistance of the SnO_2 sensitive layer can vary over a wide range and is hence measured using a logarithmic converter. The microhotplate temperature is controlled by analog proportional (P) and digital proportional-integral-derivative (PID) controllers. The microhotplate is heated with a polysilicon resistor, and the microhotplate temperature is measured either by means of a polysilicon temperature sensor (200°C-350°C) or a platinum temperature sensor (200°C-500°C). The microhotplate temperature is controlled at 1% resolution of the preset microhotplate temperature. The external communication is handled by an on-chip inter-IC (I^2C) serial interface thereby decreasing the number of input/output pins that are necessary for transferring the data coming from the sensors. The I^2C serial interface is also used for programming the controller parameters

and some command registers (e.g., programmable sampling rate, programmable analog switches for offset compensation and calibration, etc.).

CO-concentrations in the sub-ppm range are detectable, and a resolution of ± 0.2 ppm CO was achieved, which allows for using these chips in a wide range of applications. In addition, the single-chip gas sensors enable new dynamic sensor operation modes for gas detection and the discrimination of several analyte gases by simultaneously using various gas-sensitive materials.

The monolithic hotplate-based microsystems were also used as single-chip portable material characterization units. These designs enable a drastic reduction of the sample quantity needed for material tests in comparison to standard thermal analysis equipment. The thermal analysis performance was assessed by melting point measurements. The microhotplates were covered with ammonium nitrate (NH_4NO_3), which exhibits a melting point of 169.6°C according to the CRC Handbook of Chemistry and Physics [1]. The measured melting point was $168 \pm 2^\circ\text{C}$.

In developing a single-chip atomic force microscope, a chip featuring twelve microcantilevers and all necessary readout and control electronics was fabricated and tested. The microcantilever deflection is controlled by digital proportional-integral-derivative (PID) controllers. The atomic force microscope is operated in contact mode for parallel scanning, where the controller keeps the cantilever deflection constant by thermal bimorph actuation. The cantilever deflection is detected by a piezo-resistive Wheatstone bridge, which provides the feedback signal to the controller. A reference cantilever is used for compensating the offset of the piezo-resistive Wheatstone bridge. A resolution of less than 10 nm in the vertical direction has been achieved. The controller parameters and some command registers (e.g., programmable sampling rate, programmable analog switches for offset compensation and calibration, etc.) are programmed through the on-chip I^2C serial interface. Each cantilever has a dedicated serial line for fast transmission of its deflection data.

All mixed-signal circuit architectures mentioned above also allow for the use of field-programmable-gate-arrays (FPGAs) for the development and testing of new control schemes.

COMPENDIO

El tema central de esta tesis es el diseño, implementación y prueba de arquitecturas de microsistemas monolíticos CMOS para la lectura de datos y control de *microhotplates* y *microcantilevers*. Por primera vez, sensores monolíticos de gas (*metal-oxide sensors*), unidades portátiles monolíticas para la caracterización de materiales y un microscopio de fuerzas atómicas monolítico (AFM), que incluyen dispositivos micro-electro-mecánicos (*hotplates* o *cantilevers*) y la circuitería de lectura y de control, fueron fabricados con un proceso industrial CMOS de 0.8 μm , de dos metales y doble polisilicio, combinándolo con procesos de micromecanizado posteriores.

El uso de arquitecturas con realimentación se han utilizado en todos los diseños desarrollados en esta tesis para la mejora del rendimiento de las características de los microsistemas (por ejemplo, diseños robustos a la variación de parámetros o para mejorar la respuesta del sistema, tanto en transitorio como en casi-estático, etc.) y para cumplir las actualmente exigentes especificaciones de los microsistemas (por ejemplo, bajo coste, bajo consumo de potencia, bajo *time-to-market*, etc.). Estos métodos de diseño y las implementaciones monolíticas de los controladores de los microsistemas son descritas con gran detalle en la tesis.

Para el desarrollo de los sensores de gas monolíticos, se han fabricado y probado cuatro chips que presentan o una o tres *microhotplates*, y toda la electrónica necesaria para la lectura y control. Las *microhotplates* están cubiertas por Dióxido de Estaño (SnO_2), ya que este material presenta una alta sensibilidad a gases que pueden ser encontrados en el ambiente, como podrían ser Monóxido de Carbono (CO) o Metano (CH_4). La capa sensible de SnO_2 puede trabajar a temperaturas entre los 200 y los 500° C y presenta cambios en su conductividad al ser expuesto a diferentes gases. La resistencia de la capa de SnO_2 puede variar para un amplio rango de valores y a causa de esto las medidas se realizan con un convertidor logarítmico. La temperatura de la *microhotplate* se puede controlar a partir de dos tipos de controladores monolíticos: un controlador proporcional analógico (P) o un controlador digital proporcional-integral-diferencial (PID). La *microhotplate* se calienta con una resistencia de polisilicio, y la temperatura que presenta se puede medir con un sensor de temperatura de polisilicio (200° C-350° C) o con un sensor de temperatura de platino (200° C-500° C). Su

temperatura se determina con una resolución del 1% con respecto a la temperatura de *preset* del *microhotplate* y la comunicación externa se realiza con una interficie serie *on-chip* I²C, consiguiendo disminuir el número de pins de entrada/salida necesarios para la transferencia de datos provenientes de los sensores. La interficie serie I²C también se utiliza en la programación de parámetros del controlador y de algunos registros (por ejemplo, la velocidad programable de muestreo, los conmutadores analógicos programables para la compensación de *offset* y la calibración, etc.). Los sensores de gas monolíticos permitieron medir concentraciones de CO con una resolución de 0.2 ppm, lo que permite la utilización de estos chips en una amplia gama de aplicaciones.

Los microsistemas monolíticos basados en *hotplates* han sido también utilizados en las unidades monolíticas de caracterización de materiales. Estos diseños presentan una drástica disminución de la cantidad de muestra necesaria para las pruebas, en comparación al equipo de análisis térmico estándar. Como una aplicación de análisis térmico se realizó la medida de puntos de fusión. Las *microhotplates* se recubren con Nitrato de Amonio (NH₄NO₃), que presenta un punto de fusión a 169.6 °C, como puede ser encontrado en el *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [1], mientras que la medida obtenida en la medición del punto de fusión fue de 168 ± 2 °C.

Para el desarrollo del microscopio de fuerzas atómicas monolítico, se ha fabricado y probado un chip que presenta doce *microcantilevers* y toda la electrónica necesaria para la lectura y control. La deflexión del *microcantilever* se controla a partir de un controlador digital proporcional-integral-diferencial (PID). El microscopio de fuerzas atómicas trabaja en modo de contacto para escanear en paralelo, haciendo que el controlador mantenga la deflexión del cantilever constante a partir de un actuador bimórfico térmico. La deflexión del cantilever se detecta a partir de un puente piezoresistivo de Wheatstone el cual proporciona la señal de realimentación al controlador. También se utilizó un cantilever de referencia para la compensación del *offset* del puente de Wheatstone. Se obtuvo una resolución en la deflexión del cantilever menor a 10 nm. Los parámetros del controlador y algunos de los registros se programan a través de una interficie serie *on-chip* I²C.

Todas las arquitecturas de circuitos de señal mixta (*mixed-signal circuits*) que han sido mencionados anteriormente también permiten la utilización de *Field-Programmable-Gate-Arrays* (FPGAs) para el desarrollo y prueba de nuevos esquemas de control.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation ist das Design, die Implementation und der Test einer vollständig integrierten CMOS Mikrosystemarchitektur für das Auslesen und die Regelung von mikrominiaturisierten Heizplatten und mikromechanischen Biegebalken. Der erste Ein-Chip Metalloxid-Gassensor, portable thermische Analysegeräte und ein Rasterkraftmikroskop (AFM) bestehend aus mikro-elektro-mechanischen Komponenten (Heizplatten oder Biegebalken) und dem dazugehörigen Signalauslesungs- und Regelelektronik wurden mit einem industriellen $0.8 \mu\text{m}$ CMOS Prozess mit zwei Metalllagen und zwei Polysiliziumschichten fabriziert, verbunden mit einem nachfolgenden mikromechanischen Bearbeitungsschritt.

Die Verwendung einer Rückkopplungsarchitektur für eine Leistungssteigerung des monolithischen Mikrosystems (d.h. Stabilität gegenüber Parameterveränderungen, verbessertes transientes und statisches Verhalten, u.a.) und in Bezug auf gegenwärtig anspruchsvolle Mikrosystemspezifikationen (d.h. kostengünstig, sparsam im Stromverbrauch, Minimierung der Entwicklungszeit, u.a.) sind all den in dieser Dissertation entwickelten Designs gemeinsam. Die Designmethode und die monolithische Integration der Mikrosystemregler sind detailliert beschrieben.

Bei der Entwicklung eines Ein-Chip Gassensors wurden vier Chips mit einer oder drei Mikroheizplatten und alle benötigte Aufzeichnung- und Regelelektronik fabriziert und getestet. Die Mikroheizplatten sind mit Zinnoxid (SnO_2) bedeckt, welches bekanntlicherweise eine hohe Sensitivität gegenüber der Umwelt relevanten Gasen, wie beispielsweise Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH_4), besitzt.

Die SnO_2 Sensorschicht hat eine Arbeitstemperatur zwischen $200 \text{ }^\circ\text{C}$ und $500 \text{ }^\circ\text{C}$ und ändert ihre Leitfähigkeit falls sie einem Gas ausgesetzt wird. Da sich der Widerstand der SnO_2 -sensitiven Schicht über einen weiten Bereich ändern kann, wird er mit einem logarithmischen Wander aufgezeichnet. Die Temperatur der Mikroheizplatte wird mit einem analogen Proportional- (P) und einem digitalen Proportional-Integral-Differential-Regler (PID) gesteuert. Die Mikroheizplatte wird mit einem Widerstand aus Polysilizium beheizt und mit einem Tempera-

tursensor, wahlweise aus Polysilizium (200 °C- 350 °C) oder Platin (200 °C-500 °C), ausgemessen. Die Mikroheizplatte wird mit einer Auflösung von 1 % der angelegten Temperatur geregelt. Die externe Kommunikation übernimmt eine auf dem Chip integrierte I²C Schnittstelle, wodurch die für den Datentransfer benötigte Anzahl der Ein- und Ausgangskontakte auf ein Minimum reduziert werden kann. Die serielle I²C Schnittstelle wird zudem für die Programmierung der Reglerparameter und einigen Kommandoregister (z.B. programmierbare Aufzeichnungsrate, programmierbare Analogschalter für Offsetkompensation und Kalibrierung, u.a.) verwendet. CO-Konzentrationen im sub-ppm Bereich sind messbar und eine Messauflösung von ± 0.2 ppm CO wurde erreicht, was einen grossen Anwendungsbereich eröffnet.

Das monolithische Mikrosystem, basierend auf einer Mikroheizplatte, wurde auch als portable Ein-Chip Charakterisierungseinheit benützt. Diese Designs ermöglichen die drastische Reduktion der benötigten Messsubstanzmenge im Vergleich zu bisherigen thermischen Analysegeräten. Die thermische Analysegenauigkeit wurde mit Hilfe von Schmelzpunktmessungen abgeschätzt. Die Mikroheizplatten wurden mit Ammoniumnitrat (NH₄NO₃) bedeckt, welches nach der Quelle *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [1] einen Schmelzpunkt bei 169.6 °C aufweist. Der gemessene Schmelzpunkt war 168 ± 2 °C.

Bei der Entwicklung eines Ein-Chip Rasterkraftmikroskops wurde ein Chip mit zwölf mikromechanischen Biegebalken und der dazu benötigten Aufzeichnung- und Regelelektronik fabriziert und getestet. Die Auslenkung der mikromechanischen Biegebalken wird mit einem digitalen Proportional-Integral-Differential (PID) Regler vorgenommen. Das Rasterkraftmikroskop wird für das parallele Abtasten im Kontakt-Modus betrieben. Dabei hält der Regler die Auslenkung mit Hilfe der bimorphen Aktuatoren konstant. Die Auslenkung der mikromechanischen Biegebalken wird durch eine piezoresistive Wheatstone-Brücke detektiert, welche ein Rückkopplungssignal für den Regler zur Verfügung stellt. Ein mikromechanischer Referenzbiegebalken wird für die Kompensation des Wheatstone-Brückenoffset verwendet. Die vertikale Auflösung ist kleiner als 10 nm. Die Reglerparameter und einige Steuerregister (z.B. programmierbare Aufzeichnungsrate, programmierbare Analogschalter für Offsetkompensation und Kalibrierung, u.a.) werden über eine auf dem Chip integrierte serielle I²C-Schnittstelle programmiert. Alle oben erwähnten Mixed-Signal Schaltungsarchitekturen ermöglichen den Einsatz von programmierbaren Logikbausteinen (FPGA) für die Entwicklung und den Test neuer Regelungsalgorithmen.