

Microhotplate-Based Chemical Sensor Systems in CMOS Technology

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Markus Graf

Dipl.-Phys. University of Konstanz

Born April 5, 1972

Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Baltes, examiner

Prof. Dr. N. de Rooij, co-examiner

Prof. Dr. A. Hierlemann, co-examiner

ABSTRACT

The central topic of this thesis was the integration of microhotplate-based metal-oxide gas sensors and associated circuitry on a single chip. Innovative microhotplate designs, dedicated post-CMOS micromachining steps and novel system architectures were developed to meet this goal.

A novel thermal modeling approach supports design and fundamental understanding of the thermal microhotplate characteristics. Nonlinear 3D-FEM simulations were performed that rely on this model. The characteristic figures such as thermal resistance and thermal time constant were extracted showing an agreement of 5-10% with experimental values. The model also yields a microhotplate description that enables coupled simulations of circuitry and sensor device.

Three different prototypes of microhotplates in CMOS technology were presented as part of an application-specific design and process toolbox. The first device was a circular-shape microhotplate fabricated with a minimum of subsequent post-processing steps. The design was optimized for use with a drop-coated nanocrystalline thick-film tin-oxide layer. This microhotplate was monolithically integrated with a digital temperature controller, the sensor read-out circuitry and a digital interface. A resolution of the temperature controller of $\pm 2^\circ\text{C}$ and a detection limit of 0.1 ppm CO were achieved. A prototype package was presented, using which the chip temperature increase was only 1% of the temperature increase of the microhotplate temperature.

The second device was designed to overcome the on-chip temperature limit of 400°C that is a consequence of the CMOS metallization. A post-CMOS microfabrication process was developed to integrate a Pt-temperature sensor on the microhotplate, which enables, in combination with a novel microheater layout, achieving operating temperatures up to 500°C .

The third microhotplate features a MOS-transistor heater that substitutes the conventional resistive heating element. An almost linear relationship between microhotplate temperature and the transistor source-gate voltage was observed, and operating temperatures up to 350°C were attained with this device. An analytical transistor model based on established transistor equations and thermal microhotplate characteristics was developed to support the measurement results. The

agreement between measured and simulated results was within 5% for temperatures up to 300°C.

The last device was a microsystem comprising an array of three MOS-transistor-heated microhotplates. The system relies almost exclusively on digital electronics in a modular system architecture including three programmable digital temperature regulators and a standard serial interface. The microhotplates were coated with three different tin-oxide materials and characterized upon exposure to various CO- and CH₄-concentrations.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der monolithischen Integration von Metalloxid-Gassensoren und der zugehörigen Elektronik auf einem Mikrochip. Dazu wurden innovative Mikroheizplatten entworfen, post-CMOS Mikrotechnologieprozesse entwickelt und neuartige Systemarchitekturen umgesetzt.

Das Mikroheizplatten-Design wird durch ein Modell unterstützt, welches zum Verständnis der thermischen Eigenschaften beiträgt. Auf Grundlage dieses Modells wurden nichtlineare 3D-FEM Simulationen durchgeführt. Aus den Simulationen konnten charakteristische Kenngrößen wie thermischer Widerstand und thermische Zeitkonstante bestimmt werden. Die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten lag bei 5-10%. Das Modell ermöglicht ausserdem eine kombinierte Simulation von Mikrosensor- und Schaltungskomponenten.

Drei verschiedene Mikroheizplatten-Prototypen in CMOS-Technologie wurden als Teil einer anwendungsspezifischen Design- und Prozessplattform erarbeitet. Der erste Sensor besteht aus einer kreisförmigen Mikroheizplatte, welche mit einem Minimum an post-CMOS Prozessschritten fabriziert wurde. Das Design ist für tropfenförmige Dickfilmschichten aus nanokristallinem SnO₂ optimiert. Diese Mikroheizplatte wurde zusammen mit einem digitalen Temperaturregler, der Sensormesselektronik und einer digitalen Schnittstelle auf einem Chip integriert. Die Temperaturregelung besitzt eine Auflösung von $\pm 2^{\circ}\text{C}$, und für CO konnte eine Nachweisgrenze von 0.1 ppm erreicht werden. Realisiert wurde auch ein Sensor-Package, bei dem die Chiptemperaturerhöhung nur ein Prozent der Mikroheizplattentemperatur beträgt.

Mit der zweiten Mikroheizplatte konnte das Temperaturlimit von 350°C , welches durch die CMOS-Metallisierung bestimmt wird, überschritten werden. Ein post-CMOS Mikrofabrikationsprozess ermöglicht die Fertigung eines Platin-Temperatursensors auf der Mikroheizplatte. Die Kombination mit einem neuartigen Hezelementlayout erlaubt Betriebstemperaturen von bis zu 500°C .

Bei der dritten Mikroheizplatte wurde der konventionelle resistive Heizer durch einen MOS-Transistor ersetzt. Ein linearer Zusammenhang zwischen der Heizplattentemperatur und der source-gate-Spannung konnte beobachtet werden,

wobei Temperaturen von bis zu 350°C erreicht wurden. Ein analytisches Mikroheizplattenmodell wurde entwickelt, welches auf Transistorgleichungen und den thermischen Eigenschaften beruht. Eine Übereinstimmung von 5% zwischen experimentellen und simulierten Ergebnissen für Temperaturen bis zu 300°C wurde erzielt.

Das letzte vorgestellte Mikrosystem umfasst eine Anordnung von drei Mikroheizplatten mit MOS-Transistor Heizern. Das System besteht hauptsächlich aus digitaler Elektronik, welche aus drei programmierbaren digitalen Temperaturreglern, Auswertelektronik und einer seriellen Schnittstelle modular aufgebaut ist. Die Mikroheizplatten wurden mit drei verschiedenen Zinnoxid-Materialien beschichtet. Ihr Ansprechverhalten auf verschiedene CO und CH₄ Konzentrationen wurde charakterisiert.