

Überlastfeste Silizium-Differenzdrucksensoren mit thermisch strukturierten Gegenlagern aus Glas

T. Kober, R. Werthschützky Institut für Elektromechanische Konstruktionen, Technische Universität Darmstadt, 64283 Darmstadt, t.kober@emk.tu-darmstadt.de

Zusammenfassung

Differenzdrucksensoren, die feinwerktechnische Schutzmechanismen nutzen, erlauben eine Überlastfestigkeit von $\Delta p = 160$ bar bei einem Nennmessbereich von $\Delta p = 10$ mbar. Silizium-Drucksensoren bieten gute mechanische Eigenschaften aufgrund des geringen Hystereseverhaltens sowie eine gute Nullpunktstabilität. Die Siliziummesselemente für die Differenzdruckmesstechnik weisen selbst lediglich eine auf 1 bar begrenzte Überlastfestigkeit auf. Es werden daher Überlastschutzmechanismen benötigt, die die Empfindlichkeit und die Messunsicherheit des Messelementes nicht negativ beeinträchtigen.

Ein mikromechanisch integrierter Überlastschutz reduziert die Komplexität der feinwerktechnischen Konstruktionen im Vergleich zum Stand der Technik. Häufig wird hier der Überlastschutz durch externe Edelmetallmembranen mit definierter Ölfüllung realisiert. Das vorliegende neuartige Messelement erreicht diese Eigenschaften für einseitige Überlastung durch die Begrenzung der Auslenkung der Messplatte.

Mit dem überlastfesten Differenzdrucksensor mit Nennmessbereich $\Delta p = 10$ mbar ist es gegenwärtig möglich eine mittlere Überlastfestigkeit von $\Delta p = 220$ bar zu erreichen. Der Amplitudenfrequenzgang und die Sprungantwort zeigen ein ausgeprägtes Tiefpassverhalten, aus dem sich eine Überlastfestigkeit für dynamische Druckerregung ableiten lässt.

Strukturierte Gegenlager aus Glas

Die mittlere Tiefe der bereits hergestellten asphärischen Gegenlager im Glasgegenkörper beträgt $12\ \mu\text{m}$ [1]. Für die Herstellung von Gegenlagern mit einer Strukturtiefe von $12\ \mu\text{m}$ sind die entscheidenden Parameter die Waferhöhe, die Umformtemperatur sowie die Haltezeit während des Temperaturprozesses [2]. Um das Konzept der strukturierten Gegenlager aus Glas zu prüfen, wird ein erster Ansatz mit einseitigem Überlastschutz realisiert (Abb. 1 a Nr. 6). Vor der Temperaturbehandlung wird der dreilagige Stapel, der aus zwei Siliziumwafern (a, c) und einem Glaswafer (b) besteht, zueinander positioniert. Der erste laserstrukturierte Wafer (a) wird dazu als Werkzeug mit definierten Ausnehmungen genutzt. Der umzuformende Glaswafer (b) wird auf dem ersten Siliziumwafer positioniert. Die Platzierung des Drucksensorchips wird durch definierte Ausnehmungen im zweiten Siliziumwafer (c) vorgegeben. Wird der Waferstapel horizontal in eine Heizkammer eingebracht und auf $750\ ^\circ\text{C}$ erwärmt, erweicht der Glaswafer (Abb. 1 b).

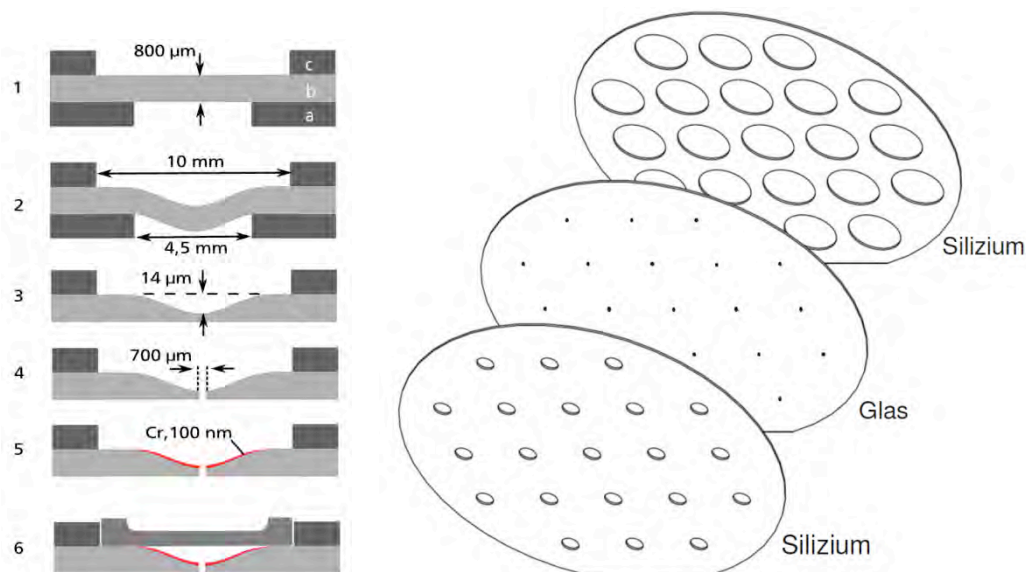


Abb. 1: Herstellung strukturierter Gegenlager. a) Prozessschritte zur Herstellung von strukturierten Gegenlagern, b) Waferstapel vor dem Positionieren unter Reinraumbedingungen.

Aufgrund des Eigengewichts des Glases sinkt es an den laserstrukturierten Ausnehmungen gezielt ein (Abb. 1 a, Nr. 2). Die weiteren Prozessschritte erfordern das Entfernen des ersten Siliziumwafers (a) durch Läppen oder Grinden (Abb. 1 a, Nr. 3). Für den notwendigen Druckausgleich zwischen dem Gegenlager und dem Umgebungsdruck wird eine Kapillare mit einem Durchmesser von 700 μm durch Ultraschallbohren eingebracht. Um das selektive Anodische Bonden der Siliziummessplatte zu realisieren, wird durch Vakuum-Bedampfen eine 100 nm dünne Chromschicht strukturiert. Bereits vereinzelte Drucksensoren werden anschließend anodisch auf das Gegenlager gebondet. Die gleichzeitige Herstellung von 21 Proben ist möglich. Durch Wafersägen werden die Gegenlager mit Siliziummessplatte (Drucksensorchip) in quadratische Proben mit einer Kantenlängen von 15 mm vereinzelte. Eine wichtige Voraussetzung ist eine ebene Oberfläche, deren Oberflächenrauigkeit für das Anodische Bonden geeignet ist. Die Waferoberfläche ist nach der Temperaturbehandlung ohne weitere Zwischenschritte zum Anodischen Bonden geeignet. Durch das Fügen der Wafer bei 750 $^{\circ}\text{C}$ wird eine signifikante Waferkrümmung erzeugt. Diese Waferkrümmung kann durch die Nutzung eines zweiten Siliziumwafers auf dem Glaswafer reduziert werden, was zu symmetrischen mechanischen Belastungen im Waferstapel führt und die Waferkrümmung ausgleicht (Abb. 1 b).

Überlasttest der Siliziummessplatte am Gegenlager

Die vereinzelten Proben werden in ein Testgehäuse eingebracht und der Druck p wird in Stufen vergrößert. Im Berstfall kann ein Volumenstrom detektiert werden, wenn die Messplatte beschädigt wird (Abb. 2 a). Die hergestellten Proben sind mit einem mittleren statischen Überlastdruck bis 220 bar (22 MPa) belastbar (Abb. 2 b).

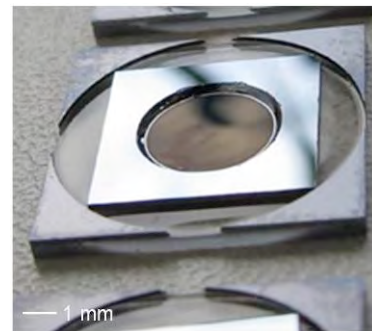
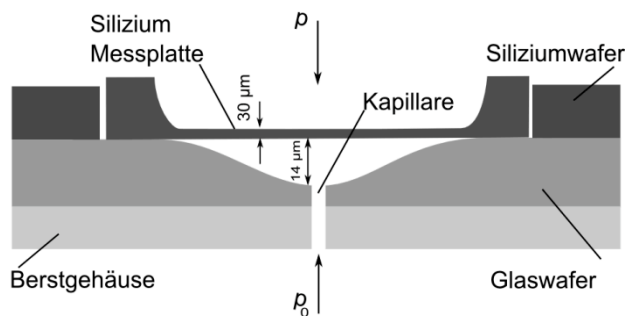


Abb. 2 Aufbau des überlastfesten Messelementes. a) Überlasttest des einseitig überlastgeschützten Silizium-Chips mit einem Gegenlager aus Glas, b) Messelement vor einem Überlasttest mit Gegenlager aus Glas, welches alle Prozessschritte beinhaltet (Anodisches Bonden, Bedampfen, Hoch-Temperatur-Umformung).

Vergleich der simulierten mechanischen Auslenkung mit einer experimentellen DMS-Messung

Um die Funktionsweise des mechanischen Verformungskörpers messtechnisch zu erfassen, ist es möglich diskrete Silizium-Dehnungs-Messstreifen (Si-DMS) auf die Rückseite der überlastfesten Messplatte zu bonden [4]. Diese werden durch einen Cu-Opferschichtprozess definiert positioniert. Das Signal der zu einer Halbbrücke verschalteten Si-DMS wird erfasst, während sich die Messplatte an das asphärische Gegenlager anschmiegt. Das Diagramm zeigt den linearen Nennmessbereich, sowie den Übergang zum nichtlinearen Überlastbereich (Abb. 3 a). Die Auslenkung ξ einer virtuellen Siliziummessplatte kann an einem realen Gegenlager für den Überlastfall simuliert werden (Abb. 3 b).

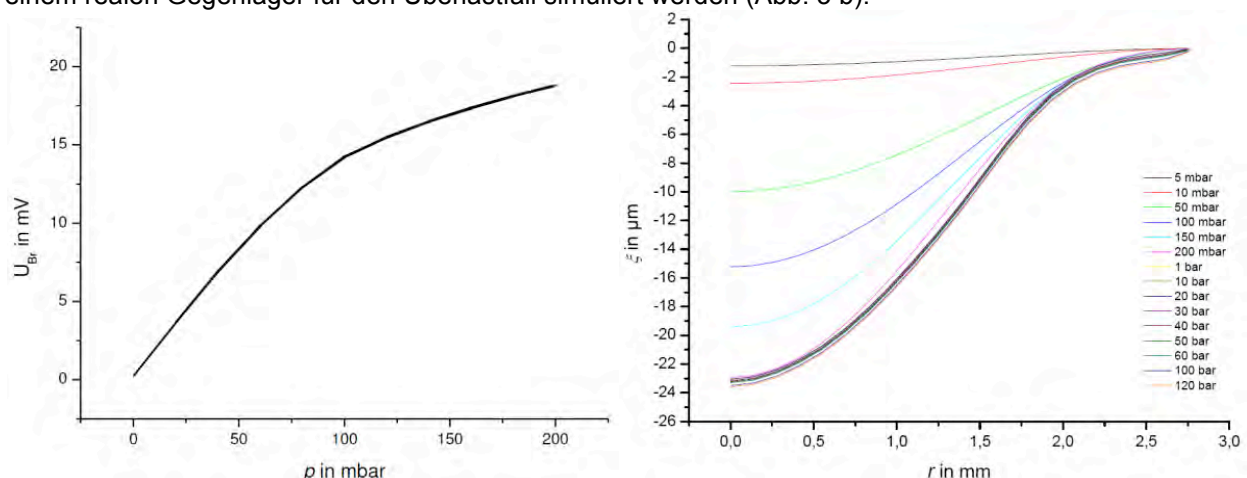


Abb. 3: Auslenkung der Siliziummessplatte. a) Spannungs-Druck Diagramm, basierend auf einer Si-DMS Analyse, b) FEM Simulation der Messplattenauslenkung an einem realen Gegenlager.

Die Simulation zeigt eine freie Plattenbewegung für den Nennmessbereich. Wenn der Überlastdruck steigt, bleibt die Auslenkung der Messplatte auf $24\text{ }\mu\text{m}$ begrenzt, weil das asphärisch strukturierte Gegenlager die mechanische Belastung aufnehmen kann. Durch die begrenzte mechanische Auslenkung der Messplatte, werden die mechanischen Spannungen ebenso begrenzt.

Für den Bersttest werden Kapillaren durch Ultraschallbearbeitung in die Gegenlager eingebracht. Basierend auf dieser Technologie kann eine durchschnittliche Überlastfestigkeit von 220 bar (22 MPa) erreicht werden (Abb. 4 a). Der Einfluss der Druckausgleichskapillare auf die statische Überlastfestigkeit, ist für weitere Designvarianten zu berücksichtigen. Ohne die Unstetigkeit der Gegenlageroberfläche, die durch die Druckausgleichskapillare entsteht, wird die mechanische Spannung der Siliziummessplatte auf 100 MPa begrenzt, was eine zuverlässige Funktion gewährleistet (Abb. 4 b).

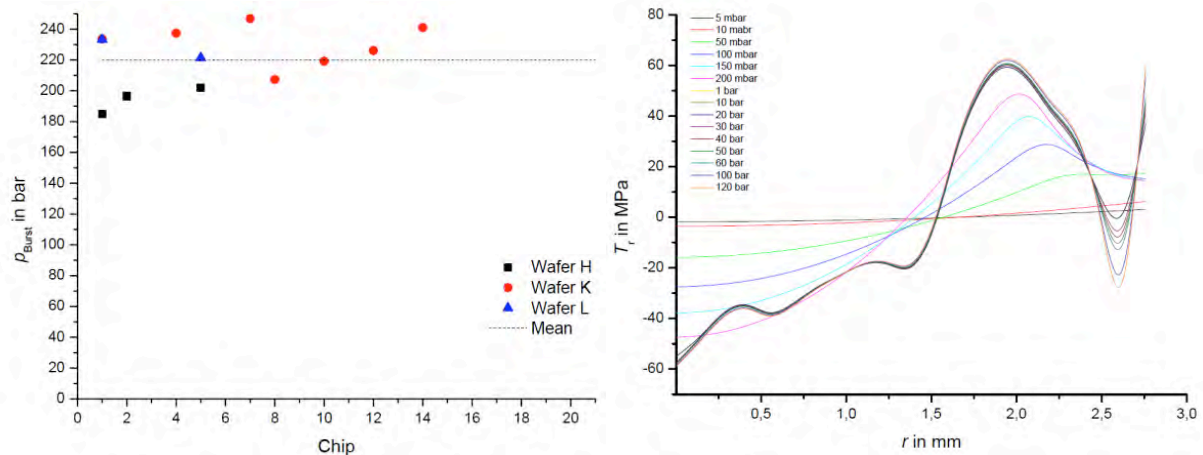


Abb. 4: Überlastfestigkeit des Messelementes. a) Überlasttest mit statischem Druck, der 220 bar (22 MPa) im Einzelfall übersteigt, b) FEM-Simulation der mechanischen Spannung der Siliziummessplatte T_r aufgetragen über der radialsymmetrischen Achse am Gegenlager.

Für eine reproduzierbare Überlastfestigkeit sind die Gegenlagertiefe, der Kapillardurchmesser der Druckausgleichsbohrung sowie eine defektfreie Glasoberfläche entscheidend (Tab. 1). Zusätzlich zum Bohrungsdurchmesser der Kapillare wurde der Randbereich hinzuaddiert, in dem Fehlstellen der Oberfläche auftreten.

Tabelle 1: Reproduzierbarkeit des Kapillardurchmessers durch Ultraschallbohren sowie der Gegenlagertiefe durch thermisches Umformen eines Glaswafers.

	Kapillardurchmesser	Gegenlagertiefe
Mittelwert μ	608 μm	12,29 μm
Standard Abweichung σ	33,97 μm	1,77 μm

Dabei sind die Gegenlagertiefen auf einem Wafer charakteristisch verteilt (Abb. 5 a). Mögliche Ursachen für die Verteilung der Gegenlagertiefen auf einer schiefen Ebene sind eine inhomogene Temperaturverteilung der Heizkammer, sowie eine Schräglage des Wafers in der Heizkammer. Das Oberflächenprofil eines einzelnen Gegenlagers zeigt das asphärische Gegenlager, welches sich als kreisrunde Vertiefung in der Waferoberfläche $h_0 = 0\text{ }\mu\text{m}$ darstellt (Abb. 5 b). Die ultraschallgebohrte Druckausgleichs-Kapillare ist aufgrund eines manuellen Ausrichtschrittes exzentrisch zum tiefsten Punkt $h_1 = 12\text{ }\mu\text{m}$ des Gegenlagers.

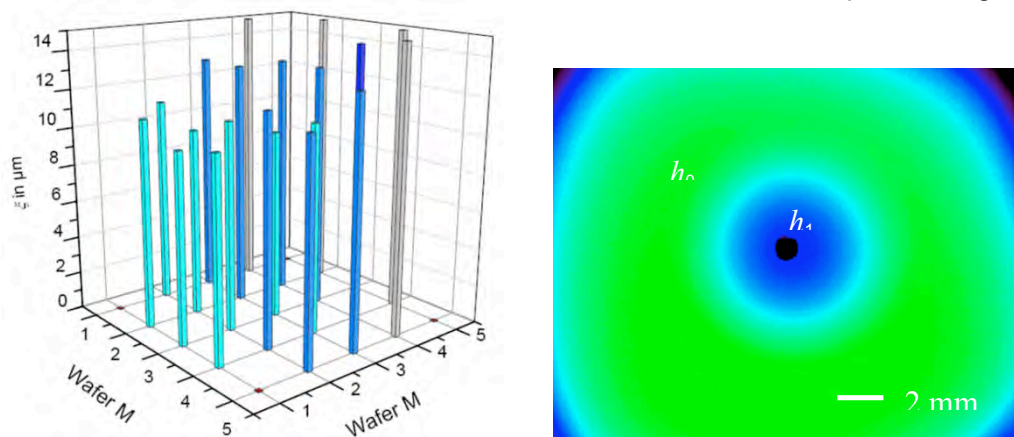


Abb. 5: Messergebnisse zum Gegenlager. a) Verteilung der Gegenlagertiefe eines Wafers, b) Chromatische Interferenzanalyse der Oberfläche eines Gegenlagers ($h_0 = 0\text{ }\mu\text{m}$, $h_1 = 12\text{ }\mu\text{m}$) mit Druckausgleichsbohrung.

Dynamische Druckuntersuchungen

Der Einfluss der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie des Überlastschutzes auf den Amplitudenfrequenzgang von Drucksensoren sind seit langem Gegenstand der Forschung unseres Fachgebietes (Abb. 6 a).

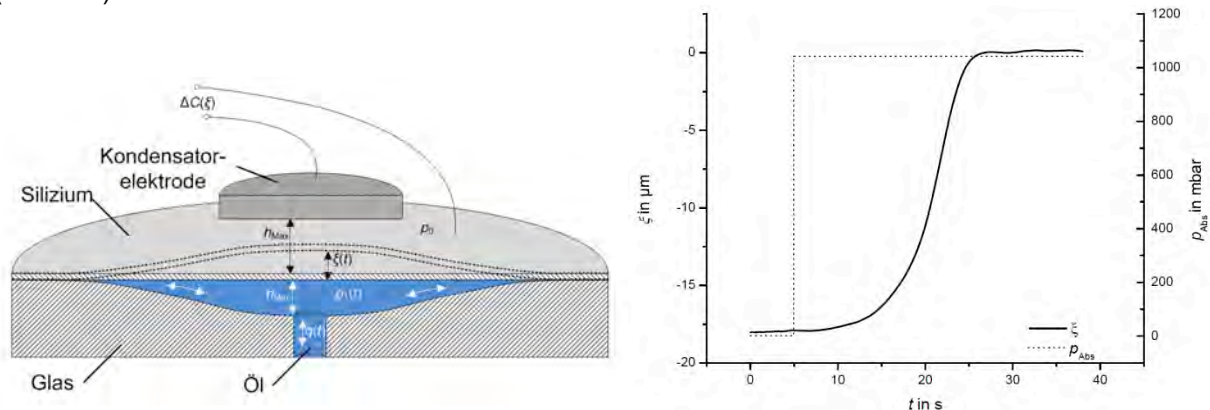


Abb. 6: a) Skizze des Versuchsaufbaus zur dynamischen Druckkalibrierung eines kapazitiven Silizium-Drucksensors, b) Messergebnis der Sprungantwort einer Messplatte mit ölgefülltem Gegenlager.

Die Sprungantwort zeigt im Zeitbereich eine Dämpfung der Geschwindigkeit des Messplattenausschlags für den Fall, dass sich die Messplatte in naher Umgebung zum Gegenlager befindet (Abb. 6 b). Um die Annahme eines linearen Übertragungsverhaltens zu erfüllen, muss für die Analyse des Amplitudenfrequenzgangs der Offsetdruck kontrolliert und auf ein Minimum reduziert werden. Die maximale Arbeitsfrequenz von Siliziummesselementen ohne Gehäuse und Überlastschutzeinrichtung liegt zwischen 10 kHz bis 100 kHz, abhängig davon für welchen Druckmessbereich das Messelement entwickelt wurde [3]. Der überlastfeste Drucksensor mit ölgefülltem Gegenlager reduziert die obere Grenzfrequenz deutlich auf $f_c < 1 \text{ Hz}$ (Abb. 6 a, b)

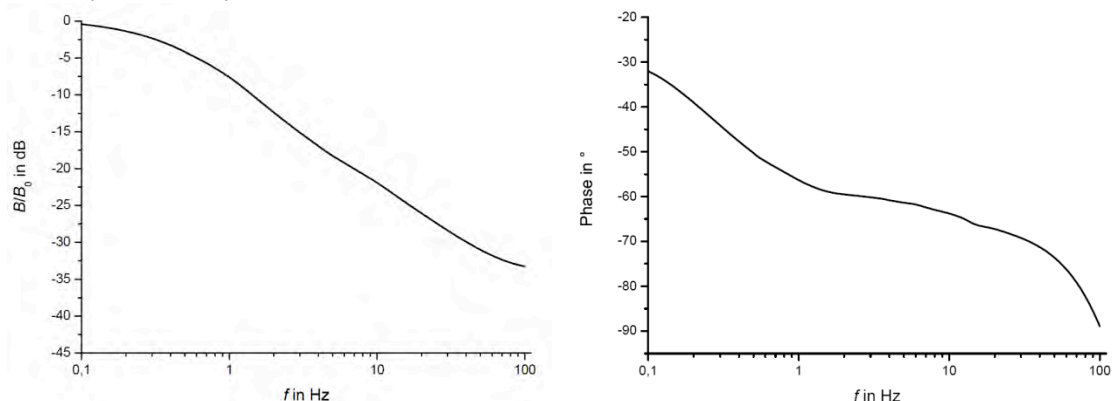


Fig. 7: Messergebnisse der dynamischen Druckuntersuchung des überlastfesten Messelementes. a) Amplitudenfrequenzgang, b) Phasenfrequenzgang des überlastfesten Drucksensors.

Ausblick

Die Entwicklung sowie das Fügen einer Elektrodenstruktur für das Siliziummesselement sind Gegenstand unserer aktuellen Arbeiten. Das Konzept wird erweitert werden, so dass ein symmetrisches Design entsteht, welches einen beidseitigen Überlastschutz für statische und dynamische Druckspitzen sicherstellt.

Literatur

- [1] Kober T, Werthschützky R, Mikromechanischer Überlastschutz für Drucksensoren durch strukturierte Gegenlager aus Glas. In: *Sensoren und Messsysteme 2010*, Berlin: VDE Verlag GmbH, ISBN 978-3-8007-3260-9; 2010.
- [2] Kober T., Werthschützky R, Overload-Resistant Pressure Sensors in the Nominal Range of 10 mbar (1 kPa). In: *Eurosenors XXIV Conference*, September 5-8, Linz, Austria, Proc. Eurosenors XXIV, 2010.
- [3] Kober T, Sindlinger S, Werthschützky R, Analyse des Übertragungsverhaltens von Differenzdrucksensoren durch dynamische Druckkalibrierung. In: *Technisches Messen*, München: Oldenbourg Verlag, ISSN 0171-8096; 2010, p. 83-88.
- [4] Wang, Y., Statisches Übertragungsverhalten eines überlastfesten Siliziumdrucksensors, Studienarbeit, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, Technische Universität Darmstadt, 2010.