

# Trockenätzprozess für MEMS – Niederdruckmesszellen auf Siliziumbasis

Die derzeitige Nachfrage nach Halbleitern und somit nach Siliziumwafern ist nicht nur dem Trend zur Elektromobilität und dem ständigen Erneuerungsprozess von Elektroartikeln geschuldet, sondern vor allem der digitalen Transformation der Gesellschaft und der zunehmenden Konnektivität. Physikalische Messgrößen wie Temperatur, Luftqualität oder Druck werden in einer Vielzahl von alltäglichen Anwendungen wie beispielsweise bei smart homes mittels Sensoren erfasst und über eine zentrale Steuerungseinheit kontrolliert. Neben den integrierten Schaltungen, sind mikroelektronische Drucksensoren auf Siliziumbasis seit Jahren in großen Mengen im Einsatz und haben sich zu Standardprodukten entwickelt.

Niederdrucksensoren für Drücke <20 mbar werden allerdings nur von wenigen Unternehmen<sup>[1]</sup> angeboten und sind in Europa Mangelware. Das liegt an dem hohen Herstellungsaufwand, bedingt durch die Forderung nach höchster Druckempfindlichkeit einerseits und nachhaltiger Vermeidung intrinsischer Störungen andererseits. Die Lösung liegt in einer Kombination neuester Technologien wie reaktivem Ionenätzen (DRIE), Membrandickenstrukturierung und Fusion-Bonding. Wie die erste dieser Techniken zu leistungsfähigeren und dabei gleichzeitig preiswerteren Sensoren beiträgt, stellt AMSYS im nachfolgenden Artikel dar.

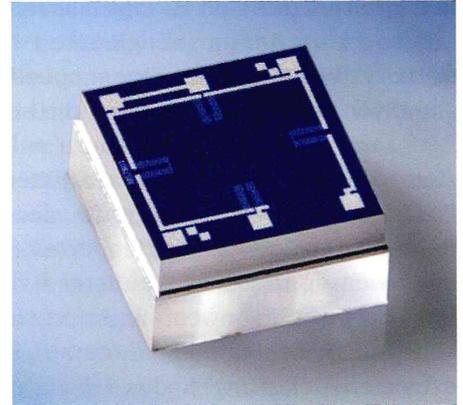
## Klassische Siliziumdruckmesszellen

Mikromechanische Druckmesszellen auf Siliziumbasis (MEMS) (Abb. 1) haben längst die mechanischen Messaufnehmer mit elastischen Membranen verdrängt und sich in der Industrie, speziell der Belüftungstechnik (HVAC) sowie in der Medizintechnik millionenfach bewährt. Als Beispiel können hier die Produkte der Insenso GmbH aus Berlin dienen, welche durch kundenspezifische Änderungen an die jeweilige Applikation angepasst werden können.

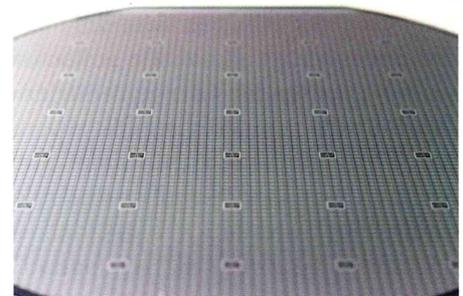
Da Druckmesszellen auf Siliziumbasis mit den Methoden der Halbleiterindustrie und teilweise auf Produktions-

linien der Chipindustrie hergestellt werden, genügen sie in Bezug auf Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit den hohen Ansprüchen, durch die sich integrierte Schaltungen (IC) auszeichnen. Sie werden in Batch-Prozessen auf Siliziumscheiben (Wafer, Abb. 2) hergestellt, wobei sich auf einem dieser Wafer mehrere tausend Messzellen (Dies) befinden können. Die Dies werden in einem letzten Prozessschritt vereinzelt und bilden als Druckmesszelle das zentrale Element eines Drucksensors.

Alle mikromechanischen Silizium-Druckmesszellen (Abb. 1 und 3) haben als druckempfindliches Element eine dünne Membran (Dicke abhängig vom Druckbereich, einige  $\mu\text{m}$ ), die bei klassischen Messzellen anisotrop in einer KOH-Lösung (nasschemisches Ätzen) aus dem Siliziumkörper ausgeätzt wird. An geeigneten Stellen auf der Oberfläche der Messzellen werden mittels Integrationstechnologien (Diffusion oder Ionenimplantation) Fremdatome in den Siliziumkristall eingebaut, sodass Zonen mit geänderter Leitfähigkeit entstehen, die elektrisch als Widerstände wirken. Sobald ein Über-/Unterdruck auf die Membran einwirkt, verändert sich mit der Durchbiegung der dünnen Siliziummembran die kristalline Struktur des Siliziums. Insbesondere in den mechanisch stark belasteten Randgebieten der Membran, wo die Wider-



▲ Abb. 1: Einzelne ausgesägte, piezoresistive Absolutdruckmesszelle für Drücke <30 bar montiert auf einem Glassockel.



▲ Abb. 2: Ansicht eines Wafers mit Druckmesszellen und Testmuster.  
©AMSYS GmbH & Co. KG

stände angebracht werden, finden starke lokale Potentialverschiebungen statt, die zu einer messbaren Änderung der Widerstandswerte führen (piezoresistiver Effekt).

Eine klassische Silizium-Druckmesszelle (Abb. 3) besteht aus einem Siliziumdie (blau), in das von unten eine Vertiefung (Cavity) eingätzt ist. In den meisten Fällen wird dieses Teil elektrochemisch auf einen Glassockel (weiß, z. B. Pyrex) montiert (gebondet), in dem sich im Falle von Differenz- oder Relativdruckmesszellen eine Bohrung befindet.

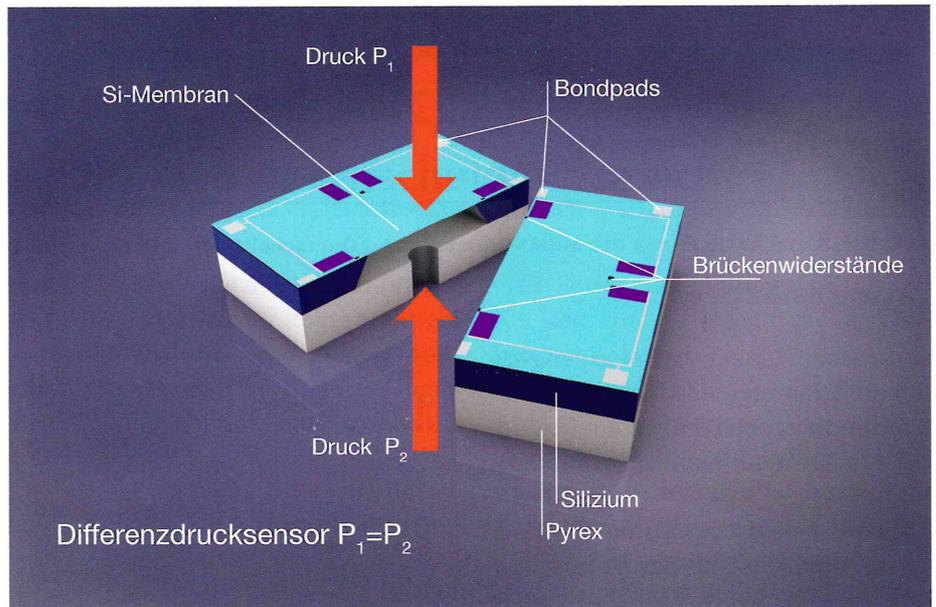
Beispielhafte Abmessungen:

- Fläche der Siliziumdruckmesszelle =  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$
- Dicke der Siliziumdruckmesszelle =  $0,9 \text{ mm}$

- Helle dünne Linien = Leiterbahnen aus Aluminium
- Helle Quadrate = Kontaktflächen (Bondpads) aus Aluminium zur elektrischen Kontaktierung
- Violette Rechtecke = Implantierte Kontaktflächen als Übergang zwischen piezoresistiven Widerständen und Leiterbahnen
- Dunkle, kleine Flächen zwischen den Rechteckflächen = piezoresistive Widerstände

**Technologie für kompakte preiswerte Druckmesszellen: Der Trockenätzprozess (DRIE)**

Je niedriger der wirkende Druck ist, umso empfindlicher muss der Sensor sein. Dies bedeutet für die piezoresistive Druckmesszelle entweder eine dünnere oder eine größere Membran. Je dünner die Membran jedoch ist, umso nichtlinearer ist ihre Übertragungskennlinie und umso empfindlicher ist die Messzelle gegen Überdruck.



▲ **Abb. 3: Querschnitt – Klassische Differenzdruckmesszelle für einen Druckbereich ab 5 mbar wie sie im AMS 5915 eingesetzt wird** [2].  
©AMSYS GmbH & Co. KG

Eine größere Membranfläche zur Sensitivitätssteigerung bringt neben dem Anwachsen der Nicht-linearitäten jedoch auch eine größere Chipfläche mit

sich und verteuert damit den Sensor. Messzellen mit der klassischen Membranstruktur (Cavity mit schrägen Seitenwänden, Abb. 3 und 4b) sind daher



**Sensorix GmbH – Sensors made in Germany**  
Paulusstr. 22 · 53227 Bonn  
Tel.: +49 228 7637 41 0 · sales@sensorix.com  
www.sensorix.com

**Sensorix GmbH**

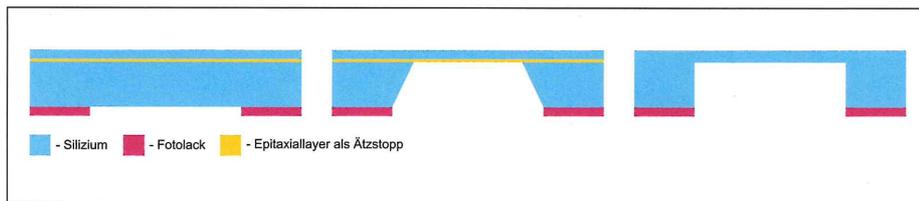
Der Bonner Hersteller von elektrochemischen Gassensoren für die Detektion toxischer Gase, Sensorix GmbH, lädt Sie herzlich ein, am 9. bis 11. Mai, die internationale Messe SENSOR+TEST 2023 in Nürnberg zu besuchen. An unserem Stand I-102 in der Halle 1 haben Sie die Möglichkeit, das Sensorix-Team zu treffen und mit uns ins Gespräch zu kommen. Unser Geschäftsführer, der Qualitäts- und F&E-Manager sowie der Kundenservice-Spezialist unterstützen Sie gerne bei Ihren Fragen rund um die strategische Entwicklung von Sensorix, unser Angebot an Sensoren sowie technisch-spezifische Fragen zu Sensoradaptionen. Nutzen Sie diese Chance, um sich zu informieren, wie unsere Technologien zur Lösung Ihrer Probleme eingesetzt werden können. Wir freuen uns darauf, Sie an unserem Stand I-102 zu treffen.



**SENSOR+TEST**  
DIE MESSTECHNIK - MESSE  
The Measurement Fair

Nürnberg, Germany  
**9. – 11.5.2023**

**VISIT OUR STAND 1-102**



▲ Abb. 4: Ätztechnologien in der MEMS-Herstellung – Querschnitt durch Die a) vor und b) / c) nach dem Ätzen.  
©AMSYS GmbH & Co. KG

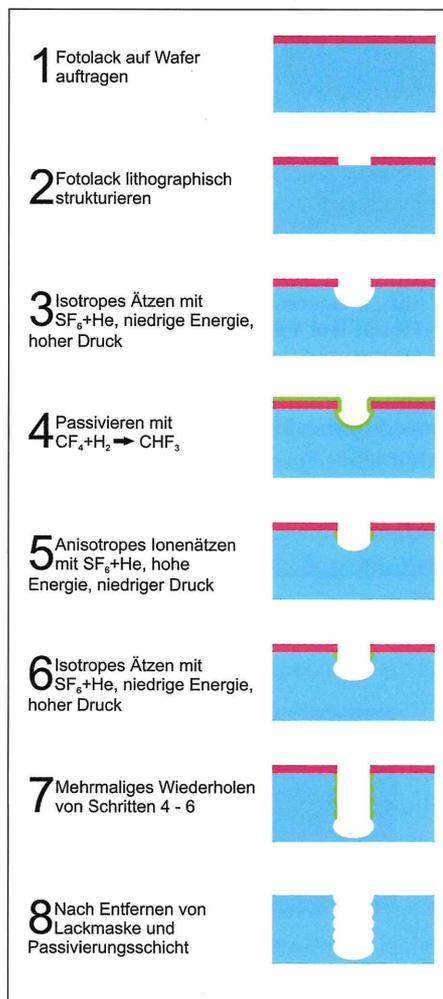
unter dem Aspekt technisch akzeptabler Parameter und kommerzieller Randbedingungen derzeit nur für Drücke bis 100 mbar sinnvoll zu realisieren.

Eine technologische Lösung für niedrigere Drücke stellt der Trockenätzprozess (Bosch-Prozess) dar, der in den 1990er Jahren entwickelt wurde. Hierbei entsteht die Membran durch die Methode des Tiefen Reaktiven Ionen Ätzens (DRIE). Dieser Prozess vermeidet den Flächenverlust durch die schrägen Cavitywände im Nassätzprozess (s. Abb. 4c).

Dieser Prozess kombiniert isotropes (richtungsabhängiges) Ätzen (Abb. 5, Schritte 3 und 6) und anisotropes (richtungsunabhängiges) Ionenätzen (Abb. 5, Schritt 5), das es erlaubt Gräben oder zur Siliziumoberfläche senkrechte Kammern in das Silizium zu ätzen. Beide Prozesse werden am maskierten Wafer mehrfach wiederholt, wobei zwischenzeitlich immer eine Passivierung mit einem Polymer erfolgen muss (Abb. 5, Schritt 4).

Die Schritte 4 bis 6 werden solange durchgeführt bis die gewünschte Tiefe der Cavity erreicht ist. In einem letzten Prozess (Stripping) werden die Wände geglättet und die Passivierungsschicht und der Fotolack entfernt (Abb. 5, Schritt 8).

Alles in allem handelt es sich beim Trockenätzen um eine komplizierte und aufwendige Technologie, durch die jedoch kleinere Messzellen, höhere Empfindlichkeiten und bessere technische Eigenschaften wie z. B. Stabilität und Genauigkeit erreicht werden. Dabei ist das Verfahren nicht auf die Niederdruckmesszellen von AMSYS beschränkt.



▲ Abb. 5: Prinzip des Trockenätzens – Die-Querschnitt während des Ätzprozesses.  
©AMSYS GmbH & Co. KG

Durch das Trockenätzverfahren erhält man eine größere Genauigkeit und Stabilität bei einem besseren Überdruckverhalten. Wichtiger kommerzieller Aspekt ist die Kostenminimierung durch die erreichte Flächenreduktion.

Mit der DRIE-Technologie, und weiteren Maßnahmen wie der Membrandstrukturierung zur Sensitivitätssteigerung und dem Fusion-Bonding, ge-

langt man zu einer neuen Generation von piezo-resistiven Druckaufnehmern, wie den bidirektionalen Nieder-Differenzdrucksensoren für Bereiche ab  $\pm 125$  Pa ( $\pm 1,25$  mbar), die AMSYS anbietet<sup>[3]</sup>. Noch niedrigere Druckbereiche bedingen andere, membranfreie Messprinzipien wie die ebenfalls siliziumbasierte micro-flow Technik, die Drucksensoren der LME Serie für Bereiche von  $\pm 25$  Pa ermöglicht.

### Zusammenfassung

Obgleich Millionen von Druckmesszellen jährlich produziert werden, stellt die Niederdruckmesszelle mit Siliziummembran unterhalb von 20 mbar unter produktionstechnischen Aspekten und bei Berücksichtigung der Herstellungskosten immer noch eine technologische Herausforderung dar. Entweder sind die Messzellen zu groß (zu teuer) oder die Sensoren zu ungenau.

Nur wenige Hersteller haben sich in der Vergangenheit dieses Themas angenommen. Neue Technologien wie DRIE, Membrandickenstrukturierung und Fusion-Bonding erlauben es mittlerweile, hochgenaue und dabei preiswerte MEMS-Sensoren im Niederdruckbereich mit Fehlern unter 1 Pa für Drücke von bis zu 100 Pa herzustellen.

### ■ INFO

Kontakt:  
Nadine Rauch  
Stefan Falk  
AMSYS GmbH & Co. KG  
An der Fahrt 4  
55124 Mainz  
Tel.: +49 6131 / 469 875 0  
E-Mail: info@amsys.de  
www.amsys.de

Weiterführende Informationen:

- [1] Homepage AMSYS: www.amsys.de
- [2] AMG5915: www.amsys.de/produkte/drucksensoren/ams5915-digitaler-drucksensor
- [3] SOIC-Sensoren: www.amsys.de/analog-digitale-soic-drucksensoren
- [4] Micro-Flow Drucksensor LME: www.amsys.de/produkte/drucksensoren/lme-25-pascal-digital-analog-sensor-mit-verstaerktem-ausgangssignal