
DISS. ETH No. 14484

THERMAL IMAGERS IN CMOS TECHNOLOGY

A thesis submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by
ANDRI SCHAUFELBÜHL
Dipl. Phys. ETH Zürich
Born December 27, 1971
Citizen of Switzerland and the USA

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. Baltes, supervisor
Prof. Dr. T. Elbel, co-examiner
Dr. O. Brand, co-examiner

2001

ABSTRACT

In this thesis, a family of micromachined thermoelectric infrared sensor arrays is reported. The sensor arrays are cointegrated with addressing- and signal-conditioning circuitry on a single chip. The microsystems were fabricated in two different commercial CMOS processes with subsequent bulk-micromachining using KOH on wafer-scale. Thermal imagers based on these microsystems operate in ambient air, without thermal stabilization or cooling. The thermoelectric sensor principle allows the measurement of DC radiation signals without a radiation chopper.

The infrared sensor arrays rely on a technology developed at our institute for the fabrication of one and two-pixel thermoelectric infrared sensor microsystems. The work presented here concentrates on the design of the microsystems, the modeling and the optimization of the sensor arrays, the characterization of the microsystems, and the design and fabrication of the prototype cameras.

All the pixels of an array are located on a single membrane consisting of the dielectric layers of the CMOS process. The membrane is released by anisotropic silicon etching with KOH from the back side of the wafer. A grid made from silicon or gold separates neighboring pixels. Every pixel comprises a polysilicon/aluminum thermopile sandwiched between the dielectric membrane layers for measurement of the temperature difference between the center and the edge of the pixel. Incoming radiation is absorbed by the dielectric layers and the thermopile materials, which generates heat. This causes a temperature increase in the center of the pixels. Through the grid on the membrane, the edges of the pixels are in good thermal contact with the bulk silicon. The resulting temperature difference between the center and the edges of the pixels is converted to a voltage by the integrated thermopiles. Each pixel contains an integrated heater, which can be used for calibration and self-testing.

Five different microsystem architectures with pixel counts from 4×5 to 32×40 and with different pixel geometries and circuit designs were fabricated and tested.

Temperature resolutions of as low as 104 mK at 1 Hz frame rate were achieved using a 1/f lens.

Two methods of thermal separation of neighboring pixels were used. The first method uses a grid of n-well silicon structures which are released by combining the KOH etching step with an electrochemical etch-stop technique. A novel contacting scheme with recessed contacts designed as pockets in the n-well was developed for this purpose. The second method uses a grid of electroplated gold lines on top of the membrane.

Analytical models for the thermal and electrical properties of the pixels were developed, taking the influence of heat conduction through the surrounding air into account. These models can be used to find an optimal design for future microsystems for different applications and different types of packaging. The effect of the shape of the thermoelements on the signal to noise ratio of the sensors was investigated and an optimal shape for the thermoelements is suggested.

The fabricated IR sensor arrays were characterized. The sensitivity of the sensors to IR radiation and to electrical heating with the integrated heaters, the offset of the pixels, the cross-talk between neighboring pixels, and the electrical resistance of the pixels were measured.

Based on our microsystems, a series of 100 infrared cameras with a resolution of 10×10 pixels and two IR cameras with a resolution of 16×16 pixels were built. These cameras allow one to demonstrate the advantages and the performance of the integrated infrared microsystems as well as to gain some practical experience in real-life applications.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Dissertation berichtet über eine Familie von CMOS-basierten thermoelektrischen Infrarot-Sensorarrays. Die Infrarot-Sensorarrays werden zusammen mit einer Adressierungs- und einer Signalverarbeitungsschaltung auf einem Chip integriert. Es wurden Mikrosysteme mit zwei verschiedenen kommerziellen CMOS Fabrikationsprozessen hergestellt. Im Anschluss an den CMOS Prozess folgt eine Nachbearbeitung durch selektives Aetzen der Wafer von der Rückseite mit KOH. Basierend auf diesen Mikrosystemen wurden Wärmebildkameras gefertigt, welche in Umgebungsluft und ohne Temperaturstabilisierung oder Kühlung betrieben werden können. Durch das thermoelektrische Messprinzip können damit auch statische IR-Signale gemessen werden.

Die Fabrikation der Infrarot-Sensorarrays basiert auf Methoden, welche an unserem Institut für Ein- und Zweipixel-Systeme entwickelt worden sind. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf das Design der Mikrosysteme, die Modellierung und die Optimierung der Sensorarrays, die Charakterisierung der Mikrosysteme und die Entwicklung und den Bau von Prototypen der Wärmebildkamera.

Alle Pixel eines Infrarot-Sensorarrays sind gitterförmig auf einer Membran angeordnet, welche aus den dielektrischen Schichten des verwendeten CMOS Prozesses besteht. Die Membran wird durch eine anisotrope Aetzung des Siliziums von der Rückseite des Wafers her freigelegt. Ein Gitter aus Silizium oder Gold grenzt benachbarte Pixel voneinander ab. Jedes Pixel enthält eine Thermosäule aus Aluminium und Polysilizium, welche zwischen die dielektrischen Schichten der Membran eingebettet ist. Damit können Temperaturunterschiede zwischen dem Zentrum und dem Rand der Pixel gemessen werden. Einfallende Infrarot-Strahlung wird von den dielektrischen Schichten und den Materialien der Thermosäule absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die Mitte des Pixels erwärmt sich dadurch, während der Rand des Pixels durch die Gitterstruktur zwischen den Pixeln auf der Temperatur des Chips gehalten wird. Der resultierende Temperaturgradient im Pixel wird von der eingebauten Thermosäule in eine Spannung

umgewandelt. Jedes Pixel enthält ein Heizelement, welches für Kalibrierung und Funktionstests verwendet werden kann.

Fünf verschiedene Mikrosysteme mit Sensorarray-Größen zwischen 4×5 und 32×40 Pixeln wurden entwickelt und getestet. Dabei wurden verschiedene Pixelgeometrien und verschiedene integrierte Schaltungen verwendet. Mit den Mikrosystemen wurde eine minimale Tempertaupflösung von 104 mK mit einer $1/f$ Linse bei 1 Hz Bildwiederholffrequenz erreicht.

Im Rahmen der Arbeit wurden zwei verschiedene Methoden der thermischen Trennung benachbarter Pixel untersucht. Die erste Methode basiert auf einem Gitter aus n-dotiertem Silizium unter der dielektrischen Membran. Das Gitter wird dabei durch anisotropes Aetzen mit KOH in Kombination mit einem elektrochemischen Aetzstop freigelegt. Zu diesem Zweck wurde eine neue Methode der elektrischen Kontaktierung entwickelt. Die zweite Methode basiert auf einem Gitter aus galvanisch aufgebrachttem Gold auf der Vorderseite der dielektrischen Membran.

Des Weiteren wurden analytische Modelle für die elektrischen und thermischen Eigenschaften der Pixel entwickelt, welche die Wärmeleitung durch die Luft berücksichtigen. Diese Modelle erlauben es, für jeden Anwendungszweck und jede Verpackungsart die optimale Geometrie für ein Pixel zu berechnen. Der Einfluss der Form der Thermoelemente auf das Signal/Rausch Verhältnis wurde untersucht, und eine optimale Form für die Thermoelemente gefunden.

Die Empfindlichkeit der Sensoren auf Infrarot-Strahlung, die Empfindlichkeit auf das Heizen mit den eingebauten Heizelementen, der Offset der Pixel, das Übersprechen eines Pixels auf seine Nachbarn und der elektrische Widerstand der Pixel wurden gemessen.

Basierend auf den Mikrosystemen wurden 100 Wärmebildkamas mit 10×10 Pixeln und zwei Wärmebildkamas mit 16×16 Pixeln gebaut. Diese Kamas können dazu verwendet werden, die Möglichkeiten der Infrarot-Sensorarrays zu demonstrieren und praktische Erfahrungen mit möglichen Anwendungen zu sammeln.