

# Entwicklung eines piezoresistiven Drucksensors für Hochtemperaturanwendungen auf Basis eines SOI-Substrats

A. Goehlich, A. Jupe, M. Stühlmeyer, Y. Celik, A. Schmidt und H. Vogt

Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS), Finkenstraße 61, 47057 Duisburg,  
email: andreas.goehlich@ims.fraunhofer.de.

## Zusammenfassung

Wir berichten über entwicklungsbegleitende Charakterisierungen und Simulationen eines mikro-mechanischen Drucksensors für Hochtemperaturanwendungen. Das anvisierte Konzept beruht auf der Nutzung von Dickfilm-SOI-Substraten (SOI: Silicon on Insulator). Kristallines Silizium ist aufgrund seiner sehr guten mechanischen und piezoresistiven Eigenschaften insbesondere für Drucksensoranwendungen gut geeignet. SOI-Wafersubstrate eignen sich zudem besonders gut für die Herstellung freitragender Silizium-Membranen, da sich Kavitäten im Handle-Substrat des SOI-Wafers durch Tiefenätzen (DRIE: deep reactive ion etch) mit dem „Bosch-Prozess“ mit der Möglichkeit eines hochselektiven Ätzstoppes auf dem vergrabenen Oxid des SOI-Wafers erzeugen lassen. Für Hochtemperatur-Anwendungen können die Piezo-Widerstände dielektrisch durch das vergrabene Oxid isoliert werden, so dass thermisch induzierte Leckströme, die bei pn-isolierten Piezowiderständen bei hohen Temperaturen auftreten, vermieden werden. Ein weiterer Vorteil des genutzten Prozesses betrifft die Nutzung einer Hochtemperatur-Metallisierung, die einen hohen Temperatureinsatzbereich oberhalb 250°C erlaubt.

**Keywords:** MEMS, piezoresistiver Drucksensor, Siliziummembranen, Simulation, Hochtemperatur

## Hochtemperatur MEMS auf Silizium Basis

Zahlreiche Sensor- und Aktoranwendungen in Industrie und Automobilbau erfordern MEMS Elemente, die bei hoher Temperatur und/oder unter rauer Umgebung arbeiten können. Beispiele hierfür sind Hochtemperaturdrucksensoren in der Ölexploration, akustische Transducer und Beschleunigungssensoren für Vibrationsanalysen z.B. in Verbrennungsmotoren.

Halbleitertechnologien auf Basis von Silizium-auf-Isolator (SOI) Wafersubstraten eignen sich für den Hochtemperaturbetrieb bis über  $T=250^\circ\text{C}$ . Im Gegensatz hierzu erlauben Technologien, die auf herkömmlichen Bulk-Siliziumsubstraten mit einer elektrischen Isolation durch pn-Übergänge beruhen, den Betrieb bis etwa  $125^\circ\text{C}$ , da der thermisch induzierte Leckstrom im pn-Übergang exponentiell mit der Temperatur ansteigt [1]. Eine weitere Maßnahme, die einen langzeitstabilen Betrieb bei hohen Temperaturen erlaubt, ist die Nutzung von Hochtemperaturmetallisierungen wie CVD-Wolfram, die keine Elektromigration zeigen. Auf dieser technologischen Basis hat das IMS bereits in den zurückliegenden Jahren kapazitive oder piezoresistive Drucksensoren für Hochtemperaturanwendungen entwickelt [2],[3].

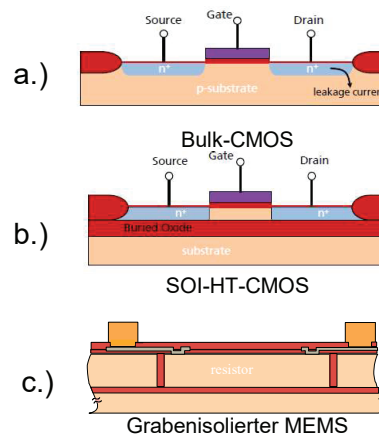


Abb. 1: Isolationstechniken für Halbleiterbauelemente: a.) Transistor in Bulk-Siliziumtechnologie mit pn-Isolation. b.) Transistor in Dünnschicht SOI-Technologie mit einer dielektrischen Isolation, c.) grabenisolierter Widerstand in Dickfilm SOI-Technologie.

Eine zurückliegende Entwicklung des IMS betrifft einen CMOS-integrierten kapazitiven Hochtemperaturdrucksensor in Oberflächen-Mikromechanik [2]. Die integrierte Ausleseschaltung wurde hierbei in Dünnschicht-SOI-

Technologie mit Filmdicken im Bereich von 200 nm realisiert.

Das kapazitive Drucksensorelement bestand aus einer freistehenden flexiblen Polysilizium-Membran, die über einer ionenimplantierten dielektrisch isolierten Gegenelektrode im Silizium-Dünnsfilm „aufgespannt“ war. Die freistehende Polysilizium Membran wurde *innerhalb des CMOS-Prozesses durch Opferoxidätzen* hergestellt und mit einer Siliziumnitridschicht hermetisch verschlossen. Ein Chipfoto ist in Abbildung 2 dargestellt.

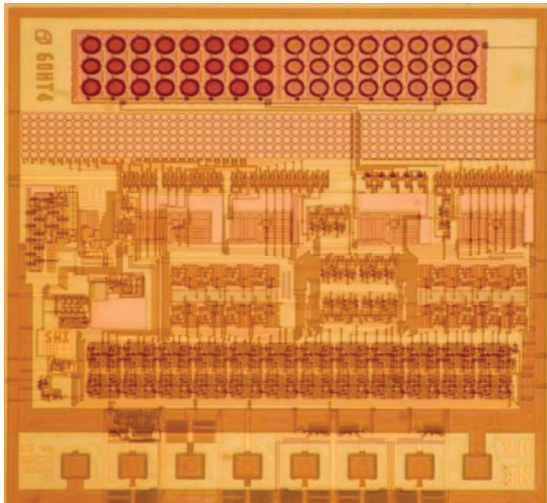


Abb. 2: Chipfoto eines am IMS entwickelten CMOS integrierten kapazitiven HT-Drucksensors in Dünnsfilm-SOI-Technologie. Oben ist das Drucksensorarray aus Polysilizium-Membranen sichtbar [2].

Eine weitere am IMS entwickelte piezoresistive HT-Drucksensortechnologie für hohe Drücke bis zu 2000 bar und Temperaturen bis 300°C nutzt dagegen Dickfilm-SOI-Substrate mit Filmdicken im Bereich einiger Mikrometer.

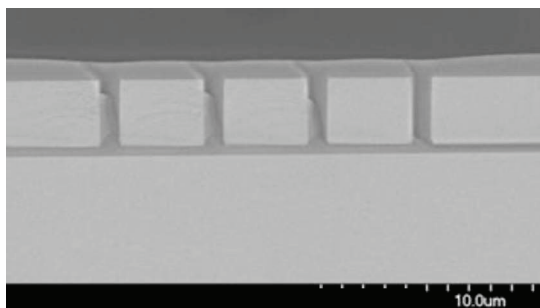


Abb. 3: Dielektrische Grabenisolation von piezoresistiven Widerständen [3].

Bei dieser Technologie sind im Siliziumfilm grabenisolierte piezoresistive Widerstände eingebracht, die mit einer einlagigen Wolfram-Metallisierung angeschlossen sind [3].

Für kleinere Druckbereiche (z.B. 10 bar) sind freistehende Membranen aus kristallinem Silizium eine interessante Möglichkeit für Hochtemperatur-Drucksensoren.

Einkristallines Silizium ist aufgrund der sehr guten mechanischen und piezoresistiven Eigenschaften wie der hohen Bruchspannung und des vergleichsweise hohen piezoresistiven Koeffizienten für Drucksensoranwendungen gut geeignet [4,5].

Mit Hilfe von SOI-Wafern können durch rückseitiges Nassätzen oder durch Tiefenätzen mit dem Bosch-Prozess robuste einkristalline Silizium-Membranen mit gut definierter Dicke erzeugt werden. Das vergrabene Oxid dient hierbei vorteilhaft als ein selektiver Ätzstopp. Diese Technik wird hier im Rahmen eines industriellen Projektes zur Entwicklung eines piezoresistiven HT-Drucksensors eingesetzt. In den weiteren Abschnitten wird über ausgewählte Ergebnisse der Sensorentwicklung berichtet.

### Entwicklungsbegleitende Charakterisierungen einer Prozessentwicklung für einen piezoresistiven HT-Drucksensor

In dem vorliegenden HT-MEMS-Projekt wird ein piezoresistiver Drucksensor auf Basis von Dickfilm SOI-Substraten mit dielektrisch isolierten Silizium-Widerständen und einer Hochtemperatur-Metallisierung entwickelt.

Die dielektrisch isolierten Piezowiderstände wurden mit etablierten Prozessschritten der Halbleitertechnologie wie Fotolithographie, Oxidation, Ionenimplantation und Temperung in der CMOS-Linie des Fraunhofer IMS erzeugt.

Eine Aufsicht auf ein exemplarisches Sensordesign zeigt Abbildung 4.

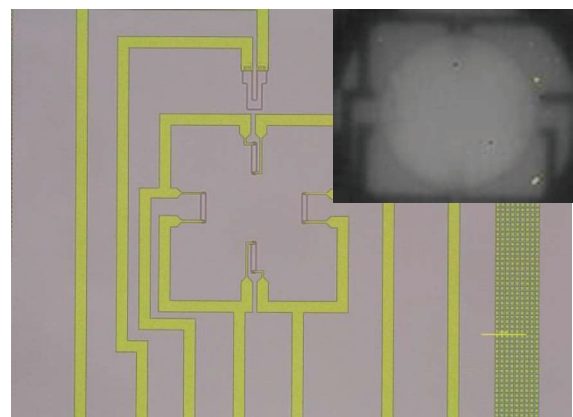


Abb. 4: Aufsicht auf die piezoresistive Brücke mit Hochtemperaturmetallisierung. Das Detail zeigt eine IR-Aufnahme, welche die freigelegte Membran zeigt.

Die Piezowiderstände der Brücke und die Hochtemperatur-Metallisierung sowie ein Widerstand zur Temperaturmessung sind erkennbar.

Die gemessene Temperaturcharakteristik der dotierten dielektrisch isolierten Silizium-Widerstände ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Halbleiter-Widerstände zeigen in dem vermessenen Temperaturintervall einen Anstieg des Widerstandswertes mit der Temperatur. Zwei gegenläufige Effekte beeinflussen die Widerstandscharakteristik mit steigender Temperatur: Das Anwachsen des Widerstands durch höhere Streuung der Ladungsträger und das Abfallen des Widerstandes durch erhöhte thermische Ladungsträgererzeugung [6]. Die gemessene Widerstandscharakteristik zeigt einen monotonen Anstieg, der auf einen durch den erstgenannten Effekt dominierten Einfluss hindeutet. Da der Anstieg des Widerstandes dem Abfall des piezoelektrischen Koeffizienten mit der Temperatur gegenläufig ist, kann dies zur Temperaturkompensation ausgenutzt werden [5].

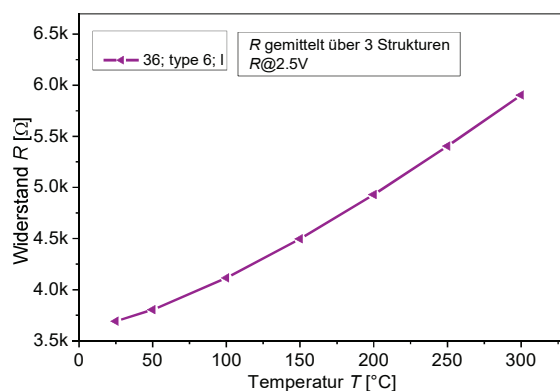


Abb. 5: Temperaturcharakteristik der implantierten Silizium-Halbleiterwiderstände bis 300 °C.

#### Teststrukturen für die Charakterisierung der mechanischen Spannung in der Membran

Neben dem Hochtemperaturverhalten der Widerstände ist die Kontrolle der mechanischen Spannungen im Membranschichtstapel von großer Wichtigkeit, da die eingefrorene Spannung zu Verwerfungen der Membran und zu Nichtlinearitäten des elektrischen Ausgangssignals führen kann.

Daher wurden Teststrukturen mit freistehenden einkristallinen Silizium-Membranen und mit einer Dicke von etwa 3 µm bzw. 3.5 µm auf 200 mm Wafern durch Tiefenätzen mit einem Tegal 200 Tiefenätzer erzeugt. Die SOI-Substrate wurden vorher durch Rückseitenschleifen auf eine Dicke von ca. 400 µm gedünnt und anschließend rückseitig poliert. Die Maskierung der Tiefenätzung erfolgte

durch eine Dickfilm-Lackmaske (AZ 10 XT). Das Testlayout enthält Strukturen mit verschiedenen kreisförmigen und quadratischen Membranstrukturen.

Der Tiefenätzprozess wurde dabei so optimiert, dass sich ein geringer „Elefantenfuß“ beim Stopp auf dem vergrabenen Oxid ausbildet (Bild 6). Zwei verschiedene Substrattypen wurden angetestet. Einerseits BSOI-Wafer mit einer Filmdicke von etwa 3 µm und einer Dicke des vergrabenen Oxides von 1 µm, andererseits Dünnsfilm-SOI-Wafer, die durch eine epitaktische Silizium-Schicht (3.5 µm) verstärkt wurden. Die epitaktisch verstärkten SOI-Wafer haben ein vergrabenes Oxid von etwa 400 nm Dicke und eine zusätzliche Oxid-Passivierungsschicht von nominal 1.75 µm. Einen typischen REM-Querschnitt einer geätzten Membran zeigt Abbildung 6.

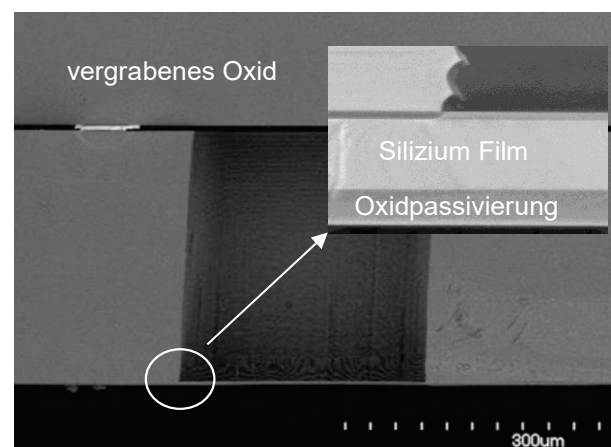


Abb. 6: Freistehende durch Tiefenätzen erzeugte Silizium-Membran. Die Kavität ist mit einem Wafer verschlossen.

Die Detail-REM-Aufnahme zeigt den selektiven „Stopp“ auf dem vergrabenen Oxid mit einem geringem „Elefantenfuß“.

Ein Teil der mit Membranen versehenen SOI-Testwafer wurde einzeln und in einem Testaufbau mit einem Interferenzmikroskop (Fogale-Photomap-3D) hinsichtlich der mechanischen Durchbiegung bei Druckbelastung untersucht. Der Testaufbau ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt.

Aus den bearbeiteten Wafern wurden Stücke mit Membranstrukturen herauspräpariert und quasi als ein hermetischer „Abschluss“ auf ein Vakuumgefäß aufgebracht, das unter dem Objektiv des Interferenzmikroskops angeordnet war. Durch Abpumpen der Kammer mit Hilfe einer Membranpumpe kann eine Druckdifferenz von bis zu etwa 1 bar zwischen der Außen- und der Innenseite der Membran hergestellt werden. Gleichzeitig kann die Auslenkung der Membran mit dem Interferenzmikroskop vermessen werden. Alternativ wurden einige der geätzten Testwafer in einer Vakuumumgebung rückseitig durch einen Wafer zugebondet, so

dass verschlossene Membranen erzeugt werden konnten (quasi als „Absolutdrucksensor“, siehe Bild 6).

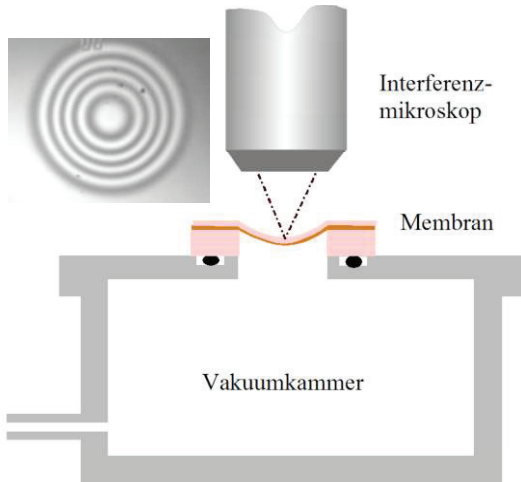


Abb. 7: Messaufbau für interferometrische Vermessung der Membranen. Das Detail zeigt eine exemplarische Interferenzaufnahme einer kreisrunden Teststruktur.

Diese Membranen wurden in die Vakuumkammer eingebracht (wobei die Kammer in diesem Fall durch ein Glasfenster verschlossen wurde) und konnten mit einem Überdruck bis zu 3 bar belastet werden (Druckregler DPI 520 von Fa. Druck). Ein beispielhaftes Messergebnis für einen BSOI-Wafer zeigt Abbildung 8 für eine verschlossene Membran mit einem nominalen (d.h. gezeichneten Durchmesser) von 200  $\mu\text{m}$ . Die gemessenen Biegelinien können gut durch die theoretische Abhängigkeit gemäß der linearen Theorie für eine druckbelasteten Platte beschrieben werden [7]. Die Biegelinie  $w(r)$  einer starr am Rand eingeklemmten kreisförmigen Platte mit Radius  $R$  kann im Rahmen der linearen Theorie durch die folgenden Formeln (Gl. 1) beschrieben werden.

$$w(r) = w_0 \left[ 1 - \frac{r^2}{R^2} \right]^2 \quad (1) \quad w(r) = w_0 \left[ 1 - \frac{r^2}{R^2} \right]^2$$

$$\text{mit } w_0 = P \frac{R^4}{64 D} \quad \text{und } D = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)}$$

$D$  bezeichnet die Biegesteifigkeit der Platte,  $E$  das Elastizitätsmodul,  $h$  die Plattendicke,  $\mu$  das Poisson-Verhältnis und  $P$  den äußeren Druck. Diese Gleichung ist für geringe Membranauslenkungen (d.h.  $w_0 \ll \text{Plattendicke}$ ) und ohne Vorliegen einer zusätzlichen intrinsischen mechanischen Spannung gültig.

### Nichtlineare 1d-Beschreibung.

Für die Beschreibung belasteter kreisförmiger Platten mit großen Auslenkungen und/oder Vorliegen einer zusätzlichen mechanischen

Spannung ist eine numerische Lösung zweier gekoppelter nichtlinearer Differentialgleichungen für die vertikale und laterale Auslenkung  $w(r)$ ,  $u(r)$  der Platte geeignet.

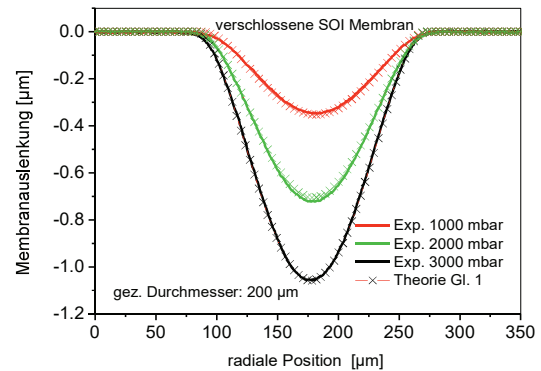


Abb. 8: Beispiel einer Durchbiegungsmessung einer „kleinen“ verschlossenen Silizium-Membran im Phase-Shift-Modus aufgenommen. Die Kreuze bezeichnen die theoretische Abhängigkeit der Biegelinie gemäß der linearen Theorie nach Gl. 1 mit einer gekoppelten Anpassung einer effektiven Biegesteifigkeit an die drei gemessenen Biegelinien (Kreuze).

Aus dem vertikalen und lateralen Kräftegleichgewicht lassen sich zwei gekoppelte nichtlineare Differentialgleichungen aufstellen [7,8], die hier durch einen Term ergänzt wurden, der eine zusätzliche intrinsische mechanische Spannung  $\sigma$  in der Platte berücksichtigt. Zur Lösung der Differentialgleichungen wurde eine Software erstellt, welche mit Hilfe der Runge-Kutta-Shooting Methode das Gleichungssystem (Gl. 2) iterativ löst.

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = -\frac{(1-\mu)}{2r} v^2 - v \frac{dv}{dr}$$

$$\text{mit } v = \frac{dw}{dr}. \quad (2a)$$

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv}{dr} - \frac{v}{r^2} = \frac{12}{h^2} v \left( \frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} + \frac{1}{2} v^2 + (1 - \mu^2) \frac{\sigma}{E} \right) + \frac{P r}{2D} \quad (2b)$$

Aus der Größe  $v(r)$  kann durch Integration die gesuchte Durchbiegung  $w(r)$  berechnet werden. Die effektive Biegesteifigkeit bzw. das effektive Elastizitätsmodul eines zusammengesetzten Schichtstapels kann gemäß Referenz [9] näherungsweise aus den Elastizitätsmodulen und den Poisson-Verhältnissen der einzelnen Schichten berechnet werden. Für  $\mu$  wurde in Gl. 2 ein effektives Poisson-Verhältnis eingesetzt. Ein beispielhaftes Ergebnis der numerischen Lösung von Gl. 2 für die zentrale Durchbiegung  $w_0$  zeigt Abbildung 9 für eine Platte aus einem



Schichtstapel von 3  $\mu\text{m}$  Silizium auf einer 1  $\mu\text{m}$  dicken (vergrabenen) Oxidschicht mit einem Durchmesser von 300  $\mu\text{m}$ . Es wurden unterschiedliche mechanische Spannungen im vergrabenen Oxid angenommen. Zum Vergleich wurde dasselbe Problem mit einer nichtlinearen 2D-FEM-Rechnung (COMSOL) gelöst (gestrichelt eingezeichnet). Die isotropen Materialkonstanten wurden jeweils gemäß Referenzen [10,11] gewählt. Es zeigt sich eine vergleichsweise gute Übereinstimmung der FEM-Rechnung mit der eindimensionalen Rechnung, die jedoch deutlich zeiteffektiver ist. Das Ergebnis dieser Rechnung zeigt, dass für anwachsende kompressive Spannung im vergrabenen Oxid die Durchbiegung der vorgespannten Platte im Vergleich zur unbelasteten Platte stark nichtlinear anwächst, wogegen eine tensile mechanische Spannung ( $\sigma > 0$ ) die Platte mechanisch steifer macht.

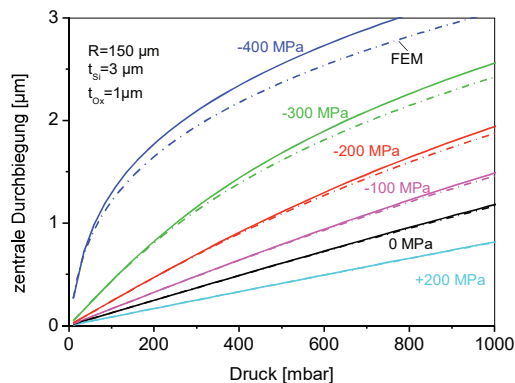


Abb. 9: Berechnete Durchbiegung einer kreisrunden starr eingeklemmten Platte mit Durchmesser 300  $\mu\text{m}$  bestehend aus 1  $\mu\text{m}$  Oxid und 3  $\mu\text{m}$  Silizium für unterschiedliche mechanische Spannungen im Oxid. Die durchgezogene Linie bezeichnet die numerische Lösung der 1d-Differentialgleichungen Gl. 2, gestrichelt zum Vergleich eingezeichnet ist die 2d-FEM-Rechnung.

Diese Betrachtungen helfen, die im nächsten Abschnitt beschriebenen experimentellen Ergebnisse zu interpretieren.

### Experimentelle Charakterisierungen an Teststrukturen

Die zentrale Durchbiegung  $w_0$  kann als Funktion des angelegten Druckes aufgetragen werden. In Abbildung 10 sind interferometrische Messungen für einen BSOI-Wafer mit einer Si-Filmdicke von ca. 3  $\mu\text{m}$  und einem vergrabenen Oxid von etwa 1  $\mu\text{m}$  Dicke für verschiedene

Durchmesser aufgetragen. Da das Ätzprofil nicht vollständig senkrecht ist, ist der „wahre“ Plattendurchmesser etwa um 20-25  $\mu\text{m}$  größer als der im Layout gezeichnete Durchmesser, dies wurde in der zum Vergleich eingezeichneten numerischen Rechnung gemäß Gl. 2 jeweils berücksichtigt. Während sich für kleine Plattendurchmesser und dementsprechend kleine Auslenkungen erwartungsgemäß eine nahezu lineare Abhängigkeit der Auslenkung vom Druck ergibt (siehe Gl. 1), zeigt sich für etwas größere Membranen bereits ein stark nichtlineares Verhalten (Abbildung 11a). Die gemessenen Durchbiegungen sind deutlich größer als aufgrund der linearen Theorie (Gl. 1) erwartet. Im unbelasteten Fall zeigen die Membranen eine nach außen gerichtete Durchbiegung („Buckling“). Eine entsprechende Messung wurde ebenfalls an den epitaktisch verstärkten SOI-Wafern mit Oxidpassivierung durchgeführt (Abbildung 11b).

Die nichtlinearen Effekte waren hierbei vergleichsweise reduziert, da das vergrabene Oxid dünner ist (0,4  $\mu\text{m}$ ) und die Platte durch die größere Siliziumdicke (3,5  $\mu\text{m}$ ) bzw. die zusätzlich vorhandene Passivierung mechanisch steifer ist. Zum Vergleich eingezeichnet sind jeweils berechnete Kurven der eindimensionalen Rechnung gemäß Gl. 2 unter der Annahme einer eingefrorenen mechanischen kompressiven Spannung von  $\sigma = -400$  MPa bzw.  $\sigma = -500$  MPa im vergrabenen Oxid.

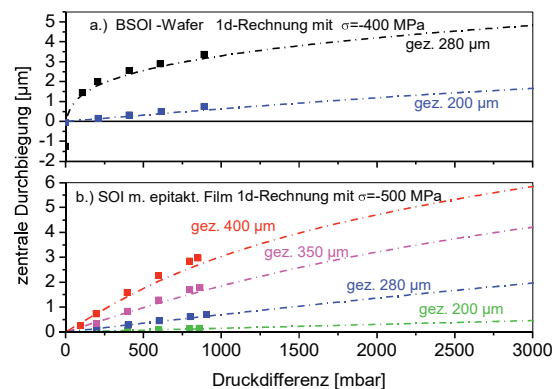


Abb.10: Zentrale Durchbiegung an einer BSOI-Membran (a) und einer epitaktisch verdickte Membran (b) für verschiedene gezeichnete Durchmesser. Die gestrichelten Linien bezeichnen die Ergebnisse der 1d-Rechnung (Gl.2) mit einem kompressiven Stress im vergrabenen Oxid.

Zur experimentellen Überprüfung dieser Annahme wurde das vergrabene Oxid eines Bruchstückes eines strukturierten BSOI-Wafers mit Hilfe von HF-Gas weggeätzt, um die vermutete Quelle der intrinsischen mechanischen

Spannung zu beseitigen. Anschließend wurde die Durchbiegung als Funktion des Druckes gemessen (Abbildung 11a). Nach dem HF-Ätzschritt hat sich die Durchbiegung deutlich verringert und fällt auf Werte ab, die durch die lineare Theorie gemäß Gl. 1 zu erwarten wären (als gestrichelte Linie in Abbildung 11a eingezeichnet).

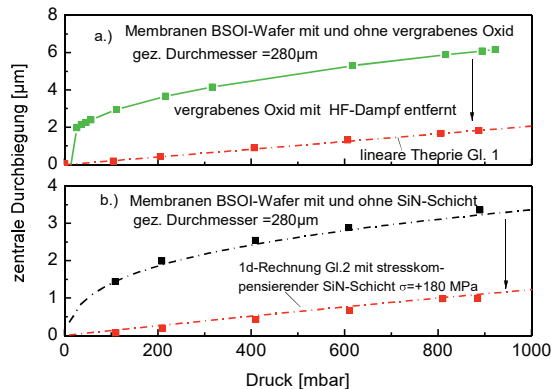


Abb. 11: Zentrale Durchbiegung an BSOI-Membranen. a) Vergleich der Durchbiegung nach Entfernen des vergrabenen Oxides. b) Vergleich einer Membran mit und ohne stresskompensierende Nitridschicht (500 nm). Gestrichelt eingezeichnet ist das Ergebnis der 1d-Rechnung.

Um die eingefrorene mechanische Spannung des vergrabenen Oxides in MEMS-Anwendungen zu kompensieren, kann eine tensile Plasmanitridschicht ( $\text{SiN}$ ) z.B. als Passivierung auf den SOI-Wafer aufgebracht werden. Durch Anpassung der Abscheidebedingungen (insbesondere durch Wahl des Druckes, Temperatur und/oder der RF-Leistung) kann der intrinsische Stress des  $\text{SiN}$  vom kompressiven in den tensilen Bereich gelegt werden.

Hierzu wurde versuchsweise eine etwa 500 nm dicke Nitridschicht mit tensiler Spannung mit Hilfe von PECVD auf einen BSOI-Wafer abgeschieden und die Druckabhängigkeit der Membranauslenkung gemessen.

Das Ergebnis dieses Versuches ist in Abbildung 11b im Vergleich zu einem Wafer ohne stresskompensierende Schicht dargestellt. Die rot eingezeichnete berechnete Kurve wurde unter der Annahme einer 500 nm dicken Nitridschicht mit einem tensilen Stress von  $+180\text{ MPa}$  berechnet. Die abgeschiedene  $\text{SiN}$ -Schicht kompensiert die eingefrorene mechanische Spannung nahezu vollständig.

### 3d-FEM-Simulation zur Optimierung der Schichtdicke der Passivierung

Detailfragen zur Dimensionierung des Drucksensors wurden mit Hilfe einer nichtlinearen piezoresistiven-mechanischen 3d-FEM-Simulation untersucht (COMSOL V4.3).

Ein wesentlicher Parameter für die Performance eines piezoresistiven Drucksensors ist die Nichtlinearität des Ausgangssignales, d.h. die Brückenspannung als Funktion des Druckes.

Daher wurde der Einfluss der im vergrabenen Oxid eingefrorenen kompressiven mechanischen Spannung auf die Ausgangskennlinie des Drucksensors untersucht.

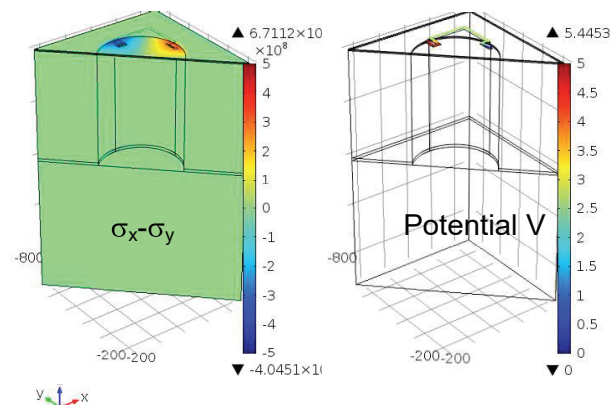


Abb. 12: 3D-FEM-Simulation eines piezoresistiven Drucksensors mit einer  $3.5\mu\text{m}$  dicken kreisförmigen SOI-Membran (Durchmesser  $280\mu\text{m}$ ) und einer Oxid- (Dicke  $1500\text{ nm}$ ) und einer tensilen Nitrid-Passivierung (Dicke  $400\text{ nm}$ ,  $\sigma = +200\text{ MPa}$ ). Im vergrabenen Oxid (mit Dicke  $400\text{ nm}$ ) ist eine Spannung von  $\sigma = -500\text{ MPa}$  eingefroren. Es wurde eine piezoresistiv-mechanisch-nichtlineare Rechnung durchgeführt. Die angenommene Temperatur beträgt  $T = 600\text{ K}$ . Links: die mechanische Spannungsdifferenz  $\sigma_x - \sigma_y$ , rechts: Potential  $V$  bei  $1\text{ mA}$  Stromeinprägung.

Der piezoresistive Effekt in den Widerstandsstrukturen wurde im Simulationssetup durch eine 2d-Anordnung von planaren Widerständen auf der Siliziummembran angenähert, während die elastische Mechanik in drei Dimensionen berücksichtigt wurde.

Hierzu wurde eine 3d-Geometrie erstellt, die den Silizium-Film und die einzelnen Passivierungsschichten sowie das vergrabene Oxid berücksichtigt. Eine eingefrorene kompressive mechanische Spannung im vergrabenen Oxid von  $\sigma = -500\text{ MPa}$  wurde angenommen, sowie eine  $\text{SiN}$ -Kompensationsschicht mit einem tensilen Stress von  $\sigma = 200\text{ MPa}$  und mit einer variablen Dicke zwischen  $100\text{ nm}$  bis  $500\text{ nm}$ .

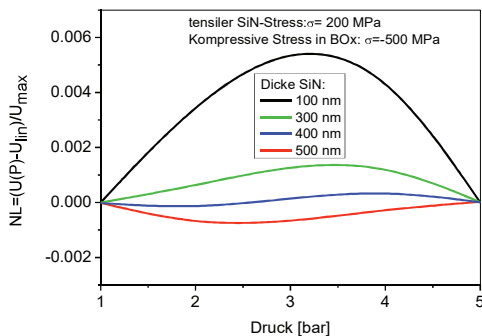
Ebenfalls berücksichtigt wurde der Einfluss der Materialausdehnungskoeffizienten auf die Stressverteilung der Siliziummembran. Es wurde hier eine Temperatur von 600 K angenommen.

Durch Anwendung eines äußeren Drucks auf die Passivierung können Übertragungskennlinien berechnet werden. Hierzu wurde in die Halbbrücke ein Strom von 1 mA „eingepägt“. Das 3d-FEM-Modell ist in Abbildung 12 dargestellt. Links ist die mechanische Spannungsdifferenz, in deren Extrema die Piezowiderstände liegen, rechts ist das elektrische Potential dargestellt.

Aus der druckabhängigen Kurve kann die Nichtlinearität NL in einem vorgegebenen Druckintervall als Funktion des Druckes für unterschiedliche Dicken der tensilen SiN-Schicht berechnet werden. Die Nichtlinearität NL ist hierbei wie folgt definiert worden:

$$NL = \frac{U(P) - U_{lin}(P)}{U_{max}} \quad (3)$$

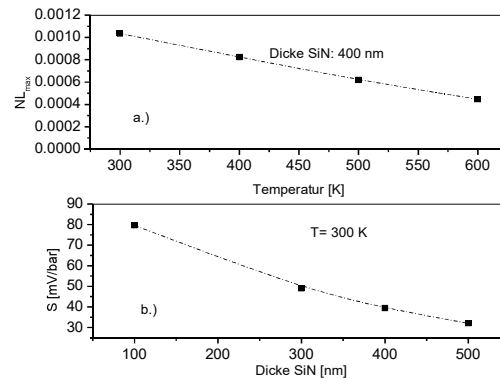
$U_{lin}(P)$  bezeichnet hierbei die lineare Interpolation zwischen dem Anfangs und dem Endpunkt der simulierten nichtlinearen  $U(P)$ -Kurve,  $U_{max}$  ist der Maximalwert der Ausgangsspannung und  $U(P)$  bezeichnet die (nichtlineare) Ausgangsspannung der Widerstandsbrücke als Funktion des Druckes.



**Abb. 13:** Berechnete Nichtlinearität im Bereich 1-5 bar und Kompensation durch eine SiN-Schicht mit +200 MPa tensilem Stress. Abhängig von der Filmdicke ändert sich die Nichtlinearität. Eine minimale Nichtlinearität wird in diesem Beispiel bei einer Schichtdicke von ca. 400 nm erreicht.

Die berechnete Nichtlinearität ist als Funktion des Druckes in Abbildung 13 für eine Temperatur von 600 K dargestellt. Für das hier gewählte Beispiel wird ein Minimum der Nichtlinearität bei einer SiN-Dicke von etwa 400 nm erreicht. Auf der anderen Seite hat die Dicke der stresskompensierenden SiN-Schicht

auch einen entscheidenden Einfluss auf die Sensitivität der Brücke, da mit steigender Dicke der Passivierung die Steifigkeit der Membran steigt. Die berechnete Nichtlinearität als Funktion der Temperatur bzw. die Sensitivität als Funktion der Passivierungsdicke zeigt Abbildung 14.



**Abb. 14:** Berechnete Abhängigkeit der maximalen Nichtlinearität NL von der Temperatur (a) und der Sensitivität als Funktion der SiN-Filmdicke (b.) bei 1 mA Stromspeisung der Halbbrücke.

Es ist ein erwartungsgemäß bei dickerer Passivierung ein Absinken der Empfindlichkeit zu beobachten (Bild 14 b), so dass hier ein Kompromiss zwischen der Linearität und der Empfindlichkeit geschlossen werden muss.

### Zusammenfassung und Ausblick:

Im Rahmen einer Prozessentwicklung für einen Hochtemperatur-Drucksensor wurden das Temperaturverhalten der Siliziumwiderstände und der Einfluss der eingefrorenen mechanischen Spannung auf die Durchbiegung von Silizium-Membranen untersucht. Hierzu wurden in SOI-Wafer rückseitig Kavitäten eingebracht und die Durchbiegung der freistehenden Membranen interferometrisch als Funktion des angelegten Druckes vermessen. Die gemessenen Abhängigkeiten können gut durch ein System gekoppelter nichtlinearer Differentialgleichungen beschrieben werden. Die numerische Lösung zeigt eine gute Übereinstimmung mit der FEM-Simulation und dem Experiment. Insbesondere bei den gebondeten BSOI-Wafern wurden deutliche nichtlineare Abhängigkeiten der gemessenen Durchbiegung vom angelegten Druck beobachtet. Als eine wesentliche Quelle der gemessenen Nichtlinearität wurde das vergrabene Oxid des SOI-Wafers identifiziert. Zur Beherrschung der Nichtlinearität wurde eine stresskompensierende tensile PECVD-Siliziumnitrid-Schicht auf die Teststrukturen abgeschieden. Die SiN-Schicht kompensiert die eingefrorene mechanische Spannung nahezu vollständig.

Es wurden nichtlineare FEM-Simulationen des Drucksensors mit COMSOL durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere der Einfluss von eingefrorenem mechanischen Stress auf die Nichtlinearität des Ausgangssignales untersucht. Durch die optimale Wahl der SiN-Schichtdicke kann eine Minimierung der Nichtlinearität erreicht werden. Weitere experimentelle Untersuchungen insbesondere bei höheren Temperaturen im Rahmen der Sensorentwicklung werden zurzeit durchgeführt.

EE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 19, Issue 2, pp. 229-238, 2010.

- [11] S. Stavroulis, „Rechner gestützter Entwurf von piezoresistiven Silizium-Drucksensoren mit realem mechanischen Wandler“, TU Darmstadt Dissertation, 2004.

## Literaturnachweis

- [1] H. Kappert; N. Kordas; S. Dreiner; U. Paschen; R. Kokozinski: Circuits and Systems (ISCAS), 2015 IEEE International Symposium on: High temperature SOI CMOS technology and circuit realization for applications up to 300°C.: 2015 Pages: 1162 - 1165, DOI: 10.1109/ISCAS.2015.7168845 IEEE Conference Publications
- [2] K. Kasten; N. Kordas; H. Kappert ; W. Mokwa: Capacitive pressure sensor with monolithically integrated CMOS readout circuit for high temperature applications, In: Sensors and actuators / A. 97-98, (2002), pp. 83 - 87. - DOI 10.1016/S0924-4247(01)00799-3
- [3] A. Goehlich ; H. Vogt; K. Debusman; H.K. Trieu : Customized Mems process development: A pressure sensor for high temperature and high pressure applications In: Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme: Annual report. Duisburg, pp. 42 - 44. - 2009 (2010).
- [4] K.E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material", Proceedings of the IEEE, Vol.70, pp. 420-455, 1982.
- [5] M.-H. Bao, "Micro Mechanical Transducers" in "Handbook of Sensors and Actuators", series editor. S. Middelhoek, Vol. 8, Elsevier, 2000.
- [6] S. Guo, H. Eriksen, K. Childress, A. Fink, M. Hoffman, High temperature smart-cut SOI pressure sensor Sensors and Actuators A 154 (2009) 255–260
- [7] S. Timoshenko und S. Woinowski-Krieger, "Theory of plates and shells", McGraw-Hill, 2 nd. edition, 1970.
- [8] M. Kandler "CMOS-kompatibler kapazitiver Silizium Drucksensor in Oberflächen Mikromechanik", Universität GH-Duisburg, Dissertation 1993.
- [9] J. Yang, J. Gaspar, O. Paul, "Fracture Properties of LPCVD Silicon Nitride and Thermally grown Silicon Oxide Thin Films from the Load Deflection of Long Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Diaphragms ", J. Micromechanical Systems, Vol. 17, No. 5, 1120-1134, 2008.
- [10] M. A. Hopcroft, W. D. Nix, and T. W. Kenny, "What is the Young's Modulus of Silicon?", IE-