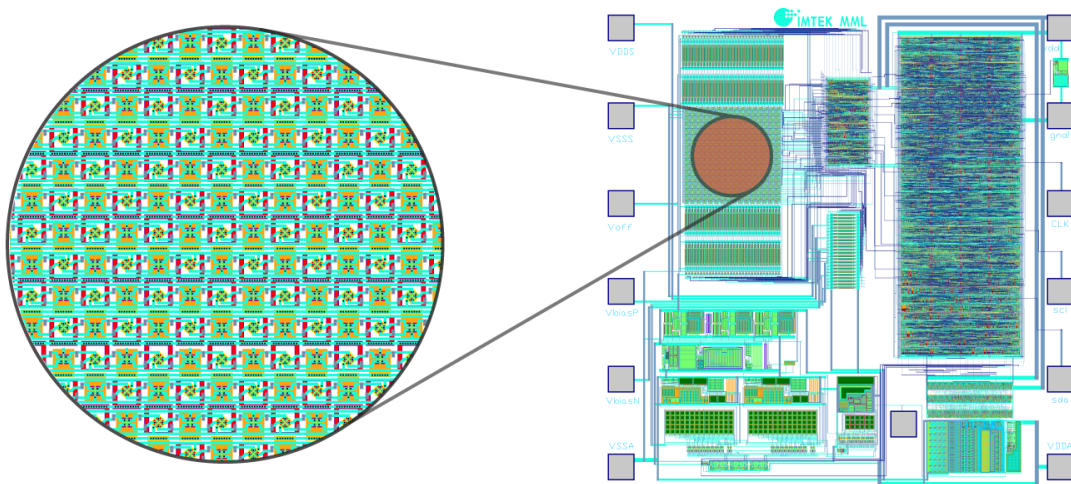


Diploma Thesis

# Design of an Integrated Piezo-FET Based Stress Sensor Array

Pascal Gieschke



## Abstract

This diploma thesis describes the design of a fully CMOS integrated high density stress sensor array. The stress sensors are based on field effect transistors, also called piezo-FETs. The stress sensor array consists of 1024 sensors with a device pitch of  $15\ \mu\text{m}$  only. Half of the 1024 stress sensors are used for the extraction of the  $(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$  difference of normal stresses while the other half is used to extract the  $\sigma_{xy}$  shear stress component.

A novel array concept was developed for the simple addressing and selection of a single stress sensor element in the array. It incorporates the following features which provide essential advantages in arrays larger than  $5 \times 5$  sensors: (i) the sensor pitch is constant for any array size, (ii) the sensor pitch mainly depends on the size of the stress sensor pixels and not on the leads connecting each sensor, (iii) the number of passive sensors connected in parallel to an active sensor is significantly reduced compared to former designs, (iv) it features a high level of symmetry, and (v) it can be laid out in any size using a flexible software algorithm.

A critical component of an integrated stress sensor system is the amplifier. Therefore, a switched capacitor (SC) instrumentation amplifier was designed. It consists of two fully differential stages and a third stage for the fully-differential to single-ended conversion. It uses auto-zeroing through correlated double sampling to make it insusceptible to operational amplifier offsets. The SC amplifier has eight selectable gain steps between 100 and 1200. In combination with a 10-Bit analog-to-digital converter (ADC), this results in resolutions between  $4\ \mu\text{V}$  and  $49\ \mu\text{V}$ . The 3 dB corner frequency of the amplifier at a clock frequency of

200 kHz was simulated to be between 15 kHz and 20 kHz depending on the selected gain. The simulated noise power spectral density at 1 kHz equals 81 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  and the input-equivalent offset is below 1 mV.

Test structures were designed to study the sensor characteristics and the influence of parasitic effects on the performance of the active sensor in the array. Parasitic effects originate from parasitic elements and from the passive sensors connected in parallel to the active sensor. The test structures not only include the single sensors and a  $2 \times 2$  sensor array but also single rows and single columns of the array. All test structures are integrated with minimal circuitry and directly connected to bondpads. Two versions of a fully integrated stress sensor array were implemented. They differ only concerning the size of the integrated stress sensors and consist of a  $32 \times 32$  sensor array, an analog multiplexer, an SC amplifier, a successive approximation analog-to-digital converter and a digital control unit with an I<sup>2</sup>C-bus.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit stellt das Design eines vollintegrierten hochdichten Stress-Sensor Arrays vor. Die Stress-Sensoren basieren auf Feldeffekttransistoren und werden daher auch als Piezo-FETs bezeichnet. Das Stress-Sensor Array besteht aus 1024 Sensoren mit einem Abstand von nur 15  $\mu\text{m}$ . Die eine Hälfte der Sensoren wird für die Extraktion der Normalspannungsdifferenz ( $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ ) genutzt. Die andere Hälfte hingegen erlaubt die Bestimmung der  $\sigma_{xy}$  Scherspannungskomponente.

Ein neuartiges Array-Konzept wurde entwickelt, um ein einfaches Adressieren und Auswählen eines einzelnen Stress-Sensors im Array zu gewährleisten. Die Vorteile, die sich aus diesem Konzept ergeben, kommen bei Arrays mit mehr als  $5 \times 5$  Sensoren voll zum Tragen. Sie umfassen die folgenden Punkte: (i) Der Abstand der Sensoren bleibt konstant unabhängig von der Größe des Arrays, (ii) der Sensorabstand hängt hauptsächlich von der Größe der Stress-Sensor Pixel ab und nicht von den Verbindungsleitungen zu jedem Sensor, (iii) die Anzahl von passiven Sensoren, die parallel zu einem eingeschalteten Sensor betrieben werden, ist signifikant kleiner im Vergleich zu herkömmlichen Designs, (iv) der Aufbau des Arrays ist sehr symmetrisch, und (v) das Layout von beliebig großen Arrays kann durch einen einfachen Software-Algorithmus erstellt werden.

Eine kritische Komponente eines solchen integrierten Systems ist der Verstärker. Aus diesem Grund wurde ein Instrumentenverstärker basierend auf der Schalter-Kondensator-Technik entwickelt. Er besteht aus zwei voll-differentiellen Stufen und einer dritten Stufe, die die Konvertierung des voll-differentiellen Signals auf ein einpoliges Signal übernimmt. Der Verstärker nutzt zur Reduzierung des Offsets einen automatischen Nullabgleich (Autozero) mit Hilfe von korrelierter Doppelabtastung (Correlated Double Sampling) und ist somit unempfindlich gegenüber Offsets des Operationsverstärkers. Die Verstärkung kann in acht Schritten von 100 bis 1200 eingestellt werden. In Verbindung mit einem 10-Bit Analog-Digital-Wandler werden Auflösungen zwischen 4  $\mu\text{V}$  und 49  $\mu\text{V}$  erreicht. Die 3 dB Grenzfrequenz des Verstärkers wurde mit Hilfe von Simulationen bestimmt. Bei einer Verstärker-Taktfrequenz von 200 kHz beträgt sie abhängig von der gewählten Verstärkung zwischen 15 kHz und 20 kHz. Die simulierte spektrale Rauschdichte bei einer Frequenz von 1 kHz beträgt 81 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . Der eingangsäquivalente Offset ist deutlich unter 1 mV.

Um die Kenndaten der Sensoren und den Einfluß von parasitären Effekten auf das Verhalten des aktiven Sensors im Array zu untersuchen, wurden Teststrukturen entworfen. Parasitäre Effekte stammen von parasitären Elementen und von passiven Sensoren, die parallel zum aktiven Sensor geschaltet sind. Die Teststrukturen beinhalten die einzelnen

Sensorelemente, ein  $2 \times 2$  Sensor-Array, eine einzelne Arrayspalte sowie eine einzelne Arrayzeile. Alle Teststrukturen wurden mit minimaler zusätzlicher Schaltung integriert und direkt mit Bondpads verbunden. Zwei Versionen eines vollintegrierten Stress-Sensor Arrays wurden implementiert. Beide Versionen unterscheiden sich nur durch die Größe der integrierten Sensoren. Sie beinhalten ein Array mit  $32 \times 32$  Sensoren, einen Multiplexer mit analogen Schaltern, den Verstärker in Schalter-Kondensator-Technik, einen Analog-Digital-Wandler mit sukzessiver Approximation und eine digitale Kontrolleinheit mit integriertem I<sup>2</sup>C-Bus.

**For further information, please contact:**

Prof. Dr. Oliver Paul  
Institute for Microsystem Technology IMTEK  
Microsystem Materials Laboratory MML  
Georges-Koehler Allee 103  
79110 Freiburg, Germany  
phone     ++49/761-203-7190  
fax        ++49/761-203-7192  
e-mail     paul@imtek.de