

Torsten Thieme¹, Andreas Bertz², Claus Dittrich³ und Thomas Gessner⁴

Eine neue Technologie zur Herstellung kostengünstiger Inertialsensoren

Inertialsensoren (Masse-Trägheitssensoren) sind am Markt etabliert; der Trend geht zu höheren Genauigkeiten bei vergleichbaren Preisen. Mit der patentierten AIM-Technologie wurde eine Möglichkeit geschaffen, robuste Inertialsensoren mit sehr guten Eigenschaften relativ preiswert herzustellen. Die Anwendungsfelder erstrecken sich von Automotive, Präzisionsmesstechnik, Navigation bis Industrie und Konsum.

1. Einleitung

1.1 Inertialsensorik: Marktanforderungen und Chancen

Seit über 20 Jahren werden weltweit Inertialsensoren auf der Basis von mikroelektromechanischen Sensoren (MEMS) entwickelt und inzwischen auch in großem Umfang für ein breites Anwendungsspektrum vermarktet. Dabei steht den immer höheren Anforderungen an die Sensoren ein enormer Preisdruck gegenüber. In diesem Markt können sich langfristig nur noch Lösungen durchsetzen, die qualitativ hochwertige bzw. an die jeweilige Anwendung angepasste Komponenten und Systeme auf Basis effizienter Prozess- und Testabläufe sowie den wirtschaftlichen Einsatz von Ressourcen (Material, Ausrüstungen, Personal) miteinander verbinden. Wesentliche Kriterien hierbei sind: Fertigungsaufwand, Sensorfläche, Ausbeute, Kalibrierungsaufwand, das Signal-Rauschverhältnis, Signaldrift und die Empfindlichkeit gegenüber unterschiedlichsten Umwelteinflüssen (Temperatur, Strahlung, elektrische Felder, mechanische Kräfte). Für kleine und mittelständische Unternehmen, die im Allgemeinen nicht in der Lage sind, alle Komponenten eines solchen komplexen Sensorsystems in der gewünschten Qualität selbst herzustellen, ist es deshalb erforderlich, rechtzeitig geeignete Partner zu finden und die Entwicklungsarbeiten eng aufeinander abzustimmen. Für die Erarbeitung innovativer Lösungen ist die Einbeziehung von Forschungseinrichtungen unter diesen Umständen ein besonderer Vorteil, wie nachfolgend am Beispiel der AIM-Technologie (*Airgap Insulation of Microstructures* [1]) für die Herstellung von Sensoren mit kapazitivem Wirkprinzip gezeigt wird.

1.2 Neue Lösungsansätze

Eine Vielzahl der genannten Anforderungen wird durch Anwendung einer Technologie zur Herstellung von siliziumbasierten Sensoren mit einem hohem Verhältnis von Ätztiefe zu Strukturbrei-

1 memsfab GmbH, Chemnitz

2 Technische Universität Chemnitz, Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM), Chemnitz

3 GEMAC mbH, Chemnitz

4 Fraunhofer-Einrichtung für Elektronische Nanosysteme (ENAS), Chemnitz

te (HARM = *High Aspect Ratio Micromachining*) ermöglicht. Durch die konsequente Nutzung der dritten Dimension (große Elektrodenflächen für Sensoren mit kapazitivem Wirkprinzip) kann ein sehr großes Verhältnis von Signal zu benötigter Siliziumfläche erreicht werden. Für viele Anwendungen ist darüber hinaus die geringe Querempfindlichkeit von Vorteil, aber auch die Möglichkeit einer ‚Überdämpfung‘, welche z.B. bei Sensoren mit einer gewünschten geringen Bandbreite höherfrequente Störungen unterdrückt. Diese Dämpfung wird im einfachsten Fall möglich durch die zu verdrängenden Gasteilchen zwischen den Elektrodenplatten.

Zu den HARM-Technologien können SOI-Varianten [2], Epitaxie-Prozesse (dicke Si-Schichten [3]) sowie SCREAM [4] und die AIM-Technologie gezählt werden. Letztere ist durch einen einfachen Prozessablauf, aber vor allem auch durch die Vermeidung von Waferbondverfahren (außer dem teilweise genutzten Deckelwafer) und den Verzicht auf temperaturgestützte Schichtabscheidungsprozesse für die Funktionsschicht gekennzeichnet. Damit sollte herstellungsbedingter mechanischer Stress in den beweglichen Komponenten vermeidbar sein, was zu einer sehr guten Temperaturstabilität führt. Wie am Beispiel von Beschleunigungssensoren im 1 g-Bereich gezeigt wird, kann so beispielsweise für viele Anwendungen auf eine zeitaufwändige Temperaturcharakterisierung und Kalibrierung verzichtet werden.

Ein weiterer markanter Vorteil der AIM-Technologie ist die Tatsache, dass durch einen speziellen Schritt im Prozessablauf alle partikelverursachten Relikte mit einer Lateralabmessung kleiner 1,2 µm in den *Trenches* entfernt werden. Dadurch können Ausbeuten von bis zu 95 % selbst in Reinräumen mit einer Reinraumklasse 3 bzw. 4 (VDI 2083) erreicht werden. In der weiteren Entwicklung werden Ansätze verfolgt, die auch noch auf die Abdeckung des Sensors durch einen massiven Deckelwafer verzichten, um den damit verbundenen Fertigungsaufwand, die mechanische Verspannung aber auch die verbrauchte Fläche weiter reduzieren zu können.

2. Die AIM -Technologie

2.1 Prinzip und Besonderheiten bei der Herstellung

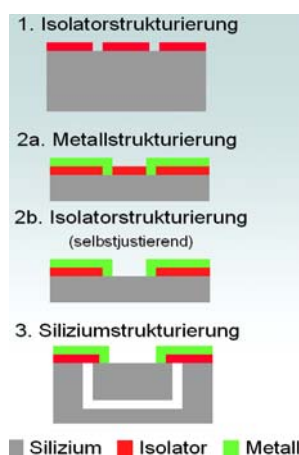


Abb. 1a: Prinzipieller Ablauf der AIM-Technologie im Ankerbereich

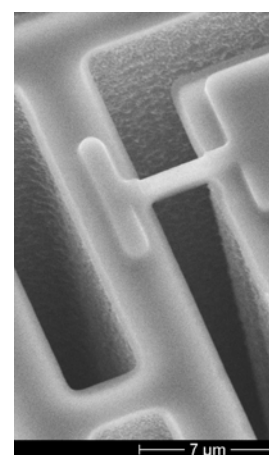


Abb. 1b: REM-Aufnahme eines Trägers, der durch anisotropes und isotropes Ätzen von Silizium als Brücke ausgebildet wird

Der grundlegende Prozessablauf der AIM-Technologie wurde bereits in [1] beschrieben (siehe Abbildung 1a). Das REM-Bild (Abbildung 1b) zeigt einen Träger nach dem Tiefenätzen (hier 50

μm) und einer Folge von Passivierung und isotropen Ätzschritten. Damit wird die Freilegung der Strukturen am Ätzgrund sowie die Entfernung unter den Trägern erreicht.

Der im Bild dargestellte Anker muss dann in der Lage sein, ein geeignetes Feder-Masse-System zu tragen. Eine komplexe Struktur des Neigungssensors AIM7E, bestehend aus vier Ankern, vier Federn und einem perforierten Masseteil (vollständig aus einkristallinem Silizium) zeigt Abbildung 2.

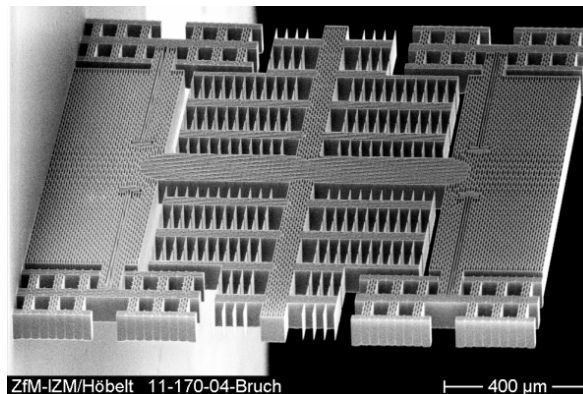


Abb. 2: REM-Aufnahme des Neigungssensors AIM7E mit einer Strukturhöhe von 50 μm (ohne Gegenelektroden und umgebendes Si).

Die Herstellung der AIM-Strukturen kann zu 95 % auf der Basis von Prozessschritten einer CMOS-Technologie (z.B. 1 μm Niveau) durchgeführt werden. Die restlichen Prozesse betreffen vor allem den Komplex der Siliziumstrukturierung. Doch auch hier konnte nachgewiesen werden, dass mit einer für das DRIE von Silizium (Bosch-Prozess) entwickelten Anlage, die erforderlichen Prozesse ausführbar sind. Durch die Anwendung einer Polymer-*Spacer*-Schicht und das plasma-gestützte *Release-Etch* kann auf jegliche Nassprozesse und den Einsatz von HF-Dampf verzichtet werden. Die schützende Polymerschicht wird hingegen nach Abschluss der Sensorfertigung in einem üblichen Plasmaveraschungsprozess rückstandsfrei entfernt. Unter diesen Bedingungen ist das häufig beobachtete ‚Verkleben‘ solcher Sensoren mit geringer Rückstellkraft generell nicht zu beobachten.

Diese Vorteile erforderten allerdings die Lösung folgender technologischer Aufgabenstellungen:

- sichere und homogene Passivierung der Silizium-Strukturen auch für die hohen Aspektverhältnisse und relativ hohen Prozesstemperaturen,
- zuverlässiges Unterätzen der passivierten Siliziumstrukturen und
- laterales Siliziumätzen mit großer Ätzhomogenität auf dem gesamten Wafer und auch in die Tiefe der geätzten *Trenches*.

Wie die Struktur in Abbildung 2 und die erreichten großen Ausbeuten (siehe Kapitel 2.2) illustrieren, ist es gelungen, diese Prozesse in der erforderlichen Qualität sowie hohen zeitlichen Stabilität zu entwickeln. Ungeachtet dessen bestand ein weiteres Ziel dieser Arbeiten darin, die durchgeführten Prozesse soweit zu durchdringen, dass auch eine Übertragung auf andere Anlagen kurzfristig möglich ist. Da die grundlegenden Mechanismen zumindest bei den Ätzprozessen aufgeklärt werden konnten, war beispielsweise ein Prozesstransfer der *Spacer*-Ätzung und des Lateralätzprozesses von einer RIE-Anordnung auf ein ICP-System möglich. Wie in Abbildung 3 zu

sehen, wurden erste freigelegte Strukturen bereits mit annähernd 100 µm Ätztiefe erfolgreich hergestellt.

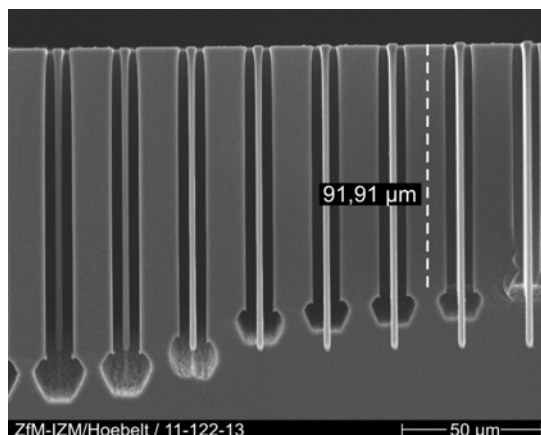


Abb. 3: REM-Aufnahme eines Querschnitts von freigelegten Balken mit ca. 100 µm Tiefe

2.2 Funktionstest / Charakterisierung

Alle hergestellten Sensoren werden noch im Waferverbund mehreren Funktionstest unterzogen. Als erster Test werden alle Anschlüsse der Sensoren bezüglich ihrer Isolation untersucht. Dazu sind beispielsweise 14 Messungen pro Sensor erforderlich. Eine typische Fehlerverteilung auf einem Wafer zeigt Abbildung 4. Als fehlerhaft werden dabei alle Sensoren angesehen, die zumindest bei einer Messung einen Isolationswiderstand kleiner 1 GΩ aufweisen. In der Abbildung beträgt die Fehlerquote ca. 13 %.

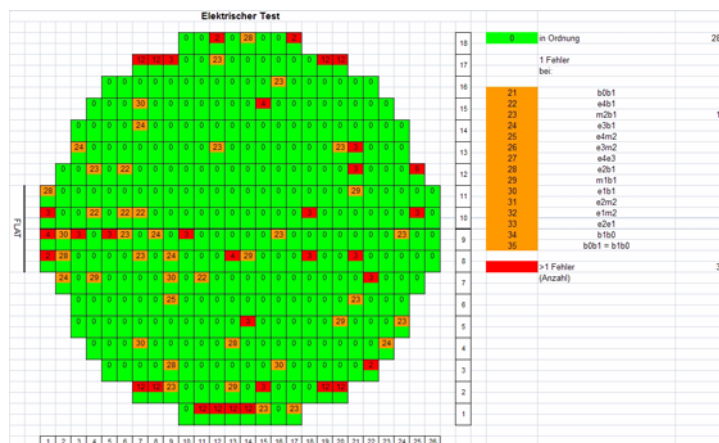


Abb. 4: Typische Fehlerverteilung auf einem Wafer entsprechend der Isolationmessung

Diese (passiven) Tests können jedoch nicht garantieren, dass die Sensoren trotz vollständiger Isolation beispielsweise nicht in ihrer Bewegung eingeschränkt sind. Aus diesem Grund wurde das Verfahren der so genannten 2ω-Methode [5] für eine Anwendung im Waferverbund angepasst. Dabei ist es möglich, die seismische Masse mittels Waferprober elektrostatisch anzuregen. Die mechanische Schwingfrequenz ist dann doppelt so hoch wie die Anregungsfrequenz. Wird der durch geeignete Beschaltung auf diese Weise entstehende Verschiebungsstrom (für das Doppelte der Anregungsfrequenz) gemessen, kann die Signaleinkopplung über Festkapazitäten ausgeschlossen werden (Abbildung 5).

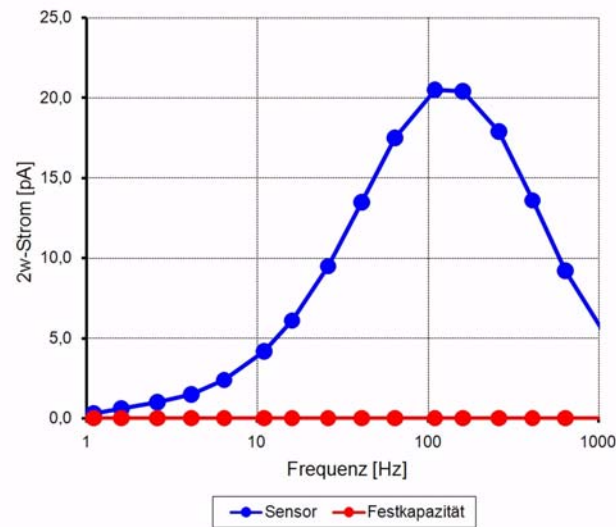


Abb. 5: $i(2\omega)$ in Abhängigkeit zur Frequenz der Anregungsspannung für eine Festkapazität und eine bewegliche Sensormasse

Entsprechend diesem Test ist somit auch die mechanische Funktionstüchtigkeit der Sensoren gesichert. Abbildung 6 zeigt eine typische Verteilung des 2ω -Stroms für einen Wafer mit AIM-Sensoren.

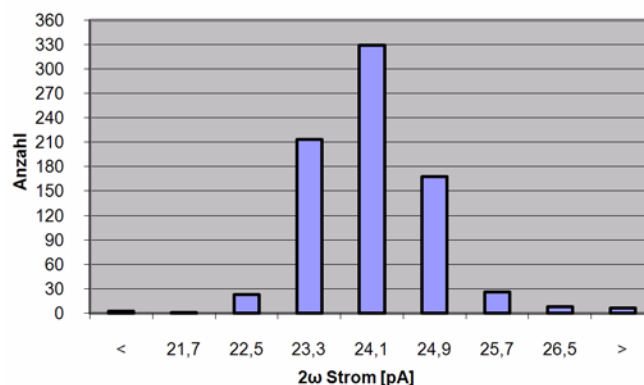


Abb. 6: $i(2\omega)$ -Histogramm basierend auf 775 Sensoren eines Wafers

Alle Sensoren, welche für diesen Sensortyp keinen 2ω -Strom zwischen 22 und 26 pA aufweisen, werden als potentiell fehlerhaft betrachtet. Somit kann erreicht werden, dass alle ausgelieferten Bauelemente ihre geplante Funktion erfüllen.

3. Eigenschaften und Anwendungsfelder der Sensoren

3.1 Wesentliche Eigenschaften der AIM-Sensoren

An dieser Stelle sollen einige charakteristische Eigenschaften der AIM-Sensoren illustriert werden. In Abbildung 7 ist die bei HARM-Sensoren mögliche Überdämpfung am Beispiel eines Zweiachsneigungssensors (Typ AIM5i) zu sehen. Damit kann für sehr viele Anwendungen in vorteilhafter Weise die Unterdrückung von mechanischen Schwingungen höherer Frequenz erfolgen.



Abb. 7: Übertragungsfunktion des Neigungssensors AIM5i

Um eine Einordnung der Sensoren in Bezug auf das Signal-Rausch-Verhältnis zu bekommen, wurde nach [6] die kapazitive Empfindlichkeit ($\mu\text{F/g}$) auf die gemessene Rauschdichte ($\mu\text{g/Hz}^{-1/2}$) bezogen. Der Spitzenwert der in dieser Publikation betrachteten Beispiele liegt bei einem Verhältnis von 4,1 während bei den eigenen Untersuchungen in Verbindung mit dem ASIC-Typ CVC1.0 der Firma GEMAC ein Verhältnis von 19,5 erreicht wurde.

Wie eingangs erwähnt, sollten die AIM-Sensoren dem Ansatz entsprechend eine sehr geringe Temperaturdrift aufweisen. Zu diesem Zweck wurden beispielsweise ca. 40 Sensoren (1 g) zunächst im Bereich zwischen Raumtemperatur und 80 °C bezüglich der Offsetdrift untersucht. Mit einer maximalen Änderung von $\pm 70 \mu\text{g/K}$ (inklusive ASIC und *Assembly*) werden dabei Werte erreicht, die anderen Sensortechnologien nur nach einer entsprechenden Kalibrierung möglich sind. In ähnlicher Weise ist dies auch in Bezug auf die Empfindlichkeitsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur zu verzeichnen. Beim Test, auch unterschiedlicher Sensortypen (1 g und 15 g), werden Koeffizienten von $\pm 0,11 \text{ %/K}$ ermittelt. Abbildung 8 zeigt ein spezielles Beispiel für die Temperaturdrift des Offsetwertes (Nulllage), bei dem der Temperaturverlauf (- 40 °C ... + 85 °C) bei einer erhöhten Luftfeuchte (39 % r. F.) aufgenommen wurde. Die quasi Hysteresefreiheit deutet auf eine sehr gute Dichtigkeit dieses Aufbaus hin.

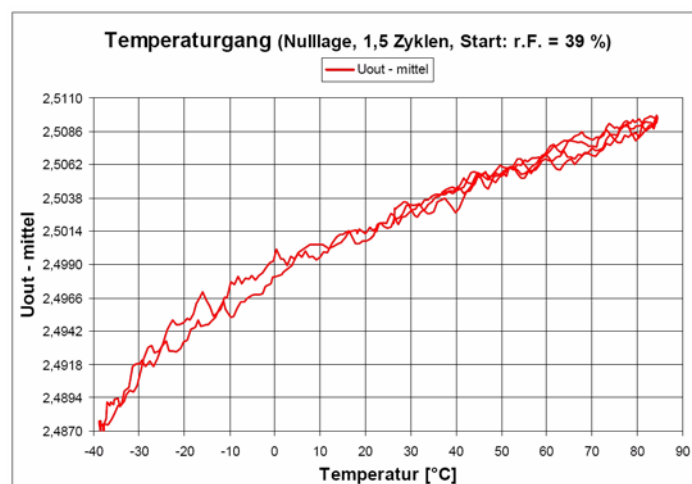


Abb. 8: Ausgangssignal eines Sensor-ASIC-Systems (AIM5i+CVC1.0) in Abhängigkeit von der Temperatur (- 40 °C ... + 85 °C) bei 39 % r.F.

3.2 Sensorbeispiele/Anwendungsfelder

Unter Einhaltung der Entwurfsregeln können die AIM-Strukturen flexibel für verschiedenste Anwendungen angepasst werden. Die überwiegende Mehrheit der bisher verfügbaren Sensoren betrifft den Bereich um 1 g (Neigungsmessungen). Diese zumeist als Zweiachsensysteme ausgeführten Sensoren sind beispielsweise die Typen AIM 5 und AIM 7 (1 g) mit unterschiedlichen kapazitiven Empfindlichkeiten sowie der Sensor AIM 9 (0,5 g) und weitere an spezielle Auswerteschaltungen angepasste Entwürfe. Weitere AIM-Sensortypen stehen für Vibrationsmessungen zur Verfügung und für spezielle Anforderungen, bei denen beispielsweise Schock- und Neigungsmessungen mit einem System erfolgen sollen.

Danksagung

Die gezeigten Ergebnisse sind das Resultat der intensiven Arbeit vieler weiterer Mitarbeiter der beteiligten Einrichtungen (memsfab, GEMAC, TUC-ZfM, FhG-IZM). Stellvertretend seien hier genannt: Steffen Schubert und Torsten Aurich (GEMAC), Danny Reuter und Markus Nowack (TUC-ZfM) sowie Dr. Christian Lohmann (jetzt NXP). Ein Teil der Arbeiten war bzw. ist außerdem Gegenstand von geförderten Forschungsprojekten (MIKROFE: BMBF-FKZ 03/1728B, ASIL: BMBF-FKZ 16 SV2084). Ohne die großzügige Bereitstellung des flexiblen ASIC M7704.a (Prototypen) durch die Firma ELMOS wäre darüber hinaus eine Vielzahl von Untersuchungen nicht möglich gewesen.

Literatur

- [1] Bertz, A.; Küchler, M.; Knöfler, R.; Gessner, T.: A novel high aspect ratio technology for MEMS fabrication using standard silicon wafers. In: Proceedings of the Transducers '01. Munich, Germany, 2001, S. 1128–1131
- [2] Renard, St.: Industrial MEMS on SOI. Journal of Micromechanics and Microengineering 10 (2000), Nr. 2, S. 245–249
- [3] Reichenbach, R.; Schubert, D.; Gerlach, G.: Micromechanical triaxial acceleration sensor for automotive applications. Proceedings of the Transducers '03. Boston, USA, 2003, S. 77–80
- [4] Zhang, Z. L.; MacDonald, N. C.: A RIE process for submicron, silicon electromechanical structures. Journal of Micromechanics and Microengineering 2 (1992), Nr. 1, S. 31–38
- [5] Logeeswaran, V. J.; F. E. H. Tay; M. L. Chan; F. S. Chau; Y. C. Liang: First Harmonic (2f) Characterisation of Resonant Frequency and Q-Factor of Micromechanical Transducers. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 37, 17–33, 2003
- [6] Chae, J.; Kulah, H.; Najafi, K.: A CMOS-compatible high aspect ratio silicon-on-glass in-plane micro-accelerometer. J. Micromech. Microeng. 15 (2005) 336–345

[10.03.09]

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. Torsten Thieme
Memsfab GmbH
Annaberger Str. 240
D – 09125 Chemnitz
torsten.thieme@memsfab.de