

Langzeitstabilität der Innendrucke von Kavernen benachbarter MEMS-Sensoren auf Siliziumbasis

Zur Erlangung des akademischen Grades einer
DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN
(Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Marlene Kopf, geb. Winker

Tag der mündlichen Prüfung: 31.03.2021

Referent: Prof. Dr. Jan G. Korvink

Korreferent: Prof. Dr. Jürgen Wilde

Abstract

MEMS inertial sensors are oscillatory electro-mechanical devices that detect relative motion in an inertial system. Energy losses in these systems, expressed as quality factor Q , have a direct influence on the absolute measurement accuracy and thus on the operation time, where an acceptably accurate response of a sensor can be expected, for example when they are used for navigation during loss of GPS signal. One mechanism that can lead to a reduced quality factor is energy loss of the oscillating system due to gas damping. This influence can be reduced by operating the sensor in an evacuated cavity. Due to the limited space available for the components in many applications, the housing of the inertial sensor is designed to be as space-saving as possible. Due to the ongoing miniaturization of MEMS components including the cavity volumes of inertial sensors, the influence of slight changes in the damping atmosphere in a sensor's cavity on the reliability will increase in the future.

The experiments in this thesis show that the sensors contain hydrogen, which is trapped in the cavities due to desorption occurring during the manufacturing process, despite a vacuum wafer bonding process.

Measurements based on stress tests for accelerated aging of the sensors in this work also indicate that hydrogen molecules manage to diffuse out of the sensor cavities in spite of efforts to hermetically seal the cavities, which changes the quality factor of the system and influences the lifetime of a sensor.

In this work the sources of the detected hydrogen in the sensor structure as well as diffusion paths between the inside and the outside of the sensor cavities are identified. For each of the mechanisms under consideration, measures are presented that can effectively prevent undesired changes in the damping atmo-

sphere. These include baking processes before the sealing of sensor cavities, interruption of diffusion paths by layout adjustments, and an approach for the use of materials with an absorbing effect in the cavities, thermally activated by means of laser radiation.

Kurzfassung

MEMS-Inertialsensoren sind oszillatorische elektromechanische Bauelemente, die Relativbewegungen in einem Inertialsystem erfassen. Energieverluste in diesen Systemen, ausgedrückt als Gütefaktor Q , haben direkten Einfluss auf die absolute Messgenauigkeit der Sensoren, beispielsweise wenn sie für Navigation bei Ausfall des GPS-Signals eingesetzt werden. Ein Mechanismus, der den Gütefaktor reduzieren kann, ist Energieverlust des oszillierenden Systems durch Gasdämpfung. Indem der Sensor in einer evakuierten Kaverne betrieben wird, kann dieser Einfluss reduziert werden. Aufgrund der knappen Platzverhältnisse, die bei vielen Anwendungen für die einzelnen Bauelemente zur Verfügung stehen, wird das Gehäuse des Inertialsensors möglichst platzsparend ausgeführt. Aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung vieler Bauelemente und somit auch der Kavernenvolumina von Inertialsensoren wird zukünftig der Einfluss geringfügiger Veränderungen der Dämpfungsatmosphäre in Sensorkavernen auf die Zuverlässigkeit der Sensoren immer größer.

Die Versuche in dieser Arbeit zeigen, dass die Sensorkavernen trotz Vakuumwaferbondens Wasserstoff enthalten, der durch Desorbate, die im Verlauf der Sensorherstellung auftreten, nach abgeschlossener Prozessierung in den Kavernen eingeschlossen ist.

Messungen anhand von Belastungstests zur beschleunigten Alterung von Sensorelementen in dieser Arbeit deuten zudem darauf hin, dass es Wasserstoffmolekülen trotz Bemühungen um eine hermetische Abdichtung der Sensorkavernen gelingt, aus den Sensorkavernen hinaus zu diffundieren, was den Qualitätsfaktor des Systems verändert und die Lebensdauer des Sensors beeinflusst.

In dieser Arbeit werden sowohl die Quellen des auffindbaren Wasserstoffs im Sensoraufbau, als auch Diffusionspfade zwischen Innen- und Außenseite der Sensorkavernen identifiziert. Für jeden der betrachteten Mechanismen, die den Gütefaktor beeinträchtigen können, werden Maßnahmen vorgestellt, mit denen sich unerwünschte Veränderungen der Dämpfungsatmosphäre wirksam und langfristig vermeiden lassen. Dazu gehören Ausheizprozesse vor Verschluss der Kavernen, Unterbrechen der Diffusionspfade durch Layoutanpassungen, sowie ein Ansatz für die Verwendung von Materialien mit absorbierender Wirkung in den Kavernen, deren thermische Aktivierung mittels Laserstrahlung erfolgt.

Danksagung

Ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr. Jan G. Korvink, für seine wertvolle Unterstützung und die immer ausgesprochen konstruktive Beratung.

Ebenso danke ich meinem Zweitgutachter, Prof. Dr. Jürgen Wilde, sehr für das Interesse an meinem Promotionsthema und seine bestärkenden Ratschläge.

Außerdem danke ich Prof. Dr. Andreas Guber für die zeitweilige Betreuung meiner Arbeit.

Bei der Robert Bosch GmbH in Reutlingen danke ich meinen Betreuern Dr. Achim Breitling und Dr. Jens Frey für ihre unentbehrlichen fachlichen Anregungen, ebenso meinen Kolleginnen und Kollegen, die mit Denkanstößen, Hilfe bei Versuchen und einer angenehmen Arbeitsatmosphäre zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Mentorin Dr. Norma Torres Suárez danke ich für ihr immer offenes Ohr und ihre ermunternden Hinweise.

Meinen Bronnbacher Mitstipendiaten des 15. Jahrgangs danke ich für inspirierende Wochenenden, die für mich unbezahlbarer Ausgleich waren.

Der größte Dank gilt meiner ganzen Familie, besonders meinem Mann, und meinen Freunden, auf die ich mich bei Höhen und Tiefen jederzeit bedingungslos verlassen konnte.

Paris, im März 2021

Marlene Kopf

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abstract | i |
| Kurzfassung | iii |
| Danksagung | v |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Aufgabenstellung | 2 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 3 |
| 2 Grundlagen | 5 |
| 2.1 MEMS-Sensoren | 5 |
| 2.2 Kapazitive Inertialsensoren | 5 |
| 2.2.1 Beschleunigungssensoren | 6 |
| 2.2.2 Drehratensensoren | 7 |
| 2.2.3 Kombi-MEMS | 8 |
| 2.3 Waferprozessierung für Inertialsensoren | 10 |
| 2.3.1 Herstellung von SiO ₂ -Schichten | 13 |
| 2.3.2 BOE-Ätzen | 16 |
| 2.3.3 Silizium-Epitaxie | 16 |
| 2.3.4 Deep Reactive Ion Etching | 17 |
| 2.3.5 Aluminiumabscheidung | 18 |
| 2.3.6 Strukturierung mittels Fotolithografie | 19 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.7 | Reinigung nach Aluminiumätzen | 19 |
| 2.3.8 | Gasphasenätzen | 20 |
| 2.3.9 | Germaniumabscheidung | 20 |
| 2.3.10 | Waferbonden | 21 |
| 2.3.11 | Prozessierung des Waferstacks | 23 |
| 2.4 | Dämpfung kapazitiver Inertialsensoren | 25 |
| 2.4.1 | Gütefaktor von Resonatoren | 25 |
| 2.4.2 | Druckabhängigkeit der Dämpfung | 27 |
| 2.4.3 | Gasabhängigkeit der Dämpfung | 30 |
| 2.5 | Mechanismen der Druckänderung in Sensorkavernen | 31 |
| 2.5.1 | Adsorption | 31 |
| 2.5.2 | Desorption | 32 |
| 2.5.3 | Chemische Reaktionen | 33 |
| 2.5.4 | Diffusion | 33 |
| 3 | Methoden | 39 |
| 3.1 | Testsystem | 39 |
| 3.1.1 | Zielsystem: Kombi-MEMS | 40 |
| 3.1.2 | Modellsystem: einzelner Drehratensensor | 42 |
| 3.2 | Einstellung des Innendruckes in Sensorkavernen | 43 |
| 3.2.1 | Konventionelles Waferbonden | 43 |
| 3.2.2 | Gestaffeltes Bonden | 44 |
| 3.2.3 | Laser-Reseal | 46 |
| 3.2.4 | Getter | 47 |
| 3.3 | Bestimmung des realen Kaverneninnendruckes | 48 |
| 3.3.1 | Drehratensensor als Messsystem: Kalibrierung | 49 |
| 3.3.2 | Gütesimulation | 50 |
| 3.4 | Beschleunigte Alterung durch Hochtemperaturlagerung | 50 |
| 3.5 | Untersuchung von Desorptionseffekten | 52 |
| 3.5.1 | Bestimmung des Kaverneninhalts: Restgasanalysen | 52 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.5.2 | Testchips mit zusätzlichem Material | 53 |
| 3.5.3 | Nukleare Reaktionsanalyse (NRA) | 54 |
| 3.5.4 | Thermodesorption-Massenspektrometrie (TD-MS) | 56 |
| 3.5.5 | Variation der Bonddauer | 57 |
| 3.5.6 | Ausheizen vor Verschluss | 58 |
| 3.6 | Untersuchung von Diffusionseffekten | 61 |
| 3.6.1 | Angesägte Wafer | 62 |
| 3.6.2 | Testchips mit unterbrochenen Schichten | 64 |
| 3.6.3 | Verschiedene Oxiddicken | 65 |
| 3.6.4 | Modifizierte SiO ₂ /Si-Grenzflächen | 66 |
| 3.6.5 | Verschiedene Bondrahmenbreiten | 66 |
| 3.6.6 | FE-Modell und Simulation von Diffusion durch Kaver- nenwände | 67 |
| 4 | Ergebnisse und Diskussion | 71 |
| 4.1 | Ausgangspunkt | 71 |
| 4.2 | Untersuchungsstrategie | 71 |
| 4.3 | Güte-Druck-Messungen | 72 |
| 4.4 | Bestimmung des Kaverneninhalts | 76 |
| 4.5 | Ursprung des Wasserstoffs | 78 |
| 4.6 | Desorption | 81 |
| 4.6.1 | Aluminium | 82 |
| 4.6.2 | Desorption durch Prozesseinflüsse | 87 |
| 4.6.3 | Germanium | 101 |
| 4.6.4 | Trenchpolymere | 105 |
| 4.6.5 | Siliziumdioxid | 106 |
| 4.6.6 | Silizium | 112 |
| 4.6.7 | Angesägte Wafer bei höheren Temperaturen | 113 |
| 4.6.8 | Maßnahme für bessere Druckstabilität: Vorwegnahme von Desorption | 117 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.7 | Diffusion | 121 |
| 4.7.1 | Chipaußenflächen als Diffusionspfade | 122 |
| 4.7.2 | Silizium | 128 |
| 4.7.3 | Siliziumdioxid | 130 |
| 4.7.4 | Aluminium-Germanium-Eutektikum | 135 |
| 4.7.5 | Berechnung von Diffusionskoeffizienten | 137 |
| 4.7.6 | Simulation des Diffusionsverhaltens | 140 |
| 4.7.7 | Verifizierung der Wasserstoffthese | 142 |
| 4.7.8 | Maßnahme für bessere Druckstabilität: Diffusionsbarriere | 146 |
| 4.8 | Laseraktivierter Getter | 150 |
| 4.8.1 | Maßnahme für bessere Druckstabilität: Absorbierendes Material | 151 |
| 5 | Zusammenfassung und Fazit | 161 |
| 5.1 | Zusammenfassung | 161 |
| 5.1.1 | Desorption | 162 |
| 5.1.2 | Diffusion | 163 |
| 5.2 | Fazit | 164 |
| 6 | Ausblick | 167 |
| A | Anhang | 169 |
| | Veröffentlichungen | 177 |
| | Literaturverzeichnis | 178 |

1 Einleitung

1.1 Motivation

MEMS-Sensoren auf Siliziumbasis sind häufig unscheinbare, aber unverzichtbare Helfer des täglichen Lebens. Ihre vielfältigen Anwendungsbereiche reichen von Fahrzeugsicherheit über Navigation, Gesundheitstracking, Bildstabilisierung und weitere Funktionen bei Smartphones, Wearables, Digitalkameras, Spielkonsolen und VR-Brillen bis hin zu Zukunftstechnologien wie automatisiertes Fahren oder das Internet der Dinge. Alleine die MEMS-Sensoren der Fa. Bosch, die die Versuchschips für diese Arbeit dankenswerterweise zur Verfügung gestellt hat, sind in jedem zweiten Smartphone weltweit verbaut [1]. Seit einigen Jahren zeichnet sich ein weltweiter Trend zur Miniaturisierung der MEMS-Chips ab. Dieser Trend bringt neue Herausforderungen bei der Entwicklung von Inertialsensoren mit sich. Er führt unter anderem zur Entwicklung von platzsparenden Kombi-MEMS-Chips, die zwei oder mehr verschiedenartige Sensoren auf sich vereinen. In dieser Arbeit wird die Kombination von Drehraten- und Beschleunigungssensoren in benachbarten Kavernen auf ein und demselben Chip betrachtet, deren Herstellungsprozesse grundsätzlich gut miteinander vereinbar sind. Ein entscheidender Unterschied zwischen den beiden Sensorarten ist jedoch das Dämpfungsgas, das in den jeweiligen Kavernen eingeschlossen sein muss, um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten. Während bei den gedämpften Beschleunigungssensoren ein Kavernendruck von bis zu mehreren Hundert Millibar notwendig ist, werden die resonanten Drehratensensoren vor dem Verschluss evakuiert und weisen nach abgeschlossener Prozessierung einen Druck im Bereich von wenigen Millibar auf, der durch Desorbate aus dem Bondprozess verursacht wird. Die im Zuge der Miniaturisierung zunehmend kleineren

Kavernenvolumina führen dazu, dass kleinste Änderungen der eingeschlossenen Gasmenge durch die veränderte Dämpfungsatmosphäre insbesondere bei den empfindlichen Drehratensensoren zu Messfehlern führen können. Eine Herausforderung bei der Miniaturisierung der Sensoren besteht darin, eine langfristig stabile Gasatmosphäre in den Sensorkavernen zu gewährleisten, um auch Jahre nach der Kalibrierung noch verlässliche Messergebnisse zu erhalten.

In dieser Arbeit steht neben der Stabilität des Kavernendrucks die Herkunft unabsichtlich eingeschlossener Gase in Drehratensensorkavernen im Fokus. Diese können Hinweise auf mögliche Gasquellen mit Einfluss auf die Lebensdauer eines Sensors darstellen und sind daher Gegenstand zahlreicher Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit.

1.2 Aufgabenstellung

Nach abgeschlossener Prozessierung von Drehratensensorwafern gibt es Hinweise darauf, dass das Messverhalten der Sensoren durch gasförmige Substanzen unbekanntem Ursprungs in den Sensorkavernen beeinflusst wird, obwohl die Kavernen in einem Vakuum-Waferbondprozess verschlossen wurden. Auch wie sich der Einfluss der eingeschlossenen Gase langfristig entwickelt, sollte untersucht werden.

Um die Ursachen und Auswirkungen dieser druckverändernden Vorgänge kalkulierbar zu machen, ist das Ziel dieser Arbeit die Bestimmung und Quantifizierung von Einflussfaktoren auf den Kavernendruck sowie auf die Druckstabilität von MEMS-Inertialsensoren.

Hierfür muss zunächst ein geeignetes System zur Druckmessung in Sensorkavernen kalibriert werden, das empfindlich genug ist, um selbst geringe Druckänderungen von deutlich unter 1 mbar zu erfassen, möglichst ohne den Chip zu zerstören.

Um einzuschätzen, auf welche Weise Druckänderungen hervorgerufen werden, müssen der Ursprung der Gase, die sich nach abgeschlossener Prozessierung in den Kavernen nachweisen lassen, gefunden und ihre langfristigen Auswirkungen

auf den Kavernendruck beurteilt werden. Darüber hinaus werden Maßnahmen zur Vermeidung der unerwünschten Einflüsse auf den Kavernendruck entwickelt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in drei übergeordnete Abschnitte gegliedert. In Kapitel 2 werden zunächst Grundlagen zu den verwendeten Inertialsensoren und ihrer Herstellung beschrieben. Neben der Funktionsweise der verwendeten Drehraten- und Beschleunigungssensoren sind alle Herstellungsschritte, die für die Untersuchungen in dieser Arbeit relevant sind, einzeln sowie im Zusammenhang des Prozessflusses eines Wafers dargestellt. Anschließend gibt das Kapitel einen Überblick über Mechanismen der Dämpfung von resonanten Drehratensensoren und Mechanismen der Druckänderung in Sensorkavernen, um das Verständnis der folgenden Untersuchungen zu erleichtern, die Schicht für Schicht des Sensoraufbaus in den Fokus nehmen.

Das folgende Kapitel 3 beschreibt die Methoden, die in den Versuchen dieser Arbeit angewandt wurden. Einige Methoden wurden eigens für diese Arbeit entwickelt, andere sind gängige Mess- und Analyseverfahren. Das Kapitel gibt zunächst einen Überblick über das verwendete Testsystem, Möglichkeiten der Druckeinstellung in Sensorkavernen und die Vorgehensweise zur Bestimmung des realen Kavernendrucks nach abgeschlossener Waferprozessierung. Die Methoden werden genutzt, um Einflüsse der Materialien im Sensoraufbau auf den Kavernenaufbau zu identifizieren.

In Kapitel 4 werden jeweils nach einer kurzen Versuchsbeschreibung die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der verschiedenen Versuche diskutiert. Zunächst werden die notwendigen Kalibrierungsmessungen zur Bewertung der nachfolgenden Versuche mit Gütemessungen an Drehratensensoren vorgestellt. Anschließend folgen die Versuchsergebnisse zur Zusammensetzung des Kaverneninhalts und zu Desorptionsvorgängen in Sensorkavernen. Sie sind entsprechend der systematischen Suche nach Gasquellen aufgeschlüsselt nach untersuchten Schichtmaterialien. Schließlich wird demonstriert, inwiefern ein Ausheizprozess

als wirksame Maßnahme zur Verminderung der Desorptionseinflüsse auf den Kavernendruck dient.

Der folgende Abschnitt widmet sich den Versuchen zu Diffusionsvorgängen. Indem erneut Schicht für Schicht des Sensoraufbaus betrachtet wird, sind die Ergebnisse aufgeschlüsselt nach möglichen Diffusionspfaden. Die Versuchsergebnisse führen zu der Hypothese, dass Druckschwankungen im Sensor durch die Diffusion von Wasserstoff durch Siliziumoxidschichten verursacht werden. Nachdem die Hypothese durch einen Versuch verifiziert ist, steht am Ende des Abschnitts eine Maßnahme, mit deren Hilfe die Auswirkungen von Diffusionsvorgängen auf den Kavernendruck langfristig wirksam eingeschränkt werden können. Dafür werden in den Siliziumoxidschichten Diffusionssperren ins Chipdesign integriert.

Abschließend werden Versuchsergebnisse zu einem laseraktivierten Getter vorgestellt, der als weitere Maßnahme für eine bessere Druckstabilität in die Sensorkavernen integrierbar ist. Den Abschluss der Arbeit bilden eine Zusammenfassung in Kapitel 5 und der Ausblick auf weiterführende Fragestellungen in Kapitel 6.

2 Grundlagen

2.1 MEMS-Sensoren

MEMS-Sensoren (MEMS = micro-electro-mechanical system) sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. In Smartphones, Navigationssystemen, Wearables, Spielkonsolen und vielen anderen Consumerprodukten sind sie unverzichtbar, genauso wie in Autos, wo pro Fahrzeug heute über 50 verschiedene MEMS-Sensoren verbaut werden [2, 3]. Die Palette der MEMS-Sensoren reicht von Drucksensoren, Massenflussensoren, Mikrofonen und Magnetfeldsensoren über Feuchtigkeitssensoren und Gassensoren bis zu Inertialsensoren wie Drehraten- und Beschleunigungssensoren. Charakteristisch für MEMS-Bauteile ist die Integration von elektrischen, mechanischen und weiteren Funktionen auf engstem Raum, wobei die Abmessungen der Komponenten meist im Mikrometerbereich liegen [4]. Inertialsensoren, aber auch viele andere Sensorarten, unterliegen einem weltweiten Trend der Miniaturisierung [5, 6]. Um die Herausforderungen dieser Entwicklung besser verständlich zu machen, werden im Folgenden einige Grundlagen und Funktionsprinzipien der Sensorarten, die in dieser Arbeit untersucht werden, erläutert. Darauf aufbauend sind die Sensoren, die für Versuche bei der Fa. Bosch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, im Abschnitt 3.1 näher beschrieben. Einen Größenvergleich zur Veranschaulichung der Abmessungen von Beschleunigungssensorstrukturen zeigt Abb. 2.1.

2.2 Kapazitive Inertialsensoren

Als Inertialsensoren werden Sensoren bezeichnet, deren Messprinzip auf Massenträgheitseffekten beruht. Unter diesem Überbegriff werden Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren zusammengefasst [8]. Beide Sensortypen

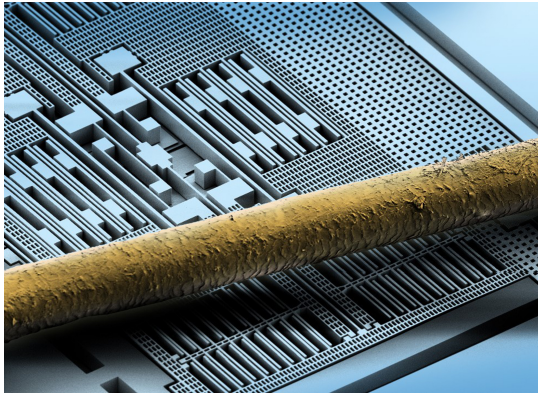


Abb. 2.1: REM-Bild der Siliziumstrukturen eines Bosch-Beschleunigungssensors und menschliches Haar zum Größenvergleich. Die Siliziumbalken sind ca. $2\ \mu\text{m}$ breit und $20\ \mu\text{m}$ hoch. Bildquelle: Robert Bosch GmbH [7].

sind auf Basis verschiedener Messverfahren realisierbar [9]. In dieser Arbeit werden kapazitive Inertialsensoren auf Siliziumbasis untersucht.

2.2.1 Beschleunigungssensoren

Ein Beschleunigungssensor soll sowohl positive, als auch negative Beschleunigungen messen und findet an den verschiedensten Einsatzorten Verwendung, von Airbagsystemen, wo er die Verzögerung eines Fahrzeugs zur Detektion eines Unfalls misst [8], über die Steuerung von Herzschrittmachern bis zu Laptops, um bei Stürzen den Festplattenlesekopf zu sichern [10].

Das elektrische Grundelement eines kapazitiven Beschleunigungssensors ist ein Kondensator mit zwei Elektroden und einer beweglichen Mittelmasse, die über Federn mit dem feststehenden Rahmen des Sensors verbunden ist. Erfährt die bewegliche Masse eine Beschleunigung, wird sie aufgrund ihrer Trägheit in Bewegung versetzt. Somit verändert sich der Abstand zwischen den beiden Elektroden des Kondensators und über die Messung der Kapazitätsänderung kann die Beschleunigung bestimmt werden [12]. Über die Federsteifigkeit und die Masse wird die Beschleunigungsempfindlichkeit definiert. Das Funktions-

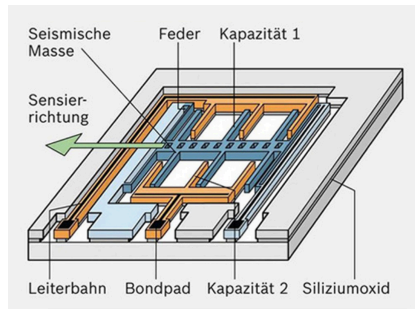


Abb. 2.2: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Beschleunigungssensors. Bildquelle: Robert Bosch GmbH [11].

prinzip eines Beschleunigungssensors zeigt Abb. 2.2.

Da ein einzelner Kondensator in MEMS-Größe nur eine Plattenfläche im μm^2 -Bereich aufweist und die Kapazitätsänderungen winzig sind, ist ein MEMS-Beschleunigungssensor aus mehreren Dutzend Kondensatoren zusammengesetzt. Mithilfe der entstandenen Kammstruktur ist das Signal stärker und besser messbar [13]. Das Feder-Masse-System des Beschleunigungssensors soll gedämpft sein, damit der Sensor unempfindlich gegenüber Vibrationen ist, die am Einbauort auftreten können. Für die Dämpfung ist beim Beschleunigungssensor ein Dämpfungsgas mit einem bestimmten Druck in die Sensorkaverne eingeschlossen, das die mikromechanischen Strukturen umgibt. Häufig werden dafür Edelgase oder Stickstoff verwendet. Der Innendruck eines MEMS-Beschleunigungssensors mit hoher Dämpfung kann zwischen 50 und 700 mbar liegen.

2.2.2 Drehratensensoren

Auch Drehratensensoren haben vielfältige Einsatzfelder, unter anderem im Automobilbereich in ESP-Systemen und in Smartphones oder Spielkonsolen, wo Drehbewegungen erfasst werden müssen [14, 15]. Wie der Beschleunigungssensor nutzt auch ein kapazitiver MEMS-Drehratensensor die Trägheit einer mikromechanisch hergestellten seismischen Masse, die beweglich an Federn

aufgehängt ist. Während der Beschleunigungssensor die Beschleunigung direkt misst, beruht das Messprinzip des Drehratensensors auf einer Auslenkung der Masse aufgrund der Corioliskraft [16]. Auch in diesem Fall wird eine Kapazitätsänderung detektiert, die in eine Winkelgeschwindigkeit umgerechnet werden kann. Die Corioliskraft ist eine Scheinkraft, die nur auf Objekte in Bewegung wirkt. Ein bekannter Fall, bei dem sich die Wirkung einer Corioliskraft zeigt, sind Wirbelstürme. Durch die Erdrotation wirkt eine Corioliskraft auf Luftmassen eines Sturms und verursacht den Wirbel [17].

Um die Corioliskraft messen zu können, muss die Masse des Drehratensensors oszillieren und aus diesem Grund kontinuierlich angetrieben werden. Im Fall der Versuchschips erfolgt dies mithilfe eines elektrostatischen Kammantriebs (Schema s. Abb. A.1 im Anhang). Das Funktionsprinzip des Sensors zeigt Abb. 2.3. Damit beim Antrieb des Sensors möglichst wenig Energie verloren geht, wird die Sensorkaverne evakuiert und der Drehratensensor, anders als der Beschleunigungssensor, nur mit einer sehr geringen Dämpfung versehen. Der Innendruck eines konventionellen MEMS-Drehratensensors beträgt typischerweise wenige Millibar. Die differenzielle Ausführung des Sensors mit zwei gegengleich schwingenden Detektionsmassen dient dazu, Messfehler durch Quereinflüsse zu unterdrücken. Neben der dargestellten rechteckigen Variante existieren auch andere Ausführungsformen von resonanten MEMS-Drehratensensoren [18].

2.2.3 Kombi-MEMS

Eine Kombination verschiedener Sensortypen auf einem Chip wird in dieser Arbeit als Kombi-MEMS bezeichnet. Prinzipiell sind in einem Kombi-MEMS-Chip beliebige Sensorkombinationen denkbar, sofern die Herstellungsprozesse der einzelnen Typen miteinander vereinbar sind. Die Integration von verschiedenen Sensortypen auf einem Chip folgt dem eingangs beschriebenen Trend zu Miniaturisierung und erlaubt zudem eine kostengünstigere Herstellung der Sensoren, wenn große Stückzahlen einer Sensorkombination erforderlich sind, etwa für Smartphones oder andere Anwendungen aus dem Consumer-Bereich.

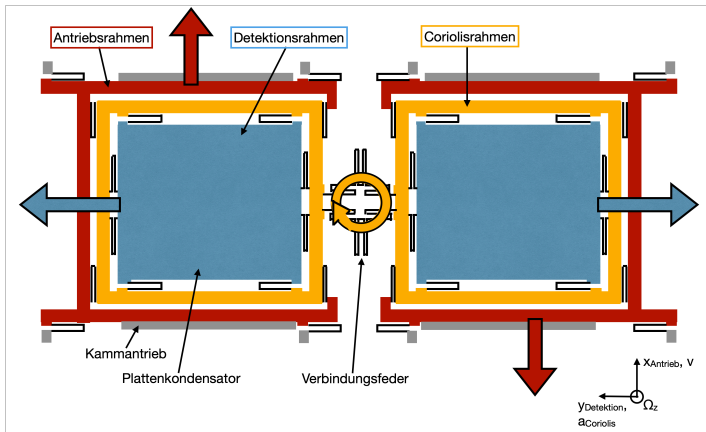


Abb. 2.3: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Drehratensensors mit Antriebsrahmen (rot), Coriolisrahmen (gelb) und Detektionsmasse (blau); Abbildung nach [8].

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Kombination aus Drehraten- und Beschleunigungssensor, die für zahlreiche Anwendungen der Konsumgüterelektronik von Bedeutung ist. Abb. 2.4 zeigt ein Schema des verwendeten Chips, auf dem zwei Sensortypen vereint sind. Insbesondere ein Merkmal der Kombination von Beschleunigungs- und Drehratensensor auf ein und demselben Chip steht im Fokus der Versuche: die unterschiedlichen Innendrucke, die in den benachbarten Kavernen notwendig sind. Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, besteht zwischen den benachbarten Kavernen ein Druckunterschied von bis zu mehreren Hundert Millibar aufgrund der unterschiedlichen Dämpfungskonzepte. Um die unterschiedlichen Druckeinschlüsse in benachbarten Sensorkavernen auf ein und demselben Chip zu realisieren, gibt es mehrere Ansätze, die in den Abschnitten 2.3.10 und 3.2.3 beschrieben werden.

Ein wichtiger Aspekt aus Produktsicht ist nicht nur die Realisierung der verschiedenen Drücke, sondern auch die Stabilität der eingestellten Drücke über die gesamte Lebenszeit des Kombi-MEMS-Chips. Durch den Druckunterschied sind Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Kavernen denkbar, die

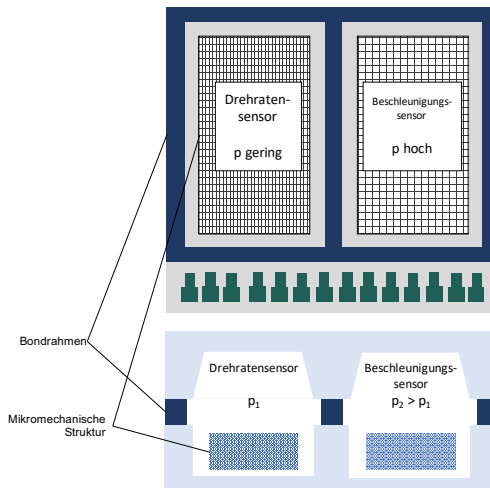


Abb. 2.4: Schematische Darstellung eines Kombi-MEMS-Chips in Draufsicht (oben) und als Querschnitt (unten).

bei herkömmlichen Chips keine Rolle spielen. Neben weiteren Effekten, die Einfluss auf die Innendruckstabilität haben, liegt ein Augenmerk der Arbeit auf diesen Wechselwirkungen.

2.3 Waferprozessierung für Inertialsensoren

Die kapazitiven MEMS-Inertialsensoren für die Versuche in dieser Arbeit werden mit Verfahren der Silizium-Oberflächenmikromechanik hergestellt. Die Grundlage für diese Technologie ist ein Siliziumeinkristall, der zu Anfang des Prozesses in Form eines Siliziumwafers von ca. 1 mm Dicke und mit einem Durchmesser von 200 mm vorliegt. Silizium hat neben seinen elektronischen Eigenschaften auch hervorragende mechanische Eigenschaften. Mit einem E-Modul, der nahezu an den von Edelstahl heranreicht, im Vergleich zu Stahl aber einer geringen Dichte und hohen Zugfestigkeit und durch die schier unbegrenzte Verfügbarkeit des Rohmaterials Quarzsand ist Silizium bestens

als Konstruktionswerkstoff für mikrotechnische Feder-Masse-Systeme geeignet [19].

Bei der Oberflächenmikromechanik werden die Komponenten schichtweise aufgebaut und durchlaufen zahlreiche schichtabscheidungs- und fotolithographische Prozesse [20]. Mithilfe verschiedener technologischer Grundprozesse können elektrische Schaltkreise oder dreidimensionale Mikrostrukturen auf dem Siliziumwafer erzeugt werden. Zu den wichtigsten Grundprozessen gehören Schichtabscheidung (chemische Abscheidung, Epitaxie und Aufdampfen oder Sputtern), Schichtmodifikation (Oxidieren und Dotieren), Schichtstrukturierung (Lithographie) und Schichtabtragung (Ätzen) [19]. Je nach Komplexität des Bauteils kann der Gesamtprozess aus mehreren Hundert einzelnen Prozessschritten bestehen. Die Grundprozesse können sich dabei wiederholen, meist mit verschiedenen Parametern [19].

Der Gesamtprozess zur Herstellung von Inertialsensoren bei der Robert Bosch GmbH in Reutlingen, die die Versuchssensoren für diese Arbeit zur Verfügung gestellt hat, umfasst mehrere Hundert Einzelschritte. Die Basis dafür ist der in [21] beschriebene Prozessablauf, schematisch dargestellt in den Abbildungen 2.6, 2.7 und 2.8. Das Ergebnis ist ein Schichtstapel wie im Ausschnitt eines Schliffs in Abb. 2.5 für einen Testchip gezeigt.

Für das Grundelement eines mikromechanischen Inertialsensors werden zwei Siliziumschichten benötigt, die durch eine Opferoxidschicht voneinander getrennt sind. Eine dünne Siliziumschicht bildet Leiterbahnen, während aus einer später abgeschiedenen dickeren Siliziumschicht die mikromechanischen Elemente herausgearbeitet werden, etwa die an Federn aufgehängte Masse des Sensors. Das Opferoxid zwischen den Siliziumschichten wird mithilfe von Flusssäure wieder entfernt. Auf diese Weise wird die mikromechanische Struktur freigestellt und ist anschließend beweglich [21].

Anschließend wird eine Aluminiumstruktur appliziert, die beim fertigen Sensor zur elektrischen Kontaktierung dient und zudem den sensorseitigen Teil der Bondrahmen bildet, die den Sensorkern umgeben (s. Abb. 2.6).

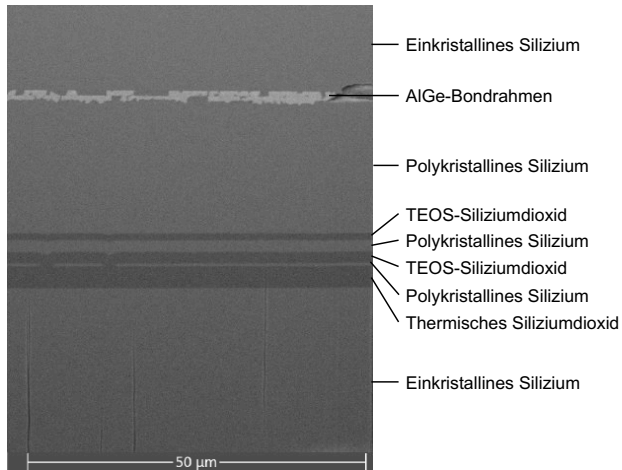


Abb. 2.5: Schliff des Schichtstapels eines Testchips

Parallel zur Prozessierung des Sensorwafers wird ein Kappenwafer hergestellt, der neben einer Oxidstruktur, die das Innenleben des Sensors beim Waferbonden vor verfließendem Eutektikum schützt, mit Bondrahmen aus Germanium ausgestattet wird. Diese bilden das Gegenstück zu den Aluminiumbondrahmen auf dem Sensorwafer (s. Abb. 2.7).

Anschließend werden Sensor- und Kappenwafer in einem eutektischen Waferbondprozess an den Bondrahmen zusammengefügt. Der Waferstapel wird noch einigen weiteren Schritten unterzogen, darunter das stellenweise Öffnen der Siliziumoberfläche jedes Chips, um die Aluminium-Kontaktflächen für die spätere Montage zugänglich zu machen, und ist schließlich bereit für das Vereinzeln der Chips (s. Abb. 2.8).

Für die Versuche in dieser Arbeit wurden teilweise Prozessschritte variiert oder ausgelassen. Einige Prozessschritte haben sich für die Versuchsergebnisse als bedeutsam erwiesen und werden im Folgenden kurz erläutert, um das Verständnis der Ergebnisse im weiteren Verlauf zu erleichtern.



Abb. 2.6: Schematische Übersicht über den Prozessverlauf eines Sensorwafers, dargestellt für den Querschnitt eines Einzelchips.

2.3.1 Herstellung von SiO₂-Schichten

Bei der Herstellung von MEMS-Sensoren werden Siliziumoxidschichten vorrangig als Opferschichten zur Realisierung freigestellter Siliziumstrukturen

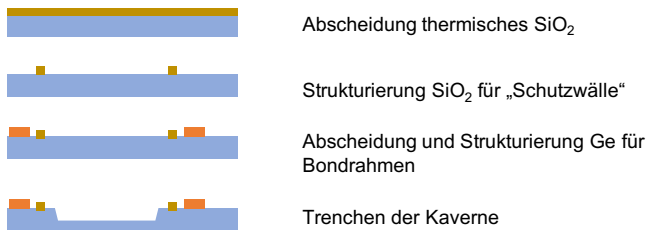
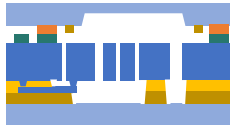


Abb. 2.7: Schematische Übersicht über den Prozessverlauf eines Kappenwafers, dargestellt für den Querschnitt einer Kaverne auf einem solchen Wafer entsprechend dem Gegenstück, das Abb. 2.6 zeigt.

verwendet. Um eine Siliziumoxidschicht auf einen Wafer aufzubringen, sind für die Versuchswafer insbesondere zwei Vorgehensweisen von Bedeutung: die thermische Oxidation und das LPCVD-Verfahren (Low Pressure Chemical Vapour Deposition). Bei der thermischen Oxidation wird die Oberfläche einer Siliziumschicht oxidiert, indem der Wafer bei Temperaturen zwischen 900 °C und 1200 °C reinem Sauerstoff ausgesetzt wird (trockene Oxidation) [12]. Um die Oxidation des Substrates zu beschleunigen, kann dem Prozessgas Wasserdampf beigelegt werden [19, 22] (nasse Oxidation). In beiden Fällen wird Silizium der Substratschicht verbraucht. Die thermische Oxidation ergibt eine Siliziumoxidschicht mit sehr dichter Gitterstruktur [19], wobei die trockene Oxidation ein langsames Wachstum und eine höhere Dichte der Oxidschicht aufweist als die nasse Oxidation [12].

Im Gegensatz zur thermischen Oxidation ist das LPCVD-Verfahren ein chemisches Beschichtungsverfahren, bei dem die Oxidschicht das Ergebnis einer Kondensierung aus der Gasphase auf dem Substrat ist [19]. Die Oxidschicht wächst in diesem Fall auf dem Substrat auf, das Substrat selbst wird nicht oxidiert. Eine im LPCVD-Verfahren hergestellte Oxidschicht weist eine geringere Packungsdichte auf als ein thermisches Oxid. Bei den Versuchswafern wurde als Ausgangsstoff für Oxidschichten TEOS (Tetraethyl-Orthosilikat, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) verwendet, aus dem bei Prozesstemperaturen zwischen 680 °C und 730 °C SiO_2 abgeschieden wird [22]. Neben Siliziumoxid entstehen bei der Reaktion auch



Waferbonden: Verbinden von Sensor- und Kappenwafer



Rückschleifen der Kappenseite



Öffnen des Bondpadbereichs (Trenchen)



Rückdünnen des Sensorwafers

Abb. 2.8: Übersicht über den Prozessverlauf nach dem Zusammensetzen von Sensor- und Kappenwafer. Dargestellt ist der Querschnitt einer Kaverte entsprechend der Schemata von Sensor- und Kappenseite in den Abbildungen 2.6 und 2.7.

H₂O und weitere Nebenprodukte, die unter anderem Wasserstoff enthalten können.

Weitere Möglichkeiten der Abscheidung von Siliziumoxidschichten sind CVD-Verfahren bei Atmosphärendruck sowie plasmaunterstützte CVD-Verfahren [12], die hier von geringer Bedeutung sind, da sie für den Schichtaufbau der Versuchswafer nicht verwendet wurden. Alle in MEMS-Inertialsensoren verwendeten Siliziumoxidschichten sind amorph, da für die Abscheidung kristalliner Oxidschichten deutlich höhere Temperaturen notwendig wären, die mit dem Sensorherstellungsprozess nicht vereinbar sind [23].

2.3.2 BOE-Ätzen

Mit BOE (buffered oxide etch, gepufferte Flusssäure) kann Siliziumoxid in einem nasschemischen Ätzverfahren isotrop geätzt werden [12]. Als Maskenmaterial ist je nach Dicke der Oxidschicht, die geätzt werden soll, Fotolack oder Siliziumnitrid geeignet. Durch die Reaktion von SiO_2 mit HF zu H_2SiF_6 und H_2O lässt sich Siliziumoxid, das nicht durch eine Maske geschützt ist, herauslösen [12]. Um ein chemisch stabiles Ätzmittel mit einer konstanten Ätzrate zu erhalten, wird die Flusssäure mit Ammoniumfluorid (NH_4F) gepuffert. Mit dieser Ätzlösung lassen sich thermisch gewachsenes SiO_2 und TEOS-Oxid abtragen [12]. Wird eine Siliziumoxidschicht nur für kurze Zeit der Säure ausgesetzt, lässt sich die Oberfläche der Schicht anätzen und dadurch verändern. Die Nutzung der BOE zur Oberflächenmodifikation ist kein gängiger Verfahrensschritt in der MEMS-Sensorherstellung, wird aber in einem der folgenden Versuche herangezogen.

2.3.3 Silizium-Epitaxie

Um Siliziumschichten auf ein Substrat aufzubringen, ist Epitaxie ein weit verbreitetes Verfahren. Bei Prozesstemperaturen um $1100\text{ }^\circ\text{C}$ lässt sich mithilfe von Siliziumverbindungen wie SiH_4 , SiCl_4 oder SiHCl_3 Silizium aus der Gasphase auf den Wafern abscheiden [22]. Die Reaktionsgase werden zusammen mit einem verdünnenden Trägergas in die Reaktionskammer eingelassen. Stoßen die Gasatome auf die aufgeheizten Wafer, werden sie aufgespalten. Das Silizium kondensiert auf der Waferoberfläche, während die übrigen Bestandteile gasförmig bleiben und abgesaugt werden können. Für homogene Siliziumschichten sind eine genaue Kontrolle der Prozesstemperatur, ein möglichst geringer Temperaturgradient über den Wafer und eine gleichmäßige Konzentration des Reaktionsgases entscheidend. Durch gleichmäßige Abscheidebedingungen können Kristallfehler in der abgeschiedenen Siliziumschicht vermieden werden. Die Siliziumatome ordnen sich in der energetisch günstigsten Form an und folgen der Kristallorientierung des Substrats, die neben den Prozessparametern einen

großen Einfluss auf die abgeschiedene Schicht hat [19]. Auf diese Weise ist es möglich, auch einkristalline Siliziumschichten epitaktisch abzuscheiden. Im Fall der Versuchssensoren, bei dem die bewegliche Masse der Inertialsensoren aus epitaktisch abgeschiedenem Silizium besteht, wird vor der Epitaxie eine polykristalline Siliziumschicht von wenigen Nanometern Dicke auf die Wafer aufgebracht, die die Kristallorientierung vorgibt. In der folgenden epitaktischen Abscheidung lassen sich Siliziumdicken von einigen $10\ \mu\text{m}$ erreichen. Neben weiteren Faktoren wird das Gewicht der beweglichen Sensormasse durch die Dicke des polykristallinen Siliziums festgelegt, sodass die Schwingungseigenschaften des Sensors an dieser Stelle beeinflussbar sind.

2.3.4 Deep Reactive Ion Etching

Ein wichtiger Prozess, durch den die Entwicklung der Silizium-Mikromechanik in den 90er Jahren einen großen Sprung machen konnte, ist das Deep Reactive Ion Etching (DRIE), auch als Trenchen oder Bosch-Prozess bezeichnet. Mithilfe dieses plasmaunterstützten Trockenätzverfahrens lassen sich Siliziumstrukturen mit extrem hohen Aspektverhältnissen von etwa 1:50 und fast senkrechten Seitenwänden realisieren [24].

Der Ätzprozess läuft in zweistufigen Zyklen ab. Der grundlegende Zyklus wird so oft wiederholt, bis die vorgesehene Ätztiefe erreicht ist. Wie beim Reactive Ion Etching (RIE) ist die Kombination aus chemischen und physikalischen Mechanismen, die zum gezielten Abtrag von Silizium führen, ein wichtiges Kennzeichen des DRIE. Die chemische Komponente ist hier das isotrope Ätzen des Siliziums mithilfe von SF_6 , die physikalische ist das anisotrope Ätzen durch Ionenbeschuss. Die Bereiche des Siliziumwafers, die unversehrt bleiben sollen, sind durch eine Maske aus Lack oder Siliziumoxid abgedeckt. Die Besonderheit des DRIE ist folgender zyklischer Ablauf des Prozesses, zusammengesetzt aus sich abwechselnden Ätz- und Passivierungsschritten:

1. Flutung der Prozesskammer mit SF_6 . Fluorgase eignen sich durch hohe Ätzraten und eine hohe Selektivität gegenüber der Maske gut zum Ätzen von Silizium [22].

2. In einem Plasma (z.B. Argonplasma) wird SF_6 zu SF_5^+ und F^- gespalten.
3. Die hochreaktiven Fluorradikale reagieren mit Silizium zu gasförmigem SF_5 und SiF_4 und die freiliegende Siliziumoberfläche wird isotrop geätzt. Die Reaktionsprodukte werden abgesaugt.
4. CF_4 wird in die Prozesskammer eingeleitet.
5. Erzeugung von Radikalen mithilfe eines Plasmas, dadurch lagert sich das CF_4 an die zuvor isotrop geätzte Siliziumoberfläche an und bildet eine teflonartige Passivierungsschicht, die die Seitenwände vor weiterem chemischen Abtrag schützt.
6. Wiederholung der Schritte 1. bis 5., bis die gewünschte Ätztiefe erreicht ist. Auf dem Boden des geätzten Grabens wird die Passivierungsschicht bei jeder Wiederholung des Zyklus durch Ionenbeschuss wieder abgetragen, sodass das Silizium freigelegt wird und an dieser Stelle erneut die isotrope Ätzreaktion mit SF_6 stattfinden kann. [24].

Durch das Abwechseln von Ätzen und Passivieren ergibt sich eine Struktur aus horizontalen Rillen an den Seitenwänden. Durch die Wahl der Prozessparameter kann die Größe der Rillen und die Dicke der Polymerschicht beeinflusst werden. Um in einem Versuch dieser Arbeit den Einfluss von Ausgasungen dieser Polymere auf den Innendruck von Drehratensensoren zu untersuchen, wurde für einen Versuch die Möglichkeit genutzt, besonders dicke Polymerschichten herzustellen, die, anders als gemeinhin üblich, nach dem DRIE-Prozess nicht wieder entfernt wurden, wie in 4.6.4 beschrieben.

2.3.5 Aluminiumabscheidung

Die Aluminiumschichten, die in den Versuchschips enthalten sind, werden in einem Sputterprozess appliziert. Argonionen, beschleunigt durch eine Gleichspannung, werden auf ein Aluminium-Target gelenkt, wo sie Atome heraus schlagen. Die freigewordenen Aluminiumteilchen bilden eine gleichmäßige

Schicht auf dem Substrat. Der Sputterprozess ergibt im Vergleich zu einem Bedampfungsprozess eine sehr gleichmäßige Beschichtung, da sich die herausgeschlagenen Aluminiumteilchen nicht geradlinig auf das Substrat zubewegen, sondern durch Stöße am Restgas unter verschiedenen Winkeln auf das Substrat treffen [12].

2.3.6 Strukturierung mittels Fotolithografie

Nachdem die Aluminiumschicht in einem Sputterprozess auf den Wafer aufgebracht wurde, wird sie mithilfe von Fotolithographie strukturiert. Auch bei Schichten aus anderen Materialien wird diese Möglichkeit der Strukturierung genutzt.

Der Lithografieprozess setzt sich aus mehreren Teilschritten zusammen [19]. Zunächst wird der Wafer, der strukturiert werden soll, in einem Spincoating-Verfahren mit einem Fotolack versehen. Dieser reagiert empfindlich auf Licht eines bestimmten Spektrums und wird durch eine zuvor angefertigte Maske hindurch belichtet, sodass der Lack nach der Belichtung die gewünschten Strukturen abbildet. Anschließend folgt ein Entwicklungsschritt, bei dem die belichteten (Negativresist) bzw. die unbelichteten Partien (Positivresist) der Lackschicht herausgelöst werden. An diesen Stellen kann nasschemisch oder in einem Plasma-Ätzverfahren das nun offenliegende Aluminium abgetragen werden. Schließlich wird der verbliebene Lack entfernt, sodass der Wafer mit der strukturierten Aluminiumschicht weiterbearbeitet werden kann. Durch Abscheiden und Strukturieren mehrerer aufeinanderfolgender Schichten lassen sich komplexe Mikrostrukturen aufbauen [19].

2.3.7 Reinigung nach Aluminiumätzen

Damit mögliche Überreste von Polymeren aus der Fotolithographie wie Fotolackreste oder Ätzpolymere als Rückstände des Ätzprozesses den weiteren Verlauf der Waferprozessierung nicht beeinträchtigen, erfolgt nach der Strukturierung des Aluminiums ein Reinigungsschritt, in dem Polymerreste voll-

ständig entfernt werden sollen. Hierfür eignen sich organische Lösemittelreiniger, die von mehreren Anbietern und in verschiedenen Zusammensetzungen erhältlich sind und die verbliebenen Polymere wirksam entfernen [25]. In vielen Fällen greifen die Reinigungslösungen jedoch nicht nur die Lackreste, sondern auch die Aluminiumoberfläche an [26]. Indem die Dauer minimiert wird, die ein Wafer der Reinigungslösung ausgesetzt ist, bleibt die Schädigung des Aluminiums geringfügig. Auswirkungen des Reinigungsschritts auf nachfolgende Prozessschritte sind jedoch nicht ausgeschlossen und werden in dieser Arbeit mithilfe der in Abschnitt 4.6.2 beschriebenen Versuche betrachtet.

Bei den Versuchswafern wurde zur Reinigung nach dem Aluminiumätzen eine Lösung verwendet, zu deren Bestandteilen 2-(2-Aminoethoxy)-Ethanol ($C_4H_{11}NO_2$), Hydroxylamin (NH_2OH) und Catechol ($C_6H_6O_2$) gehören [27], sofern in den Versuchen nicht abweichend beschrieben.

2.3.8 Gasphasenätzen

Um bewegliche Mikrostrukturen aus Silizium zu realisieren, werden Opferschichten aus Siliziumdioxid verwendet. Nachdem diese strukturiert sind, wird auf dem Wafer in einem Epitaxieprozess eine Siliziumschicht abgeschieden. Diese bildet im fertigen Sensor die an Federn aufgehängte bewegliche Mittelmasse, das Kernstück der Beschleunigungs- und Drehratensensoren (s. Abschnitt 2.2.1). Um die Siliziumstruktur freizustellen und Bewegung der Masse zu ermöglichen, wird das darunterliegende Oxid in einem Gasphasenprozess wieder entfernt.

Zum Ätzen von SiO_2 eignet sich gasförmige Flußsäure (HF). Diese reagiert mit dem Oxid zu Siliziumfluorid, das abgepumpt wird, und Wasser.

2.3.9 Germaniumabscheidung

Die Germaniumschicht, die für die kappenseitigen Bondrahmen der Versuchschips sowie für einige Versuche mit zusätzlichen Germaniumstrukturen in den Sensorkavernen benötigt wird, wird in einem LPCVD-Verfahren auf den Wafer

aufgebracht. Das Prinzip des Verfahrens entspricht dem zur SiO_2 -Abscheidung, das in Abschnitt 2.3.1 zur Sprache kommt. Das Ausgangsmaterial, aus dem das Germanium bei Temperaturen um 350°C abgeschieden werden kann [28], ist gasförmiges German (GeH_4) [29]. Nach der LPCVD-Abscheidung ist der Kappenwafer zunächst vollflächig mit Germanium beschichtet. Anschließend wird die Schicht mithilfe von Lithografie und Ätzen strukturiert. Zum Ätzen von Germanium bestehen verschiedene Möglichkeiten wie Nassätzen mit Wasserstoffperoxid [30, 31] oder plasmaunterstütztes Ätzen [32, 33].

2.3.10 Waferbonden

Nachdem die mikromechanischen Sensorstrukturen auf einem Substratwafer fertiggestellt sind, werden sie mit einer Kappe versehen, die die empfindlichen Strukturen vor Partikeln, Feuchtigkeit und anderen Einflüssen durch Umwelt oder nachfolgende Prozessschritte schützen soll. Die Kappen werden getrennt vom Sensorwafer auf einem zweiten Wafer, dem Kappenwafer, hergestellt. Beim Waferbonden werden die beiden Wafer zusammengefügt. Das Aufbringen der Kappe dient nicht nur zum Schutz der Sensorstrukturen, sondern das Waferbonden wird gleichzeitig genutzt, um die Dämpfungsatmosphäre in den Sensorkavernen optimal einzustellen.

Um den Kappen- und den Sensorwafer miteinander zu verbinden, sind verschiedene Waferbondverfahren möglich, die sich in Verfahren mit Zwischenschichten und Verfahren ohne Zwischenschichten zwischen den zu bondenden Wafern unterteilen lassen. Zu Verfahren ohne Zwischenschichten zählen das Silizium-Direktbonden oder das anodische Bonden mithilfe einer Spannung, die zwischen den beiden Wafern angelegt wird. Verfahren mit Zwischenschicht sind das Sealglasbonden mit einer Glasfritt-Paste als Zwischenschicht, die im Siebdruckverfahren auf einen der Wafer aufgebracht wird, adhäsive Bondverfahren (Kleben) und Verfahren mit metallischen Zwischenschichten.

Im Fall der Versuchschips werden Sensor- und Kappenwafer in einem eutektischen Aluminium-Germanium-Waferbondprozess zusammengefügt, der unter die Bondverfahren mit metallischer Zwischenschicht fällt.

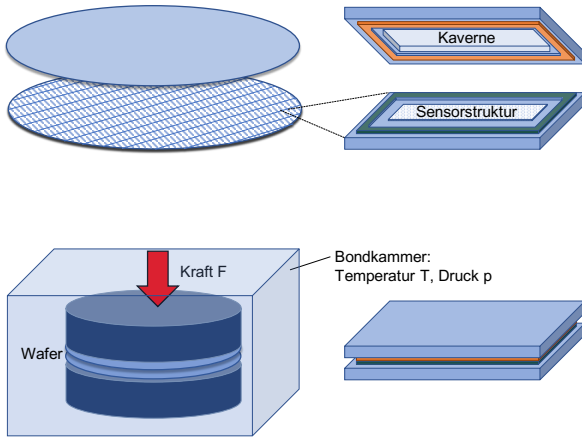


Abb. 2.9: Schema Waferbonden. Oben: Sensor- und Kappenwafer werden separat hergestellt, wobei sämtliche Chips mit Bondrahmen versehen werden (grün, orange). Unten: Ausrichten der beiden Wafer zueinander (Alignment) und Bonden in der Bondkammer.

Um die Chips hermetisch abzudichten, wird umlaufend um jeden Sensorkern ein Bondrahmen aus metallischem Material strukturiert. Die Bondrahmen stellen die Fügestelle zwischen Sensor- und Kappenwafer dar. Im Fall des Al-Ge-Bondens bestehen sie aus zwei Schichten. Auf dem Sensorwafer wird ein Bondrahmen aus Aluminium aufgebracht, während der Bondrahmen auf den Kappenwafern aus Germanium besteht. Diese beiden Materialien bilden bei $424\text{ }^{\circ}\text{C}$ ein Eutektikum [34], das genutzt wird, um Sensor- und Kappenwafer dauerhaft miteinander zu verbinden.

Da sich auf den Germaniumbondrahmen bei Kontakt mit der Umgebungsluft ein Oxid ausbildet, das die Vermischung von Aluminium und Germanium erschwert, werden die Kappenwafer vor dem Waferbondprozess zunächst konditioniert, um das Germaniumdioxid zu entfernen [35]. Nachdem Sensor- und Kappenwafer mikrometergenau zueinander ausgerichtet und festgeklammert sind, sodass Aluminium- und Germaniumbondrahmen genau übereinanderliegen, durchlaufen die Wafer in einer Bondkammer den eutektischen Bondprozess.

Die Bondkammer besteht aus einer Vakuumkammer, in der die zu fügenden Wafer von beiden Seiten durch Heizplatten aufgeheizt werden, wie in Abb. 2.9 schematisch dargestellt. Da sich vor dem Bonden auch auf dem Aluminiumbondrahmen eine Oxidschicht ausbildet, können die Wafer zusätzlich mit einer Kraft beaufschlagt werden, um die Passivierungsschicht auf den Aluminiumbondrahmen aufzubrechen [35]. Die Kraft liegt beim AlGe-Bonden meist im Bereich von 40-60 kN [35], kann aber bis zu 90 kN betragen [36] und wird mithilfe eines hydraulischen Stempels auf die Wafer aufgebracht. Nach abgeschlossenem Bondprozess herrscht in allen Chips auf dem Wafer der gleiche Innendruck.

2.3.11 Prozessierung des Waferstacks

Nach dem Verschluss der Sensorkavernen mit Druckeinstellung im Zuge des Waferbondprozesses fehlen noch wenige Schritte, bis die Prozessierung der Sensoren abgeschlossen ist und sie bereit für die Montage sind.

Ein notwendiger Schritt für die Funktionalität der Chips ist die Freilegung der Aluminiumbondpads für die elektrische Kontaktierung bei der späteren Montage der Chips. Die Aluminiumpads sind nach dem Bonden zunächst noch nicht zugänglich, da sie durch das Silizium des Kappenwafers verdeckt sind. An den Stellen, an denen die Sensoren bei der Montage verdrahtet werden sollen, muss das Silizium deshalb entfernt werden. Dafür wird bei den Versuchswafern ein Trenchprozess genutzt. Um diesen zu verkürzen, kann zunächst in einem chemisch-mechanischen Schleifprozess die Siliziumoberfläche des Kappenwafers gleichmäßig abgetragen werden, bis eine zuvor festgelegte Kappendicke erreicht ist. Anschließend wird die kappenseitige Siliziumoberfläche des Waferstapels mithilfe von Fotolithografie und Trenchen an den Stellen geöffnet, an denen die Aluminiumpads liegen. Somit ist die Kontaktierung und Ansteuerung der Sensoren möglich.

Bei den Versuchswafern, die ausschließlich mit Drehratensensoren bestückt sind, erfolgt die endgültige Druckeinstellung direkt im Bondprozess.

Bei den Versuchswafern, bei denen der Kavernendruck nach dem Bonden noch nicht den Anforderungen entspricht, folgt nach dem Freilegen der Aluminiumpads dagegen ein Reseal-Prozess. Dazu gehören Kombi-MEMS-Wafer, für die verschiedene Innendrucke in benachbarten Kavernen auf ein und demselben Wafer realisiert werden müssen, sowie reine Drehratensensorwafer, die für Versuche mit Druckwerten in besonders engen Toleranzgrenzen vorgesehen sind. Für die Druckeinstellung mittels Laser-Reseal müssen alle Drehratensensorkavernen, deren Innendruck präzise eingestellt werden soll, erneut geöffnet werden. Nachdem in die Kappe der entsprechenden Kavernen ein kleines Loch mit einem Durchmesser von einigen Mikrometern getrennt ist, sind die Wafer bereit für den Reseal-Prozess, der in Abschnitt 3.2.3 beschrieben ist. Bei den Varianten von Versuchswafern, bei denen die Druckeinstellung ausschließlich im Rahmen des Bondprozesses erfolgt, entfällt der Laser-Reseal-Prozess.

Die fertig prozessierten Wafer können nun einer Messung unterzogen werden, die jeden einzelnen Chip elektrisch charakterisiert. Hier können auf Waferebene erstmals die Güte (s. Abschnitt 2.4.1) und somit der Kaverneninnendruck, die Resonanzfrequenz und zahlreiche weitere Größen ermittelt werden, die sich von Chip zu Chip unterscheiden können und daher für jeden Chip eines Wafers gesondert gemessen werden müssen. Auch Stichproben sind möglich, wenn lediglich überprüft werden soll, ob die Prozessierung eines Wafers insgesamt erfolgreich verlaufen ist oder ob eine fehlerhafte Prozessierung dazu geführt hat, dass keiner der Sensoren funktional ist. Anhand bestimmter Kriterien können defekte Chips ausgemacht, markiert und später aussortiert werden.

Nach erfolgreicher Vorcharakterisierung der Wafer können diese in Einzelchips zerteilt werden. Die Versuchswafer werden hierfür auf ein spezielles Tape geklebt, in einen Rahmen gespannt und mit einem Diamantsägeblatt gesägt.

Nach der Vereinzelung wird jeder Chip, der nicht aufgrund des ersten elektrischen Charakterisierungsergebnisses auf Waferebene aussortiert werden muss, von Kunststoff umgossen, der das Gehäuse bildet. Mithilfe einer finalen elektrischen Messung der einzelnen Chips lassen sich der Offset jedes Chips ein-

stellen sowie gegebenenfalls defekte Bauteile aussortieren. Anschließend sind die Bauteile montagefertig. Die Abmessungen der fertigen Bauteile betragen wenige Millimeter.

Abb. 2.10 zeigt die Innenansicht eines montagefertigen Beschleunigungssensors samt ASIC im Kunststoffgehäuse.



Abb. 2.10: Innenansicht eines Kunststoffgehäuses, in das Beschleunigungssensorchip (rechts) und ASIC (links) eingebettet sind. Der Aufbau ist übertragbar auf Drehratensensoren oder Kombi-MEMS. Bildquelle: Robert Bosch GmbH

2.4 Dämpfung kapazitiver Inertialsensoren

Wie oben beschrieben, unterscheiden sich die Dämpfungskonzepte von Drehraten- und Beschleunigungssensor grundlegend voneinander. Bei der Auswertung der Versuche in dieser Arbeit liegt ein Schwerpunkt auf der Messung der elektrischen Güte von resonanten Drehratensensoren, die im Folgenden erläutert wird.

2.4.1 Gütefaktor von Resonatoren

Das Schwingungsverhalten eines Resonators ist mithilfe des Gütefaktors Q charakterisierbar. Dieser ist definiert als das Verhältnis der im gesamten System enthaltenen Energie zum Energieverlust des Systems pro Schwingungsperiode [37, 38]:

$$Q = 2\pi \frac{E_{\text{System}}}{\Delta E_{\text{Schwingungsperiode}}} \quad (2.1)$$

Gasdämpfung bedeutet Energieverlust. Die Güte kann als Maß für den Grad der Dämpfung eines Drehratensensors herangezogen werden. Der reziproke Wert der Güte ist der Verlustfaktor, der auch als $d = \tan(\delta)$ mit dem Dämpfungskoeffizienten δ angegeben werden kann [39]. Um die Güte eines Drehratensensors zu ermitteln, bestehen verschiedene Möglichkeiten.

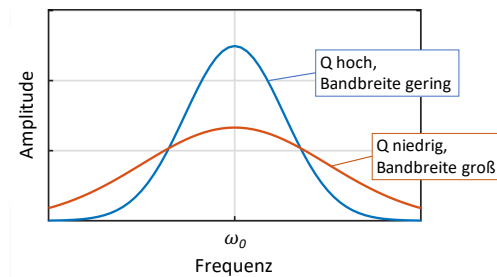


Abb. 2.11: Zusammenhang zwischen Gütefaktor Q und Bandbreite der Resonanzkurve. Abbildung nach [40].

Einerseits lässt sich die Güte aus dem Amplituden-Frequenzspektrums bestimmen, indem die Resonanzfrequenz ω_0 durch die Bandbreite der Resonanz geteilt wird (entspricht der Breite des Resonanzpeaks bei -3 dB; an dieser Stelle ist die Amplitude des Systems auf $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ihres Maximalwertes gesunken, s. Abb. A.2 im Anhang) [41]. Für die Güte gilt dann $Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{0,-3dB}}$. Den Zusammenhang zwischen Gütefaktor Q und Bandbreite der Resonanzkurve veranschaulicht Abb. 2.11.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Gütefaktors besteht darin, die Abklingkurve der gedämpften Schwingung des Sensors aufzunehmen. Anhand der Abklingzeit τ ist der Dämpfungskoeffizient $\delta = \frac{1}{\tau}$ des Systems bestimmbar. Daraus lässt sich mit der Resonanzfrequenz ω_0 die Güte berechnen, diese ergibt sich zu $Q = \frac{\omega_0}{2\delta}$ [42].

Die Abklingkurve ist bestimmbar, indem ein Drehratensensor in seiner Resonanzfrequenz zum Schwingen gebracht wird. Dann wird der Antrieb abgeschaltet und die Amplitude der Schwingung folgt der Funktion $A(t) = A_0 e^{-\delta t}$ mit der maximalen Amplitude A_0 und dem Dämpfungskoeffizienten δ . Die Abklingzeit τ , die aus der Abklingkurve ermittelt wird, ist definiert als $\tau = t(A = \frac{1}{e}A_0)$. Damit kann die Güte errechnet werden [38].

Für die Gütemessungen im Rahmen dieser Arbeit wurde die zweite der oben beschriebenen Methoden angewandt, da sie sich am besten in eine Testmessung integrieren lässt, die ohnehin für jeden Chip durchgeführt wird.

Jeder einzelne der mehreren 10000 Chips, die in die Auswertungen eingingen, wurde in einem speziell eingerichteten Prober elektrisch kontaktiert und elektrostatisch in seiner Resonanzfrequenz angeregt, sodass schließlich seine Abklingkurve aufgenommen und die Güte berechnet werden konnte, wie oben beschrieben.

Um von der gemessenen Güte auf den Innendruck eines Sensors schließen zu können, wurden Güte-Druck-Messungen zur Kalibrierung für verschiedene Dämpfungsgase vorgenommen, siehe dazu Abschnitt 3.3.1.

2.4.2 Druckabhängigkeit der Dämpfung

Zahlreiche Faktoren beeinflussen die Dämpfung und somit auch die Güte des Sensors, darunter die Art des Dämpfungsgases, der Druck des Gases, die Messtemperatur, Sensorgeometrie, elektrostatische Effekte und Materialeigenschaften [43]. Bleiben jedoch alle Faktoren konstant und wird nur der Druck verändert, wie später im Abschnitt 3.3.1 beschrieben, lassen sich Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Gütefaktor und Druck ziehen.

Ist der Sensor durch einen geringen Innendruck des Dämpfungsgases schwach gedämpft, ist die Abklingzeit länger als bei einem stark gedämpften Sensor, bei dem der Kavernendruck hoch ist, wie Abb. 2.12 verdeutlicht. Die Gesamtdämpfung setzt sich aus unterschiedlichen Dämpfungsmechanismen zusammen, die in druckabhängige und druckunabhängige Dämpfungsanteile unterteilbar sind. Bei Drücken zwischen etwa 1 mbar und Atmosphärendruck kann das

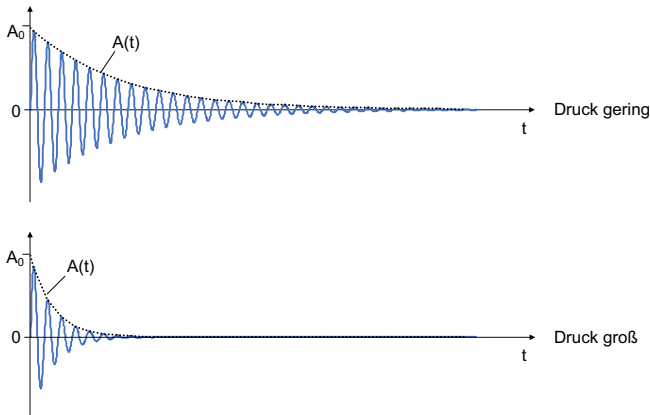


Abb. 2.12: Der Druck des Dämpfungsgases beeinflusst die Abklingzeit der Schwingung eines Resonators.

Dämpfungsgas als viskoses Medium betrachtet werden. In engen Spalten zwischen Wand und Sensormasse kann in diesem Druckbereich Squeezefilmdämpfung eine Rolle spielen.

Bei Drücken unter 1 mbar beginnt der molekulare Dämpfungsbereich. Das Gas kann nicht mehr als viskos betrachtet werden, die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle ist deutlich größer als der Abstand zwischen Wand und Sensormasse.

Zu den druckabhängigen Dämpfungsmechanismen kommen druckunabhängige Mechanismen hinzu, die relevant werden, wenn der Druck so niedrig ist, dass sie das Dämpfungsverhalten des Sensors dominieren. Zu diesen Mechanismen gehören Energieverluste durch die Aufhängung der Sensormasse an Federn, durch intrinsische Materialdämpfung, durch Ladungsverschiebungen, d.h. wenn beim Schwingen eine Spannung zwischen Masse und festen Elektroden anliegt, die als elektrostatische Dämpfung bezeichnet werden können, sowie Thermokompressionsdämpfung durch lokale Volumenänderungen beim Biegen des Federmaterials, was Energieverluste durch thermomechanische Ef-

Tab. 2.1: Charakterisierung von Strömung bei verschiedenen Knudsenzahlen Kn nach [46]. Je größer Kn , desto geringer der Druck.

| | |
|---------------------|--------------------------|
| $Kn \leq 0,001$ | Hydrodynamische Strömung |
| $001 < Kn \leq 0,1$ | Schlupfströmung |
| $0,1 < Kn \leq 10$ | Übergangsströmung |
| $Kn > 10$ | Freie Molekularströmung |

fekte hervorruft [44]. Die druckunabhängigen Dämpfungsanteile werden auch als Grunddämpfung bezeichnet [45].

Die Gesamtdämpfung ist die Summe der Beiträge der verschiedenen Mechanismen [42]. Sie wird immer durch den größten der Dämpfungsfaktoren dominiert. Die verschiedenen möglichen Dämpfungsmechanismen sind abhängig von der Art der Gasströmung, die im Sensor vorliegt. Die Gasströmungen lassen sich mithilfe der Knudsen-Zahl

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{\text{Mittlere freie Weglänge der Gasteilchen}}{\text{Charakteristische Länge der Strömung}} \quad (2.2)$$

charakterisieren. Eine Übersicht der Strömungsarten, die in MEMS-Sensoren vorkommen können, zeigt Tabelle 2.1.

Bei sehr geringem Druck des Dämpfungsgases bis ca. 1 Pa (entspricht 0,01 mbar) überwiegt die druckunabhängige intrinsische Dämpfung [47]. Ausschlaggebend für die Gesamtdämpfung sind in diesem Druckbereich Materialeigenschaften der Sensorstruktur, bestimmt durch Verunreinigungen, Versetzungen und thermoelastische Verluste im Material [41], sowie elektrostatische Dämpfungseffekte. In diesem Bereich sind die höchsten Güteverhältnisse des Systems möglich [42].

Im mittleren Druckbereich, etwa zwischen 1 und 100 Pa, ändert sich das Dämpfungsverhalten [42]. Die Dämpfung im sogenannten molekularen Strömungsbereich oder Knudsen-Bereich wird durch die akustische Dämpfung bestimmt. Die Dämpfung kommt hier durch Kollisionen der Gasmoleküle mit den oszillierenden Sensorstrukturen zustande, beschreibbar mithilfe der kinetischen Gastheorie. Die Gesamtdämpfung ist abhängig von Temperatur, Druck und der

molaren Masse des Dämpfungsgases [47]. Die Güte des Drehratensensors ergibt sich in diesem Fall aus

$$Q = \frac{\text{const.}}{p\sqrt{\frac{M}{T}}} \quad (2.3)$$

mit dem Druck p und der molaren Masse M des Dämpfungsgases sowie der absoluten Temperatur T [42].

Bei höheren Drücken ab ca. 100 Pa geht das Verhalten des Dämpfungsgases vom molekularen in den viskosen Strömungsbereich über, in dem die Zusammenhänge der Fluidmechanik gelten [47]. In diesem Druckregime verhält sich das Dämpfungsgas als viskoses Fluid. Die Güte ist in diesem Fall abhängig von der dynamischen Gasviskosität, dem Druck des Dämpfungsgases und der Temperatur [42].

Das Druckregime, das für die Drehratensensoren in dieser Arbeit relevant ist, ist der mittlere Bereich zwischen 1 und 100 Pa, bei dem die Dämpfung im molekularen Strömungsbereich liegt.

2.4.3 Gasabhängigkeit der Dämpfung

Im molekularen Strömungsbereich, in dem sich die Dämpfung von Drehratensensoren im Allgemeinen bewegt, ist der Gütefaktor nicht nur vom Druck abhängig, sondern auch von der Art des Dämpfungsgases. Zwischen der Güte eines Drehratensensors, bestimmt durch Gasdämpfung, und der molaren Masse des Gases besteht bei der Zusammenhang in Glg. 2.3 [48–50]. Dieser gilt für Dämpfungsgase, die aus nur einer Gasspezies bestehen. Zur Überprüfung lassen sich für verschiedene Dämpfungsgase die Verhältnisse der bei gleichem Druck gemessenen Güten und der molaren Massen vergleichen:

$$\frac{Q_{Gas1}}{Q_{Gas2}} \propto \frac{\sqrt{M_{Gas2}}}{\sqrt{M_{Gas1}}} \quad (2.4)$$

Zudem ist es möglich, mithilfe dieses Zusammenhangs Ergebnisse einer Gütemessung in die korrespondierende Güte einer weiteren Gasspezies umzurechnen.

nen. Auf diese Weise können Gütewerte für verschiedene Gase ermittelt werden, ohne dass dafür weitere Messungen notwendig sind.

2.5 Mechanismen der Druckänderung in Sensorkavernen

Die Stabilität des Drucks, mit dem das Dämpfungsgas in den Sensorkavernen eingeschlossen ist, ist entscheidend für die Funktionalität der Sensoren über die gesamte vorgesehene Lebensdauer. Auch Veränderungen der Gaszusammensetzung können zu Änderungen im Dämpfungsverhalten führen. Die Stabilität der Kavernenatmosphäre lässt sich anhand von Gütemessungen beurteilen [51]. Abb. 2.13 zeigt schematisch verschiedene Mechanismen, die die Stabilität des Dämpfungsverhaltens beeinträchtigen können. Denkbar sind Diffusion, Adsorption, Desorption oder chemische Reaktionen des Dämpfungsgases, die zu einer Veränderung der Dämpfungsatmosphäre oder des Drucks in der Kaverne führen können. Diese Punkte werden im Folgenden kurz beschrieben.

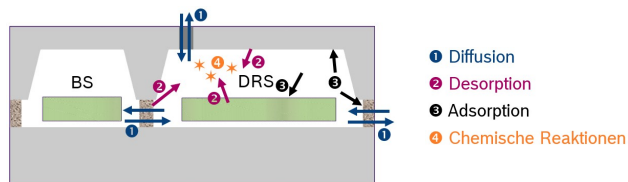


Abb. 2.13: Verschiedene Mechanismen, die zu einer Druckänderung in den Kombi-MEMS-Kavernen führen können. BS = Beschleunigungssensor, DRS = Drehratensensor.

2.5.1 Adsorption

Ein Mechanismus, der die Dämpfungsatmosphäre der Sensoren beeinflussen könnte, ist Adsorption. Als Adsorption wird die Anlagerung von Molekülen aus einer flüssigen oder gasförmigen Phase an der Oberfläche eines Feststoffs bezeichnet [52]. Bei Adsorption von Dämpfungsgasmolekülen fällt der Kaver-

nendruck durch die Verringerung der Teilchenzahl im gasförmigen Zustand ab.

Im Allgemeinen ist mit Adsorption physikalische Adsorption gemeint, bei der die Bindung der adsorbierten Moleküle an das Substrat durch Van-der-Waals-Kräfte und elektrostatische Wechselwirkungen besteht [53]. Diese Art der Adsorption ist reversibel und die Bindungen lassen sich durch Wärmeeinwirkung verhältnismäßig leicht aufheben. Bei der physikalischen Adsorption stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Konzentrationen des zu adsorbierenden Stoffs in der fluiden Phase und der bereits adsorbierten Teilchen auf der festen Oberfläche ein. Das Gleichgewicht ist temperatur- und druckabhängig [54]. Physikalisch adsorbiert werden können grundsätzlich Gase aller Art, solange die Temperaturen niedrig genug und der Druck ausreichend hoch sind, ansonsten lösen sich die Teilchen wieder von der Oberfläche [55].

Anders als bei der physikalischen Adsorption werden bei der chemischen Adsorption Moleküle durch deutlich stärkere Bindungskräfte wie Elektronenbindungen an die Oberfläche des Feststoffs gebunden. Diese Art der Adsorption wird häufig als irreversibel eingestuft und als chemische Reaktion betrachtet [53].

Besonders gut können Teilchen an denjenigen Stellen der Feststoffoberfläche adsorbiert werden, die Gitterfehler aufweisen [56]. Amorphe und poröse Substrate haben daher eine höhere Adsorptionsfähigkeit als einkristalline Feststoffe mit einer glatten Oberfläche.

2.5.2 Desorption

Als Desorption wird die Loslösung adsorbierter Teilchen von einer Oberfläche bezeichnet [57]. Desorption kann als Umkehrung der Adsorption betrachtet werden [54]. Desorbieren Moleküle, die durch physikalische Adsorption an einer Oberfläche haften, etwa durch erhöhte Temperatur [58], bewirkt die steigende Zahl an Teilchen in der Gasphase bei gleichbleibendem Volumen, zum Beispiel in einer Sensorkaverne, einen höheren Druck. Auch bei gleichbleibender Temperatur und sinkendem Gasdruck können adsorbierte Teilchen sich lösen [58].

Nach der Desorption liegen die Moleküle in flüssiger oder gasförmiger Phase vor.

2.5.3 Chemische Reaktionen

Als weiterer Mechanismus, aufgrund dessen Druckänderungen denkbar sind, können chemische Reaktionen betrachtet werden.

Einerseits kann die oben erwähnte chemische Adsorption auftreten, bei der Teilchen des Dämpfungsgases durch chemische Bindungen an einer festen Oberfläche haften. Von chemischer Adsorption im engeren Sinn ist jedoch nur bei einer Monolage adsorbierter Teilchen die Rede, da die chemischen Bindungskräfte nur unmittelbar zwischen dem Substrat und dieser ersten Monolage wirken können [53].

Neben chemischer Adsorption könnten andererseits auch chemische Reaktionen des eingeschlossenen Gases mit reaktiven Überresten aus vorhergehenden Prozessschritten zu einer Veränderung der Dämpfungsatmosphäre führen. Veränderungen der Gaszusammensetzung durch chemische Reaktionen können neben einer Änderung des Kaverneninnendruckes auch veränderte Dämpfungseigenschaften des Gases zur Folge haben.

2.5.4 Diffusion

Auch Gasdiffusion durch die Kavernenwände kann die Dämpfungsatmosphäre verändern. Sowohl vom Kaverneninneren nach außen als auch umgekehrt ist Diffusion denkbar, die den Druck oder die Zusammensetzung des eingeschlossenen Gases beeinflusst.

Als Diffusion wird der Vorgang des Konzentrationsausgleichs durch einen Massenstrom zwischen Bereichen mit unterschiedlichen Konzentrationen eines Stoffes bezeichnet [59]. In einem Konzentrationsgradienten bewegen sich Teilchen von einem Bereich höherer Konzentration zu einem Bereich niedrigerer Konzentration, bis sich die Konzentrationen in den verschiedenen Bereichen angeglichen haben [60].

Diffusion in Feststoffen kommt durch Bewegung von Teilchen im Matrixmaterial zustande, die im Atomgitter des Feststoffs von einem Ort zu einem benachbarten springen. Ein Diffusionsprozess ist das Ergebnis vieler Einzelsprünge von Teilchen der diffundierenden Spezies.

Bei Diffusionsphänomenen in Feststoffen lassen sich verschiedene Arten der Diffusion unterscheiden. Dazu gehören Diffusion von Substitutionsatomen im Wirtsgitter, Diffusion über Leerstellen oder interstitielle Diffusion von kleinen Fremdatomen wie Wasserstoff über Zwischengitterplätze. Die interstitielle Diffusion läuft schneller ab als die Diffusion über Gitterdefekte, da der notwendige Energieaufwand für die Sprünge geringer ist [61].

In Gläsern, Polykristallen mit sehr schwacher Textur und in kubischen Kristallen ist die Diffusion isotrop, so auch in Aluminium, Silizium und Germanium.

In Polykristallen spielt darüber hinaus Korngrenzendiffusion eine Rolle, die deutlich schneller abläuft als die Gitterdiffusion in kristallinen Körnern, da an Korngrenzen vermehrt Gitterdefekte vorliegen [61].

Im Fall der untersuchten Sensoren können sich diffundierende Teilchen zudem zum Beispiel entlang der Grenzen zwischen Silizium- und Siliziumoxidschichten (Grenzflächendiffusion) oder durch das Volumen der Oxidschichten (Volumendiffusion) bewegen [62].

Für den Vorgang stationärer Diffusion gilt das 1. Fick'sche Gesetz [63], das auch auf den Diffusionsvorgang von Wasserstoff angewendet werden kann [64], der im Folgenden von Bedeutung ist. Dieses Gesetz beschreibt den Diffusionsstrom j_D , der sich einstellt, wenn zwischen zwei betrachteten Volumenabschnitten ein Konzentrationsunterschied besteht. Der Teilchenstrom ist ein Maß für die Anzahl der Teilchen, die pro Sekunde durch eine definierte Fläche am Ort x diffundieren [65] und wird mithilfe der örtlichen Änderung der Konzentration und des Diffusionskoeffizienten D angegeben:

$$j_D = -D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (2.5)$$

Bei Diffusionsvorgängen unter nichtstationären Bedingungen kommt das 2. Fick'sche Gesetz zur Anwendung [63]:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad (2.6)$$

Der Diffusionskoeffizient D ist material- und temperaturabhängig und kann folgendermaßen beschrieben werden, wobei D_0 eine materialabhängige Konstante, E_A die Aktivierungsenergie des Diffusionsprozesses, k_B die Boltzmannkonstante und T die absolute Temperatur sind [63]:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_A}{k_B T}} \quad (2.7)$$

Der Diffusionskoeffizient D wird durch die Rate und Länge der Teilchensprünge bestimmt, abhängig von Kristallstruktur der Matrix, Größe und chemischen Eigenschaften der diffundierenden Partikel und davon, ob die Teilchen aufgrund von Gitterdefekten in der Kristallstruktur diffundieren oder über Zwischengitterplätze. Diffusion ist zudem abhängig von der Temperatur, häufig dem Arrheniusgesetz folgend, und deutlich weniger stark auch vom Druck [61]. Mit der Temperatur steigt der Diffusionskoeffizient an, wie in Abb. 2.14 für verschiedene Elemente in SiO_2 dargestellt.

Diffusion in kristallinen und amorphen Feststoffen

Während sich Teilchen in Gasen zufällig durch den Raum bewegen, schränkt das Kristallgitter die möglichen Plätze und Wege diffundierender Teilchen in Feststoffen ein. Diffusion tritt deshalb häufig in Verbindung mit Gitterdefekten wie Punktdefekten, Leerstellen, Zwischengitteratomen, Versetzungen, Korngrenzen, Phasengrenzen und freie Oberflächen auf. Bei Halbleitern ist die Defektkonzentration aufgrund ihrer kovalenten Bindungen im Allgemeinen um Größenordnungen geringer als bei Metallen oder ionischen Kristallen. Die kovalenten Bindungen führen dazu, dass im thermischen Gleichgewicht eine hohe Energie zur Bildung von Defekten notwendig ist, sodass die Löslichkeit

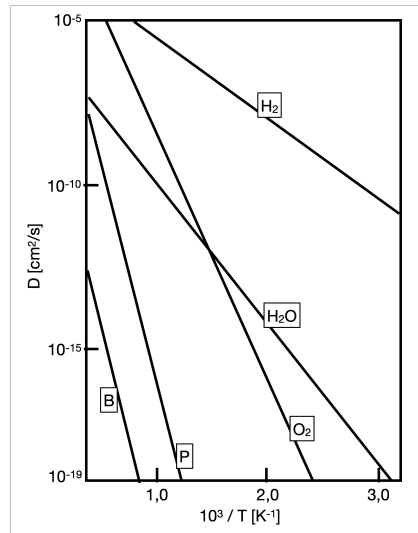


Abb. 2.14: Temperaturabhängigkeit von Diffusionskoeffizienten verschiedener Elemente in SiO_2 ; Abbildung nach [66].

der meisten Fremdatome nur im ppm-Bereich liegt. Bei polykristallinem Silizium sind Versetzungen, Korngrenzen, Leerstellen und Zwischengitteratome, die für Eigen- und Fremdatomdiffusion unentbehrlich sind, auch im thermischen Gleichgewicht vorhanden. Einkristallines Silizium weist dagegen nahezu keine Defekte auf. Nur freie Oberflächen können als Senken oder Quellen für Punktdefekte fungieren.

Diffusion in amorphen Feststoffen läuft zufälliger ab als in Kristallen. Die physikalischen Eigenschaften von amorphen Materialien sind isotrop, die Gaspermeabilität ist abhängig von den Eigenschaften der Zwischengitterplätze in der Molekülstruktur. In einigen Fällen sind chemische Reaktionen der diffundierenden Teilchen mit dem Matrixmaterial möglich, die das Diffusionsverhalten ebenfalls beeinflussen. Wasserstoff kann in Siliziumoxid beispielsweise Hydroxyl- und Silangruppen bilden [61]. Für die Versuche in dieser Arbeit mit Fokus auf Diffusionsprozessen wurden Testsensoren verwendet, die zuvor

im Verlauf der Prozessierung unter anderem bereits wasserstoffhaltigen Substanzen ausgesetzt waren. Zusätzliche Einflüsse aufgrund von Reaktionen von SiO_2 mit Wasserstoff werden bei diesen Versuchen daher als vernachlässigbar betrachtet. Die Gaspermeabilität in SiO_2 nimmt mit steigendem Durchmesser der diffundierenden Atome oder Moleküle ab. H_2 mit einem Durchmesser von 0,25 nm ist daher eines der am leichtesten in SiO_2 diffundierenden Elemente [67].

3 Methoden

Um die Einflüsse auf den Innendruck von Siliziumkavernen zu untersuchen, wurden verschiedene teils eigens für die Versuche entwickelte Methoden eingesetzt. In den Abschnitten 3.1 bis 3.6 werden die einzelnen Methoden erläutert. In welchen Kombinationen die Methoden bei den verschiedenen Versuchen angewendet wurden, ist anschließend im Kapitel 4 beschrieben.

3.1 Testsystem

Das Testsystem, das für den Großteil der Versuche zur Druckstabilität in Siliziumkavernen gewählt wurde, ist ein voll funktionaler mikromechanischer Drehratensensor, dessen Funktionsweise in Abschnitt 2.2.2 beschrieben ist. Die Sensorstrukturen befinden sich in einer Siliziumkaverne, in der ein Gas eingeschlossen sein kann, das die Dämpfung der resonanten Strukturen beeinflusst. Das Ziel der Versuche in dieser Arbeit ist es, Erkenntnisse über Einflüsse auf die Stabilität des Gasdrucks zu gewinnen, der in der Kaverne herrscht.

Der Drehratensensor eignet sich sehr gut als Testsystem für Untersuchungen, deren Grundlage der Kaverneninnendruck ist, da nach entsprechender Kalibrierung über die Güte (s. Abschnitt 2.4.1) Rückschlüsse auf den Innendruck der Sensorkaverne möglich sind [42, 68]. Die Güte des Drehratensensors ist sehr empfindlich gegenüber Änderungen des Kaverneninnendrucks. Anhand der Gütemessungen in dieser Arbeit sind im relevanten Messbereich Druckänderungen mit einer Genauigkeit von $4,5 \cdot 10^{-3}$ mbar bestimmbar (Information zur Messgenauigkeit von C. Cervetti, Bosch). Da die Gütemessung ein zerstörungsfreies Verfahren ist, können die Sensoren beliebig oft nachgemessen

und auf diese Weise verschiedene Einflussfaktoren auf den Innendruck untersucht werden. Zudem ist die Gütemessung automatisierbar, sodass auf jedem Wafer mehrere Tausend Chips ausgewertet werden können und eine statistisch relevante Zahl von Messergebnissen erhoben werden kann.

Auch Beschleunigungssensoren wurden für Versuche zur Druckstabilität in Erwägung gezogen, doch da sie durch einen höheren Druckeinschluss stärker gedämpft sind als resonante Drehratensensoren, fallen kleine Druckänderungen deutlich weniger stark ins Gewicht. Die geringere Empfindlichkeit der Beschleunigungssensoren führt dazu, dass sehr kleine Druckänderungen nicht detektiert werden können. Die Drehratensensoren sind somit das am besten geeignete Testsystem, um die Druckstabilität in Siliziumkavernen zu untersuchen. Durch die zunehmende Miniaturisierung zukünftiger MEMS-Produkte und immer kleiner werdende Kavernenvolumina steigen auch die Anforderungen an die Stabilität der Gasmenge. Durch die hohe Empfindlichkeit der Drehratensensoren gegenüber Druckänderungen sind sie von den Auswirkungen der zukünftigen Miniaturisierung besonders betroffen.

Andere bekannte Verfahren zur Druckmessung mittels Manometern, Vakuummetern, Barometern oder Drucksensoren sind für die hier notwendige Messung des Innendrucks in winzigen Siliziumkavernen mit Volumina im Nanoliterbereich nicht geeignet. Daher wurde in dieser Arbeit die Gütemessung als Methode zur Bestimmung des Innendrucks verwendet.

3.1.1 Zielsystem: Kombi-MEMS

Das Zielsystem, auf das die Untersuchungen dieser Arbeit ausgerichtet sind, ist kein einfacher Drehratensensor, sondern ein „Kombi-MEMS“, bestehend aus einem Drehratensensor und einem Beschleunigungssensor auf einem gemeinsamen Chip. Eine Besonderheit bei der Herstellung dieser Kombi-MEMS-Chips ist die notwendige Einstellung unterschiedlicher Innendrucke in den beiden Kavernen aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen, die Drehraten- und Beschleunigungssensor an den Innendruck stellen.

Eine der zukünftig immer stärker wachsenden Herausforderungen ist die Druckstabilität in der Kaverne des Drehratensensors über die gesamte Lebensdauer des Kombi-MEMS-Chips. Die Druckstabilität kann durch verschiedene Mechanismen beeinträchtigt werden, die in Abschnitt 2.5 beschrieben sind.

Eine Besonderheit der Kombi-MEMS-Chips gegenüber einfachen Drehratensensoren bezüglich der Kavernendruckstabilität besteht darin, dass Diffusionsprozesse nicht nur durch die Chipaußenseiten, sondern auch durch die Trennwand zwischen Drehraten- und Beschleunigungssensorkaverne stattfinden können (Schema s. Abb. 2.13). Für die Untersuchung von Diffusionsprozessen zwischen benachbarten Kavernen eines Kombi-MEMS-Chips reichen einfache Drehratensensorchips nicht aus. Deshalb werden für einige Versuche Kombi-MEMS-Chips verwendet.

Um verschiedene Kaverneninnendrucke in benachbarten Kavernen auf einem Wafer zu realisieren, sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar:

1. Die Sensorkavernen werden in einem zweistufigen Prozess verschlossen: zuerst die Drehratensensoren mit niedrigem Druckeinschluss und anschließend die Beschleunigungssensoren mit höherem Druck, oder umgekehrt.
2. Beide Sensorkavernen werden mit einem einheitlichen Druck gleichzeitig verschlossen. Dann wird die Sensorkaverne, die einen von der anfänglichen Druckeinstellung abweichenden Innendruck erhalten soll, nochmals geöffnet und bei Zieldruck erneut verschlossen. Sowohl der Drehraten-, als auch der Beschleunigungssensor kommen für das erneute Öffnen und Wiederverschließen in Frage.
3. Beide Kavernen werden mit einem einheitlichen Druck verschlossen. Die Kaverne, die einen niedrigeren Innendruck aufweisen soll, enthält einen sogenannten Getter, der nach einer thermischen Aktivierung Gase bindet und die Kaverne auf diese Weise leerpumpt. Gängige Gettermaterialien nehmen unter anderem Stickstoff oder Wasserstoff auf, jedoch keine Edelgase.

4. Beide Kavernen werden mit einem einheitlichen niedrigen Druck verschlossen. Die Kaverne, die einen höheren Innendruck aufweisen soll, enthält ein ausgasendes Material, das Substanzen freisetzt, die zu einem höheren Druck in der Kaverne führen.

Für die Versuche mit Kombi-MEMS in dieser Arbeit wurde vorrangig die zweite Variante verwendet, beschrieben im Abschnitt 3.2.3. Auch zur Umsetzung der ersten Variante wurden Versuche mit einem gestaffelten Bondprozess durchgeführt, s. Abschnitt 3.2.2.

3.1.2 Modellsystem: einzelner Drehratensensor

Zur Untersuchung all derjenigen Effekte, die nicht auf Wechselwirkungen zwischen benachbarten Kavernen zurückzuführen sind, ist nicht unbedingt ein Kombi-MEMS-Chip mit zwei Kavernen notwendig. Effekte aufgrund von Desorption oder Diffusion durch die Kavernenaußenwand (nicht zwischen benachbarten Kavernen) sind bei einem vereinfachten System besser zu beobachten. Zur besseren Darstellung dieser Effekte wurde daher ein einfacher Drehratensensor als Testsystem verwendet.

Für Versuche mit dem Ziel, Wechselwirkungen zwischen benachbarten Sensorkavernen mit deutlichen Druckunterschieden zu untersuchen, wurden dagegen Kombi-MEMS-Chips eingesetzt. Der Aufbau dieser Chips ist in Abschnitt 2.2.3 beschrieben.

Der Drehratensensortyp, der für einen Teil der Versuche in dieser Arbeit gewählt wurde, hat folgende Vorteile:

- Auswertung einer großen Anzahl von Chips möglich, da die elektrische Gütemessung auf Waferebene gut automatisierbar ist.
- Keine Überlagerung der Versuchsergebnisse mit Wechselwirkungseffekten durch benachbarte Beschleunigungssensorkaverne, dadurch lassen sich beobachtete Effekte besser einordnen.

- Herstellungsprozess im Vergleich mit Kombi-MEMS weniger aufwendig durch geringere Anzahl an Prozessschritten, da nur einer und nicht zwei Kavernendrucke pro Chip realisiert werden müssen.

Da mit zunehmender Miniaturisierung von MEMS-Sensoren auch die Anforderungen an die Stabilität der eingeschlossenen Gasmenge wachsen, die sich in den Kavernen einfacher Drehratensensoren befindet und den Innendruck bestimmt, ist es ohnehin sinnvoll, neben Kombi-MEMS auch alleinstehende Drehratensensoren zu untersuchen. Die Effekte, die bei einfachen Drehratensensoren auftreten, sind auf Kombi-MEMS-Chips übertragbar.

3.2 Einstellung des Innendrucks in Sensorkavernen

Zum Schutz vor Partikeln und zum Einschließen eines Dämpfungsgases, mit dem die gewünschten Dämpfungseigenschaften des Systems eingestellt werden können, wird der Drehratensensor verkappt, wie im Grundlagenkapitel 2.3.10 beschrieben. Zusätzliche Möglichkeiten der Druckeinstellung ergeben sich durch einen Wiederverschlussprozess und den Einsatz von Gettern. Beide Möglichkeiten sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

3.2.1 Konventionelles Waferbonden

Bei einem konventionellen Waferbondprozess, dessen Ablauf in Abschnitt 2.3.10 umrissen ist, erhalten alle Sensoren denselben Innendruck. Alle Chips werden zum selben Zeitpunkt verschlossen und nehmen den Innendruck an, der zu diesem Zeitpunkt in der Prozesskammer herrscht. Die Dämpfungsatmosphäre, die in diesem Bondprozess definiert wird, lässt sich ohne zusätzliche Prozessschritte nicht mehr gezielt verändern.

Der minimale realisierbare Kaverneninnendruck von Resonatoren, die in einem konventionellen Waferbondprozess verschlossen werden, ist durch Desorbate begrenzt, die während des Bondprozesses auftreten und deren Einschluss in die Sensorkavernen unvermeidlich ist. Der resultierende Innendruck nach dem

eutektischen Waferbonden ist aufgrund der Desorbate immer höher als der Druck, der beim Verschluss in der Bondkammer eingestellt war. Bei den Drehratensensoren, die für die Versuche in dieser Arbeit verwendet werden, liegt der resultierende Innendruck deshalb trotz Evakuierung der Bondkammer auf 10^{-3} mbar bei ca. 1 mbar, wie Versuchsergebnisse zeigen werden (s. Abschnitt 4.1). Noch niedrigere Kaverneninnendrucke werden mit dem eutektischen Bondprozess, der für die Herstellung der Versuchswafer in dieser Arbeit genutzt wird, nicht ohne Weiteres erreicht.

Auch Kombi-MEMS-Chips, bei denen zwei verschiedene Innendrucke auf einem Wafer notwendig sind, sind ohne ergänzende Prozessschritte nicht allein mit diesem Waferbondprozess realisierbar.

Eine Möglichkeit zum Einschluss unterschiedlicher Innendrucke auf einem Wafer ist das Bonden mithilfe eines modifizierten, zeitlich gestaffelten Bondprozesses in Kombination mit verschiedenen Bondrahmenhöhen, wie im folgenden Abschnitt beschrieben. Weitere Möglichkeiten, die über das Bonden hinausgehen, folgen anschließend.

3.2.2 Gestaffeltes Bonden

Um zwei verschiedene Innendrucke in benachbarten Kavernen in einem einzigen Bondprozess zu realisieren, wurde ein gestaffelter Bondprozess entwickelt und patentiert [69]. Die benachbarten Kavernen, in denen verschiedene Innendrucke realisiert werden sollen, besitzen verschiedene Bondrahmenhöhen. Mithilfe des neuartigen Bondprozessverlaufs ist es möglich, benachbarte Kavernen zu verschiedenen Zeitpunkten des Prozesses bei verschiedenen Druckeinstellungen zu verschließen.

Der Prozess läuft folgendermaßen ab, s. auch Darstellung in Abb. 3.1:

1. Zunächst werden nur diejenigen Kavernen mit einem Druck p_1 verschlossen, die mit erhöhten Bondrahmen versehen sind. Die Prozesstemperatur ist noch unterhalb des eutektischen Punktes der Bondrahmenmaterialien, sodass dieser erste Verschluss als eine Art „temporärer Thermokompressionsbond“ betrachtet werden kann.

2. Die Kavernen mit niedrigeren Bondrahmen sind noch immer offen, sodass hier jetzt ein Druckwechsel möglich ist, während die zuerst verschlossenen Kavernen den Druck p_1 halten.
3. Sobald in allen noch offenen Kavernen der zweite Druck p_2 herrscht, wird die volle Bondkraft auf die Wafer aufgebracht und die Temperatur über den eutektischen Punkt erhöht, sodass sämtliche Bondrahmen aufschmelzen und alle Chips eine eutektische Bondverbindung erhalten.

Die ersten Ergebnisse dieser Versuche waren vielversprechend, haben aber für die Produktion großer Stückzahlen den Nachteil, dass noch zu große Schwankungen des Innendrucks über einen Wafer auftreten [70]. Für eine Nutzung des gestaffelten Bondprozesses in größerem Maßstab sind daher weiterführende Untersuchungen notwendig.

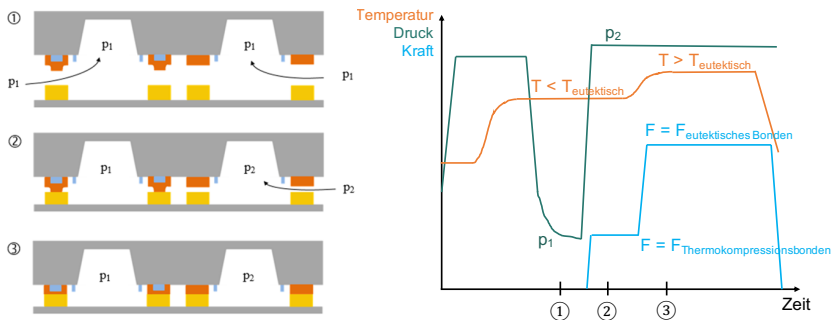


Abb. 3.1: Schema des gestaffelten Bondprozesses zum Einschließen von zwei verschiedenen Drücken in benachbarten Kavernen auf einem Wafer in drei Schritten (Bildquelle: Vortrag zu [71]).

1) Beide Kavernen sind noch geöffnet, Druck p_1 wird eingestellt. 2) Die Kavernen mit niedrigerer Bondrahmenhöhe schließen den Druck p_1 ein, während in den übrigen Kavernen ein Druckwechsel durchgeführt wird. 3) Sämtliche Kavernen werden eutektisch gebondet. In benachbarten Kavernen sind zwei verschiedene Drücke eingeschlossen.

3.2.3 Laser-Reseal

Da der gestaffelte Bondprozess Schwankungen über einen Wafer aufweist, die die Untersuchung der Innendruckstabilität erschweren können, fiel die Wahl zum Einschluss verschiedener Innendrucke für die Kombi-MEMS-Versuche dieser Arbeit auf ein anderes Verfahren, das im Folgenden als Reseal bezeichnet wird und in der Patentschrift [72] festgehalten ist. Die Einstellung der Kaverneinnendrucke benachbarter Kavernen läuft dabei in drei Schritten ab, wie in Abb. 3.2 veranschaulicht.

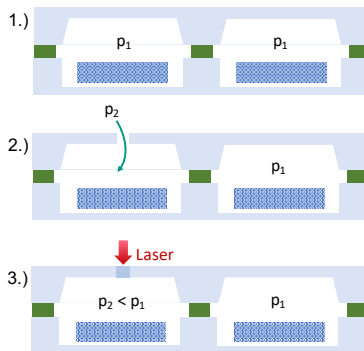


Abb. 3.2: Ablauf des Laser-Reseal-Prozesses zum Einschließen unterschiedlicher Kaverneinnendrucke in benachbarten Sensorkavernen.

1. Sensor- und Kappenwafer werden in einem eutektischen Bondprozess gebondet. Wie in Abschnitt 2.3.10 beschrieben, erhalten zunächst alle Kavernen denselben Innendruck.
2. In einem Trenchprozess (DRIE) wird die Kappe jedes Sensors, dessen Druck angepasst werden soll, mit einer Öffnung versehen, die eine Evakuierung der darunterliegenden Kaverne erlaubt.
3. Die Öffnungen werden mithilfe eines IR-Lasers unter dem niedrigen Innendruck, der für die Drehratensensoren erforderlich ist, wieder verschlossen. Hierbei wird das Silizium, das die Öffnung umgibt, durch den

Laserstrahl aufgeschmolzen. Anschließend verfestigt sich das Material und verschließt die Öffnung.

Bewährt hat sich das Vorgehen, beim Waferbonden den höheren der beiden notwendigen Drücke einzustellen, der für die Beschleunigungssensoren des Kombi-MEMS-Wafers erforderlich ist. Somit ist es möglich, im zweiten Schritt unerwünschte Ausgasungen aus den Drehratensensorkavernen zu entfernen, die aus dem Bondprozess stammen. Der Innendruck der sensibleren Drehratensensoren ist auf diese Weise präziser einstellbar.

Der Vorteil des beschriebenen Reseal-Prozesses liegt in der ausgezeichneten Kontrollierbarkeit des Kavernendrucks.

3.2.4 Getter

Eine weitere Möglichkeit der Druckeinstellung in Sensorkavernen ist der Einsatz von Gettern. Als Getter wird ein Material bezeichnet, das Flüssigkeiten, Gase oder Partikel bindet [73]. Im Fall der MEMS-Sensoren ist der Getter eine in die Kaverne integrierte Komponente, die reaktive Gase in der Kaverne aufnimmt und dadurch zur Verringerung oder Stabilisierung des Kavernendrucks beiträgt (Abb. 3.3). Etablierte Gettermaterialien sind unter anderem Titan [42], Zirkonium-Legierungen [74, 75] oder Aluminiumoxide [76]. Das passende

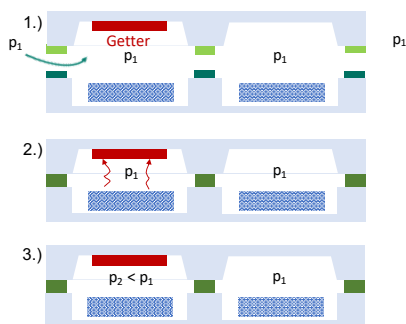


Abb. 3.3: Prinzip der Funktionsweise eines Getters in MEMS-Sensorkavernen zum Einschließen unterschiedlicher Kavernendrücke in benachbarten Kavernen.

Material wird je nach Anwendung ausgewählt. Zu den Gasen, die durch einen Getter gebunden werden können, gehört unter anderem Wasserstoff [77]. Die Gettermaterialien müssen vor der Verwendung thermisch aktiviert werden, um Gase adsorbieren zu können. Durch die thermische Behandlung werden angelagerte Moleküle entfernt, die zuvor für eine Sättigung des Getters oder die Passivierung der Oberfläche gesorgt haben [78]. In der Sensorherstellung wird die thermische Aktivierung häufig mit dem Waferbonden verbunden. Im Fall der oben beschriebenen Versuchschips, bei denen nach dem Waferbonden noch ein Laser-Reseal folgt, ist die Aktivierung während des Bondens nicht zielführend, da der Getter anschließend durch das Wiederöffnen der Kavernen Kontakt zur Umgebungsatmosphäre erhält und sofort gesättigt wird. Günstiger ist in diesem Fall die endgültige Aktivierung des Gettermaterials im Zuge des Laser-Reseals, bei dem die Kavernen endgültig verschlossen werden [79].

3.3 Bestimmung des realen Kaverneninnendrucks

Aufgrund von Desorbaten aus dem Bondprozess entspricht der Innendruck nach dem Waferbonden nicht dem Druck, der während des Bondprozesses in der Bondkammer herrscht. Auch wenn der eingestellte Druck während des Bondprozesses weit unter 1 mbar liegt, beträgt der resultierende Kaverneninnendruck nach dem Bonden bis zu mehreren Millibar, wie eine Kalibrierung zeigen wird (Abschnitt 4.3).

Der wahre Innendruck in Kavernen von ca. 150 nl Volumen, wie sie bei den verwendeten MEMS-Sensoren vorliegen, ist sehr schwer zu messen. Kein bekanntes Ex-situ-Druckmessverfahren ist dazu in der Lage, Drücke in derart kleinen Volumina zerstörungsfrei so genau zu messen, wie es für die Untersuchung von Druckänderungen unter bestimmten Bedingungen in der Siliziumkaverne eines MEMS-Bauteils notwendig ist. Deshalb wurde zur Bewertung der Innendrucke und ihrer Stabilität auf ein Verfahren zurückgegriffen, bei dem der Druck in Kavernen von Drehratensensoren über deren Güte bestimmt wird. Die Güte wird für jeden einzelnen Drehratensensorchip in einer elektrischen Charakter-

isierung ermittelt. Um von der gemessenen Güte auf den dazugehörigen Druck schließen zu können, sind Kalibrierungsmessungen für den verwendeten Sensortyp notwendig. Auf Grundlage dieser Messungen ist der Drehratensensor als Messsystem für den Innendruck nutzbar, der in der dazugehörigen Siliziumkaverne herrscht.

3.3.1 Drehratensensor als Messsystem: Kalibrierung

Zur Kalibrierung des Drehratensensors als Messsystem wurden in einem Vakuumprober auf Waferebene Gütemessungen an geöffneten Drehratensensoren durchgeführt. Mithilfe der Messergebnisse konnte für verschiedene Dämpfungsgase der Zusammenhang zwischen der elektrischen Güte der Sensoren und dem herrschenden Druck des jeweiligen Dämpfungsgases ermittelt werden. Abb. 3.4 zeigt den verwendeten Vakuumprober.

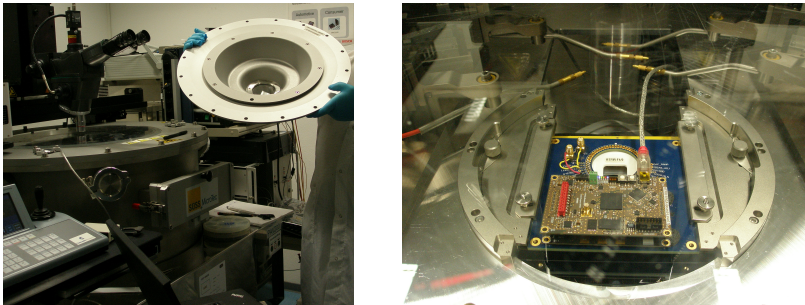


Abb. 3.4: Vakuumprober, in dem unverkappte oder wiedergeöffnete MEMS-Strukturen unter verschiedenen Dämpfungsatmosphären und Drücken elektrisch charakterisiert werden können. Linkes Bild: Vakuumkammer mit Mikroskop zur Waferausrichtung und Deckel der Kammer. Rechtes Bild: Mutterkarte mit Nadelspinne, mit der die Kontakte eines Chips kontaktiert werden. Der Wafer ist im Bild nicht sichtbar. Falls keine Nadelspinne verfügbar ist, können Kontaktpads eines Chips auch mit vier Einzelnadeln kontaktiert werden (oben im Bild).

In [42] wurden für entsprechende Kalibrierungsmessungen in einem Vakuumprober unverkappte Sensoren verwendet. Ein Einfluss der Kappe auf die Dämpfungseigenschaften des Sensors kann aufgrund der geringen Gesamtgröße des

Systems, bei dem der Abstand zwischen Kappen-Silizium und Sensormasse in einigen Fällen nur wenige Mikrometer beträgt, jedoch nicht ausgeschlossen werden. Um diesen Einfluss nicht zu vernachlässigen, wurden für die Kalibrierungsmessungen im Rahmen dieser Arbeit Drehratensensoren angefertigt, die zunächst in einem Waferbondprozess verkappt wurden. Anschließend wurden die Sensorkavernen in einem Trenchprozess an der Kappenseite mit einer Öffnung von wenigen Mikrometern Durchmesser versehen, die einen Gasaustausch in den Kavernen erlaubt. Auf diese Weise sind Gütemessungen bei verschiedenen Atmosphären möglich, bei denen auch der Einfluss der Verkappung auf das Strömungsverhalten des Dämpfungsgases in der Kaverne berücksichtigt ist. Für die Kalibrierung des Drehratensensors als Messsystem wurde die Güte unter Stickstoff-, Helium- und Neonatmosphäre für verschiedene Druckeinstellungen gemessen wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, um das Verhalten der Güte bei Dämpfungsgasen mit verschiedenen molaren Massen abzubilden.

3.3.2 Gütesimulation

Für eine Vorhersage der Antriebsgüte der Drehratensensoren bei verschiedenen Dämpfungsgasen und Gasdrücken wurde eine Simulation durchgeführt, die auf einem physikalisch basierten Mixed-Level-Ansatz von Sattler [80] beruht. Das Modell beschreibt die Dämpfung eines Sensors auf Grundlage der Reynolds-Gleichung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Dämpfungsmechanismen abhängig vom Druckbereich.

3.4 Beschleunigte Alterung durch Hochtemperaturlagerung

Die Anforderungen an die Mindestlebensdauer von MEMS-Sensoren liegen je nach Anwendung bei bis zu 15 Jahren (vgl. Abb. A.3 im Anhang). Bei neu entwickelten Sensoren ist es nicht möglich, diese Dauer abzuwarten, bevor sie auf den Markt kommen, trotzdem muss die Funktionsfähigkeit für die geforderte

Tab. 3.1: Lagerungsvarianten, die für Versuche zur beschleunigten Alterung von Sensoren genutzt wurden.

| Lagerungsart | Lagerungsdauer | Temperaturen |
|----------------|----------------|--------------|
| Hochtemperatur | 1000 h | 150 °C |
| Hochtemperatur | 240 h | 200 °C |
| Hochtemperatur | 120 h | 250 °C |
| Hochtemperatur | 24 h | 300 °C |

Dauer garantiert werden. Um Langzeiteffekte auf die MEMS-Sensoren abschätzen zu können, werden die Bauteile in verschiedenen Tests extremen Bedingungen ausgesetzt, die Alterungsprozesse beschleunigen. Zu diesen Tests gehören unter anderem Lagerungen in einer Umgebung mit sehr hoher Luftfeuchtigkeit, bei extremen Temperaturschwankungen oder Hochtemperaturlagerungen.

Für die Untersuchung von Einflüssen auf den Kaverneninnendruck haben sich vor allem Hochtemperaturlagerungen als hilfreich erwiesen, da sich hierdurch die Prozesse, die den Innendruck beeinflussen, am stärksten beschleunigen lassen und somit am besten zu beobachten sind. Die Tests, die für einen Großteil der Versuche in dieser Arbeit herangezogen wurden, sind aus einer für Halbleiterbauteile gängigen JEDEC-Norm abgeleitet [81]. Sie sehen die Lagerung der Sensoren für 1000 Stunden bei 150 °C in Luft vor. Die erhöhte Temperatur sorgt dafür, dass Alterungsprozesse beschleunigt ablaufen und Effekte beobachtet werden können, die unter Standardbedingungen erst nach längerer Zeit auffallen. Für die Beobachtung bestimmter Effekte sind höhere Lagerungstemperaturen über 150 °C sinnvoll. Für die Versuche wurden für höhere Temperaturen entsprechend der Übersicht in Tabelle 3.1 kürzere Lagerungsdauern gewählt, die aus gängigen Spezifikationen abgeleitet sind, um zu überprüfen, ob die zu beobachtenden Prozesse der Arrhenius-Gleichung folgend mit steigender Temperatur schneller ablaufen.

Mithilfe der Hochtemperaturlagerungen kann die Langzeitstabilität des Innendrucks der untersuchten Sensoren besser eingeschätzt werden. Probleme treten früher auf und können behoben werden, bevor sie zu Ausfällen im Feld führen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Hochtemperaturlagerungen für zahlreiche Versuche verwendet, da sie sich in Kombination mit verschiedenen Analysemöglichkeiten (z.B. Restgasanalysen) als gut geeignet erwiesen haben, um Einflüsse auf die Stabilität der Kaverneninnendrucke von Drehratensensoren zu untersuchen.

3.5 Untersuchung von Desorptionseffekten

Die folgenden Abschnitten behandeln Methoden, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurden, um Aufschluss darüber zu erhalten, ob und welche Gase aufgrund von Desorptionsprozessen in den Sensorkavernen auffindbar sind und an welcher Stelle im Sensoraufbau der Ursprung der Desorbate liegt.

3.5.1 Bestimmung des Kaverneninhalts: Restgasanalysen

Restgasanalysen können Informationen über die Zusammensetzung des Inhalts von MEMS-Sensorkavernen liefern. Für die Analyse müssen die Sensoren nach der Prozessierung vereinzelt werden und werden im Verlauf des Analyseverfahrens zerstört.

Zur Vorbereitung werden die sauberen Chips für 24 Stunden bei 70 °C im Ultrahochvakuum in der Probenkammer ausgeheizt, sodass sich Wasserreste großteils von der Oberfläche der Probe lösen und auch weitere Ausgasungen durch äußere Verunreinigungen bei der Analyse vernachlässigbar werden.

Anschließend wird die Sensorkaverne durch einen Dorn aufgebrochen. Der entweichende Gasinhalt wird abgesaugt und in einem Massenspektrometer analysiert. Für eine große Palette von möglichen Gasbestandteilen ist eine qualitative Bestimmung möglich, zu einigen vorkalibrierten Gasen können darüber hinaus quantitative Angaben gemacht werden.

Die Nachweisgrenze des verwendeten Massenspektrometers liegt für das untersuchte Kavernenvolumen von etwa 150 nl nach Angaben des Analyselabors im Fall von Wasserstoff bei $1,11 \cdot 10^7$ H₂-Molekülen. Kleinere Mengen können nicht mehr erfasst werden. Zudem ist Wasserstoff das am schwierigsten nachzuweisende Element, für weitere Gasarten ist die Messempfindlichkeit höher.

Messunsicherheiten ergeben sich auch aus der Beschaffenheit der Probe. Beim Aufbrechen der Kavernen entstehen Bruchflächen aus reinem Silizium, die gegebenenfalls mit Gasen reagieren können, die aus der Kaverne austreten. Es ist denkbar, dass auf diese Weise Sekundärstoffe entstehen, die das Ergebnis der Analyse beeinflussen, dieser Effekt lässt sich aber nicht verhindern. Die Bruchfläche muss aus diesem Grund so klein wie möglich sein.

Aufgrund der kleinen Kavernenvolumina von weniger als 150 nl und der winzigen analysierbaren Gasmengen ist bei der Analyse der Drehratensensoren vor allem die quantitative Bestimmung des Kaverneninhalts mit Unsicherheit behaftet. Die Restgasanalyse ist deshalb zwar hilfreich zur Unterstützung der Untersuchungen zu den Einflussfaktoren auf den Kaverneninnendruck, reicht aber nicht als alleiniges Werkzeug aus, um die erforderlichen Informationen zu liefern. Deshalb werden die Ergebnisse der Restgasanalyse immer in Zusammenhang mit weiteren Versuchsergebnissen betrachtet.

3.5.2 Testchips mit zusätzlichem Material

Um die Materialien des Bondrahmens auf ihre Bedeutung als Desorptionquellen hin zu untersuchen, wurden speziell dafür entworfene Testchips in Versuchen mit Hochtemperaturlagerungen verwendet.

Das Innere der Chips ist zweigeteilt, wie Abb. 3.5 zeigt. Sie enthalten neben einem voll funktionalen Drehratensensor ein Feld, das mit zusätzlichem Material belegt ist. Eine Lücke im Trennsteg, der bei einem Kombi-MEMS-Chips zwei Kavernen voneinander trennt, erlaubt einen Gasaustausch zwischen den beiden Abschnitten des Chips. Sollte sich der Kaverneninnendruck in einer beschleunigten Alterung etwa aufgrund von Desorbaten ändern, deren Ursprung

in dem zusätzlich vorhandenen Material liegt, lässt sich dies mithilfe einer Güteauswertung des Drehratensensors detektieren. Drei Varianten der Testchips mit zusätzlichem Material wurden untersucht, wobei das Feld mit zusätzlichem Material jeweils aus Aluminium, Germanium oder AlGe-Eutektikum bestand. Zusätzlich wurde ein Referenzchip verwendet, der bei gleichem Aufbau ohne zusätzliches Material hergestellt wurde.

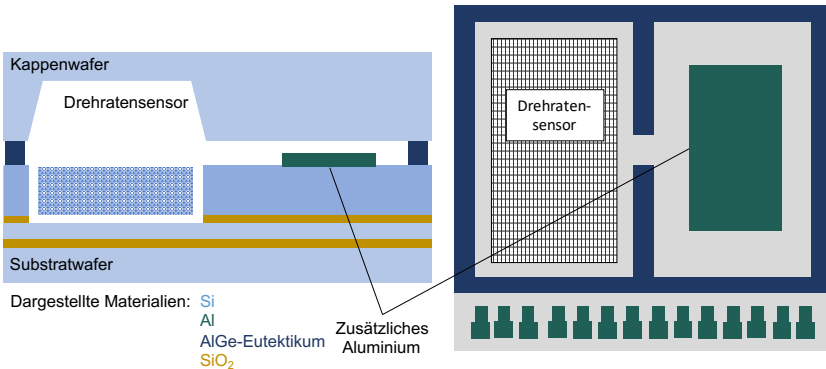


Abb. 3.5: Schema eines Versuchschips mit zusätzlichem Aluminium, das neben einem funktionalen Drehratensensor in der Sensorkaverne platziert wurde. Das gleiche Prinzip gilt für Testchips mit zusätzlichem Germanium, jedoch wurde das Material in diesem Fall aus prozesstechnischen Gründen auf der Kappenseite aufgebracht (nicht abgebildet).

3.5.3 Nukleare Reaktionsanalyse (NRA)

Die Nukleare Reaktionsanalyse (NRA) ist eine kernphysikalische Messmethode zur Materialanalyse. Eine Besonderheit der NRA besteht darin, dass mit ihrer Hilfe das Tiefenprofil der Wasserstoffkonzentration in einer Probe sichtbar gemacht werden kann. Da Wasserstoff das leichteste Element im Periodensystem ist, ist eine quantitative Analyse in ausreichender Genauigkeit mit anderen Methoden schwer möglich. Die NRA erlaubt Analysen in bis zu $3\ \mu\text{m}$ Schichttiefe mit einer Auflösung von bis zu unter 1 At.-%.

Für den Nachweis von Wasserstoff werden die Proben mit einem N^{15} -Ionenstrahl beschossen. Die Ionen reagieren mit den Atomkernen des Probenmaterials. Die

Kernreaktion ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N},\alpha\gamma){}^{12}\text{C}$, die für die Analyse genutzt wird, besitzt eine scharfe Resonanz bei 6,385 MeV [82]. Die N^{15} -Ionen lösen eine Kernreaktion mit Wasserstoff aus, wenn sie diese Einschussenergie aufweisen. Davon abweichende Einschussenergien bewirken keine Kernreaktion. Findet die Kernreaktion statt, führt sie zur Emission von γ -Strahlung mit 4,43 MeV, die wiederum detektiert werden kann. Die Anzahl der detektierten Reaktionsprodukte erlaubt Rückschlüsse über die Häufigkeit von Wasserstoffatomen im Probenmaterial [83].

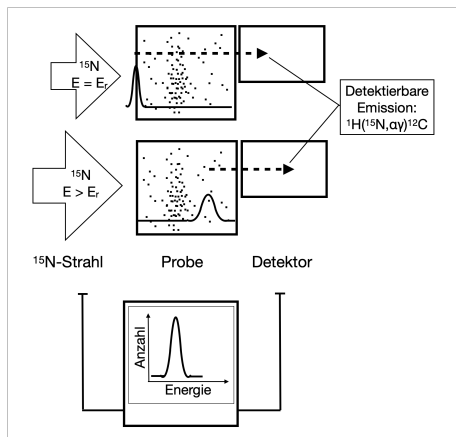


Abb. 3.6: Prinzip der Nuklearen Reaktionsanalyse (NRA), mit der ein Tiefenprofil der Wasserstoffkonzentration in einer Probe ermittelt werden kann; Abbildung nach [82].

Das Tiefenprofil der Wasserstoffkonzentration ist durch den Beschuss der Probe mit verschiedenen Einschussenergien ermittelbar (siehe Abb. 3.6). Haben die Ionen eine Einschussenergie von 6,385 MeV, findet die Kernreaktion an der Oberfläche der Probe statt. Ist die Einschussenergie eines N^{15} -Ions dagegen größer als 6,385 MeV, erreicht das Projektil-Ion eine größere Tiefe und die Kernreaktion findet erst statt, wenn das Ion im Probenmaterial auf eine Energie von 6,385 MeV abgebremst wurde [84]. Somit kann die Wasserstoffkonzentration

mithilfe verschiedener Einschussenergien nicht nur an der Probenoberfläche, sondern auch im Innern einer Schicht ermittelt werden.

Mithilfe einer NRA kann der Wasserstoff in einer Schichttiefe von bis zu mehreren Mikrometern nachgewiesen werden. Andere Analyseverfahren sind nur für die Analyse von Schichtoberflächen geeignet oder nicht empfindlich genug, um die geringe Wasserstoffkonzentration sichtbar zu machen, wie sie bei den Versuchen in dieser Arbeit zu erwarten sind [84].

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden in einer Nuklearen Reaktionsanalyse verschiedene Proben auf ihren Wasserstoffgehalt hin überprüft. Die Analyse wurde am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) durchgeführt. An der verwendeten Anlage kann Wasserstoff mit einer Messemptindlichkeit im Bereich von 0,1 At.-% erfasst werden [85].

Für die Proben wurden vollflächig beschichtete Siliziumwafer angefertigt, bei denen die Wasserstoffkonzentration in der jeweiligen Beschichtung untersucht wurde. Eine Übersicht der Proben zeigt Tabelle 3.2. Die Verwendung der Proben für bestimmte Fragestellungen bis auf LPCVD-Si₃N₄ ist in Kapitel 4 erläutert. LPCVD-Si₃N₄ findet in den Sensoren keine Verwendung, doch da hier bekanntermaßen Wasserstoffeinlagerungen vorliegen, wurde diese Probe als Referenz hinzugefügt.

3.5.4 Thermodesorption-Massenspektrometrie (TD-MS)

Eine Methode, mit der desorbierende Gase abhängig von der herrschenden Temperatur detektiert werden können, ist die Thermodesorption-Massenspektrometrie (TD-MS). Diese thermische Analysemethode hat zum Ziel, während des Aufheizprozesses einer Probe abhängig von der Temperatur ausgasende Substanzen mithilfe eines Massenspektrometers zu bestimmen [86].

Eine Erweiterung dieser Methode ist die thermogravimetrische Massenspektrometrie (TG-MS), bei der nicht nur die ausgasenden Spezies, sondern auch Masseänderungen der Probe während des Aufheizens detektiert werden. Durch die Kombination der quantitativen Informationen über Gewichtsänderungen der

Tab. 3.2: Proben, die in einer NRA analysiert wurden. Die Materialien waren jeweils vollflächig auf einem Siliziumwafer aufgebracht. Das Substrat hat auf die Messung keinen Einfluss.

| Material | Dicke [μm] | Temperung |
|--------------------------------|-------------------------|--|
| Thermisches SiO_2 | 1,7 | – |
| Thermisches SiO_2 | 1,7 | 950°C, 3 h (N_2 -Atmosphäre) |
| Ge | 0,8 | – |
| Ge | 0,8 | 600°C, 24 h (Luft) |
| AlCu | 1,35 | – |
| AlCu, mit HF behandelt | 1,35 | – |
| TEOS- SiO_2 | 1,8 | – |
| LPCVD- Si_3N_4 | 0,2 | – |

Probe und die qualitativen Informationen über Reaktionsprodukte von Verdampfung oder Zersetzung liefert die Analyse ein umfassendes Bild von Probenbestandteilen bei verschiedenen Temperaturen [87].

3.5.5 Variation der Bonddauer

Zur Untersuchung von Vorgängen in den Sensorkavernen während des Waferbondprozesses wurde ein Versuch entwickelt, bei dem die Haltedauer der Höchsttemperatur des Bondprozesses variiert wurde. Die Höchsttemperatur oder Bondtemperatur ist die Temperatur oberhalb des eutektischen Punktes kurz vor Ende des Prozesses, bei der die eutektische Reaktion der Bondrahmenmaterialien stattfindet. Das Temperaturplateau ist in Abbildung 3.7 mit $T > T_{\text{eutektisch}}$ gekennzeichnet. Durch die Variation der Bonddauer ist es möglich, Rückschlüsse über den Zeitpunkt des Ausgasens von Desorbaten in den Kavernen zu ziehen, die sich während dieses Temperaturplateaus in den Kavernen sammeln. Eine ausführlichere Beschreibung des Waferbondens findet sich in Abschnitt 2.3.10. Für die Versuche mit verlängertem Bondtemperaturplateau wurden KombiMEMS-Wafer verwendet, die mit dem für Beschleunigungssensoren vorgese-

henen höheren Stickstoffdruck (über 100 mbar) gebondet wurden. In einem Reseal-Prozess wurden anschließend die Drehratensensorkavernen erneut geöffnet, ausgeheizt, Desorbate abgepumpt und die Kavernen mit einem Stickstoffdruck von ca. 0,25 mbar (Kavernendruck bei Raumtemperatur, der sich den Prozesseinstellungen entsprechend ergibt) wieder verschlossen. Die Drehratensensorkavernen, deren Kaverneninnendruck mithilfe einer Gütemessung auswertbar ist, sind durch die Evakuierung im Reseal-Prozess weitgehend von Desorbaten aus dem Bondprozess gereinigt, während die gleichen Desorbate in den benachbarten Kavernen der Beschleunigungssensoren weiterhin eingeschlossen bleiben.

In einer Hochtemperaturlagerung zur beschleunigten Alterung kann anschließend beobachtet werden, ob abhängig von der Dauer des Bondtemperaturplateaus eines Wafers unterschiedlich starke Druckänderungen in den Drehratensensorkavernen auftreten. Die Unterschiede können gegebenenfalls der Diffusion von Desorbaten aus der Beschleunigungssensor- in die Drehratensensorkaverne zugeschrieben werden. Falls die Menge der Desorbate in den nicht gereinigten Beschleunigungssensorkavernen mit der Dauer der Bondtemperaturplateaus steigt, kann dies anhand der Druckänderungen in der Drehratensensorkaverne sichtbar gemacht werden. Diese entstehen, wenn Desorbate vom Beschleunigungs- zum Drehratensensor diffundieren.

Wenn die Menge der Desorbate dagegen nicht mit längerer Bonddauer ansteigt, sind auch keine Unterschiede zwischen den Druckänderungen nach verschiedenen Bondvarianten erkennbar. Dies wäre wiederum ein Hinweis darauf, dass die Desorbate nicht kontinuierlich während des gesamten Temperaturplateaus, sondern nur einmalig am Anfang des Plateaus ausgasen.

3.5.6 Ausheizen vor Verschluss

Bei weiteren Versuchen mit dem Ziel, Informationen über Desorptionsprozesse zu gewinnen, wurden Wafer bei verschiedenen Prozessen sowohl vor dem Einlegen in die Prozesskammer (mit Bruch des Vakuums), als auch „in-situ“, direkt in der Prozesskammer ohne Bruch des Vakuums, einem Ausheizschritt unterzogen.

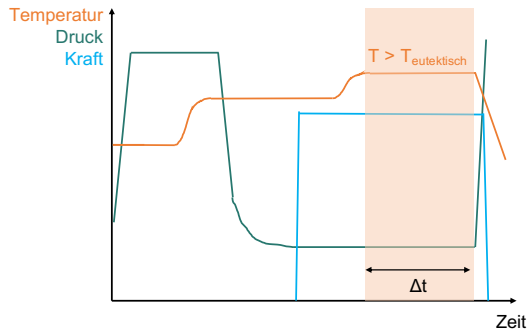


Abb. 3.7: Schematischer Verlauf eines eutektischen Waferbondprozesses. Der farbig hinterlegte Bereich markiert die Dauer Δt des Temperaturplateaus, bei dem die Temperatur oberhalb des eutektischen Punktes liegt.

Zu den gewählten Methoden zum „In-situ“-Ausheizen gehört das Waferbonden mit integrierten Abstandshaltern, um eine gründlichere Evakuierung der Chips zu ermöglichen, zudem wurden Versuche zu einer Ausheizphase vor dem Laser-Reseal sowie Versuche zum Einfluss der Reihenfolge, in der die Kavernen eines Wafers im Zuge des Reseal-Prozesses verschlossen werden, durchgeführt. Die Vorgehensweisen sind im Folgenden beschrieben.

Ausheizen im Bonder mit integrierten Abstandshaltern

Im Rahmen des Waferbondprozesses wird üblicherweise der Druck eingestellt, der nach Verschluss in den Sensorkavernen herrschen soll, sofern nicht ein weiterer Schritt im Prozessverlauf diese Funktion übernimmt (z.B. ein Laser-Reseal-Prozess). Soll der Innendruck der Sensoren wie im Fall von Drehratensensoren besonders gering sein, müssen die Kavernen vor dem Verschluss evakuiert werden. Da damit gerechnet werden muss, dass während oder nach dem eutektischen Aufschmelzen der Bondrahmen Desorbate freigesetzt werden, die anschließend in den Kavernen eingeschlossen bleiben und den Druck bestimmen, kann es sinnvoll sein, die Wafer vor dem endgültigen Verschluss zu tempern. Da der Effekt des Temperns nur dann voll ausgenutzt werden kann, wenn das Vakuum

zwischen Tempern und Verschluss nicht mehr gebrochen wird, müssen die Versuchswafer in dieser Arbeit, die einem solchen Tempersschritt vor dem Verschluss beim Bonden unterzogen werden sollen, zunächst zueinander ausgerichtet und dann in der Bondkammer getempert werden. Um den Effekt des Temperns zu maximieren, können sogenannte Flags eingesetzt werden. Die Flags sind meist Plättchen, die am Waferrand zwischen die Wafer gelegt werden und sie auf Abstand halten, bis sie kurz vor dem endgültigen Verschluss mechanisch entfernt werden. Dieses Verfahren ist sehr fehleranfällig, da die bereits zueinander ausgerichteten Wafer beim Entfernen der Flags häufig wieder verrutschen und ein Versatz entsteht. Für die Wafer in dieser Arbeit wurde deshalb ein neuartiges Verfahren herangezogen, bei dem die Flags in die Strukturen auf dem Wafer integriert sind und nicht entfernt werden müssen, sondern auf dem Wafer verbleiben können [88, 89]. Eine schematische Darstellung der verwendeten Abstandshalter zeigt Abb. 3.8. Das Prinzip dieser Abstandshalter ähnelt dem, das in Abschnitt 3.2.2 zum gestaffelten Bonden zur Sprache kommt. Diesmal sind die Abstandshalter jedoch nicht umlaufend, sondern nur an wenigen Punkten um die Kavernen herum angeordnet. In beiden Fällen werden die Chips, deren Bondrahmen zunächst nicht miteinander in Kontakt kommen sollen, mit zusätzlichen Oxidstrukturen versehen, die als Abstandshalter fungieren.

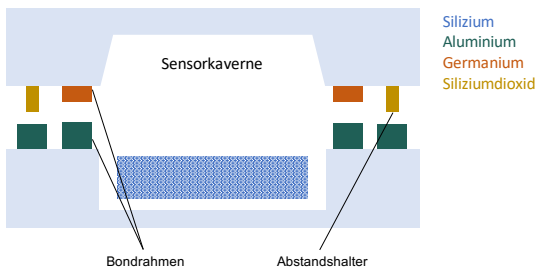


Abb. 3.8: Schematische Darstellung eines Chips mit integrierten Abstandshaltern, die ein Ausheizen der Strukturen im Rahmen des eutektischen Bondprozesses ermöglichen.

Ausheizphase vor Wiederverschluss bei Kombi-MEMS

Eine weitere Möglichkeit, die Kavernen auszuheizen, ist nutzbar, wenn die Sensoren nach dem Bonden erneut geöffnet werden, um in einem Reseal-Prozess endgültig verschlossen zu werden. Vor dem Wiederverschluss mittels eines Lasers können die Wafer in der Prozesskammer ebenso ausgeheizt werden wie in der oben beschriebenen Variante beim Bonden. Entscheidend ist, dass sich nach dem Ausheizschritt ohne Bruch des Vakuums das Verschließen der Kavernen anschließt.

Untersucht wurden hier verschiedene Dauern und Temperaturen des Ausheizens sowie verschiedene Varianten des Spülens der Prozesskammer mit Stickstoff zum Entfernen von Desorbaten.

Einfluss der Reihenfolge des Wiederverschlusses (Laserreihenfolge)

Neben einem Ausheizschritt vor dem Verschluss der Sensorkavernen mittels eines Lasers wurde der Einfluss der Dauer betrachtet, die bereits verschlossene Chips noch bei hohen Temperaturen in der Prozesskammer verbringen, bis alle Chips auf dem gesamten Wafer verschlossen sind. Da beim Laser-Reseal nur ein Laser verwendet wurde, konnte nur ein Chip nach dem anderen verschlossen werden, sodass sich aufgrund der Verzögerung zwischen den zuerst und den zuletzt verschlossenen Chips Unterschiede durch eingeschlossene Desorbate ergeben können. Untersucht wurden verschiedene Varianten von Laserreihenfolgen und Gesamtprozessdauern.

3.6 Untersuchung von Diffusionseffekten

Um neben den Ergebnissen zur Herkunft von Desorbaten in den Sensorkavernen der Versuchswafer auch Erkenntnisse darüber zu gewinnen, in welchem Umfang und über welche Pfade die Gase aus den Kavernen heraus, zwischen benachbarten Kavernen oder in Kavernen hinein diffundieren können, wurden die folgenden Methoden verwendet.

3.6.1 Angesägte Wafer

Um Diffusionseffekte durch den Schichtaufbau in seiner Gesamtheit, der die Seitenwände eines Drehratensensorchips bildet, auf Waferebene zu untersuchen und vom Einfluss der ebenfalls zu erwartenden Desorptionseffekte trennen zu können, wurde eine Methode entwickelt, bei der ein gebondeter Wafer mithilfe eines Diamantsägeblatts auf der Kappenseite angesägt wird. Das Ansägen erfolgt auf den Sägelinien, die für die spätere Vereinzelung der Chips vorgesehen sind. Der Wafer wird dabei nicht vollständig durchtrennt, sondern liegt nach dem Ansägen weiterhin in einem Stück vor. Dies hat den Vorteil, dass sowohl vor als auch nach einer beschleunigten Alterung Messungen auf Waferebene und die Auswertung mehrerer Hundert Chips möglich sind.

Die Chips in den angesägten Waferbereichen erhalten durch das Ansägen über ihre Seitenwände Kontakt zur Umgebungsatmosphäre, sodass Diffusionseffekte unter realistischen Bedingungen von Chips nach dem Vereinzeln untersucht werden können, ohne dass auf die Auswertung auf Waferebene verzichtet werden muss. Ist ein Wafer nicht angesägt, sind auch die potentiellen Diffusionspfade durch die Chipseitenwände ungeöffnet und stehen somit nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung.

Eine schematische Darstellung des Querschnitts von zwei benachbarten Chips auf einem Wafer vor und nach dem Ansägen zeigt Abb. 3.9.

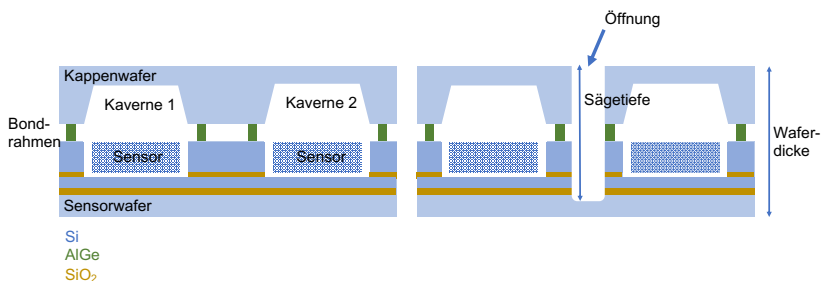


Abb. 3.9: Schematische Darstellung des Querschnitts von zwei benachbarten Chips auf einem Wafer, links vor und rechts nach dem Ansägen.

Das Ansägen der Versuchswafer ist in verschiedenen Varianten möglich. Für die Versuche in dieser Arbeit wurde in jeder Sägerichtung jeweils nur eine Hälfte des Wafers angesägt, wie in Abb. 3.10 schematisch dargestellt. Auf diese Weise lassen sich vier unterschiedlich angesägte Viertel auf einem Wafer unterscheiden. Die Gesamtlänge der durch Ansägen geöffneten Diffusionspfade pro Chip ist je nach Viertel unterschiedlich, sodass sich das Diffusionsverhalten abhängig von den verfügbaren Diffusionspfaden betrachten lässt. Durch den Vergleich der Druckänderungen bei Hochtemperaturlagerung bei Chips des ungesägten Viertels (unten links in Abb. 3.10) mit Chips auf dem Viertel, das in x- und y-Richtung angesägt ist (oben rechts in der Abbildung), kann der Einfluss von Diffusion auf den Kavernendruck quantifiziert werden.

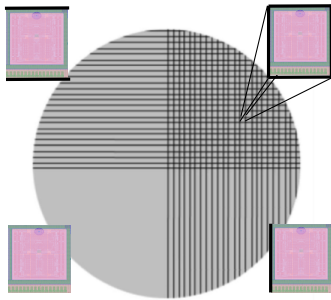


Abb. 3.10: Schematische Darstellung der Sägelinien auf einem Versuchswafer, bei dem in jeder Sägerichtung jeweils nur eine Hälfte des Wafers angesägt ist. Für jedes Viertel sind in der Abbildung eines Chips die Seiten schwarz markiert, die nach dem Ansägen Kontakt zur Umgebungsatmosphäre haben.

Dass diese Methode dazu geeignet ist, je nach Ansägevariante der verschiedenen Viertel Diffusion in unterschiedlichem Ausmaß zu erlauben, wurde anhand von Hochtemperaturlagerungen von viertelweise angesägten Wafern in Neon beziehungsweise Stickstoffatmosphäre bestätigt. Bei den Wafern, die in Neon gelagert waren, waren nach der Lagerung deutliche Unterschiede in den resultierenden Druckänderungen zu messen, die abhängig davon waren, auf welchem Viertel sich die gemessenen Chips befanden. Bei den Stickstoff-gelagerten

Wafern war diese Unterscheidung nicht möglich. Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass die kleineren Neon-Atome leichter diffundieren als die größeren Stickstoffmoleküle. Da in den Versuchen zu Diffusionsvorgängen in dieser Arbeit der Fokus auf Wasserstoffmolekülen liegt, die ebenfalls klein und in vielen Materialien hochdiffusiv sind, ist die Methode der viertelweise angesägten Wafer für die Untersuchungen geeignet.

Bei Hochtemperaturlagerung ungesägter Wafer und in den Chips des ungesägten Viertels bei der oben beschriebenen Waferpräparierung bleiben die Gase, die schon zuvor im Chip vorliegen, sowie die Desorbate, die während der Lagerung entstehen, weitgehend in der Kaverne eingeschlossen. Nur im Bereich der Aluminium-Bondpads, die beim fertigen Chip eine elektrische Kontaktierung ermöglichen, führt eine getrenchte Vertiefung in der Kappe zur Öffnung möglicher Diffusionspfade vom Inneren der Kaverne nach außen. Die geöffnete Seitenfläche, die auch ungesägte Chips aufweisen, zeigt Abb. 3.11. Sind die Wafer dagegen schon vor der Hochtemperaturlagerung gesägt oder auch nur an der Oberfläche angesägt, stehen an den dadurch geöffneten Chipseiten weitere Diffusionspfade nach außen zur Verfügung und eingeschlossene Gase können teilweise entweichen.

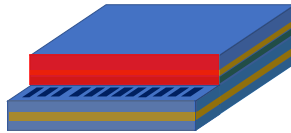


Abb. 3.11: Rot: Bereich, in dem auch bei ungesägten Chips potentielle Diffusionspfade eine Öffnung nach außen erhalten: Um die Bondpads zugänglich zu machen, muss das darüberliegende Material in einem Trenchprozess entfernt werden.

3.6.2 Testchips mit unterbrochenen Schichten

Um ausgewählte Schichten des Sensoraufbaus hinsichtlich ihrer Wirkung als Diffusionspfade zu untersuchen, wurden Kombi-MEMS-Versuchschips verwendet, die sich dadurch auszeichnen, dass umlaufend um die Kaverne des

Drehratensensorteils jeweils eine Schicht des Schichtaufbaus unterbrochen ist, wie in Abb. 3.12 dargestellt. Die Unterbrechung wurde mit dem jeweils anschließend abgeschiedenen Material aufgefüllt.

Verschiedene Varianten dieses Testchips sind Chips mit Unterbrechung des thermischen Oxids, einer LPCVD-TEOS-Oxidschicht oder einer Poly-Siliziumschicht sowie zugehörige Referenzchips ohne Schichtunterbrechung. Die Referenzchips entsprechen unveränderten Kombi-MEMS-Chips.

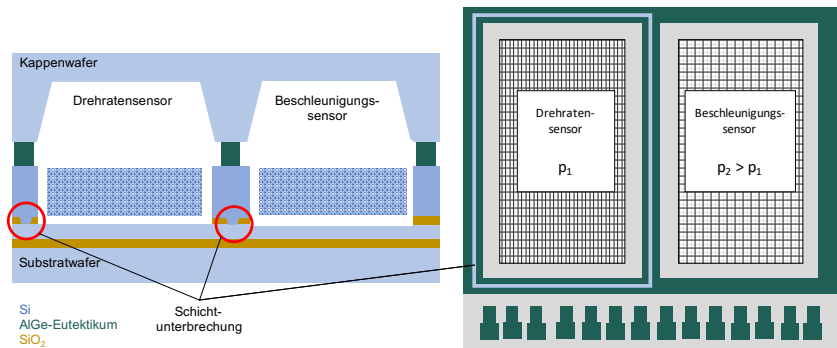


Abb. 3.12: Schematische Darstellung eines Chips mit Unterbrechung einer mikromechanischen Schicht, umlaufend um den Drehratensensorkern. Die Unterbrechung verschiedener Schichten erlaubt die Identifizierung von Diffusionspfaden.

3.6.3 Verschiedene Oxiddicken

In einem Versuch mit mehreren Kombi-MEMS-Wafern wurden die Dicken verschiedener Oxidschichten variiert. Wie Tabelle 3.3 zu entnehmen ist, wurde in einem Fall die thermische Oxidschicht mit einer größeren Dicke abgeschieden. Im zweiten Fall ist eine der TEOS-Oxidschichten dünner ausgeführt als bei den Referenzwafern. Mithilfe dieser Wafer konnten Rückschlüsse über die Rolle der Oxidschichten als Diffusionspfade und als Desorptionsquellen gezogen werden.

Tab. 3.3: Varianten von Wafern mit verschiedenen Oxiddicken. Angegeben sind hier nur die Dicken von Oxidschichten, die ohne Unterbrechung vom Kaverneninneren nach außen führen. Weitere Oxidschichten, die nicht durchgehend sind, sind hier nicht berücksichtigt, da sie als Diffusionspfade keine Rolle spielen.

| Variante | Dicke thermisches Oxid | Dicke TEOS-Oxid | Gesamtdicke Oxid |
|--------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| Referenz | 2,5 μm | 1,8 μm | 4,3 μm |
| Dickes therm. Oxid | 3,6 μm | 1,8 μm | 5,4 μm |
| Dünnes TEOS-Oxid | 2,5 μm | 1,2 μm | 3,7 μm |

3.6.4 Modifizierte SiO_2/Si -Grenzflächen

Zur Untersuchung der Rolle von Grenzflächen zwischen Silizium- und Siliziumoxidschichten wurden Versuchswafer hergestellt, bei denen die betreffenden Grenzflächen gegenüber den Referenzwafern durch einen zusätzlichen Prozessschritt modifiziert sind.

Bei zwei Varianten wurde jeweils eine Oxidschicht nach der Abscheidung und Strukturierung unmittelbar vor der Abscheidung der darauffolgenden Siliziumschicht für kurze Zeit in ein BOE-Ätzbad getaucht. Das Ziel dieser Behandlung war es, die Beschaffenheit der Oxidoberfläche und somit der resultierenden Grenzfläche zwischen Oxid und Silizium zu verändern. Im Vergleich mit einem Referenzwafer ohne modifizierte Grenzfläche lässt sich somit der Einfluss der Grenzflächen auf Diffusion betrachten.

3.6.5 Verschiedene Bondrahmenbreiten

Um neben den Oxid- und den Siliziumschichten auch die Materialien des Bondrahmens als potentielle Diffusionspfade zu untersuchen, wurden Kombi-MEMS-Chips hergestellt, bei denen der Trennsteg zwischen den benachbarten Kavernen in unterschiedlichen Breiten ausgeführt ist, s. Abb. 3.13. Die Testchips mit unterschiedlichen Trennstegbreiten enthalten jeweils in einer Kaverne einen funktionalen Drehratensensor, während die zweite Kaverne nicht mit einem

Beschleunigungssensor ausgestattet ist, sondern leer bleibt. Auf diese Weise lässt sich der Effekt der Diffusion durch das Bondrahmenmaterial von weiteren Einflüssen besser trennen.

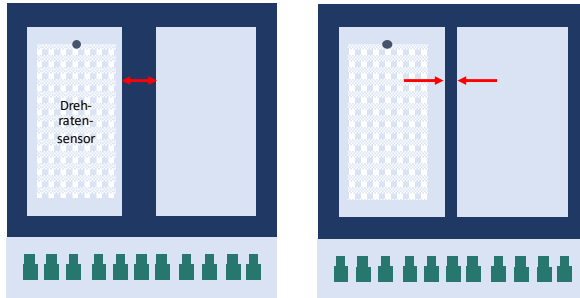


Abb. 3.13: Schematische Darstellung von zwei Varianten eines Chips mit unterschiedlichen Breiten des Trennstegs zwischen den benachbarten Kavernen.

3.6.6 FE-Modell und Simulation von Diffusion durch Kavernenwände

Um den Einfluss von Diffusion durch Kavernenwände auf den Kavernendruck über längere Zeiträume zu simulieren, wurde ein FE-Modell einer Testkaverne verwendet, auf Grundlage dessen das Diffusionsverhalten von Desorbaten vom Kaverneninneren nach außen in ANSYS modelliert wurde.

Die maßgebliche Gleichung, die in ANSYS für die Diffusionssimulation implementiert ist, entspricht der Konvektions-Diffusions-Gleichung (Glg. 3.2), die in der statistischen Physik für Transportphänomene verwendet wird.

Um Schwierigkeiten aufgrund des unstetigen Konzentrationsverlaufs einer diffundierenden Substanz an der Phasengrenze zwischen Kaverneninnenraum und Kavernenwand zu umgehen, wird die stetige Variable \bar{C} eingeführt. Dieser Ansatz ist der „Wetness technique“ entnommen [90, 91].

$$\bar{C} = \frac{C}{C_{sat}} \quad (3.1)$$

Die der Modellierung zugrundeliegende Gleichung ist

$$\frac{\delta(C_{sat}\bar{C})}{\delta t} = \nabla \cdot (D\nabla(C_{sat}\bar{C})) - \nabla \cdot (vC_{sat}\bar{C}) + G \quad (3.2)$$

mit der Konzentration C der diffundierenden Substanz und der Sättigungskonzentration C_{sat} des Materials. Die Sättigungskonzentration ist eine material-, druck- und temperaturabhängige Größe. Sie gibt die Konzentration einer Substanz in gesättigter Lösung an, hier die maximale Wasserstoffkonzentration in Siliziumoxid C_{sat, SiO_2} . D ist der Diffusionskoeffizient, in dieser Arbeit der Diffusionskoeffizient D_{SiO_2} von Wasserstoff in SiO_2 . Weitere Variablen sind die Zeit t , der Transportgeschwindigkeitsvektor v im Konvektionsterm und die Erzeugungsrate G der diffundierenden Substanz pro Volumeneinheit als Reaktionsterm der Gleichung, falls eine Quelle zu berücksichtigen ist, die während der betrachteten Diffusionsdauer weitere diffundierende Substanz generiert. Da im untersuchten Fall weder Konvektion, noch Wasserstoffquellen betrachtet werden, vereinfacht sich die Gleichung für die Simulation durch Vernachlässigung des Konvektions- und des Reaktionsterms.

Im FE-Modell der Drehratensensorkaverne, das für die Diffusionssimulation genutzt wird, müssen nur diejenigen Schichten des Sensoraufbaus berücksichtigt werden, die bei der Diffusion eine Rolle spielen. Diese werden im Modell als Diffusionspfad mit entsprechenden Dimensionen zusammengefasst. Für die Testkaverne handelt es sich dabei um alle SiO_2 -Schichten des Sensoraufbaus, die von der Kaverneninnenseite zum Kavernenäußeren führen. Die zweite Komponente des Modells ist der Kaverneninnenraum als Quelle der diffundierenden Substanz, wie in Abb. 3.14 abgebildet. Im Modell wird angenommen, dass Wasserstoff, der über den Diffusionspfad die Oberfläche der Kavernenaußenwand erreicht, sich sofort verflüchtigt, da der Wasserstoffgehalt der Atmosphäre bei nur $5 \cdot 10^{-5} \%$ liegt. Oberflächeneffekte werden hier nicht berücksichtigt. Aufgrund von Angaben in der Literatur wird zudem angenommen, dass der Wasserstoff in molekularer Form diffundiert [61, 66].

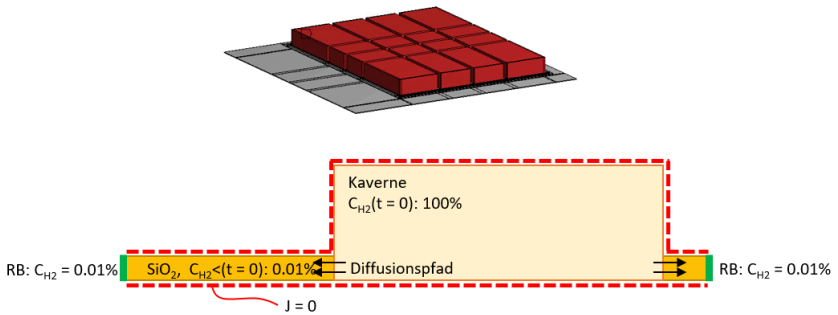


Abb. 3.14: Oben: 3D-Modell der Kaverne (rot) und der Siliziumoxidschicht (grau). Unten: Schema des FE-Modells mit normiertem Anfangszustand ($t = 0$) und Randbedingungen (RB). C_{H_2} = Wasserstoffkonzentration, J = Teilchenfluss des Wasserstoffs.

Mithilfe der Simulation soll die zeitliche Änderung des Wasserstoffgehaltes in einer Sensorkaverne ermittelt werden. Um das Diffusionsverhalten simulieren zu können, muss die Sättigungskonzentration C_{sat, SiO_2} von Wasserstoff in den Siliziumoxidschichten bekannt sein, die im Modell als Diffusionspfade angenommen werden, d.h. die Wasserstoffkonzentration im SiO_2 bei maximal löslicher Wasserstoffmenge bei der untersuchten Temperatur von $150\text{ }^\circ\text{C}$. Der Wert von C_{sat, SiO_2} ist zunächst unbekannt und wird mithilfe von Versuchsergebnissen von viertelweise angesägten Wafern (Abschnitt 4.7.1) in mehreren Simulationsdurchläufen empirisch bestimmt. Die Versuchsergebnisse, die dabei verwendet werden, sind Anfangs- und Endwerte der eingeschlossenen Wasserstoffmenge in den untersuchten Drehratensensorkavernen. Auch der Diffusionskoeffizient, der für die Simulation verwendet wurde, wurde mithilfe dieser Versuchsergebnisse ermittelt (Abschnitt 4.7.5). Die H_2 -Konzentration C_{SiO_2-atm} als Randbedingung an der Grenzfläche zwischen SiO_2 und Umgebungsatmosphäre ist abhängig von der Sättigungskonzentration C_{sat, SiO_2} im Oxid und wurde anfänglich mit $C_{SiO_2-atm} = 0,01\%$ angenommen, ebenso die initiale H_2 -Konzentration in der SiO_2 -Schicht.

Auch für den Kaverneninnenraum als zweite Komponente des Modells müssen

Tab. 3.4: Materialeigenschaften für die Simulation.

| | SiO ₂ | Kaverneninnenraum* |
|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| D [m ² /s] | $(6.45 \pm 1.32) \cdot 10^{-15}$ | $6.45 \cdot 10^{-14}$ |
| C _{sat} [kg/m ³] | $1.25 \cdot 10^{-4}$ | $1.25 \cdot 10^{-4}$ * |

*Initiale Sättigungskonzentration

ein Diffusionskoeffizient und eine Sättigungskonzentration von Wasserstoff definiert werden. Als Sättigungskonzentration wird hier der experimentell ermittelte anfängliche Wasserstoffgehalt angenommen. Die initiale Wasserstoffmenge in der Kaverne bezogen auf das Kavernenvolumen wurde gleich 100 % gesetzt. Der Diffusionskoeffizient $D_{Kaverne}$ von Wasserstoff ist im Modell eine willkürliche Konstante, die deutlich größer als D_{SiO_2} ist, um über die gesamte Dauer des betrachteten Diffusionsvorgangs eine gleichmäßige Verteilung des Wasserstoffs in der Kaverne abzubilden. Eine Übersicht der Materialeigenschaften, die für die Simulation verwendet wurden, zeigt Tabelle 3.4. Die Materialeigenschaften werden als zeitlich konstant und im jeweiligen Material räumlich konstant betrachtet. Da es keinen Materialfluss der diffundierenden Substanz gibt, der über den Diffusionsvorgang hinausgeht und die Menge der diffundierenden Substanz nicht erhöht wird, können in Glg. 3.2 die Terme für Transportgeschwindigkeit v und Substanzerzeugung G vernachlässigt werden. Somit gilt für die Simulation folgende Gleichung:

$$\frac{\delta(C_{sat}\bar{C})}{\delta t} = \nabla \cdot (D\nabla(C_{sat}\bar{C})). \quad (3.3)$$

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ausgangspunkt

Bei eutektisch gebondeten Drehratensensoren lässt sich beobachten, dass der Kavernendruck nach abgeschlossener Prozessierung nicht dem Druck entspricht, der beim Waferbondprozess eingestellt war. Der resultierende Druck ist immer höher als der Druck, der sich aus den Parametern des Bondprozesses berechnen lässt. Auch wenn die Bondkammer während des Bondprozesses evakuiert wird und sich rechnerisch ein Kaverneninnendruck von $4 \cdot 10^{-4}$ mbar ergeben müsste, liegt der tatsächliche Innendruck oberhalb von 1 mbar.

Werden die Sensoren bei erhöhter Temperatur ausgelagert, für die Versuche dieser Arbeit typischerweise 1000 Stunden bei 150°C , verändert sich ihr Dämpfungsverhalten erneut, wie eine Änderung des Gütefaktors zeigt. Sind alle anderen Parameter, die einen Einfluss auf die Güte haben, konstant, ist davon auszugehen, dass die Güteänderung auf eine Änderung der Dämpfungsatmosphäre zurückzuführen ist, wie im Kapitel 2.4.1 beschrieben. Mit den zur Verfügung stehenden Messeinrichtungen lassen sich Druckänderungen ab ca. $4 \cdot 10^{-3}$ mbar erfassen. Der Kaverneninnendruck der Chips sinkt während der Lagerung reproduzierbar um ca. $2 \cdot 10^{-2}$ mbar.

Diese Beobachtungen führen zur Ausgangsfrage dieser Arbeit: Warum bleibt die Dämpfungsatmosphäre der Sensoren nicht stabil?

4.2 Untersuchungsstrategie

Die Komponenten des Sensoraufbaus und des Herstellungsprozesses, die im Folgenden hinsichtlich ihres Einflusses auf den Kavernendruck von Inertialsensoren betrachtet werden, sind in der Übersicht in Abb. 4.1 aufgeführt. Ausgehend

von den möglichen Mechanismen, die zu Veränderungen des Kavernendrucks führen können, wurden die zu untersuchenden Bestandteile ausgewählt. Auf diese Weise ist eine systematische Identifizierung relevanter Einflüsse möglich.

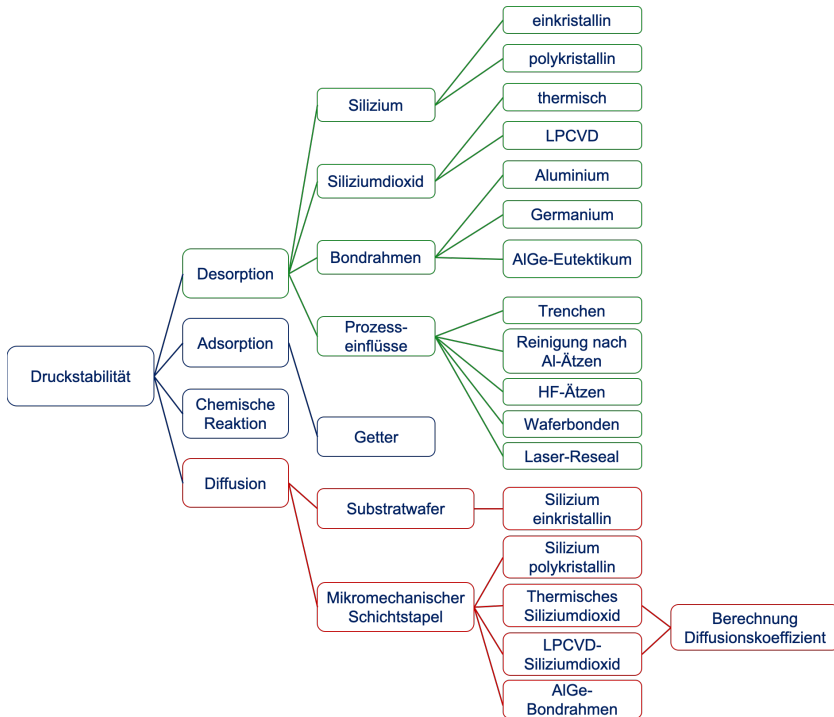


Abb. 4.1: Übersicht der untersuchten Mechanismen und Komponenten zur Identifizierung von Einflussfaktoren auf den Kavernendruck von Drehratensensoren.

4.3 Güte-Druck-Messungen

Die Auswertung des Dämpfungsverhaltens der Drehratensensorchips für die beschriebenen Versuche erfolgt immer über eine Messung der Güte. Der genaue Güte-Druck-Zusammenhang ist zunächst unbekannt und muss für jeden Sensortyp neu ermittelt werden, da nicht nur die Dämpfungsatmosphäre, sondern

Tab. 4.1: Gase und Druckbereiche, für die Güte-Druck-Kalibrierungsmessungen durchgeführt wurden.

| Dämpfungsatmosphäre | Gemessener Druckbereich [mbar] |
|---------------------|--------------------------------|
| N ₂ | 0,1 - 3 mbar |
| He | 0,1 - 10 mbar |
| Ne | 0,1 - 10 mbar |
| Luft | 0,1 - 10 mbar |

auch weitere Größen wie die Sensorgeometrie in die Güte eingehen, die bei verschiedenen Sensortypen variieren.

Um anhand einer Gütemessung einschätzen zu können, wie stark sich der Druck verändert, ist eine Kalibrierungsmessung notwendig, deren Ablauf in Abschnitt 3.3.1 beschrieben ist.

Wie sich anhand der Versuchsergebnisse herausstellen wird, spielt Wasserstoff als Dämpfungsgas der untersuchten Drehratensensoren eine Schlüsselrolle. Da eine Kalibrierungsmessung mit Wasserstoff im Rahmen dieser Arbeit aus Sicherheitsgründen nicht durchführbar war, wurden ersatzweise andere Gase für Güte-Druck-Messungen herangezogen. Anhand dieser Messdaten in Kombination mit theoretischen Modellen (s. Glg. 2.4) wurde der Güte-Druck-Zusammenhang für Wasserstoff als Dämpfungsgas extrapoliert. Die Gase und Gasgemische, für die im Rahmen dieser Arbeit Güte-Druck-Messungen durchgeführt wurden, sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Die Ergebnisse der Gütemessungen im Vakuumprober sind in Abb. 4.2 dargestellt. Die Kurvenverläufe zeigen, dass die erreichbare Güte mit ansteigender molarer Masse des Dämpfungsgases geringer wird. Der Sensor ist somit umso stärker gedämpft, je größer die Molmasse des einkomponentigen Dämpfungsgases ist. Für Mischgase gilt dieser Zusammenhang nur eingeschränkt.

Die Güte-Druck-Zusammenhänge für weitere einkomponentige Dämpfungsgase können mithilfe der Messwerte für Stickstoff, Helium oder Neon und dem Verhältnis der molaren Massen zueinander berechnet werden, wie in [50]

beschrieben. Auf dieser Grundlage ist in Abb. 4.2 neben den experimentellen Messergebnissen auch der daraus berechnete Güte-Druck-Zusammenhang für Wasserstoff als Dämpfungsgas dargestellt. Der Koeffizient $-0,9$ wurde empirisch ermittelt und entsprechend angepasst.

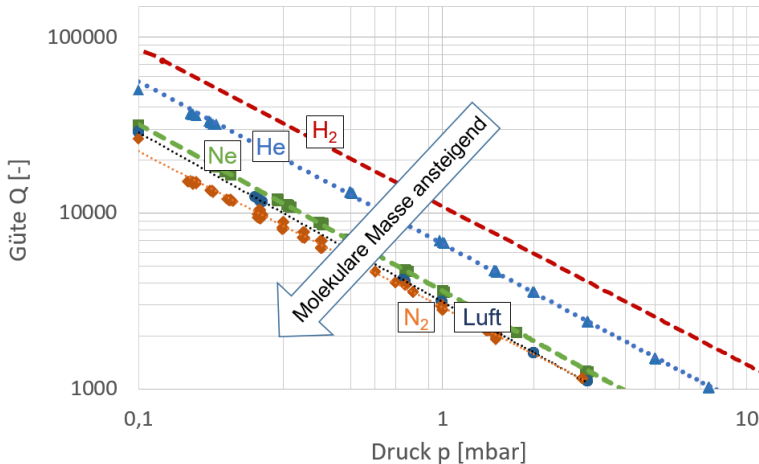


Abb. 4.2: Ergebnisse der Güte-Druck-Messungen für verschiedene Gase im Vakuumprober an Chips mit kleiner Öffnung als Gaszugang in der Kappe; ergänzend der rechnerisch ermittelte Güte-Druck-Zusammenhang für Wasserstoff als Dämpfungsgas.

Für die Dämpfungsgase Ne und H₂ wurde in Zusammenarbeit mit M. Putnik eine Gütesimulation auf Basis eines Mixed-Level-Ansatzes durchgeführt, der in Abschnitt 3.3.2 umrissen ist. Das Verhältnis der Güten bei gleichem Druck zwischen Neon- und Wasserstoff-Simulation entspricht dem erwarteten Ergebnis. Die Simulationsergebnisse zeigen einen ähnlichen Güte-Druck-Verlauf wie die experimentellen Messergebnisse, jedoch sind die gemessenen Gütewerte insgesamt etwas niedriger als die simulierten Werte, wie in Abb. 4.3 zu sehen. Die etwas größere Dämpfung bei den experimentellen Messergebnissen ist darin begründet, dass neben den Dämpfungsmechanismen, die in die Gütesimulation eingehen, in der Realität weitere Mechanismen das Dämpfungsverhalten beeinflussen, die in der Simulation vernachlässigt wurden. Die Simulation bildet die

Dämpfung der schwingenden Masse als Dämpfung einer alleinstehenden Struktur ohne Gehäuse ab, während die experimentell ausgewerteten Sensoren mit einer Kappe versehen sind. Der Einfluss der Verkappung auf das Strömungsverhalten des Dämpfungsgases ist in der Simulation nicht berücksichtigt. Für eine möglichst realitätsnahe Simulation sind offenbar weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Dazu gehören die Einflüsse des umgebenden Gehäuses auf das Strömungsverhalten des Dämpfungsgases und druckunabhängige elektrostatische Effekte. Auch Vereinfachungen der Modellierung bei den Federstrukturen, an denen die mikromechanische Masse des Sensors aufgehängt ist, können dazu führen, dass die simulierten Gütewerte von den experimentell gemessenen Werten abweichen.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten zeigt, dass die Simulation als Anhaltspunkt für das Dämpfungsverhalten des Sensors gut geeignet ist. Für noch präzisere Simulationsergebnisse ist eine sehr viel komplexere Modellierung notwendig, die den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Die unterschiedlichen Güte-Druck-Zusammenhänge für unterschiedliche

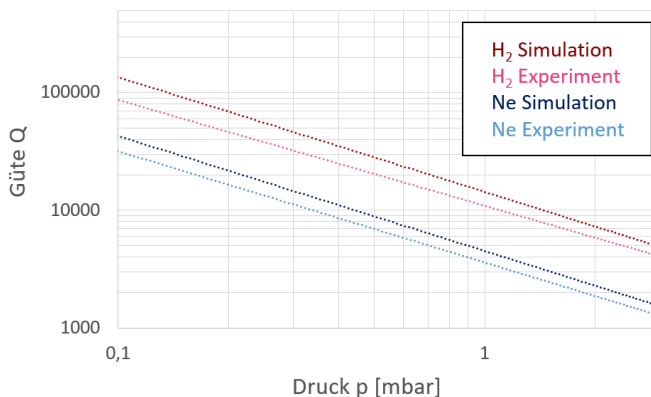


Abb. 4.3: Simulation der Güte in Abhängigkeit vom Druck für Neon bzw. Wasserstoff als Dämpfungsgas. Zum Vergleich sind die experimentell ermittelten Werte aufgetragen.

Dämpfungsgase zeigen, dass die Kenntnis der Dämpfungsatmosphäre in Sensor-kavernen unverzichtbar ist, um den herrschenden Kaverneninnendruck und die

bei Hochtemperaturlagerungen beobachteten Druckänderungen einordnen zu können. Ist die Dämpfungsatmosphäre bekannt, sind anhand der Güte-Druck-Messungen Abschätzungen des Innendrucks und der beobachteten Druckänderungen mit einer Genauigkeit von ca. $4 \cdot 10^{-3}$ mbar möglich, abgeleitet aus der Messgenauigkeit des Gütefaktors und der Umrechnung von Güte zu Druck.

4.4 Bestimmung des Kaverneninhalts

Zur Bestimmung der Gasspezies, die zur druckabhängigen Dämpfung der untersuchten Drehratensensoren beitragen, wurden Sensorkavernen aus verschiedenen Versuchen Restgasanalysen unterzogen. Die Sensoren stammen von reinen Drehratensensorwafern ohne benachbarte Beschleunigungssensoren.

Die Analyseergebnisse lassen sich in zwei Fälle unterscheiden:

1. Analyse von Chips direkt nach Prozessierung (vor Hochtemperaturlagerung)
2. Analyse von Chips nach Hochtemperaturlagerung mit Bewertungsmöglichkeit der resultierenden Druckänderung.

Im ersten Fall, direkt nach der Prozessierung der vakuumgebundenen Drehratensensoren, besteht das Gas, das in den Kavernen auffindbar ist, bis zu 100 % aus Wasserstoff. Bei einer Probe wurden im Massenspektrometer auch geringe Mengen CO₂ detektiert, die jedoch einen Anteil von weniger als 1 % ausmachen (s. Abb. 4.4).

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der gasförmige Inhalt der Kavernen in allen untersuchten Fällen hauptsächlich aus Wasserstoff zusammensetzt.

Um die Entwicklung der Gaszusammensetzung in den Kavernen unter Belastung zu untersuchen, wurden Chips verschiedenen Hochtemperaturlagerungsvarianten ausgesetzt und anschließend analysiert. Unterschiede bestanden nicht nur in der Lagerungstemperatur und -dauer, sondern auch darin, ob die Wafer vor oder nach der Lagerung gesägt wurden.

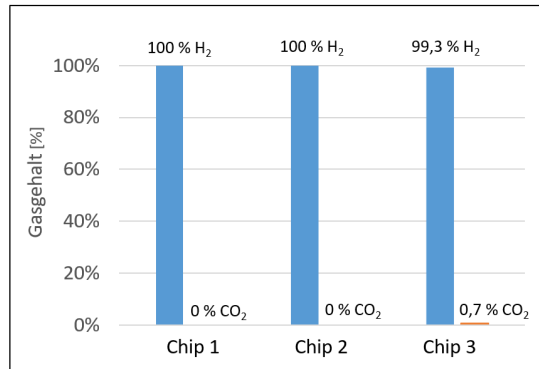


Abb. 4.4: Ergebnisse der Restgasanalysen von drei identisch prozessierten Drehratensensorkavernen nach abgeschlossener Waferprozessierung.

Sind die Wafer schon vor der Hochtemperaturlagerung gesägt oder auch entsprechend der Methode in Abschnitt 3.6.1 an der Oberfläche angesägt, stehen an den dadurch geöffneten Chipseiten Diffusionspfade nach außen zur Verfügung und eingeschlossene Gase können teilweise entweichen.

Genauso wie bei den Chips, die direkt nach der Prozessierung analysiert wurden, ergaben Restgasanalysen auch bei den ausgelagerten Chips, dass der Kaverneninhalt zum überwiegenden Teil aus Wasserstoff besteht (94 % nach 250 °C-Lagerung bis 99 % nach 150 °C-Lagerung). Neben Wasserstoff wurden geringe Mengen CO₂ detektiert, deren Anteil mit steigender Lagerungstemperatur wächst (0,9 % bei 150 °C-Lagerung bis 5,1 % bei 250 °C-Lagerung). Ab einer Lagerungstemperatur von 250 °C finden sich im Massenspektrum zudem Hinweise auf CH₄. Dies deutet auf zusätzliche Prozesse hin, die erst bei höheren Temperaturen ab ca. 250 °C ablaufen. Alle Ergebnisse der Restgasanalysen nach Hochtemperaturlagerung sind in Abb. A.9 (Anhang) aufgeführt.

Als Ursprung der kohlenstoffhaltigen Verbindungen sind Reste von Trenchpolymeren oder aus Reinigungsvorgängen während der Waferprozessierung denkbar. Da sie nur in geringen Mengen auffindbar sind und erst bei hohen

Lagerungstemperaturen eine Rolle spielen, liegt der Fokus im Folgenden auf dem Einfluss des Wasserstoffs auf die Kavernendruckstabilität der Sensoren.

Zusammengefasst zeigen die Restgasanalysen, dass der gasförmige Inhalt der getesteten Kavernen vorrangig aus Wasserstoff besteht. Wasserstoff ist somit auch das wichtigste Dämpfungsgas der Versuchssensoren in dieser Arbeit. Der Anteil des Wasserstoffs am Kaverneninhalt kann sich bei Hochtemperaturlagerungen verändern, wenn, ausgelöst durch die hohen Temperaturen, weitere Gasspezies hinzukommen.

4.5 Ursprung des Wasserstoffs

Nachdem die Restgasanalysen gezeigt haben, dass die Kavernen Wasserstoff enthalten, der nicht gezielt beim Verschließen der Chips im Verlauf der Prozessierung eingeschlossen wurde, stellt sich die Frage, aufgrund welcher Mechanismen Wasserstoff in die Kaverne gelangen kann.

Die vier denkbaren Mechanismen, die dazu führen können, dass die resultierende Güte nach dem Verschluss der Chips nicht der Güte entspricht, die den Verschlussparametern zufolge vorliegen müsste, wurden im Kapitel 2.5 vorgestellt. Im Folgenden ist dargestellt, inwieweit die Mechanismen für das Auftreten von Wasserstoff in den Kavernen sowie für beobachtete Druckänderungen infrage kommen.

1. Desorption:

Desorptionsprozesse sind als Ursache für den Druckanstieg in den Sensorkavernen nach Waferbonden grundsätzlich möglich. Aufgrund der verhältnismäßig großen Oberflächen der Mikrostrukturen der Sensorkerne ist es denkbar, dass Ausgasungen, die von den Oberflächen desorbieren, ausreichen, um einen deutlichen Druckanstieg hervorzurufen. Zudem finden verschiedenste Materialien und Substanzen bei der Chipherstellung Verwendung, die in Kombination mit bestimmten Prozessschritten als Wasserstoffquellen in Betracht kommen.

Die Tatsache, dass der H_2 -Druck in der Kaverne nach dem Bonden mit ca. 2 mbar deutlich höher ist als der H_2 -Partialdruck in der Atmosphäre, der ca. $5 \cdot 10^{-4}$ mbar beträgt [92, 93], spricht dagegen, dass Wasserstoff nachträglich von außen in die Kaverne diffundiert. Das Entstehen des unbeabsichtigten höheren Drucks nach dem Bonden wird demnach durch einen anderen Mechanismus dominiert, der unabhängig von der Umgebungsatmosphäre im Inneren des Chips abläuft, beispielsweise Desorption.

2. Diffusion:

Wie oben beschrieben, ist Diffusion von Wasserstoff aus der Umgebungsluft ins Innere des Chips nicht der Grund für das Auftreten von Wasserstoff in den Sensorkavernen, da die auffindbare Wasserstoffkonzentration in den Kavernen größer ist als außerhalb.

Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass Diffusion eine tragende Rolle bei Innendruckänderungen über die gesamte Lebensdauer eines Chips spielt. Dafür spricht die Beobachtung, dass bei Drehratensensorwafern in Hochtemperaturlagerungen bei 150°C die Güte ansteigt, was auf einen Druckabfall in den Kavernen schließen lässt. Gase, die nach dem Bonden in der Kaverne eingeschlossen sind, könnten langfristig nach außen diffundieren und zum Abfallen des Innendrucks führen.

Desorptions- und Diffusionsprozesse beeinflussen sich zudem gegenseitig. Je mehr Desorbate sich nach dem Bonden in den Kavernen befinden, desto größere Druckänderungen durch Diffusion der Desorbate sind möglich.

3. Adsorption:

Für Adsorption als entscheidenden Mechanismus bezüglich der Druckstabilität der untersuchten Chips gibt es keine Hinweise. Da der Waferbondprozess der Drehratensensoren im Vakuum stattfindet, wird kein Gas von vornherein in signifikanter Menge eingeschlossen, das adsorbiert werden könnte. Zudem lässt sich der trotz Vakuumbondprozesses beobachtete

Druck zwischen 1 und 2 mbar nach dem Bonden nicht durch Adsorption erklären.

Einen Sonderfall stellen Chips dar, die mit einem Getter versehen sind, der den Innendruck durch gezielte Adsorption von reaktiven Gasen stabilisieren soll. Ein Versuch zu potenziellen Gettermaterialien ist in Abschnitt 4.8 beschrieben.

4. Chemische Reaktion:

Das Produkt einer möglichen chemischen Reaktion müsste H_2 sein. Da beim Bonden im Vakuum jedoch kein Gas absichtlich eingeschlossen wird, das für eine solche Reaktion zur Verfügung stünde und ein so deutlicher Druckanstieg nur bei einer Feststoffreaktion zu vermuten wäre, ist eine chemische Reaktion als Ursache für das Auftreten von Wasserstoff nach dem Bonden weniger wahrscheinlich als Desorptions- oder Diffusionsprozesse.

Es ist vorstellbar, dass sich etwa Rückstände von Fluorwasserstoff (HF) aus vorhergehenden Prozessschritten während des Bondprozesses noch in der Kaverne befinden und dort reagieren. Wenn sich ein komplexes großes Molekül während des Bondprozesses in kleine Bestandteile auflösen würde, wäre ein Druckanstieg infolge der chemischen Reaktion denkbar. Wie Restgasanalysen jedoch zeigen, enthalten die Kavernen meist ausschließlich Wasserstoff. Fluorhaltige Bestandteile, die auf eine Reaktion unter Beteiligung von Fluorwasserstoff hinweisen würden, wurden in den Analysen nicht gefunden. Weitere gasförmige Substanzen, die mit dem Wasserstoff zuvor ein größeres Molekül gebildet haben könnten, werden ebenfalls nicht detektiert.

Unter diesen Bedingungen ist es unwahrscheinlich, dass eine chemische Reaktion durchgängig die entscheidende Ursache für den beobachteten Wasserstoffgehalt in der Kaverne ist.

Entsprechend dieser Betrachtung spielen Desorptions- und Diffusionsprozesse die wichtigste Rolle für den Innendruck der untersuchten Sensoren. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt deshalb auf den Einflüssen von Desorption und Diffusion auf den Kaverneninnendruck. Adsorption und chemische Reaktionen spielen im Folgenden eine untergeordnete Rolle.

4.6 Desorption

Zunächst wird Desorption als Mechanismus für das Auftreten von Wasserstoff in den Sensorkavernen betrachtet. Die Materialien, aus denen sich der Schichtaufbau der Sensoren zusammensetzt, werden in Hinblick auf ihre Rolle als Desorptionsquellen untersucht. Eine schematische Darstellung des Schichtaufbaus eines entsprechenden Sensors zeigt Abb. 4.5. Die Versuchssensoren werden entsprechend dem Prozessverlauf in Abschnitt 2.3 hergestellt.

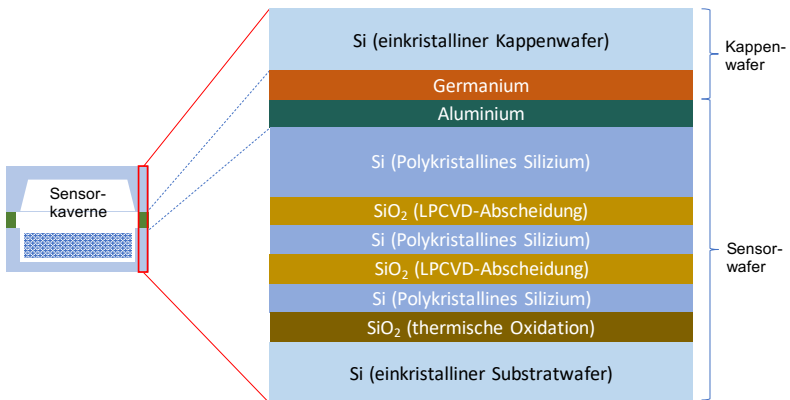


Abb. 4.5: Schichtaufbau des verwendeten Kombi-MEMS-Drehratensensors (nicht maßstabsgetreu).

Als mögliche Quellen von Desorbaten werden die verschiedenen Schichten des Sensoraufbaus untersucht, darunter einkristallines und polykristallines Silizium, Siliziumoxide, Aluminium und Germanium des Bondrahmens sowie mögliche Rückstände von Trenchpolymeren an Siliziumflächen.

Literaturangaben für die Löslichkeit von Wasserstoff in einigen der genannten Materialien sind in Abb. 4.6 zusammengefasst.

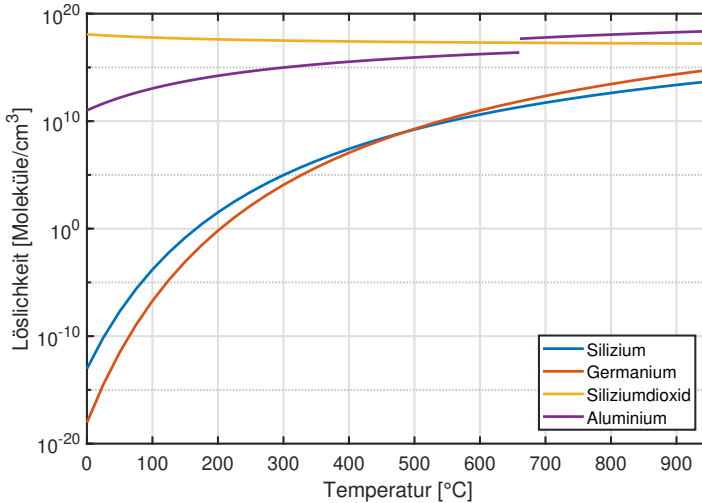


Abb. 4.6: Löslichkeiten von Wasserstoff in verschiedenen Materialien nach [94] (Silizium), [95] (Germanium), [96] (Siliziumdioxid) und [97, 98] (Aluminium). Die Wasserstofflöslichkeit in Aluminium weist bei dessen Schmelztemperatur von 660 °C einen Sprung auf. Einheit: Moleküle H₂ pro cm³ Matrixmaterial.

4.6.1 Aluminium

Die Aluminiumstrukturen der Versuchswafer werden in einem Sputterprozess aufgebracht und mittels Lithographie und Ätzen strukturiert. Anschließend durchlaufen die Wafer zahlreiche weitere Prozessschritte, sodass Vorgänge nicht auszuschließen sind, bei denen Wasserstoff in die Aluminiumschicht eingebracht wird, der später desorbieren kann. Die folgenden Versuche beleuchten die Rolle der Aluminiumschicht als Wasserstofflieferant.

Testchips mit großer Aluminiumfläche

Ein erster Hinweis auf Aluminium als Desorptionsquelle zeigt sich bei Drehratensensorwafern, auf denen sich in regelmäßigen Abständen entsprechend

dem Design des verwendeten Retikels Testchips befinden, die deutlich mehr Aluminium enthalten als die Nutzchips mit funktionalem Drehratensensorkern, siehe Abb. 4.7. Zusätzlich zum Bondrahmenmaterial, das bei Nutz- und Testchips gleichviel Aluminium enthält, befindet sich in den Kavernen der Testchips etwa die gleiche Aluminiummenge noch einmal, sodass die Testchips fast doppelt so viel Aluminium enthalten wie die Nutzchips.

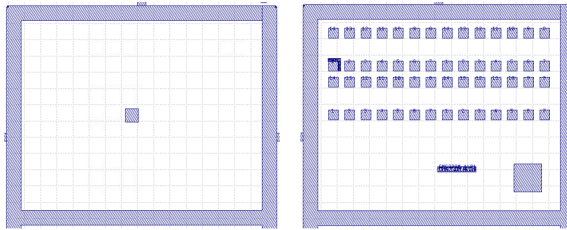


Abb. 4.7: Aluminiumfläche in der Kaverne eines Nutzchips (links) und eines Testchips (rechts) auf Drehratensensorwafern.

Nach einer Hochtemperaturlagerung der Wafer (1000 h, 150 °C) fällt auf, dass diejenigen Nutzchips, die an einen Testchip angrenzen, während der Lagerung einen deutlich größeren Druckanstieg erfahren als die Chips, die Kavernen ohne zusätzliches Aluminium als Nachbarn haben (s. Abb. 4.8). Dies spricht dafür, dass Diffusionsprozesse von den Testchip-Kavernen hin zu den Nutzchip-Kavernen stattfinden. Als diffundierende Gase kommen in diesem Fall Desorbate infrage, die nach der Prozessierung in den Testchips mit großer Aluminiumfläche in deutlich größerer Menge auftreten als in den Nutzchips, sodass zwischen den benachbarten Kavernen ein Konzentrationsgefälle besteht. Als Diffusionspfade sind mikromechanische Schichten des Sensoraufbaus denkbar, die auf ungesägten Wafern Verbindungen zwischen benachbarten Sensorkavernen darstellen. Diese Hypothese wird später anhand von Versuchen bestätigt, die in Abschnitt 4.7 beschrieben sind.

Diese Beobachtung ist der erste Hinweis darauf, dass eine größere Aluminiumfläche zu einer größeren Menge von Ausgasungen führt. Der exakte Druckunterschied zwischen Test- und Nutzchips ist nicht bestimmbar, da die Testchips

im Gegensatz zu den Nutzchips keine Resonatorstruktur enthalten, die für eine Gütemessung zur Auswertung des Innendrucks herangezogen werden könnte.

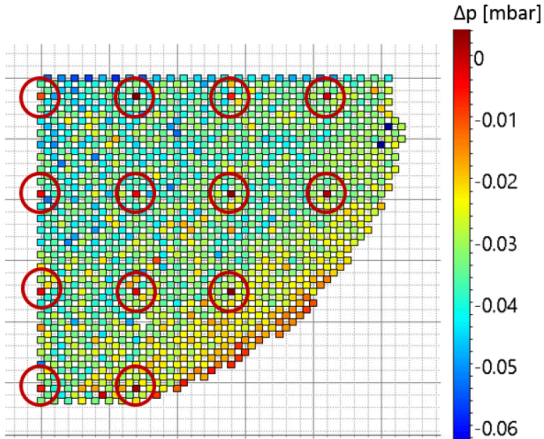


Abb. 4.8: Ausschnitt eines Wafermaps; dargestellt ist die Druckänderung nach Hochtemperaturlagerung (jedes farbige Feld stellt den Wert der Druckänderung eines Chips entsprechend seiner Position auf dem Wafer dar). Auffällige Chips, jeweils an Testchips mit viel Aluminium angrenzend, sind mit einem Kreis markiert.

Drehratensensoren mit zusätzlicher Aluminiumfläche

In einem weiteren Versuch wurden Versuchswafer mit speziellen Drehratensensorchips angefertigt, die gezielt mit einer zusätzlichen Aluminiumfläche in den Sensorkavernen ausgestattet sind (Beschreibung der Methode in Abschnitt 3.5.2). Zum Vergleich befinden sich auf dem Wafer auch Referenzchips mit demselben Kavernenvolumen, aber ohne zusätzliches Material.

Eine Gütemessung der Chips nach dem Waferbonden (ohne Laser-Reseal, alle Desorbate sind somit noch vorhanden) zeigt, dass die Chips mit zusätzlichem Aluminium unmittelbar nach dem Waferbonden einen höheren Innendruck aufweisen als die Referenzchips ohne zusätzliches Material (s. Abb. 4.9). In abgeschwächter Form ist der gleiche Effekt bei entsprechenden Chips mit zusätzlichem AlGe-Eutektikum zu beobachten.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass in der Aluminiumschicht eine Ursache für den beobachteten Druck in Drehratensensorkavernen nach Vakuumbonden liegt.

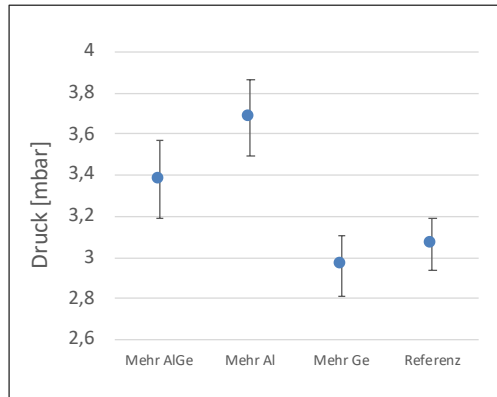


Abb. 4.9: Vergleich von Drehratensensor-Testchips, deren Kaverne zusätzliches AlGe-Eutektikum, Aluminium oder Germanium enthält, und Referenzchips ohne zusätzliches Material auf demselben Wafer. Die Messwerte zeigen den Kavernendruck nach dem Waferbenden (Mittelwert und Standardabweichung für 40 Chips pro Variante).

Nukleare Reaktionsanalyse (NRA) von Aluminium

In einer Nuklearen Reaktionsanalyse (NRA) wurde ein mit Aluminium besputtertes Waferstück untersucht. Die Probe wurde nach der Beschichtung analysiert, ohne weitere Prozessschritte durchlaufen zu haben (s. Abschnitt 3.5.3, Tabelle 3.2: AlCu unbehandelt). Mithilfe der NRA war innerhalb der Messunsicherheit von ca. 0,1 At.-% in der Aluminiumschicht kein Wasserstoff eindeutig nachzuweisen. Abb. 4.10 zeigt die Messergebnisse der NRA von Aluminiumproben.

Thermodesorption-Massenspektrometrie (TD-MS) von Aluminium

In einer TD-MS-Analyse wurde eine Probe, bestehend aus einem vollflächig mit Aluminium beschichteten Siliziumwaferstück (Probe 2 in Tab. 4.2), bis zu einer

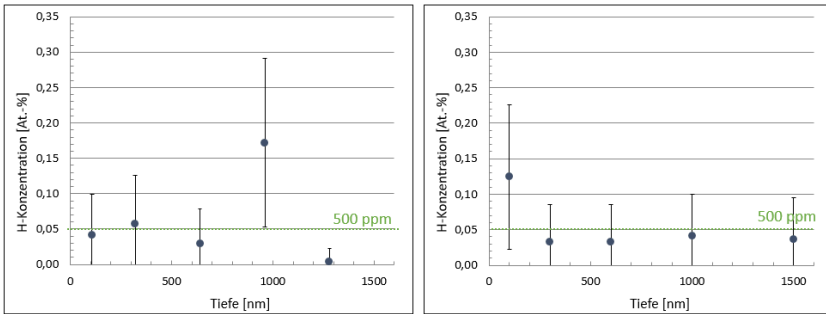


Abb. 4.10: Ergebnis der Nuklearen Reaktionsanalyse: Tiefenprofile der Wasserstoffkonzentration in zwei Aluminiumproben. Links Aluminium unbehandelt, rechts Aluminium mit Belag durch Behandlung mit HF.

Temperatur von 725 °C erhitzt und währenddessen freigesetzter Wasserstoff von einem Massenspektrometer erfasst. Bei Temperaturen zwischen 610 °C und 700 °C wurde Wasserstoff detektiert (s. Abb. 4.11).

Zusammenfassend zeigen die ersten Ergebnisse Folgendes:

1. Die Versuche mit Testchips mit zusätzlicher Aluminiumfläche zeigen, dass die Aluminiumschicht als Wasserstoffquelle grundsätzlich infrage kommt.
2. Die NRA mit Aluminiumproben, die nach dem Sputtern keine weiteren Prozessschritte durchlaufen hatten, war jedoch kein Wasserstoff nachweisbar, sodass signifikante Wasserstoffeinlagerungen aufgrund des Abscheideprozesses nicht bestätigt werden können.
3. Die TD-MS-Analyse zeigt hingegen bei gleicher Probenbeschaffenheit Wasserstofffreisetzungen in einem begrenzten Temperaturbereich. Dabei könnte es sich um Anlagerungen an der Oberfläche der Aluminiumschicht handeln, die bei hohen Temperaturen entfernt werden.

4.6.2 Desorption durch Prozesseinflüsse

Da die Rolle der Aluminiumschicht für das Auftreten von Wasserstoff noch unklar ist, werden auch Prozesseinflüsse betrachtet. Nach ihrer Abscheidung ist die Aluminiumschicht im Verlauf der Sensorwaferprozessierung einer Reihe von weiteren Prozessschritten ausgesetzt. Möglicherweise wird die Schicht erst nachträglich mit der größeren Menge an Wasserstoff kontaminiert, der nach abgeschlossener Waferprozessierung in den Chips auffindbar ist.

Im Folgenden wird der Einfluss verschiedener Folgeprozessschritte untersucht, die ausgewählt wurden, da sie aufgrund der verwendeten Substanzen oder ihrer Prozessführung einen Einfluss auf die Art und Menge späterer Ausgasungen in den Sensorkavernen haben könnten.

Betrachtet werden folgende Prozessschritte:

- Ein Reinigungsschritt, den die Wafer direkt nach dem Plasmaätzen der Aluminiumstrukturen durchlaufen (vgl. Abschnitt 2.3.7)
- Gasphasenätzen: Behandlung der Wafer mit Flußsäure, die zum Ätzen einer Opferschicht aus Siliziumoxid verwendet wird und Nebeneffekte auf die Aluminiumstruktur haben kann (vgl. Abschnitt 2.3.8)
- Waferbonden: Ein Abschnitt des Waferbondprozesses vor Bildung des Eutektikums, in dem die Wafer vor Verschluss getempert werden können (vgl. Abschnitt 2.3.10).
- Laser-Reseal: Der endgültige Verschluss von Drehratensensorkavernen bei Kombi-MEMS-Chips (vgl. Abschnitt 3.2.3).
- Epitaxie: Abscheidung einer Siliziumschicht auf der ersten Siliziumoxidschicht (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Reinigung nach Aluminium-Ätzen

Die gesputterte Aluminiumschicht für Bondrahmen und Bondpads zur späteren elektrischen Kontaktierung auf dem Sensorwafer wird mithilfe von Lithographie

und Plasmaätzen strukturiert. Nach dem Aluminium-Ätzen folgt üblicherweise ein Reinigungsschritt, der dazu dient, Polymerreste zu entfernen. Bei dieser Reinigung kann ein organischer Lösemittelreiniger zur Hilfe genommen werden, wie in Abschnitt 2.3.7 beschrieben. Die Reinigungslösung enthält unter anderem wasserstoffhaltige Bestandteile, zudem reichern sich im Reinigungsbad Verunreinigungen durch chemische Reaktionen im Zuge der Polymerentfernung an, die möglicherweise ebenfalls wasserstoffhaltige Substanzen auf der Waferoberfläche hinterlassen könnten.

Aus diesem Grund wurden die folgenden Versuche durchgeführt, um den Einfluss des Reinigungsbad nach dem Ätzen der Aluminiumstrukturen auf die Stabilität des Kaverneninnendrucks zu beurteilen.

Für einen ersten Versuch wurden vollflächig mit Aluminium beschichtete Wafer verwendet, die verschiedenen Varianten der Reinigungslösung ausgesetzt und mit Flusssäure behandelt wurden, um den Belag auf dem Aluminium zu erzeugen, der auch bei funktionalen Sensoren infolge des Gasphasenätzprozesses zu finden ist.

Eine Probe wurde einer frisch in die Reinigungsanlage eingefüllten Reinigungslösung ohne Rückstände ausgesetzt. Eine weitere Probe wurde einer Reinigungslösung ausgesetzt, in der bereits eine Vielzahl von Wafern behandelt worden war und die kurz vor dem Austausch stand, sodass hier eine deutlich größere Menge an unerwünschten Rückständen vorhanden war. Eine dritte Probe blieb als Referenz ungereinigt. Anschließend wurden alle drei Versuchswafer mit gasförmiger Flusssäure (HF) behandelt, um den Gasphasenätzprozess zu simulieren und den Belag zu erzeugen, der im Laufe der Prozessierung bei funktionalen Sensorstrukturen auf dem Aluminium auftritt.

Schließlich wurden an den drei Versuchswafern FT-IR-Spektren mithilfe einer Streiflichtmessung aufgenommen, die auch die Detektion von sehr dünnen Schichten, selbst Monolagen, erlaubt [99]. Die Messung sollte dazu dienen, die unterschiedlichen Rückstände erkennbar zu machen, die nach den verschiedenen Reinigungsbädern gegebenenfalls auf den Wafern zu finden sind und die in funktionalen Chips als Quellen von Desorbaten in Sensorkavernen eine Rolle

spielen könnten. Die Analyse wurde jeweils in der Wafermitte sowie am Waferand jedes Versuchswafers durchgeführt, um Rückstände gegebenenfalls auch bei einer ungleichmäßigen Verteilung über den Wafer zu erfassen.

Die beiden Proben, die der Reinigungslösung ausgesetzt waren, zeigen in der FT-IR-Analyse keine eindeutigen Unterschiede. Hinweise auf eine Abhängigkeit des Messergebnisses vom Anteil der Verunreinigungen in der Reinigungslösung gibt es somit nicht (vgl. Abb. A.4 im Anhang). Die Reinigungslösung hat offenbar keinen Einfluss auf das Analyseergebnis.

Gasphasenätzen

Nach der Aluminium-Reinigung folgen im weiteren Verlauf der Waferprozessierung unter anderem ein Lithographie- und ein Trenchprozess, um das zuvor epitaktisch aufgebrachte Polysilizium zu strukturieren, das im fertigen Sensor die Resonatorstruktur bildet. Anschließend muss das darunterliegende Opferoxid entfernt werden, um die mikromechanischen Strukturen freizustellen. Die Siliziumoxidschicht, die bis zu diesem Zeitpunkt unter der später frei schwingenden Siliziumstruktur liegt, wird hierfür in einem Gasphasenätzprozess mithilfe von Flußsäure (HF) herausgelöst, wie in Abschnitt 2.3.8 beschrieben.

Die Flußsäure greift allerdings nicht ausschließlich das Siliziumoxid an. Auch andere Materialien können unter bestimmten Voraussetzungen davon beeinflusst werden, so auch Aluminium. Entstehende Ablagerungen lassen sich durch verschiedene Maßnahmen wie Ausheizen oder Spülen der Wafer oftmals minimieren [100]. Solche Ablagerungen können somit auch den Innendruck von Sensoren beeinflussen, wenn sie bei höheren Temperaturen zur Freisetzung von Molekülen führen.

Um den Einfluss des Gasphasenätzprozesses, den die Versuchswafer durchlaufen, auf die Sensorstrukturen zu ermitteln, wurden verschiedene Analysen vorgenommen.

Aufgrund der oben beschriebenen Versuchsergebnisse hinsichtlich des Einflusses von Aluminium auf den Kaverneninnendruck wurden Auswirkungen des Gasphasenätzens speziell auf die Aluminiumschicht betrachtet.

Durch die Behandlung der Sensorwafer mit HF ist von der Bildung eines Belags von wenigen Nanometern Dicke auf den Aluminiumstrukturen auszugehen, der sich aus einer wasserstoffhaltigen Aluminium-Fluor-Verbindung ($\text{Al(OH)}_x\text{F}_y$) zusammensetzt [101]. Diese Vermutung wurde durch eine Röntgenbeugungsanalyse (XRD) bestätigt, die bei der Robert Bosch GmbH Zentralanalytik durchgeführt wurde.

Um zu untersuchen, welche Rolle der Belag bei Desorptionsvorgängen spielt, wurde er auf den beschriebenen vollflächig beschichteten Proben künstlich erzeugt.

Für eine realitätsgetreue Bildung des Belags wurde jeweils ein vollflächig mit Aluminium beschichteter Wafer zusammen mit zwei mit Siliziumoxid beschichteten und weiteren unbeschichteten Siliziumwafern als Füllmaterial einem Prozess mit HF-Behandlung ausgesetzt. Das Oxid spielt eine Rolle, da es beim Gasphasenätzen realer strukturierter Sensorwafer durch die Flusssäure entfernt wird und Teil der stattfindenden chemischen Reaktionen ist, während die Silizium-Füllwafer notwendig sind, um das Strömungsverhalten der Prozessgase in der Ätzkammer möglichst gleichmäßig und realitätsnah zu gestalten. In einer EDX-Messung wurde anschließend die erfolgreiche Belagsbildung auf den Aluminiumwafern bestätigt. Die Proben können für Analysen herangezogen werden, bei denen nicht nur die Aluminiumschicht, sondern auch der Einfluss des Belags berücksichtigt werden soll. Da der Belag Wasserstoff enthält, wurden die Proben ergänzend in einer Thermodesorption-Massenspektrometrie (TD-MS) und einer Nuklearen Reaktionsanalyse (NRA) untersucht.

In einer TD-MS-Analyse wurden verschiedene Proben untersucht, die Aluminium enthielten. Sie sind in Tab. 4.2 aufgeführt. Bei Probe 2 (Aluminium ohne Belag) wurde zwischen 610 °C und 700 °C freigesetzter Wasserstoff detektiert. Im Vergleich dazu wurde dagegen bei Probe 1 (Aluminium mit Belag) bereits bei niedrigeren Temperaturen, ab 570 °C, Wasserstoff freigesetzt. Hier hielt die Wasserstoffdesorption bis zur Versuchsendtemperatur (725 °C) an und der größere detektierte Ionenstrom im Massenspektrometer zeigt, dass bei gleicher Probengröße bei der Probe mit Belag deutlich mehr Wasserstoff freigesetzt

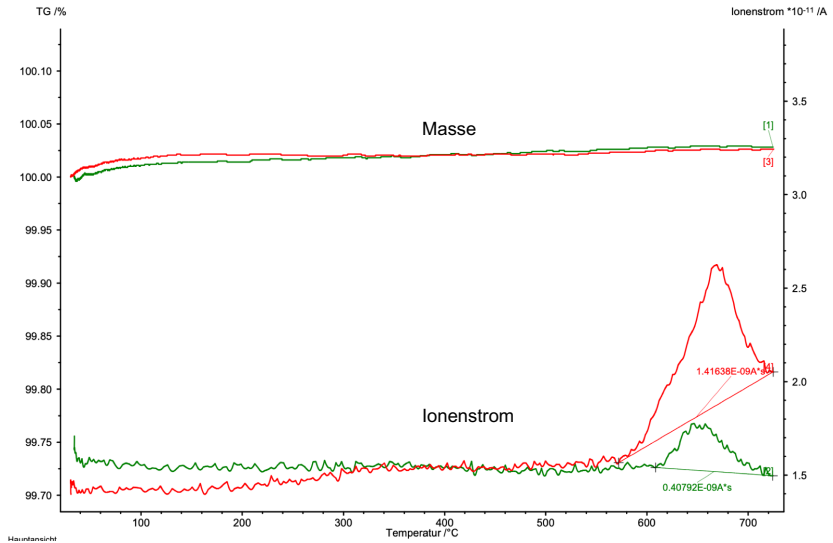


Abb. 4.11: Ergebnis der Thermodesorptionsanalyse von zwei Proben aus Silizium mit Aluminium-Beschichtung. Rot: Aluminium mit Belag, grün: Aluminium ohne Belag).

wurde als bei der Probe ohne Belag. Die Ergebnisse der TD-MS-Analyse zeigt Abb. 4.11.

Zum Vergleich mit realen Strukturen wurde zudem Probe 3 in einer TD-MS-Analyse untersucht, bestehend aus einem Stück eines strukturierten Sensorwafers, der neben weiteren Materialien auch Aluminiumstrukturen enthält, die zuvor im Rahmen der Sensorprozessierung dem Gasphasenprozess ausgesetzt waren. Diese Probe wurde lediglich auf 550 °C erhitzt, um die Sensorstrukturen nicht zu zerstören. Bis zur Endtemperatur des Versuchs (550 °C) war bei dieser Probe keine Wasserstofffreisetzung feststellbar, ebenso wie bei einer weiteren Probe (Probe 4), die mit Aluminium und Germanium beschichtet war und bis auf 450 °C aufgeheizt wurde, sodass der Einfluss des AlGe-Eutektikums im Bereich der Bondtemperaturen betrachtet werden konnte (s. Abb. A.5 im Anhang). Möglicherweise spielt bei der beobachteten Wasserstofffreisetzung unter anderem die Schmelztemperatur des Aluminiums bei 660 °C eine Rolle. Bei

Tab. 4.2: Proben für TD-MS-Analyse, die Aluminium oder Germanium enthalten.

| Probe | Aufbau | Fragestellung: Wird H ₂ freigesetzt aus...? |
|-------|--|--|
| 1 | Si-Wafer, vollflächig Al mit Belag | Aluminium mit Belag |
| 2 | Si-Wafer, vollflächig Al | Aluminium ohne Belag |
| 3 | Strukturierter Sensorwafer | Sensorwafer mit Al-Strukturen |
| 4 | Si-Wafer, vollflächig Al und Ge | Eutektikum |
| 5 | Si-Wafer, vollflächig Ge | Germanium |
| 6 | Si-Wafer, vollflächig Ge, getempert | Germanium nach Temperung |
| 7 | Strukturierter Kappenwafer, mit H ₂ O behandelt | Kappenwafer mit Ge-Strukturen nach H ₂ O-Behandlung |
| 8 | Strukturierter Kappenwafer, mit HF behandelt | Kappenwafer mit Ge-Strukturen nach HF-Behandlung |

der Probe mit Aluminium ohne Belag tritt die stärkste detektierte Wasserstofffreisetzung etwas unterhalb von 660 °C auf, bei der Probe mit Belag liegt der Peak etwas oberhalb davon. Es ist denkbar, dass im Moment des Aufschmelzen des Aluminiums die Freisetzung eingelagerten Wasserstoffs begünstigt wird, da sich die Anordnung der Atome ändert. Bei weiter steigenden Temperaturen nimmt die Wasserstofffreisetzung wieder ab, möglicherweise auch aufgrund der besseren Wasserstofflöslichkeit in flüssigem Aluminium [102] (vgl. Abb. 4.6).

Das Ergebnis der NRA und der TD-MS-Analysen von Aluminiumproben mit und ohne den gezielt erzeugten Belag zeigt, dass der Belag auf der Aluminiumschicht, der während der HF-Behandlung der Wafer entsteht, zur Wasserstoffdesorption beitragen kann.

Die Temperaturen, bei denen im Rahmen der TD-MS-Analyse Wasserstoffdesorption beobachtet werden konnte, liegen deutlich über den Temperaturen, die

beim Waferbonden auftreten. Auch bei den Proben 3 und 4 wurde im Bereich der Bondtemperatur um 423 °C kein freigesetzter Wasserstoff detektiert, trotzdem finden beim Bonden Desorptionsprozesse statt.

Da beim Bonden von Drehratensensoren deutlich geringere Gasdrücke herrschen als während der Analyse, die bei Umgebungsdruck durchgeführt wurde, ist es denkbar, dass der Belag auf den Aluminiumstrukturen während des Bondens zur Freisetzung von Wasserstoff beiträgt. Ein geringer Gasdruck in der Bondkammer könnte Gasdesorption von Oberflächen in der Sensorkaverne erleichtern, sodass in diesem Fall schon bei den Bondtemperaturen im Bereich der eutektischen Temperatur von 423 °C Desorbate in die Kavernen gelangen.

Bei einer NRA einer äquivalenten Probe (Aluminiumbeschichtung mit Belag auf Siliziumwafer) war in der analysierten Tiefe zwischen 150 nm und 1500 nm der Aluminiumschicht mit Belag kein Wasserstoff nachweisbar. Der Belag selbst auf dem Aluminium konnte in der NRA nicht unmittelbar analysiert werden. In einer Tiefe von 50 nm gibt es zwar Hinweise auf Wasserstoff in der Aluminiumschicht, die Wasserstoffmenge bewegt sich hier jedoch an der Nachweisgrenze.

Die Analyseergebnisse zeigen, dass die HF-Behandlung im Rahmen des Gasphasenätzprozesses zwar zu dem Belag führt, nicht aber zu eindeutig nachweisbaren Wasserstoffeinlagerungen im reinen Aluminium.

Zusammenfassend zeigen die Analyseergebnisse Folgendes:

1. Aus dem Belag, der sich infolge des Gasphasenätzprozesses auf den Aluminiumstrukturen bildet, kann Wasserstoff freigesetzt werden.
2. Hinweise darauf, dass das Volumen der Aluminiumschicht eine wichtige Rolle bei Wasserstoffausgasungen spielt, gibt es dagegen nicht. Dieses Ergebnis stimmt auch mit Literaturangaben überein, denen zufolge die Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium verhältnismäßig gering ist [103–107]. Für die Wasserstofflöslichkeit in AlGe-Eutektikum liegen keine Daten vor. Der Sprung in der Wasserstofflöslichkeit bei der Verflüssigung von Aluminium (s. Abb. 4.6) könnte aber dazu führen, dass beim

Bonden gasförmiger Wasserstoff im flüssigen Eutektikum gelöst wird, der später beim Erstarren wieder freigesetzt werden kann.

Der Belag auf den Aluminiumstrukturen ist als Desorptionsquelle zu berücksichtigen, da die beschriebenen Analyseergebnisse darauf hindeuten, dass das Gasphasenätzen eine Kontamination der Aluminiumoberfläche mit wasserstoffhaltigen Molekülen nach sich zieht. Dies hat offensichtlich Wasserstoffausgasungen zur Folge.

Waferbonden I: Einfluss der Bonddauer auf den Kavernendruck

Bei Kombi-MEMS-Chips mit zwei benachbarten Kavernen auf einem Chip besteht nach abgeschlossener Prozessierung zwischen der Drehratensensor- und der Beschleunigungssensorkaverne ein Konzentrationsgefälle von Desorbaten aus dem Bondprozess. Der Konzentrationsunterschied kommt dadurch zustande, dass die Drehratensensorkaverne nach dem Bonden erneut geöffnet, evakuiert und mittels Laser-Reseal wieder verschlossen wird, um den gewünschten niedrigen Druck des Dämpfungsgases einzustellen, während der Gasinhalt der Beschleunigungssensorkaverne nach dem Bonden unverändert bleibt. Aufgrund des Konzentrationsgradienten sind zwischen den Kavernen Diffusionsprozesse über mikromechanische Schichten möglich, die beide Kavernen miteinander verbinden. Versuchsergebnisse zu Diffusionsvorgängen werden im Abschnitt 4.7 ausführlich behandelt. Für das Verständnis des folgenden Versuchs ist dieses Wissen notwendig.

Der folgende Versuch soll zeigen, inwieweit die Dauer des Bondprozesses Auswirkungen auf die Bildung von Desorbaten und folglich auf die Diffusion von Desorbaten zwischen Drehratensensor- und Beschleunigungssensorkaverne bei Kombi-MEMS-Chips hat. Der Versuch zeigt Folgendes: Je länger die Kombi-MEMS-Wafer im Bondprozess der Höchsttemperatur (über 423 °C) ausgesetzt waren, desto mehr Desorbate sammeln sich in den Kavernen. Der Druckunterschied, der nach dem Laser-Reseal zwischen benachbarten Drehraten- und Beschleunigungssensorkavernen besteht, ist somit umso größer, je länger der

Wafer der Bondtemperatur ausgesetzt war. Dies lässt sich daraus schließen, dass bei beschleunigter Alterung der gebondeten Wafer ein umso größerer Druckanstieg in den Drehratensensorkavernen zu beobachten ist, je länger ein Wafer der Bondtemperatur ausgesetzt war, wie Abb. 4.12 zeigt.

Aus diesem Ergebnis lassen sich zwei Erkenntnisse ableiten. Einerseits zeigt es, dass beim Bonden kontinuierlich Desorptionsprozesse stattfinden und nicht beispielsweise ein Großteil der Desorbate gleich zu Beginn freigesetzt wird. Andererseits wird bei diesem Versuch deutlich, dass die entstandenen Desorbate bei einer Lagerungstemperatur von 150 °C von der nicht evakuierten Beschleunigungssensorkaverne in die evakuierte Drehratensensorkaverne diffundieren. Die Diffusion ist aufgrund des Druckunterschieds zwischen den benachbarten Kavernen möglich.

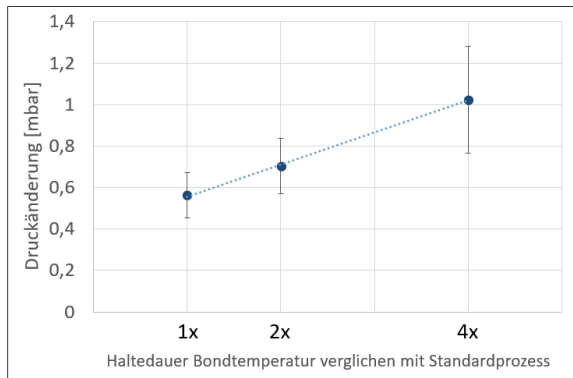


Abb. 4.12: Korrelation zwischen der Haltedauer der Bondtemperatur im eutektischen Bondprozess und dem Druckanstieg in der Drehratensensorkaverne bei Kombi-MEMS-Chips während einer 1000-stündigen Lagerung bei 150 °C.

Waferbonden II: Temperung im Bondprozess

Aufgrund der Prozessabfolge der Sensorwaferprozessierung können angelagerte wasserstoffhaltige Substanzen, die später in den Kavernen auffindbar sind, offenbar bis zum Zeitpunkt des Waferbondens nicht wieder vollständig entweichen.

Während des Waferbondprozesses, bei dem die Wafer Temperaturen ausgesetzt sind, die höher als die eutektische Temperatur der Bondrahmenmaterialien von 423 °C sind, werden Desorbate freigesetzt und sind anschließend in den Sensorkavernen eingeschlossen. Bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die kappen- und sensorseitigen Bondrahmen miteinander verschmelzen, ist noch ein Gasaustausch zwischen Innen- und Außenseite einer Kaverne möglich, da die sensor- und kappenseitigen Bondrahmen vor der eutektischen Reaktion nicht gasdicht miteinander verbunden sind. Das ist bekannt, da auch Änderungen des als Prozessparameter eingestellten Kavernendrucks in diesem Stadium noch möglich sind.

Da die Temperaturen je nach Prozessführung bereits vor dem Zeitpunkt der eutektischen Reaktion auf über 400 °C steigen können, wirkt eine gewisse Zeitspanne vor dem Erreichen der eutektischen Temperatur wie eine Temperung, während der bereits Desorptionsprozesse stattfinden können. Bei geeigneter Prozessführung können die freiwerdenden Gase vor Verschluss der Kavernen abgepumpt werden.

Das Waferbonden ist somit ein wichtiger Punkt in der Prozessierung, an dem durch die Gestaltung des Bondprozesses Einfluss auf den resultierenden Kaverneninnendruck genommen werden kann. Dies gilt für Sensorkavernen wie alleinstehende Drehratensensoren, deren Innendruck durch das Waferbonden bestimmt wird. Bei Varianten wie Drehratensensoren als Teil eines Kombi-MEMS-Chips, die später erneut geöffnet und in einem Reseal-Prozess wieder verschlossen werden, ist das Ausheizen während des Bondens nicht notwendig, da der Druck erst während des Reseals eingestellt wird.

Um die Wirkung des Waferbondprozesses hinsichtlich des späteren Kaverneninnendrucks zu untersuchen, wurde in einem Versuch beim Bonden von Drehratensensorwafern ein Ausheizschritt in den Bondprozess integriert, indem der Abschnitt vor dem Ansteigen der Temperatur auf die finale Bondtemperatur variiert wurde. In diesem Abschnitt sind die Bondrahmen von Sensor- und Kappenwafer noch nicht miteinander verschmolzen, sodass freiwerdende Desorbate noch abgepumpt werden können. Die Gaszusammensetzung bzw. der Druck,

die später im vakuumgebondeten Chip vorliegen, können somit an dieser Stelle durch Ausheizen beeinflusst werden.

Variabel sind an dieser Stelle im Prozessverlauf Temperatur, Druck und Fluss des Spülgases Stickstoff sowie die Ausheizdauer und die Abfolge von Zyklen, in denen die Bondkammer mit Spülgas geflutet und wieder evakuiert wird. Einen schematischen Bondprozessverlauf mit integriertem Ausheizplateau zeigt Abb. 4.13, das Ausheizplateau ist hervorgehoben.

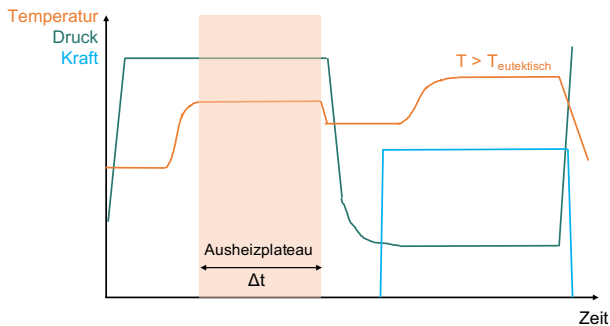


Abb. 4.13: Temperaturplateau als In-situ-Ausheizschritt im Bondprozess vor dem Aufbringen der Bondkraft und dem Erreichen der Bondtemperatur, bei der die eutektische Reaktion stattfindet.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Ausheiztemperatur neben der Ausheizdauer den größten Einfluss auf den späteren Kaverneninnendruck hat.

Abb. 4.14 zeigt den resultierenden Kaverneninnendruck nach dem Bonden von Wafern der Versuchsreihe, die bei zwei verschiedenen Temperaturen (links) bzw. Dauern (rechts) ausgeheizt wurden. Die beiden Wafer, bei denen die Ausheiztemperatur höher war (in Abb. 4.14 links grün markiert), haben nach dem Bonden einen geringeren Innendruck als die beiden weniger heiß getemperten Wafer (in Abb. 4.14 links rot markiert). Dieses Ergebnis zeigt, dass das In-situ-Ausheizen es erlaubt, Desorbate noch vor dem endgültigen Verschluss der Chips zu entfernen.

In Abb. 4.14 rechts ist ein entsprechendes Ergebnis für Wafer zu sehen, in deren Waferbondprozess ein Ausheizplateau von 20 Minuten (grün markiert) bzw. 60

Minuten Dauer (gelb markiert) bei 400 °C enthalten war. Der erste Wafer in beiden Darstellungen ist ein Referenzwafer ohne Ausheizplateau. Das Ergebnis zeigt, dass der resultierende Kaverneninnendruck umso niedriger ist, je länger ein Wafer in der Bondkammer ausgeheizt wurde.

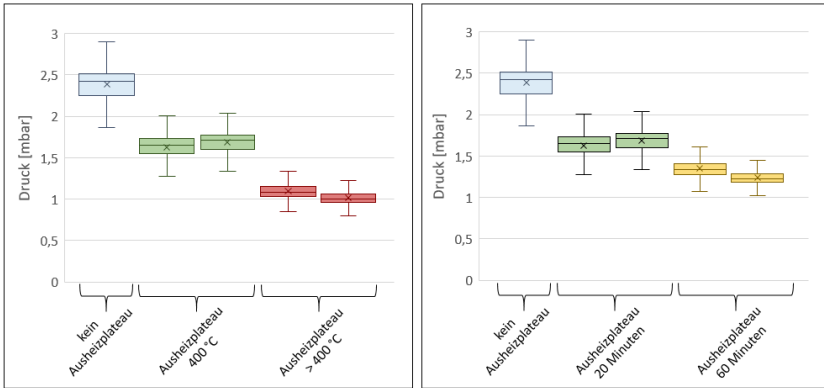


Abb. 4.14: Kavernendrucke nach Bonden von verschiedenen Wafern mit und ohne Ausheizplateau im Bondprozess. Ganz links in beiden Schaubildern jeweils die Daten der ausgewerteten Chips eines Referenzwafers ohne Ausheizplateau, anschließend Daten von jeweils zwei Wafern pro Variante. Links: Ausheizplateau mit 20 Minuten Dauer bei verschiedenen Temperaturen. Rechts: Ausheizplateau bei 400 °C mit unterschiedlicher Dauer.

Die Wirkung des In-situ-Ausheizens wurde durch eine weitere Variante von Testchips noch verbessert. Diese Chips haben die in Abschnitt 3.5.6 und in [89] beschriebene Besonderheit, dass hier die Bondrahmen von Sensor- und Kappenwafer dank in die Mikrostruktur eingebauten Abstandshaltern nicht miteinander in Kontakt kommen, bis das Aluminium so weich ist, dass die Abstandshalter einsinken. Dies ist erst kurz vor Erreichen der eutektischen Temperatur der Fall. Ohne die Abstandshalter würden die sensor- und kappenseitigen Bondrahmen von Anfang an direkt aufeinander liegen.

Mithilfe der Abstandshalter kann eine vorzeitige Bildung des Eutektikums vermieden werden, sodass die Bondrahmen an allen Stellen des Wafers zeitgleich

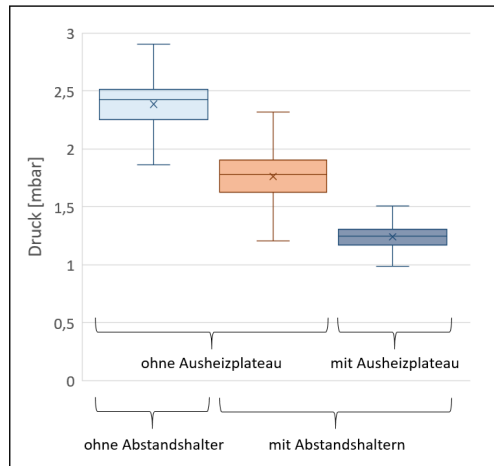


Abb. 4.15: Kavernendrucke nach Bonden von verschiedenen Wafern mit und ohne Abstandshalter. Ganz links die Daten der ausgewerteten Chips des Referenzwafers ohne Ausheizplateau und ohne Abstandshalter, anschließend Daten eines Wafers mit Abstandshaltern und eines Wafers mit Abstandshaltern und Ausheizplateau.

aufschmelzen und nicht einige Kavernen aufgrund des Waferbows oder eines Temperaturgradienten früher verschlossen werden als andere. Diese Methode verringert die Schwankungen des Kaverneninnendruckes über einen Wafer, da vor dem Verschluss in allen Chips in gleichem Maß Ausgasungen abgepumpt werden können. Abb. 4.15 zeigt Ergebnisse von Wafern mit und ohne Abstandshalter, bei denen der Einfluss der Abstandshalter deutlich erkennbar ist. Mit Abstandshaltern (Messwerte rechts im Bild, orange und dunkelblau markiert) ist der Innendruck nach dem Bonden niedriger als ohne Abstandshalter (Messwerte links im Bild, hellblau markiert). Dieses Ergebnis spricht dafür, dass die Abstandshalter ein Abpumpen von Gasen aus Desorptionsprozessen aus den Kavernen vor dem endgültigen Verschluss begünstigen. Der geringste Kavernendruck lässt sich erzielen, wenn neben den Abstandshaltern auch ein Ausheizplateau im Bondprozess vorgesehen ist, siehe Abb. 4.15 ganz rechts.

Neben der Ausheiztemperatur, die sich in den vorhergehenden Versuchen ohne Abstandhalter als wirkungsvoll erwiesen hat, wurden auch höhere Ausheiztemperaturen von bis zu 460 °C untersucht. Bei 440 °C ist der Ausheizeffekt stärker als bei 420 °C, während das Verfahren bei 460 °C nicht mehr zuverlässig anwendbar ist, da die Aluminiumgegenstände der Abstandhalter bei diesen hohen Temperaturen bereits so weich werden, dass die Abstandhalter zu früh einsinken und stellenweise auf einem Wafer vorzeitige eutektische Reaktionen stattfinden.

Laser-Reseal: Ausheizen vor Verschluss

Ergänzend zu den Waferbondversuchen wurde die Möglichkeit des Ausheizens im Rahmen des Laser-Reseal-Prozesses bei Kombi-MEMS-Chips geprüft. Dafür wurde ein Wafer in fünf Abschnitte eingeteilt, die nacheinander im Laser-Reseal-Prozess verschlossen wurden. Zwischen der Bearbeitung von zwei Abschnitten wurde jeweils eine Pause von zehn Minuten eingelegt, um den Prozess zu entzerren und Effekte des zeitverzögerten Verschlusses besser sichtbar zu machen. Die noch unverschlossenen Chips wurden umso länger in der Prozesskammer ausgeheizt, je später sie verschlossen wurden. Übereinstimmend mit den Bondversuchen zeigt sich auch bei diesem Versuch, dass ein Ausheizen der geöffneten Drehratensensorkavernen vor dem Wiederverschluss einen positiven Effekt auf den resultierenden Kavernendruck hat, selbst bei einer geringeren Ausheiztemperatur als beim Bonden, unterhalb von 400 °C. Je länger die Kavernen vor dem Verschluss (ohne Bruch des Vakuums) ausgeheizt werden, desto geringer ist der realisierbare Innendruck.

Abb. 4.16 zeigt die resultierenden Gütewerte (links als Wafermap) und Kavernendrucke (rechts) von Drehratensensoren auf einem Wafer nach dem Laser-Reseal, aufgeschlüsselt nach den zeitversetzt verschlossenen Abschnitten, die sich deutlich voneinander unterscheiden lassen. Je höher die Ausheiztemperatur während des Prozesses, desto geringer sind die Unterschiede bei gleicher Wartezeit zwischen dem Chipverschluss zweier Abschnitte.

Die Ergebnisse der Ausheizversuche bei Waferbond- und Laser-Reseal-Prozess zeigen, dass durch Ausheizen der Wafer in der Bondkammer vor dem endgülti-

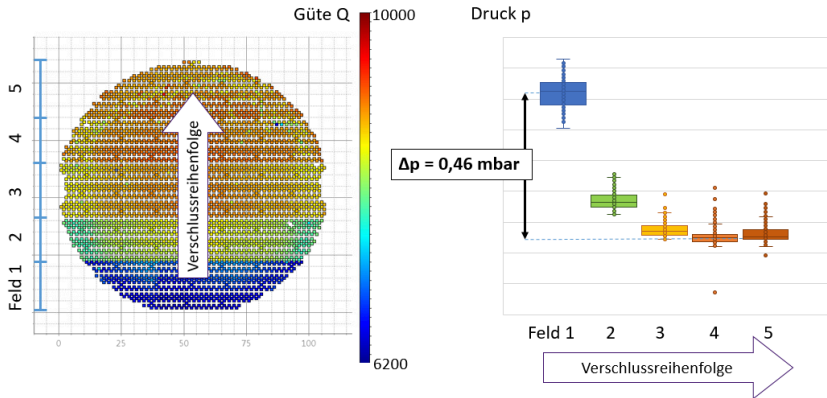


Abb. 4.16: Wafermap der Güte (links) und Verteilung der Druckwerte (rechts) von Drehratensensorkavernen auf einem Wafer, der mittels Laserreseals in fünf Abschnitten verschlossen wurde. Zwischen den Abschnitten wurde der Wafer jeweils für 10 Minuten bei der Prozess Temperatur gehalten, während der Verschlussprozess pausierte, sodass Unterschiede zwischen früher und später verschlossenen Chips sichtbar werden.

gen Verschluss der Kavernen Desorptionsprozesse vorweggenommen werden können. So wird der entweichende Wasserstoff zu einem großen Teil noch in der Prozesskammer abgepumpt und verbleibt nicht in den Kavernen. Dadurch sind die resultierende Kaverneninnendrucke niedriger und präziser einstellbar als bei Wafern, die ohne Ausheizplateau gebondet werden. In das Chipdesign integrierte Abstandshalter erleichtern das Abpumpen im Bondprozess von Gasen aus den Sensorkavernen und ermöglichen noch geringere Kaverneninnendrucke.

Siliziumepitaxie

Der Einfluss der Siliziumepitaxie wird in Abschnitt 4.6.5 in Zusammenhang mit Untersuchungen der Siliziumschichten näher betrachtet.

4.6.3 Germanium

Germanium wird im Schichtaufbau der Sensoren als kappenseitiges Bondrahmenmaterial verwendet. Die Germaniumschicht wird in einem LPCVD-Prozess

abgeschieden (vgl. Abschnitt 2.3.9) und mittels Lithographie und Trenchen strukturiert. Da das Germanium aus gasförmigem GeH_4 abgeschieden wird, ist ein Vorkommen von Wasserstoff in der Germaniumschicht denkbar, der später im Bondprozess beim Aufschmelzen des Germaniumbondrahmens freigesetzt werden könnte.

Mit den folgenden Versuchen wurde untersucht, inwiefern die Germaniumschicht auf den Kappenwafern zur Bildung von gasförmigem Wasserstoff in den Sensorkavernen beiträgt.

Nukleare Reaktionsanalyse von Germanium

Um die Germaniumschicht als Desorptionsquelle für Wasserstoff zu untersuchen, wurden zunächst in einer NRA zwei Varianten von germaniumbeschichteten Siliziumwafern analysiert (s. Übersicht in Tab. 3.2). Eine Probe wurde nach der Germaniumabscheidung getempert, die andere nicht. Das Analyseergebnis zeigt im Rahmen der Messempfindlichkeit bei keiner der beiden Proben Wasserstoff in der analysierten Schichttiefe zwischen 100 nm und 1500 nm, s. Abb. 4.17. Somit ist nicht davon auszugehen, dass während der Abscheidung des Germaniums signifikante Wasserstoffmengen in die Germaniumschicht eingelagert werden, die zu den später beobachteten Ausgasungen führen.

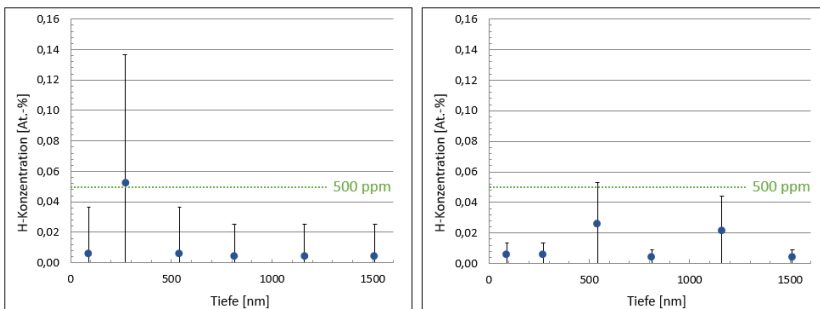


Abb. 4.17: Tiefenprofile der Wasserstoffkonzentration in zwei Germaniumproben als Ergebnis einer Nuklearen Reaktionsanalyse. Links ungetemperte Probe, rechts Probe nach Temperung.

Thermodesorption-Massenspektrometrie (TD-MS) von Germanium

In einer TD-MS wurden Proben analysiert, die aus unstrukturierten, mit Germanium beschichteten Siliziumwaferstücken bestanden (Proben 5 und 6 in Tabelle 4.2). Eine Probe wurde vor der Analyse getempert, die andere blieb ungetempert. Zwei weitere Proben bestanden aus Bruchstücken von Kappenwafern, die strukturiertes Germanium als Bondrahmenmaterial enthalten (Proben 7 und 8 in Tabelle 4.2). Ab ca. 650 °C bis zur Endtemperatur des Versuchs von 900 °C zeigen alle diese Proben eine Freisetzung von Wasserstoff. Diese Temperaturen liegen deutlich über der Höchsttemperatur des eutektischen Bondprozesses.

Die beiden analysierten Kappenwaferstücke (Proben 7 und 8) wurden nach dem Strukturieren mit Flusssäure bzw. Wasser behandelt, um Oxide an der Oberfläche zu entfernen. Eine Probe wurde dafür mit Wasser gespült, die andere mit Flusssäure. Bei den Ergebnissen der TD-MS-Analyse ergaben sich durch die unterschiedlichen Behandlungen jedoch keine Unterschiede, auch nicht gegenüber den unstrukturierten Proben. Die TD-MS-Analyseergebnisse der Proben mit Germaniumbeschichtung zeigt Abb. A.6 (Anhang).

Das Ergebnis der TD-MS passt auf den ersten Blick nicht zum Ergebnis der NRA, bei der in den Germaniumschichten kein Wasserstoff auffindbar ist. Da dem NRA-Ergebnis ab einer Schichttiefe von 100 nm zufolge kein Wasserstoff in messbarer Menge in der Germaniumschicht eingelagert ist, könnten die Ausgasungen während der TD-MS-Analyse jedoch auch aus Anlagerungen von wasserstoffhaltigen Molekülen an der Oberfläche der Germaniumschicht stammen.

Bei der TD-MS-Analyse der strukturierten Waferstücke könnten wasserstoffhaltige Substanzen zusätzlich im Verlauf der Prozessierung in Materialien des Sensors eingebaut worden sein. Ob in Silizium oder Siliziumoxid Wasserstoff eingebaut ist, zeigen Versuche, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

Zusammengefasst zeigen die Analyseergebnisse der Germaniumproben Folgendes:

1. Wasserstoffdesorption von Germaniumoberflächen im Sensor kommt als Einfluss auf den Kavernendruck in Betracht.
2. Da Wasserstoff in den Analysen erst bei sehr hohen Temperaturen freigesetzt wird, die mit 650 °C deutlich über den Temperaturen des Bondprozesses liegen, ist jedoch nicht mit Ausgasungen in großem Umfang aus der Germaniumschicht während des Waferbondens zu rechnen.
3. Da in die Germaniumschicht der NRA zufolge kein Wasserstoff eingebaut ist, stammt der in TD-MS-Analysen freigesetzte Wasserstoff allenfalls von der Oberfläche der Schicht. Die Anlagerungen von wasserstoffhaltigen Teilchen an der Germaniumoberfläche können gegebenenfalls durch einen Temperschnitt in der Bondkammer ohne Bruch des Vakuums vor dem Verschluss der Chips reduziert werden.

Es ist somit unwahrscheinlich, dass die Germaniumschicht die Quelle des Wasserstoffs ist, der nach dem eutektischen Waferbondprozess in den Kavernen zu finden ist.

Drehratensensoren mit zusätzlicher Germaniumfläche in Hochtemperaturlagerung

Analog zu dem in 3.5.2 bzw. 4.6.1 beschriebenen Versuch wurden auch Versuche mit Drehratensensoren durchgeführt, deren Kavernen zusätzliches Germanium enthielten. Mithilfe dieser speziellen Versuchs-Chips kann der Einfluss von Germanium auf den Innendruck der Drehratensensoren nach dem Waferbonden untersucht werden. Um den Einfluss des Germaniums auf den Kavernendruck beurteilen zu können, durchlaufen die Wafer keinen Reseal-Prozess, sondern bleiben nach dem Bonden ungeöffnet.

Eine Gütemessung nach abgeschlossener Prozessierung der Wafer zeigt, dass der Kaverneninnendruck der Chips mit zusätzlichem Germanium nicht wie

bei zusätzlichem Aluminium erhöht ist, sondern niedriger als der Druck in der Referenzkaverne ohne zusätzliches Material ausfällt (s. Abb. 4.9). Die Germaniumstrukturen dominieren die Ausgasungen während des Bondprozesses demnach nicht. Nach einer Hochtemperaturlagerung von Chips mit einer größeren Germaniummenge in der Kaverne ist zudem der Druckanstieg, der aufgrund der beschleunigten Alterung zu beobachten ist, weniger stark als bei der Referenzkaverne. Dieses Ergebnis könnte ein Hinweis darauf sein, dass das Germanium sogar absorbierend wirksam sein kann. Auf diese Weise könnte die zusätzliche Germaniumfläche zur Stabilisierung des Innendrucks beitragen.

Das Ergebnis des Versuchs mit zusätzlichem Germanium in Drehratensensor-kavernen stützt die Vermutung, dass sich der Wasserstoff, der in der TD-MS-Analyse freigesetzt wurde, nicht von der Abscheidung an in der Germaniumschicht befindet.

AlGe-Eutektikum

Neben Testchips mit zusätzlichem Germanium oder Aluminium wurden auch Testchips mit zusätzlichem AlGe-Eutektikum untersucht, um festzustellen, ob durch das Bilden des Eutektikums spezifische Desorptionsprozesse in Gang gesetzt werden. Das Ergebnis der Druckwerte von Testchips mit zusätzlichem Eutektikum lag durchgehend zwischen den Werten von Chips mit zusätzlichem Aluminium und Chips mit zusätzlichem Germanium (s. Abb. 4.9). Dies lässt darauf schließen, dass bei Vorhandensein des Eutektikums die beobachteten Effekte der Einzelmaterialien in Kombination ohne bedeutende Zusatzeffekte auftreten.

4.6.4 Trenchpolymere

Nach der Strukturierung von Silizium und Germanium mithilfe eines DRIE-Prozesses bleiben Polymere als Rückstände der Seitenwandpassivierung zurück. Aufgrund der Substanzen, die im Trenchprozess verwendet werden, sind die Polymerreste als Desorptionsquelle für Wasserstoff denkbar.

Um den Effekt der Seitenwandpassivierung auf den Kaverneninnendruck feststellen zu können, wurden Kombi-MEMS-Wafer mit modifizierten Trenchprozessen hergestellt. Die Drehratensensorkavernen der Kombi-MEMS-Chips wurden nach dem Waferbonden in einem Trenchprozess wieder für den Resealprozess geöffnet.

Der Trenchprozess zum Öffnen des Resealzugangs wurde bei zwei Wafern unterschiedlich gestaltet. Im ersten Fall wurden im sich wiederholenden Passivierungsschritt des Trenchprozesses durch verstärkte Polymerabscheidung eine besonders dicke Seitenwandpassivierung erzeugt. Im zweiten Fall wurden weniger Polymere abgeschieden, zusätzlich wurden Polymerreste aus dem Trenchprozess nach dem Strippen der Lackmaske mithilfe eines Sauerstoffplasmas gezielt entfernt. Anschließend wurden alle geöffneten Kavernen in einem Laser-Resealprozess wieder verschlossen und einer Lagerung zur beschleunigten Alterung ausgesetzt, sodass die Druckänderung aufgrund der Belastung abhängig von der Polymermenge im Chip betrachtet werden konnte. Eine größere Druckänderung während der beschleunigten Alterung bei dem Wafer mit größerer Polymermenge würde für Trenchpolymere als Desorbatquellen sprechen.

Im direkten Vergleich zeigt der Wafer mit einer besonders dicken Passivierungsschicht nach der beschleunigten Alterung jedoch keine signifikant andere Kavernendruckänderung als der Wafer, bei dem Überreste der Trenchpolymere nach dem Strippen der Lackmaske gezielt entfernt wurden (s. Abb. 4.18). Der Einfluss der Trenchpolymere auf den Kaverneninnendruck scheint demnach vernachlässigbar klein zu sein.

4.6.5 Siliziumdioxid

Im Schichtaufbau der untersuchten Sensoren finden zwei verschiedene Arten von Siliziumdioxid Anwendung. Die erste Oxidschicht zu Beginn der Waferprozessierung ist ein thermisches Oxid, das in einem sogenannten nassen Oxidationsverfahren auf dem Siliziumwafer aufwächst. Alle weiteren Oxidschichten sind TEOS-Oxide, die in einem LPCVD-Verfahren abgeschieden werden. Beide Abscheideverfahren sind in Abschnitt 2.3.1 beschrieben.

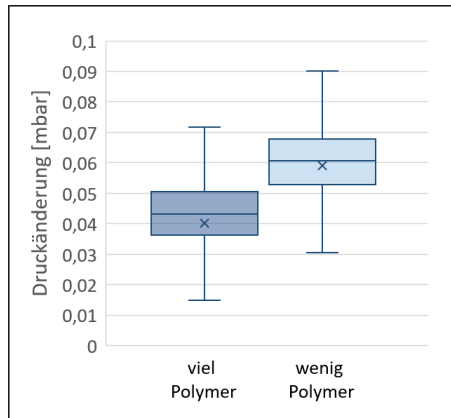


Abb. 4.18: Druckänderung nach Lagerung (1000 h, 150 °C in Drehratensorkavernen von zwei Wafern nach unterschiedlichen Trenchprozessen. Links: Wafer, bei dem im Trenchprozess gezielt eine besonders große Menge von Trenchpolymeren abgeschieden wurde; rechts: Wafer, bei dem weniger Polymere abgeschieden wurden, die zudem mithilfe eines Sauerstoffplasmas besonders gründlich wieder entfernt wurden.

Als Wasserstofflieferanten kommen zunächst beide Arten des Siliziumoxids infrage. Bei der thermischen Oxidation wird Wasserdampf verwendet, der als Ursache für Wasserstoffeinlagerungen in der Oxidschicht denkbar ist, während bei der LPCVD-Abscheidung mit $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ eine Substanz als Ausgangsstoff dient, die ebenfalls Wasserstoff enthält und Wasserstoffeinlagerungen im Oxid verursachen könnte.

Auch aufgrund der Löslichkeit von Wasserstoff in Siliziumoxid [96, 108], die höher ist als die in den anderen untersuchten Materialien (s. Abb. 4.6), ist es möglich, dass während der nachfolgenden Waferprozessierung Wasserstoff in den Oxidschichten eingelagert wird, der langfristig oder bei entsprechend hohen Temperaturen nach Verschluss der Kavernen wieder desorbiert.

Gegen Oxide als Wasserstoffquellen während des Bondprozesses spricht der Aspekt, dass nach der Abscheidung der Oxidschichten im weiteren Verlauf der Waferprozessierung Temperaturen auftreten, die deutlich über den Temperaturen im Bondprozess am Ende des Prozessflusses liegen. Trotzdem tritt beim Bonden

Desorption auf und Gase werden in die Kavernen eingeschlossen. Unter der Annahme, dass Ausgasungen aus den Oxiden schon bei höheren Prozesstemperaturen im Verlauf der Waferprozessierung vor dem Bondprozess freigesetzt werden können, sind Oxidschichten als Hauptquellen der Wasserstoffeinschlüsse beim Bonden wenig wahrscheinlich.

Denkbar wäre jedoch, dass der Wasserstoff, falls er von Anfang an in den TEOS-Oxiden eingelagert ist, nicht entweichen kann, solange das Oxid von einer unstrukturierten epitaktischen Siliziumschicht bedeckt ist. Erst nach dem Öffnen der mikromechanischen Funktionsschicht in einem Trenchprozess liegen Teile der Oxidoberflächen wieder frei, sodass Desorbate aus der Oxidschicht entweichen können. Auf diese Weise könnten Wasserstoffeinlagerungen bis zum Bonden in den Oxidschichten gebunden bleiben. Deshalb werden in den folgenden Versuchen nicht nur Oxidschichten direkt nach der Abscheidung analysiert, sondern auch Proben, bei denen das Oxid von epitaktisch aufgewachsenem Silizium bedeckt ist.

Sollte Wasserstoff dagegen erst bei einem Folgeprozessschritt in die Oxidschichten eingelagert werden, auf die bis zum Bonden keine hohen Temperaturen mehr folgen, ist es möglich, dass diese Wasserstoffeinlagerungen beim Bonden freigesetzt werden. Folgende Prozessschritte kommen als Einflüsse auf das Siliziumoxid kommen infrage:

1. Silizium-Epitaxie unmittelbar nach Oxidabscheidung: Hierfür wird eine Probe entsprechend Tabelle 4.3 zuerst mit Oxid, dann mit Silizium beschichtet. Das Silizium wurde anschließend mit SF_6 wieder entfernt, sodass das Oxid nach Siliziumabscheidung untersucht werden konnte.
2. Gasphasenätzen mit HF zum Entfernen von Opferoxid: Nach dem Gasphasenätzen bleiben lediglich die Oxidreste bestehen, die mit weiteren Schichten den Schichtstapel der Kavernenwand bilden, sowie gegebenenfalls vergrabene Oxidschichten, die mit den ätzenden Substanzen nicht in Kontakt kommen. Da das Hauptprozessgas beim Gasphasenätzen Flusssäure (HF) ist, ist nicht auszuschließen, dass bei diesem Prozess

Wasserstoff in bestehende Schichten eingelagert wird. Da nach dem Gasphasenätzen jedoch nur noch geringfügige Reste von Oxiden zurückbleiben, die gegebenenfalls als Wasserstoffspeicher zur Verfügung stehen würden, ist es unwahrscheinlich, dass die Wasserstoffausgasungen, die beim Bonden auftreten, ausschließlich auf Desorption aus diesen Oxidresten zurückzuführen sind.

TD-MS-Analyse von Siliziumoxid

Aus der Literatur ist bekannt, dass TEOS-Oxide, die in CVD-Verfahren abgeschieden werden, signifikante Wasserstoffeinlagerungen aufweisen können. Deshalb wurde eine TD-MS-Analyse an Wafern durchgeführt, die im LPCVD-Verfahren mit TEOS-Oxid beschichtet worden waren. Die Analyse soll zeigen, ob aus einer TEOS-Schicht, wie sie in den Versuchswafern verwendet wird, Wasserstoff freigesetzt wird.

Durch den Aufbau der Proben wie in Tabelle 4.3 aufgeführt zeigt diese Analyse zudem, ob Wasserstoffeinlagerungen gegebenenfalls bei der TEOS-Abscheidung selbst oder erst während der nachfolgenden Silizium-Epitaxie in die Oxidschicht eingebaut werden, da bei der Epitaxie Wasserstoff als Nebenprodukt anfallen und sich in der bereits zuvor applizierten Oxidschicht lösen könnte. Im Rahmen der TD-MS-Analyse wurde jede Probe unter N_2 -Atmosphäre bis auf $1100\text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt.

Im Massenspektrometer war bei keiner der Proben Wasserstoff detektierbar (s. Abb. A.7 im Anhang). Auch die epitaktische Siliziumabscheidung führt dem Analyseergebnis zufolge nicht dazu, dass in die unter dem Silizium liegende Oxidschicht größere Wasserstoffmengen eingebracht werden, die später wieder freigesetzt werden können. Deutlich größere Wasserstoffmengen ergeben sich bei Siliziumoxid- und Siliziumnitridschichten, die nicht im LPCVD-, sondern im PECVD-Verfahren abgeschieden werden, wie die TD-MS-Analyse einer PECVD-Siliziumnitridschicht zeigt, die als Referenz hinzugefügt wurde. Schichten, die im PECVD-Abscheidungsverfahren hergestellt werden, finden bei

Tab. 4.3: Prozessierung der TEOS- und Epitaxie-Si-Proben für TD-MS-Analyse.

| Probe | Prozessierung | Fragestellung |
|-------|--|--|
| 1 | Siliziumwafer + LPCVD-TEOS (1,8 μm) | Wird Wasserstoff bei TEOS-Abscheidung in TEOS-Schicht eingebaut? |
| 2 | Siliziumwafer + LPCVD-TEOS (1,8 μm) + Epitaxie-Silizium (20 μm) | Wird Wasserstoff bei Epitaxie in Si-Schicht eingebaut? |
| 3 | Siliziumwafer + LPCVD-TEOS (1,8 μm) + Epitaxie-Silizium (20 μm), Entfernung der Epi-Si-Schicht mit SF_6 | Wird Wasserstoff bei Epitaxie in TEOS-Schicht eingebaut? |

den Versuchssensoren in dieser Arbeit jedoch keine Anwendung und werden deshalb im Folgenden nicht näher betrachtet.

Hinweise auf andere desorbierende Gasspezies neben Wasserstoff wurden bei den Untersuchungen nicht gefunden. Demzufolge spielt Wasserstoffdesorption aus den TEOS-Oxid-Schichten der Versuchswafer, die im LPCVD-Verfahren abgeschieden wurden, eine untergeordnete Rolle.

Nukleare Reaktionsanalyse von Siliziumoxiden

In einer NRA wurden zusätzlich zur TD-MS-Analyse verschiedene Siliziumoxid-Proben untersucht (vgl. Tabelle 3.2). Bei keiner der Proben mit thermischem Oxid war Wasserstoff auffindbar. Die TEOS-Oxidschicht dagegen, die bis zu einer Tiefe von 1260 nm auf Wasserstoffeinlagerungen geprüft wurde, wies einen Wasserstoffgehalt von bis zu 3,2 At.-% (im Mittel 2,9 At.-%) auf, wie Abb. 4.19 zeigt. Die Probe wurde ohne weitere Prozessschritte direkt nach der TEOS-Oxid-Abscheidung analysiert. Der Wasserstoff wurde demnach bereits während der Abscheidung eingebaut.

Nimmt man an, dass vor dem Bonden in sämtlichen TEOS-Oxidbestandteilen eines Drehratensensors ein Wasserstoffanteil von 2,9 At.-% enthalten ist und

dass dieser Wasserstoff während des Bondprozesses restlos in die Kaverne entweicht, würde dieser freigesetzte Wasserstoff einen Druckanstieg von lediglich ca. $1,6 \cdot 10^{-4}$ mbar bewirken. Der ermittelte Druck in der Kaverne nach dem Bonden liegt jedoch bei ca. 1,5 mbar, zudem ist in der Realität davon auszugehen, dass der Wasserstoff nicht restlos in die Kaverne gelangt, sondern teilweise auch nach außen in die Umgebungsatmosphäre. Selbst wenn die TEOS-Oxide eine Wasserstoffquelle darstellen würden, ist es naheliegend, dass neben dieser noch eine weitere Quelle im Sensor vorliegt, aus der eine deutlich größere Menge Wasserstoff freigesetzt wird. Nur so kann der Wasserstoffdruck von über 1,5 mbar erreicht werden, der nach dem Bonden in Drehratensensoren vorliegt.

Dass bei der NRA Wasserstoff in einer TEOS-Oxidschicht auffindbar war, während in der TD-MS-Analyse bei derselben Schicht keine Wasserstofffreisetzung detektiert wurde, spricht dafür, dass der Wasserstoff, der in Oxidschichten eingelagert ist, nicht in großer Menge desorbiert, sondern während des Waferbondens in der Schicht gebunden bleibt und somit nicht für den beobachteten Anstieg des Kaverneninnendrucks verantwortlich ist. Dafür sprechen auch Literaturwerte für die Löslichkeit von Wasserstoff in Siliziumdioxid, die mit steigender Temperatur leicht abnimmt (vgl. Abb. 4.6).

Möglicherweise ist der Unterschied zwischen den Analyseergebnissen aus NRA und TD-MS auch darauf zurückzuführen, dass bei der TD-MS-Analyse zwar auch Wasserstoff desorbiert ist, dass die ausgasende Wasserstoffmenge aber so gering war, dass sie mit der verfügbaren Messeinrichtung nicht erfasst wurde. Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse der Versuche, in denen Siliziumoxidschichten hinsichtlich ihrer Wirkung als Wasserstofflieferanten untersucht wurden, Folgendes:

1. In thermisch abgeschiedenen Oxidschichten ist weder in einer TD-MS-Analyse, noch in der NRA Wasserstoff nachweisbar.
2. Im TEOS-Oxid ist in der NRA ein Wasserstoffgehalt von bis zu 3,2 At.-% auffindbar. In der TD-MS-Analyse wurde bei TEOS-Oxiden jedoch bis 1100 °C kein Wasserstoff detektiert.

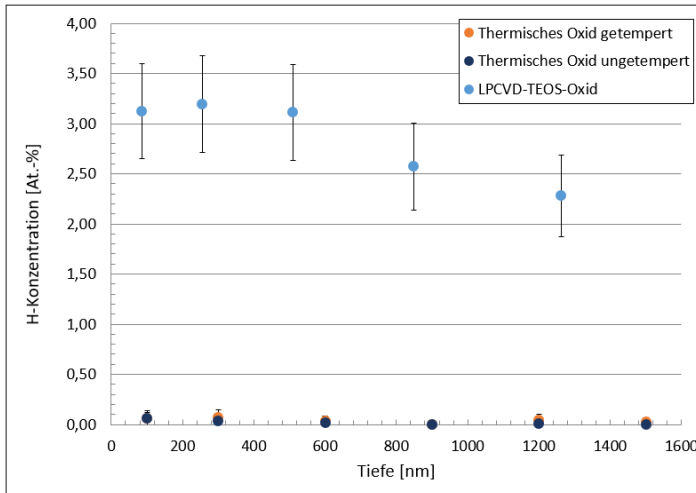


Abb. 4.19: Ergebnis der Nuklearen Reaktionsanalyse (NRA) von zwei verschiedenen Siliziumdioxidproben. Rot und dunkelblau: Thermisch aufgewachsenes Siliziumoxid; hellblau: TEOS-Oxid, das im LPCVD-Verfahren abgeschieden wurde. Der Wasserstoffgehalt der Proben wurde in einer Tiefe von 100 nm bis 1500 nm (thermisches Oxid) bzw. 85 nm bis 1260 nm (TEOS-Oxid) untersucht.

In Anbetracht dieser Ergebnisse ist es wahrscheinlich, dass der in Oxidschichten eingelagerte Wasserstoff allenfalls einen äußerst geringfügigen Einfluss auf den Kaverneninnendruck hat, da er im relevanten Temperaturbereich offenbar im Oxid gelöst bleibt und nicht desorbiert.

4.6.6 Silizium

Die Temperatur für die epitaktische Abscheidung von Silizium liegt bei ca. 1100 °C [19, 22]. Temperaturen in vergleichbarer Höhe treten im weiteren Verlauf der Prozessierung nicht mehr auf. Sollte während der Epitaxie Wasserstoff in den bereits vorhandenen Silizium- oder Siliziumoxidschichten gebunden werden, ist es möglich, dass er bis zum Waferbonden nicht freigesetzt wird, da die maximalen Temperaturen der Folgeprozessschritte zwischen Silizium-

abscheidung und Waferbonden niedriger sind als die Temperaturen, die beim eutektischen Bonden auftreten.

Gegen die Siliziumschichten als signifikante Wasserstoffquellen spricht die geringe Löslichkeit von Wasserstoff in Silizium [94, 109] (vgl. Abb. 4.6). Da der Abstand zwischen zwei Siliziumatomen nur $2,35 \text{ \AA}$ beträgt, kann ein Wasserstoffmolekül mit einem Durchmesser von $2,3\text{-}2,8 \text{ \AA}$ [110] nur unter Energiezufuhr bei Dilatation der Siliziumatome zwischen diese Bindung gelangen [111].

TD-MS-Analyse von Silizium

Im Schichtaufbau der Versuchswafer finden zwei verschiedene Arten von Silizium Verwendung. Als Substrat dienen zu Beginn der Prozessierung blanke Wafer aus einkristallinem Silizium, während nachfolgende epitaktisch abgeschiedene Siliziumschichten polykristallin sind, beispielsweise für die mikromechanische Masse eines Sensors.

In einer TD-MS-Analyse wurden beide Arten des Siliziums hinsichtlich möglicher Wasserstoffeinlagerungen untersucht. Ein unstrukturierter einkristalliner Wafer, sowie ein unstrukturierter Siliziumwafer mit TEOS-Oxidschicht und darüber epitaktisch abgeschiedener polykristalliner Siliziumschicht (Probe 2 in Tabelle 4.3) wurden bis auf 1100 °C aufgeheizt. Bei keiner der Proben waren im Massenspektrometer Wasserstofffreisetzungen sichtbar, wie Messergebnisse in den Abb. A.7 und A.6 (Anhang) zeigen. Wie bereits in Abschnitt 4.6.5 beschrieben, geht aus der TD-MS-Analyse mit Probe 3 in Tabelle 4.3 zudem hervor, dass auch der Epitaxieprozess nicht für signifikante Wasserstoffeinlagerungen in zuvor abgeschiedenen Oxidschichten verantwortlich ist.

Infolge dieser Ergebnisse gibt es keinerlei Hinweise darauf, dass Siliziumbestandteile eines Sensors als Desorptionsquellen infrage kommen.

4.6.7 Angesägte Wafer bei höheren Temperaturen

Zu Beginn dieses Kapitels wurde in Abschnitt 4.1 die Beobachtung beschrieben, dass der Druck in Drehratensensorkavernen während einer Lagerung (1000 h,

150 °C) abnimmt. Um die Frage zu beantworten, ob der gleiche oder auch ein anderer Effekt bei höheren Temperaturen auftritt, wurden viertelweise angesägte Wafer entsprechend der Methode aus Abschnitt 3.6.1 präpariert und verschiedenen Hochtemperaturlagerungen ausgesetzt.

Das viertelweise Ansägen der Wafer erlaubt eine getrennte Betrachtung von Druckänderungen durch Desorption und Diffusion, da bei einem Teil der Chips auf dem angesägten Wafer Diffusionspfade nach außen geöffnet sind, sodass Diffusion ermöglicht wird, bei einem anderen Teil aber nicht, sodass vorrangig Druckänderungen durch Desorptionsprozesse zu beobachten sind (s. Abb. 3.9). Auf diese Weise lassen sich Erkenntnisse über das Ausmaß der Einflüsse von Desorption und Diffusion auf die Stabilität des Kaverneninnendrucks gewinnen. Wie in früheren Versuchen wurden anhand von Gütemessungen vor und nach der Lagerung die Kavernendruckänderungen bestimmt.

Bei einer Lagerung in 150 °C wird der Kavernendruck vermutlich vorrangig durch Diffusionsprozesse vom Kaverneninneren nach außen verringert. Die diffundierende Substanz besteht aus Gasen, die während des Waferbondens freigesetzt werden und in den Kavernen eingeschlossen sind wie eingangs beschrieben. Ob neben diesen Desorbaten aus dem Bondprozess noch weitere Substanzen in den Sensormaterialien verbleiben, die langfristig ebenfalls freigesetzt werden können, ist zu untersuchen. Falls diese Substanzen erst nach der Kalibrierung des Sensors zutage treten, könnten sie den Kavernendruck in unbekanntem Maß verändern und im Extremfall zu einer Verfälschung von Messergebnissen des Sensors führen.

Im Folgenden werden Lagerungstemperaturen bis zu 300 °C entsprechend Tabelle 4.7 mit jeweils zwei angesägten Wafern untersucht. Falls das Ergebnis der Druckänderungen eindeutig abhängig von der jeweiligen Ansägevariante eines Waferviertels ist, ist davon auszugehen, dass vorrangig Diffusionsprozesse auf den Kavernendruck einwirken. Sind die Viertel weniger deutlich voneinander zu unterscheiden, kommen auch Desorptionsprozesse in Betracht, die von den unterschiedlichen Varianten der Öffnung von Diffusionspfaden nach außen unberührt bleiben.

Abbildung 4.20 zeigt die Ergebnisse des Versuchs in Form von Wafermaps, auf denen die ermittelten Druckänderungen aller ausgewerteten Chips abhängig von der jeweiligen Position auf dem Wafer farblich dargestellt sind. Für jede Lagerungstemperatur ist hier jeweils ein ausgewerteter Wafer gezeigt. Bei dem Wafer, der bei 150 °C gelagert war, sind deutliche Unterschiede zwischen den Druckänderungen verschiedener Viertel auszumachen. Hier liegt demnach vor allem Diffusion vor, deshalb wird dieser Wafer im Abschnitt 4.7 über Diffusion näher betrachtet. Bei den Wafern, die bei Temperaturen von 200 °C, 250 °C und 300 °C gelagert waren, fällt dagegen zusätzlich eine deutliche Kreissignatur in der Verteilung der Druckänderungen über den Wafer auf, die nach einer 150 °C-Lagerung nicht zu beobachten ist. Unabhängig vom Ansagen zeigt sich, dass die Druckänderung hier bei allen Wafervierteln in der Wafermitte etwa bis zum halben Radius des Wafers anders ist als am Waferrand.

Bei den Chips in der Wafermitte führt die Lagerung bei höheren Temperaturen zu einem Druckanstieg, der auf Desorptionsprozesse in der Wafermitte bei Temperaturen ab 200 °C hinweist.

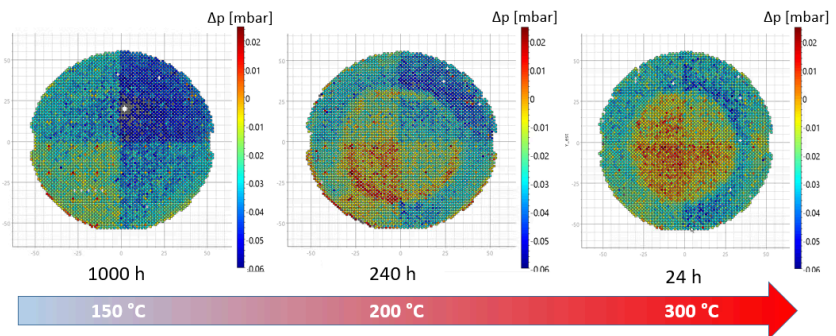


Abb. 4.20: Wafermaps, die Druckänderungen von Drehratensensorchips auf drei verschiedenen Versuchswafern zeigen. Jeder farbige Punkt repräsentiert einen Chip, der abhängig von seinem Ort auf dem Wafer abgebildet ist. Die Farbskala zeigt die Höhe der Druckänderung nach der jeweiligen Hochtemperaturlagerung. Die drei Wafer waren verschiedenen Lagerungsvarianten ausgesetzt (150 °C/1000 h, 200 °C/240 h, 300 °C/24 h).

Tab. 4.4: Lagerungsvarianten der Chips, für die eine Restgasanalyse durchgeführt wurde.

| Lagerungsparameter | | | |
|--------------------|--------|-------------------------------------|-------------------------|
| Temperatur | Dauer | Chip aus angesägtem Waferabschnitt? | Chip-Position auf Wafer |
| 150 °C | 1000 h | nein | Rand |
| 200 °C | 240 h | nein | Rand |
| 250 °C | 120 h | ja | Mitte, Rand |
| 250 °C | 120 h | nein | Mitte, Rand |
| 300 °C | 24 h | nein | Rand |

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse der angesägten Wafer, dass bis 150 °C Diffusionsprozesse die Druckänderungen dominieren, während ab 200 °C weitere Effekte hinzukommen. In den Kavernen befinden sich nach abgeschlossener Prozessierung offensichtlich noch Substanzen, die auch nach dem Bondprozess noch nicht freigesetzt sind und später bei erhöhten Temperaturen desorbieren können. Zur Zusammensetzung der Desorbate, die nach den Hochtemperaturlagerungen vorliegen, liefert eine Restgasanalyse von Chips aus verschiedenen Waferbereichen weitere Informationen (s. Tabelle 4.4). Nach der 250 °C-Lagerung steigt der Anteil des detektierten CO₂ auf bis zu 5,1 % in der Wafermitte, zudem finden sich bei denselben Chips Hinweise auf CH₄ im Massenspektrum. Dies deutet auf Prozesse hin, die erst bei höheren Temperaturen ab ca. 250 °C ablaufen. Alle Ergebnisse der Restgasanalyse sind in Abb. A.9 (Anhang) aufgeführt.

Der Effekt der Kreissignatur trat in keinem von zahlreichen Versuchen mit 1000-stündiger 150 °C-Lagerung und auch nicht nach mehr als einjähriger Standzeit von Wafern bei Raumtemperatur auf. Somit kann seine Bedeutung für die langfristige Druckstabilität als gering eingestuft werden. Der Grund für die Signatur wurde im Rahmen dieser Arbeit deshalb nicht abschließend untersucht. Versuche zum Einfluss der Bondrahmenmaterialien sowie des Prozessschritts zur

Waferreinigung nach Aluminiumätzen auf die Kreissignatur ergaben keinerlei Hinweise darauf, dass diese Faktoren mit der Ausbildung der kreisförmigen Druckverteilung über die Wafer zusammenhängen.

4.6.8 Maßnahme für bessere Druckstabilität: Vorwegnahme von Desorption

Die Desorbate, die in den fertigen Chips zu finden sind, werden vorrangig während des Bondprozesses freigesetzt und in den Kavernen eingeschlossen. Um die Menge dieser unerwünschten Desorbate in den fertigen Chips zu reduzieren, kann der Bondprozess entsprechend den Ergebnissen aus Abschnitt 4.6.2 um einen In-situ-Ausheizschritt zu erweitert werden. Bei diesem Zwischenschritt wird die Temperatur in der Bondkammer auf über 400 °C angehoben und über mehrere Minuten gehalten, bevor die Chips endgültig verschlossen werden.

Das Ausheizplateau ist eine wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Kavernendruckstabilität, da sie Desorptionsprozesse vorwegnimmt, die ansonsten nach Verschluss der Kavernen auftreten würden und eingeschlossene Desorbate zur Folge hätten. Noch effizienter ist die Evakuierung mit Abstandshaltern zwischen Kappen- und Sensorwafer, die in die mikromechanische Struktur integriert sind.

Abb. 4.21 zeigt den resultierenden Innendruck nach dem Bonden sowie die Druckänderungen nach Lagerungen von zwei Wafern mit und ohne Ausheizen im Bondprozess. In den drei Darstellungen wurde Wafer 1 ohne das beschriebene Ausheizplateau gebondet, während bei Wafer 2 ein Ausheizplateau in den Bondprozess integriert war. Schon unmittelbar nach dem Bonden ist der Mittelwert des Kavernendrucks bei Sensoren mit Ausheizplateau niedriger als ohne Ausheizplateau, was auf eine deutlich geringere Menge eingeschlossener Desorbate infolge des Ausheizplateaus hinweist.

Beide Wafer wurden anschließend einer Lagerung von 96 Stunden bei 130 °C ausgesetzt. Die Auswertung der Kaverneninnendrucke zeigt, dass die Druckstabilität bei Wafer 2, (mit Ausheizplateau), einer deutlich geringeren Streuung

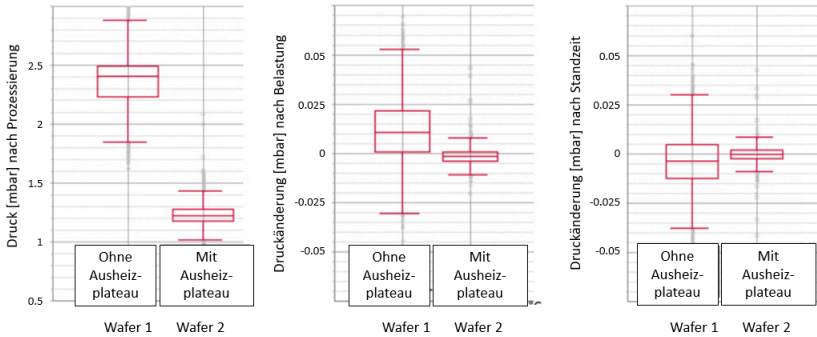


Abb. 4.21: Links: Druck in den Drehratensensorkavernen nach abgeschlossener Prozessierung. Zwei Wafer, ohne und mit Ausheizplateau im Bondprozess, im Vergleich.

Mitte: Druckänderung in den Drehratensensorkavernen nach beschleunigter Alterung für 96 Stunden bei 130 °C.

Rechts: Druckänderung in den Kavernen nach Standzeit von 16 Monaten.

unterliegt als bei Wafer 1 (ohne Ausheizplateau), s. Abb. 4.21 Mitte. Infolge der geringeren Desorbatmenge bei Wafer 2 findet offenbar auch weniger Diffusion durch Kavernenwände statt und der Innendruck der Sensorkavernen bleibt somit stabiler. Auffällig ist die reproduzierbar geringere Streuung der Druckwerte bei Wafer 2, die ebenfalls auf die gründlichere Evakuierung der Kavernen zurückgeführt werden kann.

Wie in Abb. 4.21 rechts zu sehen, besteht der positive Effekt des Ausheizplateaus auch langfristig, hier nach über einjähriger Standzeit. Nachträgliche Druckänderungen durch Desorption sind dank verminderter Schwankungen minimal und besser abschätzbar.

Übersicht der Versuche zur Desorption

Eine Übersicht über die Versuche und wesentlichen Ergebnisse hinsichtlich Desorption zeigen die Tabellen 4.5 (untersuchte Prozessschritte) und 4.6 (untersuchte Materialien des Schichtaufbaus).

Tab. 4.5: Übersicht über die untersuchten Bestandteile der Waferprozessierung hinsichtlich Einflüssen auf den Kaverneninnendruck durch Desorptionsprozesse.

| Bestandteil | Methode | Ergebnis |
|-------------------------|---|---|
| Trenchen | Wafer mit viel bzw. wenig Polymerablagerungen, Hochtemperaturlagerung | Keine Auffälligkeiten |
| Reinigung nach Al-Ätzen | FTIR, Al-Proben nach verschiedenen Varianten der Reinigung | Keine Auffälligkeiten |
| Gasphasenätzen | XRD, Al-Proben nach Gasphasenätzprozess | Al(OH) _x F _y -Belag auf Al-Schicht |
| | TD-MS, Al-Proben mit Belag | H ₂ -Freisetzung zwischen 570 °C und Endtemperatur des Versuchs 725 °C |
| | NRA, Al-Proben mit Belag | Keine Auffälligkeit |
| Waferbonden | Ausheizplateau vor Verschluss, Variationen bei Temperatur, Dauer und Spülzyklen | Kaverneninnendruck stark beeinflussbar durch Temperatur und Dauer des Ausheizplateaus, weniger durch Zahl und Dauer der Spülzyklen vor Verschluss |
| | Bondprozess mit integrierten Abstandshaltern | Abstandshalter verbessern die Evakuierung der Kavernen vor Verschluss, Kaverneninnendruck beeinflussbar |
| | Kombi-MEMS: Variationen der Haltedauer bei Bondtemperatur | Haltedauer bei erhöhter Temperatur beeinflusst Kaverneninnendruck (auch nach Verschluss) |

Tab. 4.6: Übersicht über die untersuchten Bestandteile des Schichtaufbaus hinsichtlich Einflüssen auf den Kaverneninnendruck durch Desorptionsprozesse.

| Bestandteil | Methode | Ergebnis |
|--|--|--|
| Aluminium | Testchips mit zusätzlicher Al-Fläche, Hochtemperaturlagerungen | Verstärkter Druckanstieg: Al als H ₂ -Quelle möglich |
| | NRA, Probe ohne Belag | Keine Auffälligkeiten |
| | TD-MS, Probe ohne Belag | H ₂ -Freisetzung zwischen 610 °C und 700 °C |
| Germanium | Testchips mit zusätzlicher Ge-Fläche, Hochtemperaturlagerungen | Druckanstieg gegenüber Referenz abgeschwächt |
| | NRA, getemperte und ungetemperte Probe | Keine Auffälligkeiten |
| | TD-MS, getemperte und ungetemperte Probe | H ₂ -Freisetzung ab 650 °C bis zur Versuchsendtemperatur (900 °C) |
| AlGe-Eutektikum | TD-MS | Keine H ₂ -Freisetzung bis zur Versuchsendtemperatur (450 °C) |
| | Testchips mit zusätzlicher AlGe-Fläche, Hochtemperaturlagerungen | Druckänderungen liegen zwischen Werten der entsprechenden Chips mit Al bzw. Ge |
| Siliziumdioxid (LPCVD-TEOS-SiO ₂) | TD-MS, verschiedene Proben mit und ohne zusätzliche Epi-Si-Schicht | Keine H ₂ -Freisetzung bis zur Versuchsendtemperatur (1100 °C) |
| | NRA | Wasserstoffgehalt von bis zu 3,2 At.-% |
| Siliziumdioxid (thermisches SiO ₂) | NRA, getemperte und ungetemperte Probe | Keine Auffälligkeit |

| Bestandteil | Methode | Ergebnis |
|------------------------------|--|---|
| Silizium (einkristallin) | TD-MS | Keine H ₂ -Freisetzung bis zur Versuchsendtemperatur (900 °C) |
| Silizium (polykristallin) | TD-MS, Probe mit SiO ₂ und Si | Keine H ₂ -Freisetzung bis zur Versuchsendtemperatur (1100 °C) |

4.7 Diffusion

Neben der Desorption ist ein zweiter grundlegender Mechanismus, der zu Änderungen des Kaverneninnendrucks von Drehratensensoren führen kann und der in dieser Arbeit näher betrachtet wird, die Diffusion.

Die Versuche, die im Folgenden beschrieben werden, führen Schritt für Schritt zu einer Identifizierung möglicher Diffusionspfade, über die gasförmige Substanzen in die Kavernen hinein oder aus den Kavernen heraus gelangen können. Sind die Diffusionspfade bekannt, kann eine Maßnahme zur Unterbrechung der Pfade entwickelt werden, die langfristig wirksam ist und eine deutliche Verbesserung der Innendruckstabilität von Drehratensensoren über Lebenszeit bewirkt.

Als mögliche Pfade für die Diffusion von Wasserstoff werden zunächst die Chipseitenwände sowie der Kappen- und der Substratwafer aus einkristallinem Silizium betrachtet. Dann erfolgt eine genauere Betrachtung einzelner mikro-mechanischer Schichten. Die folgenden Versuche zeigen, in welchem Maß epitaktisch abgeschiedenes Silizium, thermisches Siliziumoxid, TEOS-Oxid oder die Bondrahmen aus eutektisch verschmolzenem Aluminium und Germanium Diffusionsprozesse zulassen.

Anschließend wird die Hypothese überprüft, dass die diffundierende Gasspezies, die zu Druckänderungen in den Sensorkavernen führt, Wasserstoff ist.

Abschließend zeigt ein Langzeitversuch die Wirksamkeit einer Maßnahme, durch die sich Druckänderungen, die Diffusionsprozessen zuzuschreiben sind, signifikant verringern lassen.

4.7.1 Chipaußenflächen als Diffusionspfade

Grundsätzlich ist Gasdiffusion bei Drehratensensoren durch alle Außenflächen des Chips denkbar. Um die möglichen Diffusionspfade einzuzugrenzen, soll in den folgenden Versuchen untersucht werden, ob Diffusion vorrangig durch den Kappen- oder Substratwafer aus einkristallinem Silizium (Ober- und Unterseite des Chips) oder vielmehr durch den Schichtstapel stattfindet, der die Seitenwände der Chips bildet (s. jeweils hervorgehobene Flächen in Abb. 4.22).

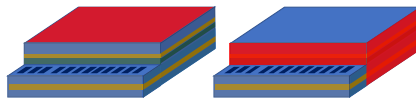


Abb. 4.22: Außenflächen eines Chips, die als Diffusionspfade in Betracht kommen. Links: Chip mit rot markierter Kappe, bestehend aus einkristallinem Silizium. Nicht zu sehen ist das ebenfalls einkristalline Substrat auf der Unterseite des Chips. Rechts: Chips mit rot markierten Seitenflächen, bestehend aus dem Schichtaufbau des Sensors.

Diffusion durch die Chipseitenwände

Zunächst werden die Seitenwände der Sensorkavernen als Diffusionspfade betrachtet. Um zu überprüfen, ob hier Diffusion stattfindet, wurden entsprechend der Methode in Abschnitt 3.6.1 Versuchswafer präpariert, auf denen sich sowohl Chips befinden, deren Kavernenwände gegebenenfalls eine Verbindung vom Kaverneninneren zur Umgebungsatmosphäre darstellen, über die Wasserstoff diffundieren kann, als auch Chips, deren Kavernenwände auf Waferebene nicht aktiviert sind. Durch den Vergleich der Kavernendruckänderungen nach Hochtemperaturlagerungen von Chips mit angesägten und nicht angesägten Chips auf ein und demselben Wafer lässt sich zeigen, ob während der Lagerung Diffusion durch die geöffneten Kavernenwände stattgefunden hat oder nicht.

Die Wafer werden nach dem Öffnen der Aluminiumpads auf jeweils einer Waferhälfte pro Sägerichtung angesägt, sodass sich auf jedem Viertel eine andere Variante ergibt (s. Abb. 3.10). Auf den angesägten Linien sind die mikromechanischen Schichten zwischen benachbarten Chips unterbrochen. Zugleich liegen

die Wafer nach wie vor in einem Stück vor, da das Silizium des Substratwafers nicht vollständig durchtrennt ist. Auf diese Weise sind auch nach dem Ansägen noch Versuche und elektrische Messungen auf Waferebene mit diesen Sensoren durchführbar. Dieses Vorgehen erlaubt die Identifizierung von Effekten auf den Kaverneninnendruck, die sich je nach Ort eines betrachteten Sensors auf dem Wafer lokal unterschiedlich auswirken. Das erwartete Diffusionsverhalten am Beispiel von eingeschlossenem Wasserstoff aus Sensorkavernen mit aktivierten Diffusionspfaden heraus zeigt Abb. 4.23.

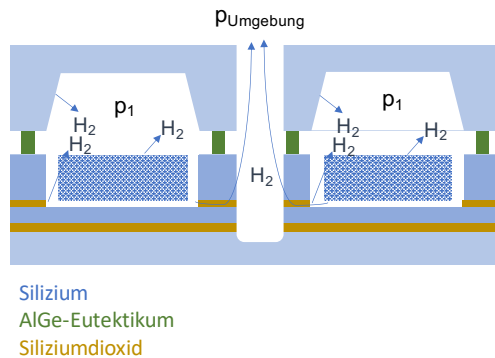


Abb. 4.23: Zwei benachbarte Sensorkavernen, deren Chipaußenseiten durch Ansägen geöffnet sind, sodass Diffusionspfade zwischen Kaverne und Umgebung geöffnet sind. Eingeschlossene Desorbate können durch die Differenz des Wasserstoffpartialdrucks $p_{Umgebung} > p_1$ nach außen diffundieren

Vor und nach der Lagerung wurde bei mehr als 4500 Drehratensensoren jedes Wafers die Güte gemessen, um auf das Verhalten des Innendrucks abhängig von Lagerungstemperatur und Ansägevariante schließen zu können.

Ausgehend von der Lagerungsvariante 1000 Stunden/150 °C wurden weitere Kombinationen aus Temperatur und Dauer der Lagerungsdauer durchgeführt, um sichtbar zu machen, ob die vermuteten Diffusionsprozesse bei höheren Temperaturen entsprechend schneller ablaufen als bei niedrigeren Temperaturen oder ob bei höheren Temperaturen zusätzlich weitere Prozesse in Gang gesetzt

werden, die den Kaverneninnendruck beeinflussen. Die Lagerungsdauern wurden den Temperaturen auf Grundlage der van-'t-Hoff'schen Regel angepasst, derzufolge sich die Diffusionsgeschwindigkeit bei um 10 °C steigender Temperatur etwa verdoppelt, s. Tabelle 4.7 [60, 112]. Dementsprechend wären ähnliche Ergebnisse bei den Druckänderungen der Wafer nach den verschiedenen Lagerungsvarianten zu erwarten, sofern bei allen Lagerungstemperaturen die gleichen Alterungsprozesse ablaufen.

Tab. 4.7: Lagerungstemperaturen der angesägten Drehratensensorwafer und gesamte Lagerungsdauer bei Nachmessung der Güte.

| Temperatur | Lagerungsdauer |
|------------|----------------|
| 150 °C | 1000 h |
| 200 °C | 240 h |
| 250 °C | 120 h |
| 300 °C | 24 h |

Ein eindeutiges Ergebnis ergibt sich bei den angesägten Wafern nach einer 1000-stündigen Lagerung bei 150 °C. Die Betrachtung der Druckänderungen aller Chips eines solchen Wafers nach der Hochtemperaturlagerung zeigt, dass der Innendruck sich während der Lagerung bei den verschiedenen Vierteln unterschiedlich stark verändert hat. Die Druckänderung ist abhängig davon, auf welche Weise das jeweilige Viertel angesägt ist. In Abb. 4.24 links sind die Druckänderungen aller ausgewerteten Chips eines Wafers in einem Wafermap dargestellt. Jeder Punkt zeigt den ermittelten Wert für die Druckänderung eines Chips entsprechend der nebenstehenden Farbskala abhängig von dessen Position auf dem Wafer.

Bei den Chips des ungesägten Waferviertels ist der Innendruck nach der Lagerung bei 150 °C im Mittel nur ca. 0,02 mbar niedriger als vor der Lagerung (in Abb. 4.24 Waferviertel unten links). Bei den Chips, die an allen Seiten angesägt sind, ist der Druckabfall um durchschnittlich ca. 0,06 mbar dagegen deutlich größer (in Abb. 4.24 Waferviertel oben rechts). Dieses Ergebnis zeigt,

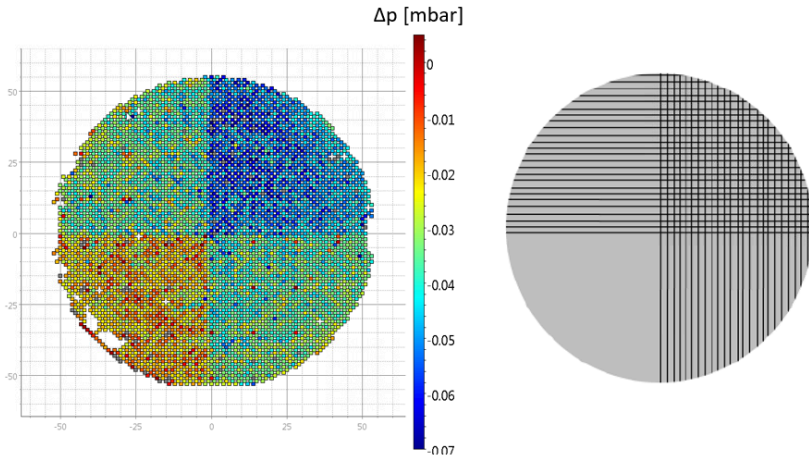


Abb. 4.24: Links: Druckänderungen der Chips eines Drehratensensorwafers nach 1000-stündiger Lagerung bei 150 °C, dargestellt als Wafermap. Jeder farbige Punkt repräsentiert einen Drehratensensor auf dem Versuchswafer. Die Farbe jedes Punktes zeigt entsprechend der Farbskala in Millibar die Druckänderung eines Drehratensensors, die aus einer Gütemessung vor und nach der Hochtemperaturlagerung abgeleitet wurde ($\Delta p = p_{\text{nachLagerung}} - p_{\text{vorLagerung}}$), gültig für eine Temperatur von 25 °C. Bei der Lagerung war der Wafer entsprechend dem Schema angesägt, das rechts neben dem Wafermap abgebildet ist.

dass das Öffnen der Chipseitenwände durch das Sägen einen bedeutenden Einfluss auf die Stabilität des Kaverneninnendrucks hat. Wie in Abb. 4.36 links zu erkennen, besteht ein Zusammenhang zwischen Druckänderung und Seitenlänge pro Chip, die durch Ansägen geöffnet ist. Je größer der geöffnete Bereich pro Chip, desto stärker fällt der Druck während der Lagerung ab.

Das Ergebnis bestätigt die eingangs aufgestellte Hypothese, dass Wasserstoff, der nach dem Bonden als Desorbat in den Kavernen vorliegt, durch die angesägten Chipseitenwände nach außen diffundiert. Da der Wasserstoffpartialdruck in der Umgebungsatmosphäre deutlich niedriger ist als in den Kavernen nach dem Bonden, besteht ein Druckgefälle von innen nach außen, das zur Wasserstoffdiffusion führt.

Auch beim ungesägten Waferviertel, bei dem die Diffusionspfade nach außen nicht gezielt durch Ansägen geöffnet wurden, ist die Druckänderung nicht Null. In geringerem Ausmaß ist auch hier Diffusion nach außen möglich, da bei jedem Chip kappenseitig in einem Bereich neben der Kaverne eine Vertiefung in den Wafer getrencht ist, die die elektrische Kontaktierung der Bondpads ermöglicht. Die getrenchte Vertiefung stellt eine partielle Öffnung einer Außenwand der Kaverne dar (vgl. rot markierte Fläche in Abb. 4.25). Durch diese Öffnung der potentiellen Diffusionspfade ist auch beim ungesägten Viertel der leichte Druckabfall zu erklären.

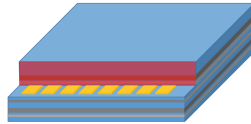


Abb. 4.25: Schema eines einzelnen Chips. Die gelben Felder stellen Aluminium-Bondpads dar, die eine elektrische Kontaktierung des Resonators ermöglichen. Um die Bondpads in der Prozessierung auf Waferebene freizulegen, ist eine Vertiefung im Kappenwafer notwendig, sodass im rot markierten Bereich einige Schichten freigelegt werden, die als potentielle Diffusionspfade vom Kaverneninneren nach außen führen.

Das Ergebnis des Versuchs mit viertelweise angesägten Wafern zeigt Folgendes:

1. Der Schichtstapel, aus dem die mikromechanischen Drehratensensoren und somit auch die Chipseitenwände aufgebaut sind, spielt für die Gasdiffusion eine wichtige Rolle.
2. Durch einen Vergleich der Druckänderungen bei angesägtem und nicht angesägtem Waferviertel ist es möglich, die Beiträge von Desorption und Diffusion zu Innendruckänderungen abzuschätzen.
3. Weitere viertelweise angesägte Wafer, entsprechend der Tabelle 4.7 bei höheren Temperaturen von bis zu 300 °C gelagert, weisen ebenfalls Unterschiede zwischen den Wafervierteln auf. Je höher die Temperaturen bei der Lagerung, desto größere Druckänderungen sind zu beobachten. Ab

Lagerungstemperaturen von 200 °C fällt der Druck beim ungesägten Viertel im Durchschnitt jedoch nicht ab, sondern steigt an. Der ansteigende Innendruck ist auf Desorptionsprozesse zurückzuführen, die die Diffusionsprozesse überlagern.

Einkristalline Wafer als Diffusionspfade

Neben den Chipseitenwänden, die aus dem Schichtstapel zusammengesetzt sind, der im Verlauf des Herstellungsprozesses der Sensoren aufgebaut wird, sind auch der Substrat- bzw. der Kappenwafer aus einkristallinem Silizium als Diffusionspfade denkbar (s. rot hervorgehobene Fläche in Abb. 4.22 links), wenn auch die vergleichsweise schlechte Permeabilität von Wasserstoff in Silizium [113] nicht erwarten lässt, dass Diffusionsprozesse durch Silizium in großem Ausmaß zu Druckänderungen beitragen.

Um dies zu untersuchen, wurden Wafer mit unterschiedlicher Dicke präpariert und die Druckänderungen nach Hochtemperaturlagerung (1000 h, 150 °C) betrachtet. Je dicker das einkristalline Substrat eines Chips, desto länger ist der potentielle Diffusionspfad durch diese Schicht. Beim Vergleich der Druckänderungen von Drehratensensoren auf zwei Wafern mit unterschiedlicher Substratdicke wäre ein Unterschied zu erwarten, sofern das einkristalline Silizium als Diffusionspfad signifikant zur Druckänderung beiträgt. Beim dünneren Wafer wäre eine größere Druckänderung aufgrund der Diffusionsprozesse sichtbar als bei einem dickeren Wafer.

Die unterschiedlichen Gesamtdicken der Versuchswafer wurden mithilfe eines chemisch-mechanischen Schleifprozesses nach dem Waferbonden realisiert. Beim dickeren Wafer war das einkristalline Silizium-Substrat 550 µm dicker als beim dünnen Wafer. Bei einem Vergleich der resultierenden Druckänderungen nach einer Hochtemperaturlagerung (1000 Stunden, 150 °C) waren nur geringfügige Unterschiede zwischen den beiden Wafern zu beobachten (s. Abb. 4.26). Wie zu erwarten, ist das einkristalline Silizium als Diffusionspfad somit zu vernachlässigen.

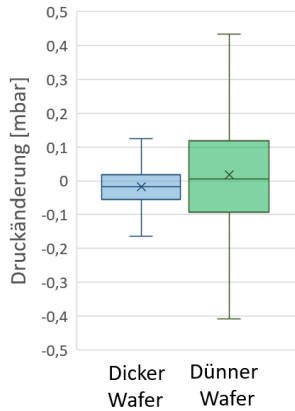


Abb. 4.26: Druckänderung von Chips auf Wafern mit unterschiedlicher Substratdicke nach Lagerung (1000 h, 150 °C).

Die beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass signifikante Effekte aufgrund von Diffusion durch die Chipseitenwände, die aus dem mikromechanischen Schichtstapel bestehen, möglich sind. Diffusion durch die Ober- und Unterseite der Chips spielt dagegen eine untergeordnete Rolle.

Als Diffusionspfade kommen somit zunächst alle Materialien des Schichtaufbaus infrage, die im Verlauf der Waferprozessierung abgeschieden werden und die eine durchgehende Verbindung vom Kaverneninneren nach außen oder zwischen zwei benachbarten Kavernen bieten. Dazu gehören epitaktisch abgeschiedene Polysiliziumschichten, thermisch abgeschiedenes Siliziumoxid, im LPCVD-Prozess abgeschiedenes TEOS-Siliziumoxid und das Aluminium-Germanium-Eutektikum der Bondrahmen. Im Folgenden werden die einzelnen Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als Diffusionspfade untersucht.

4.7.2 Silizium

Aus epitaktisch abgeschiedenem polykristallinem Silizium bestehen mehrere Lagen des mikromechanischen Schichtaufbaus (s. Schema Abb. 4.5). Literaturwerte geben ähnliche Diffusionskoeffizienten für Wasserstoff in einkristallinem

und polykristallinem Silizium an [109, 114]. Um auch nach den einkristallinen Wafern auch die polykristallinen Schichten des Sensors als Diffusionspfade ausschließen zu können, wurden Kombi-MEMS-Wafer mit speziellen Versuchschips entsprechend der Methode in Abschnitt 3.6.2 hergestellt.

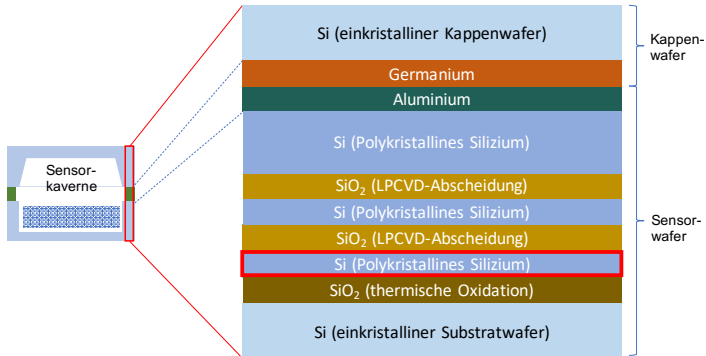


Abb. 4.27: Die epitaktische Siliziumschicht, die in Versuchschips mit einer Unterbrechung versehen ist, ist rot markiert.

Die Besonderheit der Testchips besteht darin, dass eine epitaktisch abgeschiedene Polysiliziumschicht, die Teil des Schichtstapels beim Drehratensensor ist, umlaufend um den Drehratensensorkern des Kombi-MEMS-Chips mit einer Unterbrechung versehen ist, die mit dem anschließend abgeschiedenen Oxid verfüllt wurde. Durch diese Modifikation steht die Siliziumschicht nicht mehr als durchgehender Diffusionspfad vom Kaverneninneren nach außen oder zur Nachbarkaverne zur Verfügung. Die modifizierte Siliziumschicht ist in Abb. 4.27 rot markiert.

Bei den Referenzchips ist die Siliziumschicht dagegen nicht unterbrochen, sodass Diffusion durch die Schicht möglich ist. Durch einen Vergleich der Druckänderungen in beiden Chipvarianten bei Hochtemperaturlagerungen kann somit die Bedeutung der Siliziumschicht als Diffusionspfad beurteilt werden. Sind bei den Referenzchips ohne Schichtunterbrechung in der Drehratensensor-kaverne Druckänderungen zu beobachten, die bei den Testchips mit Schichtunterbrechung nicht auftreten, können diese Druckänderungen auf Diffusionspro-

zesse zwischen den benachbarten Kavernen des Kombi-MEMS-Chips zurückgeführt werden, der aus Beschleunigungs- und Drehratensensor besteht. Wasserdiffusion von der Drehratensorkaverne nach außen, wie bei den angesägten Drehratensensorwafern zu beobachten, kann hier wegen der nachträglichen Evakuierung des Drehratensensors und der Entfernung der Desorbate im Rahmen des Reseal-Prozesses nach dem Bonden vernachlässigt werden.

Der Vergleich von Test- und Referenzchips nach einer Hochtemperaturlagerung bei 150 °C zeigt, dass der Druckanstieg im Drehratensensor durch die Unterbrechung der Siliziumschicht nicht abgeschwächt wird.

Bei beiden Chipvarianten steigt der Innendruck im Drehratensensor während der Hochtemperaturlagerung an. Die Unterbrechung der Siliziumschicht verringert die Druckänderung nicht, somit spielt diese Schicht als Diffusionspfad eine untergeordnete Rolle.

Dieses Ergebnis ist mit Literaturwerten vereinbar, denen zufolge der Diffusionskoeffizient von Wasserstoff in Silizium verhältnismäßig gering ist [113]. Auch stimmt das Ergebnis des Versuchs mit den Erkenntnissen aus [115] überein, wo keine Diffusion durch polykristallines Silizium festgestellt werden konnte.

Bei allen untersuchten Wafern mit derartigen Versuchschips ist hingegen reproduzierbar zu beobachten, dass Chips mit unterbrochener Siliziumschicht tendenziell eine stärkere Druckänderung aufweisen als die Referenzchips ohne jegliche Schichtunterbrechung. Dies verdeutlicht Abb. 4.28, die den Median der Druckänderungen von Chips mit sowie ohne Unterbrechung der Siliziumschicht zeigt. Die Versuche im Rahmen dieser Arbeit konnten dieses Phänomen nicht abschließend erklären.

4.7.3 Siliziumdioxid

Nachdem die Siliziumschichten als signifikante Diffusionspfade ausgeschlossen werden können, werden im Folgenden die Schichten des Schichtaufbaus betrachtet, die aus Siliziumoxid bestehen. Da im Verlauf der Prozessierung verschiedene Herstellungsverfahren für Oxidschichten Anwendung finden (s. Abschnitt 2.3.1),

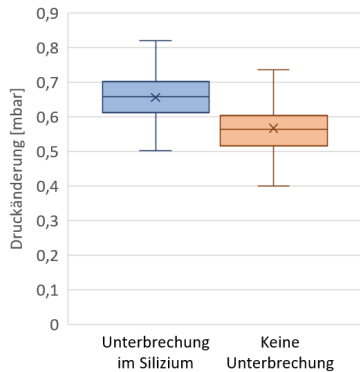


Abb. 4.28: Druckänderung von Chips eines Wafers nach 1000 Stunden in 150 °C für Testchips mit und ohne Unterbrechung der Siliziumschicht.

werden die Diffusionseigenschaften von thermischem Oxid und LPCVD-TEOS-Oxid getrennt voneinander betrachtet.

Um die Bedeutung der Oxide als Diffusionspfade zu untersuchen, wurde ein Versuch analog zu dem oben beschriebenen durchgeführt. Versuchschips waren Kombi-MEMS-Chips entsprechend der Methode in Abschnitt 3.6.2, hier mit Unterbrechung von Siliziumoxidschichten.

Die Ergebnisse der Druckänderungen nach Hochtemperaturlagerung (1000 h, 150 °C) zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Druckanstieg in der Drehratensensorkaverne und Unterbrechung der Siliziumoxidschichten. Ist eine Oxidschicht unterbrochen, steigt der Druck in der Hochtemperaturlagerung deutlich weniger stark an als bei Chips mit durchgehenden Oxidschichten, wie in Abb. 4.29 dargestellt. Je dicker die unterbrochene Oxidschicht, desto deutlicher ist der Effekt.

Diese Beobachtung zeigt, dass die Siliziumoxidschichten wichtige Diffusionspfade zwischen Innen- und Außenseite einer Sensorkaverne darstellen. Das Ergebnis stimmt mit Ergebnissen aus [115] und [116] überein, wo ebenfalls Diffusion kleiner Moleküle durch Siliziumoxid festgestellt wurde, das in einem LPCVD-Verfahren abgeschieden war. Auch Erkenntnisse aus [117] legen nahe,

dass Wasserstoffdiffusion durch Oxidschichten einen deutlich größeren Einfluss hat als durch Siliziumschichten.

Um die Innendruckstabilität der Sensorkavernen zu verbessern, bieten die Oxidschichten somit einen Ansatzpunkt. In Abschnitt 4.7.8 folgt die Beschreibung einer entsprechenden Maßnahme zur Verbesserung der Druckstabilität.

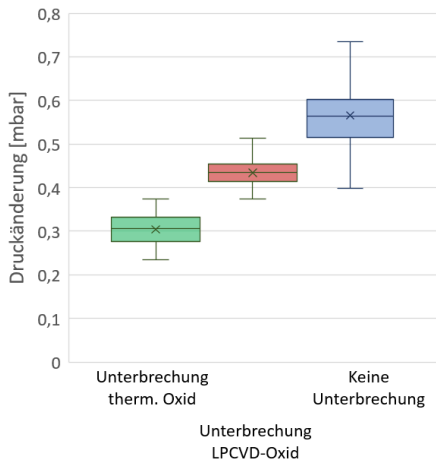


Abb. 4.29: Druckänderung nach 1000 Stunden in 150 °C von Versuchschips mit unterbrochenen Oxidschichten im Vergleich mit Referenzchips ohne Schichtunterbrechung.

Unterscheidung zwischen thermischem und LPCVD-TEOS-Siliziumoxid

Um die Diffusionspfadeigenschaften von Desorbaten in thermischem Oxid und LPCVD-TEOS-Oxid zu trennen, wurden Versuchschips, bei denen jeweils entweder eine thermische Oxidschicht oder eine TEOS-Oxidschicht unterbrochen war, getrennt ausgewertet. Für beide Chipvarianten mit unterbrochenen Oxidschichten wurden die Druckänderungen nach einer Hochtemperaturlagerung ausgewertet. Die Ergebnisse der beiden Varianten wurden miteinander verglichen, um zu ermitteln, ob das Diffusionsverhalten in thermischem Siliziumoxid anders ist als in TEOS-Oxid. Der Vergleich der Druckänderungen der

beiden Chipvarianten bei normierter Oxiddicke ergab jedoch keinen eindeutigen Unterschied im Diffusionsverhalten von Wasserstoff, s. Abb. 4.30. Die feststellbaren unterschiedlich starken Druckänderungen in Abb. 4.29 sind lediglich auf unterschiedliche Schichtdicken der unterbrochenen Schichten zurückzuführen. Beide Oxidarten tragen in ähnlichem Maß zur Druckänderung bei.

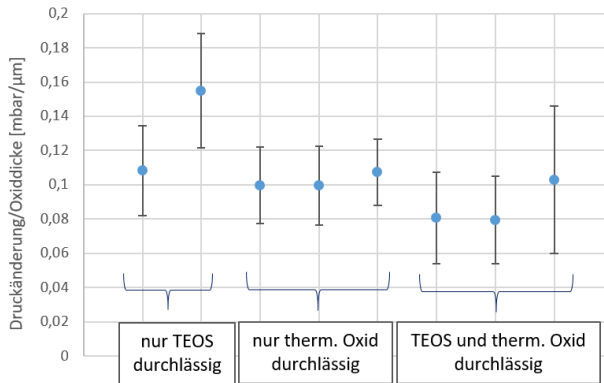


Abb. 4.30: Druckänderung pro Dicke der als Diffusionspfad verfügbaren SiO₂-Schicht [mbar/μm] in der Drehratensensorkaverne von Kombi-MEMS-Chips nach Hochtemperaturlagerung (1000 h, 150 °C), Auswertung von Testchips auf acht Wafern.

Diffusion an Schichtgrenzen und im Volumen der Oxidschichten

Wie die oben beschriebenen Ergebnisse zeigen, spielen Siliziumoxidschichten eine wichtige Rolle für die Druckstabilität, da sie Diffusionspfade für Wasserstoff darstellen. Ob es sich beim Diffusionsvorgang um Grenzflächendiffusion entlang der Grenze zwischen Silizium- und Siliziumoxidschichten oder vielmehr um Volumendiffusion durch das Siliziumdioxid handelt, wurde geprüft, indem die Beschaffenheit der Grenzfläche zwischen Silizium- und Oxidschichten sowie die Schichtdicke der Oxide modifiziert wurde.

Für den Versuch wurden Kombi-MEMS-Wafer in fünf Versuchsgruppen verwendet. Bei zwei Versuchsgruppen wurden die Wafer jeweils nach der thermischen oder nach der TEOS-Oxidabscheidung in BOE-Lösung getaucht (s.

Abschnitt 2.3.2). Die Anätzung durch gepufferte Flusssäure soll eine rauere Oxidoberfläche bewirken und führt zu einer veränderten Grenzfläche zwischen Oxid und dem anschließend abgeschiedenen Silizium.

Falls Grenzflächendiffusion eine bedeutende Rolle spielt, wäre bei Wafern mit modifizierter Grenzfläche ein Diffusionsverhalten zu erwarten, das sich von dem bei Referenzwafern mit unbehandelter Grenzfläche deutlich unterscheidet. Zwei weitere Versuchsgruppen beleuchten die Volumendiffusion durch Siliziumoxidschichten: Bei der dritten Versuchsgruppe wurde die thermische Oxidschicht dicker ausgeführt als bei den Referenzwafern ($3,6\ \mu\text{m}$ statt $2,5\ \mu\text{m}$), während bei der vierten Versuchsgruppe das TEOS-Oxid besonders dünn gewählt war ($1,2\ \mu\text{m}$ statt $1,8\ \mu\text{m}$).

Falls die Dicke der Oxidschichten einen Einfluss auf die Druckänderung hat, spricht dies für Volumendiffusion. Die letzte Gruppe beinhaltet Referenzwafer mit unveränderten Grenzflächen und Oxiddicken. Für einen Überblick der erzeugten Oxiddicken s. Tabelle 3.3 im Abschnitt 3.6.3.

Bei allen Wafern dieses Versuchs wurde dem Prozessverlauf nach dem Bonden ein Laser-Reseal angeschlossen. Im Zuge dessen wurden die Drehratensensorkavernen evakuiert, während die Beschleunigungssensorkavernen ihren ursprünglichen Druck beibehalten haben, sodass zwischen den benachbarten Kavernen eines Kombi-MEMS-Chips ein Druckgefälle besteht, das Diffusionsvorgänge vom Beschleunigungs- zum Drehratensensor bewirkt, sofern Diffusionspfade zur Verfügung stehen.

Um den Einfluss der verschiedenen Modifikationen zu untersuchen, wurden für einen Wafer aus jeder Gruppe die unterschiedlichen Änderungen der Kaverneninnendrucke nach einer Hochtemperaturlagerung (1000 h, $150\ ^\circ\text{C}$) ausgewertet und hinsichtlich Einflüssen der Oxid-Silizium-Grenzflächen sowie der Oxiddicken verglichen.

Ein Vergleich der beiden Versuchsgruppen mit modifizierten Oxid-Silizium-Grenzflächen mit der Referenz zeigt keine eindeutigen Unterschiede, s. Abb. A.8 im Anhang.

Bei den Versuchswafern mit veränderten Oxiddicken ist hingegen deutlich erkennbar, dass die Druckänderung in den untersuchten Sensorkavernen umso

größer ist, je größer die Dicke der Oxide ist, die durchgehende Diffusionspfade vom Kaverneninneren nach außen darstellen, s. Abb. 4.31.

Das Ergebnis dieses Versuchs zeigt, dass Diffusionvorgänge sowohl bei thermischem als auch bei TEOS-Oxid durch das Volumen der Oxidschichten stattfinden. Die Gesamtdicke der Siliziumoxidschichten, die als Diffusionspfade vom Kaverneninneren nach außen führen, ist somit ein wichtiger Einflussfaktor auf die Druckstabilität, während eine besondere Bedeutung der Oxid-Silizium-Grenzflächen als Diffusionspfade nicht nachgewiesen wurde.

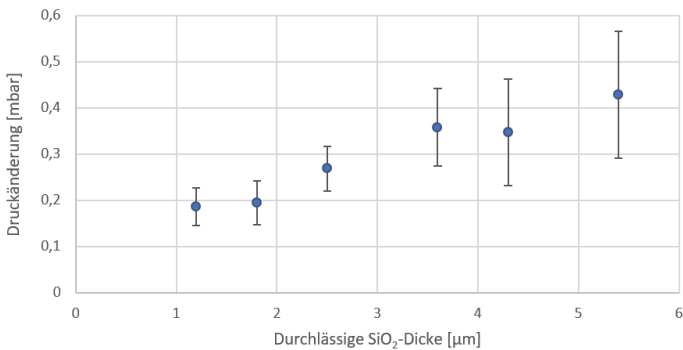


Abb. 4.31: Druckänderung im Verhältnis zur Gesamtdicke der als Diffusionspfad verfügbaren SiO₂-Schichten in Drehratensensorkavernen von Kombi-MEMS-Chips nach Hochtemperaturlagerung (1000 h, 150 °C).

4.7.4 Aluminium-Germanium-Eutektikum

Eine weitere Komponente im Schichtaufbau der Sensoren, die als Diffusionspfad für Wasserstoff in Betracht kommt, ist das Bondrahmenmaterial, bestehend aus eutektisch verschmolzenem Aluminium und Germanium. Die Bondrahmen verbinden den unteren Teil des Chips, der die Sensorstrukturen enthält, mit der Siliziumkappe, die den oberen Chipteil bildet (s. hervorgehobene Schicht in Abb. 4.32). Um die Bedeutung der eutektischen Bondrahmen für die Diffusion einschätzen zu können, dient eine Reihe von Kombi-MEMS-Versuchschips, bei

denen die Breite des eutektisch gebondeten Trennstegs aus Aluminium und Germanium zwischen Beschleunigungs- und Drehratensensorkaverne variiert wird, s. Methode in Abschnitt 3.6.5. Auch diese Versuchschips wurden vor

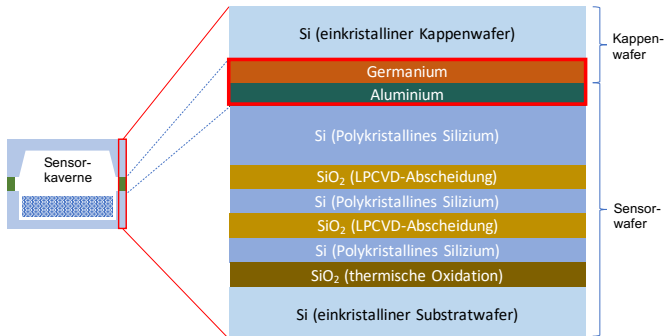


Abb. 4.32: Schema des Schichtaufbaus mit markierter Al- und Ge-Schicht, die zusammen den Bondrahmen eines Chips bilden.

und nach einer Hochtemperaturlagerung Gütemessungen unterzogen, sodass Druckänderungen in den Drehratensensorkavernen abhängig von der Breite des Stegs aus Bondmaterial untersucht werden können, der die beiden Kavernen trennt, um zu quantifizieren, in welchem Maß Diffusion durch den Bondrahmen stattfindet.

Die Beschleunigungssensorkavernen der hier verwendeten Versuchschips enthalten anstatt der getrennten Sensorstrukturen lediglich eine geschlossene Siliziumschicht ohne Zugang zu Oxiden. Dadurch kann Diffusion durch Oxidschichten bei diesen Testchips vernachlässigt werden. Um einen deutlicheren Effekt zu erzielen, wurden für diesen Versuch Wafer mit Formiergaseneinschluss gebondet (Zusammensetzung 5 % H_2 , 95 % N_2 , resultierender Wasserstoffpartialdruck in den Kavernen bei 25 °C: 40 mbar). Anschließend wurden die Drehratensensoren der Kombi-MEMS-Chips in einem Laser-Reseal-Prozess evakuiert und wieder verschlossen, während der Druck in den Beschleunigungssensoren unverändert blieb, sodass zwischen den benachbarten Kavernen ein Druckgefälle des Wasserstoffpartialdrucks von nahezu 40 mbar besteht.

Nach einer 1000-stündigen Lagerung bei 150 °C zeigt sich bei den Versuchschips kein Hinweis darauf, dass schmalere Bondrahmen eine größere Druckänderung durch Diffusion zulassen als breitere. Stattdessen ist die resultierende Druckänderung bei Chips mit breiterem Bondrahmen sogar stärker als bei schmalere, was auf einen größeren Einfluss von Desorption aufgrund der größeren Menge an Bondrahmenmaterial bei den betreffenden Chips zurückgeführt werden kann. Dem Bondrahmenmaterial wird deshalb eine untergeordnete Rolle als Diffusionspfad für Wasserstoff zugeschrieben.

4.7.5 Berechnung von Diffusionskoeffizienten

Die bisher beschriebenen Versuche haben ergeben, dass sich nach dem Bonden Wasserstoff in den Sensorkavernen befindet. Das Gas kann zwischen benachbarten Kavernen oder zwischen Innen- und Außenseite der Kavernen diffundieren, wenn geeignete Diffusionspfade zur Verfügung stehen. Als Hauptdiffusionspfade wurden die Siliziumoxidschichten identifiziert. Die übrigen Bestandteile des Schichtaufbaus tragen nicht signifikant zu Änderungen des Kaverneninnendrucks durch Diffusion bei.

Anhand der Versuchsergebnisse von angesägten Drehratensensorwafern, beschrieben in Abschnitt 4.7.1, lässt sich der Diffusionskoeffizient für Wasserstoff in den Siliziumdioxidschichten abschätzen, die im Schichtaufbau der Versuchssensoren Verwendung fanden. Er gilt für eine Temperatur von 150 °C, der die Versuchswafer für 1000 Stunden ausgesetzt waren, um mittels beschleunigter Alterung die Stabilität des Kaverneninnendrucks zu untersuchen. Für die Berechnung des Diffusionskoeffizienten wird infolge der bisherigen Versuchsergebnisse die Annahme getroffen, dass abgesehen von Siliziumoxid alle anderen Materialien als Diffusionspfade zu vernachlässigen sind. Zudem wird die Diffusion nur in eine Raumrichtung berücksichtigt, da der interessierende Teilchenfluss im Fall der Drehratensensorchips lediglich orthogonal zur Kaverneninnenwand besteht, die sich aus dem Schichtstapel zusammensetzt. Das amorphe Siliziumdioxid hat isotrope physikalische Eigenschaften [61]. Wasserstoff ist in molekularer Form in Siliziumoxid löslich [118].

Die Grundlage der Berechnungen ist das 1. Fick'sche Gesetz, das besagt, dass ein Konzentrationsunterschied δc einen Teilchenstrom j_D zur Folge hat. Der Teilchenstrom kann als Maß für die Anzahl der Teilchen betrachtet werden, die pro Sekunde durch eine definierte Fläche F am Ort x diffundieren [65]:

$$j_D = -D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (4.1)$$

Der Diffusionsstrom j_D hat die Einheit $\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$; $\frac{\delta c}{\delta x}$ ist die örtliche Änderung der Konzentration in $\frac{\text{mol}}{\text{m}^4}$. Für die Diffusionskonstante D ergibt sich die Einheit $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$. Für die Berechnung werden Ergebnisse der Gütemessungen vor und nach der Hochtemperaturlagerung herangezogen, aus denen auf den Kaverneninnendruck der Drehratensensoren und über die ideale Gasgleichung auch auf die Zahl der Wasserstoffteilchen in den Kavernen zum Messzeitpunkt geschlossen werden kann.

Die Wasserstoffkonzentration, die zum Zeitpunkt 1, bei der Messung vor der Hochtemperaturlagerung, in den Drehratensensorkavernen vorliegt, ist im Folgenden mit $c_{kav,1}$ bezeichnet. $n_{kav,1}$ ist die entsprechende Teilchenzahl in der Kaverne zum selben Zeitpunkt, V_{kav} bezeichnet das Kavernenvolumen:

$$c_{kav,1} = \frac{n_{kav,1}}{V_{kav}} \quad (4.2)$$

Als $c_{atm,1}$ wird im Folgenden die Wasserstoffkonzentration bezeichnet, die in der Umgebungsatmosphäre außerhalb der Kaverne herrscht. Diese beträgt zu beiden relevanten Zeitpunkten (vor und nach der Hochtemperaturlagerung des Sensors) nur ca. $5 \cdot 10^{-5} \%$ [92]. Sie wird deshalb in der Abschätzung als vernachlässigbar klein angenommen ($c_{atm,1} = c_{atm,2} \approx 0$).

Zum Zeitpunkt der ersten Gütemessung (vor Hochtemperaturlagerung, Zeitpunkt 1) besteht zwischen der Kaverne und der Umgebungsatmosphäre ein Gefälle der Wasserstoffkonzentration:

$$\Delta c_1 = c_{atm,1} - c_{kav,1} \quad (4.3)$$

Da die Wasserstoffkonzentration in der Atmosphäre vernachlässigt wird, gilt

$$\Delta c_1 = -c_{kav,1} = -\frac{n_{kav,1}}{V_{kav}}, \quad (4.4)$$

sodass sich mit der Diffusionslänge l_d , im Fall des Drehratensensors die Dicke der Kavernenwand bzw. die Länge des Siliziumoxidpfades vom Kaverneninneren nach außen, für den Diffusionsstrom Folgendes ergibt:

$$j_D = D \frac{n_{kav,1}}{l_d V_{kav}} \quad (4.5)$$

Über die Differenz der Teilchenzahl in der Kaverne zwischen den Messwerten vor (Zeitpunkt 1) und nach der Hochtemperaturlagerung (Zeitpunkt 2) lässt sich der Diffusionsstrom zudem in folgender Form angeben:

$$j_D = \frac{n_{kav,2} - n_{kav,1}}{A_{Oxide} \Delta t}, \quad (4.6)$$

wobei A_{Oxide} die Querschnittsfläche der Diffusionspfade ist, die die diffundierenden Teilchen durchströmen, ermittelbar aus der Dicke der Oxidschichten und der durch Ansägen geöffneten Seitenlänge der Kaverne, wie in Abb. 4.33 dargestellt. Δt gibt die betrachtete Zeitspanne des Diffusionsvorgangs an. Bei den Versuchswafern sind dies 1000 Stunden in Hochtemperaturlagerung.

Nach Gleichsetzen der beiden Gleichungen 4.5 und 4.6 ergibt sich für den gesuchten Diffusionskoeffizienten

$$D = \frac{l_d V_{kav} (n_{kav,2} - n_{kav,1})}{n_{kav,1} A_{Oxide} \Delta t}. \quad (4.7)$$

Für jeden der ausgewerteten Drehratensensoren auf den Versuchswafern kann der Diffusionskoeffizient abgeschätzt werden, gültig für Wasserstoffdiffusion in Siliziumdioxid bei 150 °C. Aus den Messwerten der Chips auf einem angesägten Waferviertel, bei dem alle verfügbaren Diffusionspfade geöffnet waren, was einen deutlichen Diffusionseffekt ermöglicht, wurde der Diffusionsko-

effizient von $(6,45 \pm 1,3) \cdot 10^{-15} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ ermittelt. Er liegt unterhalb der Literaturwerte aus [96] und [119], die einen Wert im Bereich von $2,9 \cdot 10^{-13} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ angeben, sowie [108] mit einem Wert im Bereich von $10^{-14} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$. Die Abweichungen zwischen den Quellen entstehen vermutlich dadurch, dass Siliziumoxid in unterschiedlichen Qualitäten für die verschiedenen Versuche verwendet wurde. Schwankungen bei der Waferprozessierung können zudem leicht unterschiedliche Oxiddicken und Gesamtkavernenvolumina bewirken, sodass sich bei einigen Chips eine Abweichung vom Median des errechneten Diffusionskoeffizienten ergibt.

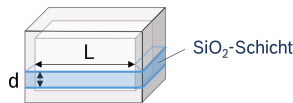


Abb. 4.33: Schema der Maße einer SiO_2 -Schicht als Diffusionspfad. Die Querschnittsfläche des Diffusionspfads A_{Oxide} wird anhand von L und d berechnet.

4.7.6 Simulation des Diffusionsverhaltens

Die beschriebenen Versuche haben gezeigt, dass sämtliche Druckänderungen, die sich durch Diffusion erklären lassen, auf Siliziumoxidschichten zurückzuführen sind. Diese haben sich als dominierende Diffusionspfade zwischen Kaverneninnerem und -äußerem herausgestellt.

Um den Einfluss der Diffusionsvorgänge auf den Kavernendruck auch über längere Zeiträume ermitteln zu können, wurde in Zusammenarbeit mit R. Mogor-Györfy (Robert Bosch GmbH) eine Simulation des Diffusionsverhaltens durch SiO_2 -Schichten durchgeführt, die für Vorhersagen der langfristigen Entwicklung des Kavernendrucks nutzbar ist. Grundlage für die Simulation ist ein FE-Modell, auf das die in ANSYS implementierte Konvektions-Diffusions-Gleichung angewendet wird, wie in Abschnitt 3.6.6 beschrieben. Zur Definition von Randbedingungen wurden Versuchsergebnisse von viertelweise angesägten Wafern herangezogen, die in Abschnitt 4.7.1 dargestellt sind.

Mithilfe einer adaptiven Optimierungsmethode wurde zunächst in ANSYS für die Sättigungskonzentration von Wasserstoff in Oxid $C_{\text{sat,SiO}_2}$ ein Wert von $1,89 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt, indem die Versuchsergebnisse des Wasserstoffgehaltes vor und nach einer 1000-stündigen Lagerung bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ als Zielwerte verwendet wurden. Dieser $C_{\text{sat,SiO}_2}$ -Wert gilt für den ebenfalls experimentell bestimmten Mittelwert des Diffusionskoeffizienten. Werte von $C_{\text{sat,SiO}_2}$ für Abweichungen von D zeigt Abb. 4.34.

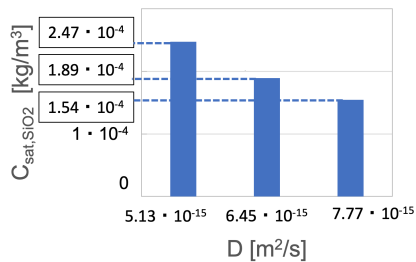


Abb. 4.34: Sättigungskonzentration $C_{\text{sat,SiO}_2}$ von Wasserstoff in SiO_2 für den Mittelwert sowie die Extremwerte des experimentell ermittelten Diffusionskoeffizienten D_{SiO_2} von Wasserstoff in SiO_2 [120].

Mit dem simulierten $C_{\text{sat,SiO}_2}$ -Wert stimmt die Simulation des Wasserstoffgehaltes in einer Kaverne über 1000 Stunden bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ mit den experimentellen Versuchsergebnissen überein. Diese Simulation ist in Abb. 4.35 links dargestellt. Somit können auch Diffusionsvorgänge über längere Zeiträume simuliert und als Einschätzung für die zu erwartende Lebensdauer eines Sensors herangezogen werden. Ein Beispiel für den Wasserstoffgehalt in einer Kaverne, der bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ über 15 Jahre hinweg zu erwarten ist, zeigt Abb. 4.35 rechts. Nach dieser Zeitspanne enthält die Kaverne nur noch $7,8 \pm 4,1 \%$ des anfänglichen Wasserstoffgehaltes. Das bedeutet für einen Drehratensensor eine beträchtliche Änderung der Dämpfungsatmosphäre.

Bei realen Betriebsbedingungen ist ein Sensor nicht dauerhaft solchen hohen Temperaturen ausgesetzt. Diffusionsvorgänge laufen bei Sensoren, die über 15 Jahre in einem Smartphone oder Airbagsystem in Betrieb sind, in aller Regel

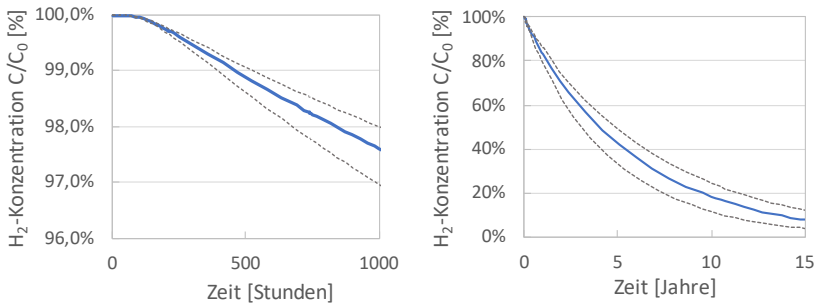


Abb. 4.35: Simulierte normalisierte H₂-Konzentration in einer Drehratensensorkaverne über die Dauer von 1000 Stunden (links) und 15 Jahren (rechts) bei 150 °C.

langsamer ab. Das Ergebnis der Simulation zeigt jedoch, dass der langfristige Einfluss von Diffusionsvorgängen auf den Kavernendruck nicht zu unterschätzen ist und bei der Auslegung von Inertialsensoren berücksichtigt werden sollte, um fehlerhafte Messergebnisse der Sensoren auf lange Sicht zu vermeiden. Simulationen des Kavernendrucks bei abweichenden Temperaturen sind mit diesem Modell ebenso möglich, wenn der jeweils gültige Diffusionskoeffizient bekannt ist.

4.7.7 Verifizierung der Wasserstoffthese

Die bisherigen Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass Änderungen des Innendrucks der Drehratensensorkavernen einerseits auf Desorption und andererseits auf Diffusion zurückzuführen sind. Als diffundierende Substanz hat sich Wasserstoff herausgestellt, der sich nach dem Bonden als Desorbat in der Kaverne befindet. Die Annahme, dass Wasserstoff diffundiert, soll mithilfe der beiden folgenden Versuche verifiziert werden.

Umkehrung der Diffusionsrichtung

Der erste Versuch zur Verifizierung der Annahme, dass eine der Ursachen für Innendruckänderungen bei den untersuchten Chips Wasserstoffdiffusion durch

Siliziumoxidschichten ist, hat den viertelweise angesägten Drehratensensorwafer zur Grundlage, der zuvor schon einer 1000-stündigen Lagerung bei 150 °C in Luft ausgesetzt war. Anschließend waren abhängig von der Ansägevariante deutlich unterschiedliche Druckänderungen erkennbar (vgl. Abschnitt 4.7.1). Das Ziel des neuen Versuchs mit demselben Wafer ist es, durch eine Lagerung in wasserstoffhaltiger Atmosphäre die Druckänderungen der ersten Lagerung auf allen vier Vierteln wieder rückgängig zu machen.

Der ursprüngliche Zustand der Kaverneninnendrucke auf allen vier Wafer Vierteln soll mithilfe einer erneuten Lagerung des angesägten Wafers hergestellt werden, diesmal in Formiergas (5 % H₂, 95 % N₂) statt Luft. Trifft die Hypothese zu, werden die Kavernen aller vier verschiedenen Waferviertel jeweils wieder in dem Maß mit Wasserstoff gefüllt, in welchem sie bei der ersten Lagerung des Wafers (1000 Stunden bei 150 °C in Luft) Wasserstoff verloren haben. Die Wasserstoffdiffusion findet somit in umgekehrter Richtung statt.

Da eine 1000-stündige Lagerung aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit des Formiergases nicht möglich ist, erfolgt die Lagerung mit kürzerer Dauer, aber unter erhöhtem Formiergasdruck (42,8 statt 1000 Stunden, H₂-Partialdruck ca. 85 mbar bei 150 °C). Unter Verwendung des abgeschätzten Diffusionskoeffizienten kann ein realisierbares Verhältnis von Lagerungsdauer und adäquatem Formiergasdruck in der Testkammer ermittelt werden, das eine entsprechende Wasserstoffdiffusion von außen in die Kavernen erwarten lässt. Ob die Druckänderung, die nach der ersten Lagerung in Luft zu beobachten war, abhängig von der Ansägeart des jeweiligen Waferviertels rückgängig gemacht werden kann, zeigt eine erneute Auswertung der Kaverneninnendrucke nach der Formiergaslagerung.

Das Ergebnis der Gütemessungen nach der Formiergaslagerung ist in Abb. 4.37 in Form von Wafermaps dargestellt, die jeweils den Druckunterschied zwischen zwei Messzeitpunkten für Chips auf dem gesamten Wafer zeigen. Auswertung 1 in der Abbildung zeigt die Druckänderung der Chips auf einem angesägten Wafer nach der ersten Hochtemperaturlagerung in Luft. Nach einer längeren Standzeit von 16 Monaten ergeben sich dagegen keine unterschiedlichen Druck-

änderungen auf den vier Wafervierteln, wie Auswertung 2 zeigt. In Auswertung 3 ist die Druckänderung aller ausgewerteten Chips auf dem Wafer nach der Formiergaslagerung zu sehen, mit dem Ziel einer umgekehrten Wasserstoffdiffusion. Die Viertel heben sich hier wieder deutlich durch unterschiedliche Druckänderungen voneinander ab. Auswertung 4 zeigt die gesamte Druckänderung zwischen dem ersten Messzeitpunkt vor jeglichen Lagerungen und der letzten Messung nach der Formiergaslagerung. Hier ist erkennbar, dass die kumulierte Druckänderung so gering ausfällt, dass der ursprüngliche Zustand des Wafers durch die Formiergaslagerung sehr präzise wiederherstellbar ist. Die Änderung des Kaverneninnendruckes während der Formiergaslagerung steigt linear mit der Öffnungslänge pro Chip an (s. Abb. 4.36 rechts). Der Vergleich mit der Druckänderung während der ersten Lagerung des Wafers (1000 Stunden bei 150 °C in Luft) zeigt, dass die Änderung des Innendruckes durch die nachfolgende Formiergaslagerung umgekehrt werden konnte (s. Abb. 4.36 links).

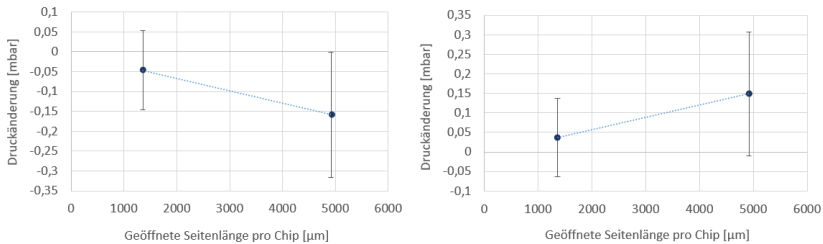


Abb. 4.36: Druckänderung in Chips eines viertelweise angesägten Wafers nach Hochtemperaturlagerung abhängig von der geöffneten Seitenlänge pro Chip. Die Messwerte für verschiedene Öffnungslängen entstammen verschiedenen Vierteln eines angesägten Wafers. Der Wafer wurde zuerst in Luft und anschließend in wasserstoffhaltigem Gas gelagert.

Links: Druckänderungen nach 1000-stündiger Lagerung bei 150 °C in Luft.

Rechts: Druckänderungen nach 42-stündige Lagerung bei 150 °C in wasserstoffhaltigem Gas bei erhöhtem Druck zur Wiederherstellung des ursprünglichen Drucks.

Die beschriebenen Ergebnisse zur Umkehrung der Diffusionsrichtung bestätigen die Annahmen, die aufgrund früherer Versuchsergebnisse getroffen wurden:

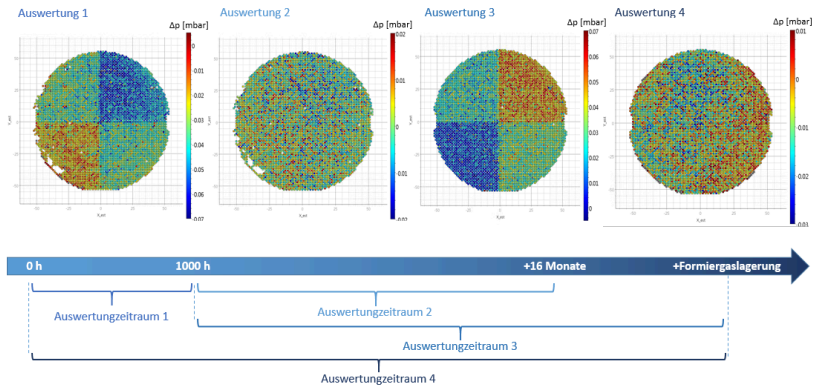


Abb. 4.37: Wafermaps der Druckänderungen von Drehratensensorchips, die durch die verschiedenen Hochtemperaturlagerungen eines Wafers hervorgerufen werden. Die Farbskala zeigt den Druckunterschied Δp zwischen zwei Messungen eines Chips (positive Werte = Druckanstieg). 1.) Druckänderungen durch 1000-stündige Lagerung bei 150 °C in Luft, 2.) Druckänderungen nach Standzeit von 16 Monaten, 3.) Druckänderungen durch 43-stündige Lagerung in Formiergas (1703 mbar bei 150 °C), 4.) Druckänderungen betrachtet über sämtliche Lagerungen (Median bei allen Vierteln 0 mbar, keine Unterscheidung der Ansägevarianten möglich).

Diffusion von Wasserstoff durch Siliziumoxidschichten verursacht Druckänderungen in den Sensorkavernen.

Ursprung des Wasserstoffs sind wie zuvor beschrieben Desorptionsprozesse, hauptsächlich ausgehend von einem Belag auf dem verwendeten Aluminium, die bei erhöhten Temperaturen im Verlauf der Prozessierung aktiviert werden. Mit diesem Wissen um die Ursachen für Druckänderungen in den Sensorkavernen können Maßnahmen für eine langfristig bessere Druckstabilität entwickelt werden. Eine mögliche Maßnahme, um Druckänderungen durch Diffusionsprozesse vorzubeugen, behandelt der folgende Abschnitt.

Eine Veröffentlichung der beschriebenen Ergebnisse von Versuchen mit viertelweise angesägten Wafern in Luft- und Formiergaslagerung und Diffusionssimulation ist eingereicht [120].

4.7.8 Maßnahme für bessere Druckstabilität: Diffusionsbarriere

Mit den Erkenntnissen über die diffundierende Substanz und die Diffusionspfade können Maßnahmen realisiert werden, um Druckänderungen durch Diffusion zu minimieren.

Wie anhand der Versuchschips mit unterbrochenen Schichten festgestellt werden konnte, bewirkt eine Unterbrechung von Oxidschichten in den untersuchten Kavernen eine deutlich verringerte Druckänderung bei Hochtemperaturlagerungen (s. Abschnitt 4.7.3). Da die Wasserstoffdiffusion ganz überwiegend durch die Siliziumoxidschichten verläuft, dient eine Unterbrechung aller Oxidschichten als Barriere für die Diffusion und als Maßnahme für einen stabileren Kaverneninnendruck. Umlaufend um den Drehratensorkern entsprechend Abb. 4.38 und [121] soll sie dafür sorgen, dass die Wasserstoffdiffusion sowohl vom Kaverneninneren nach außen als auch umgekehrt minimiert wird.

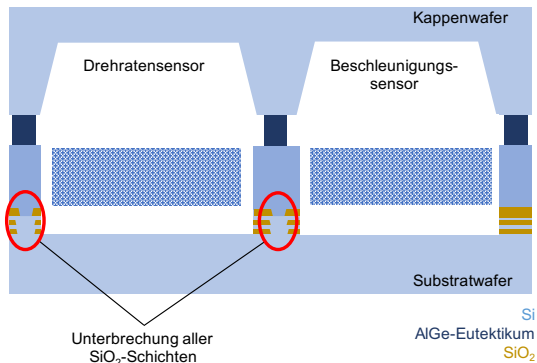


Abb. 4.38: Schematischer Aufbau eines Kombi-MEMS-Chips mit umlaufender Unterbrechung aller Siliziumoxidschichten als Gasdiffusionsbarriere, die den Drehratensorkern umgibt [121, 122].

Schnelltest Gasdiffusionsbarriere

Die Wirksamkeit der Gasdiffusionsbarriere lässt sich mit einer 1000-stündigen 150 °C-Lagerung von Chips mit und ohne Diffusionsbarriere überprüfen, die

sich auf demselben Wafer befinden, um unterschiedliche Ergebnisse durch unkalkulierte Effekte aufgrund der Prozessierung auszuschließen. Neben den Kombi-MEMS-Chips ohne jegliche Oxidunterbrechung als Referenzchips enthält der Versuchswafer auch Chips, bei denen die Oxide umlaufend um den Drehratensensorkern unterbrochen sind, sowie eine weitere Variante, bei der die Schichtunterbrechungen nicht umlaufend, sondern lediglich entlang des Trennstegs zwischen Beschleunigungs- und Drehratensensor realisiert sind. Der Vergleich von Druckänderungen nach Lagerung (1000 h, 150 °C) zeigt, dass die Diffusionsbarriere eine deutlich bessere Stabilität des Kaverneninnendrucks bewirkt (s. Abb. 4.39).

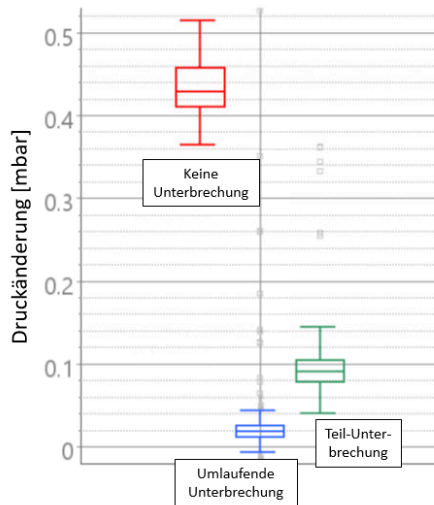


Abb. 4.39: Vergleich der Druckänderungen nach Lagerung (1000 h, 150 °C) von Drehratensensoren ohne bzw. mit Teil- oder umlaufender Gasdiffusionsbarriere bei Chips eines Kombi-MEMS-Wafers. Rot: Referenz ohne Diffusionsbarriere; blau: umlaufende Diffusionsbarriere; grün: Diffusionsbarriere nur zwischen benachbarten Kavernen. Je konsequenter die Umsetzung der Diffusionsbarriere, desto wirksamer der Schutz und desto stabiler der Kaverneninnendruck

Langzeitwirkung Gasdiffusionsbarriere

Auch die Wirksamkeit der Gasdiffusionsbarriere über die Lebensdauer des Chips lässt sich mithilfe einer weiteren Gütemessung beurteilen. Zusätzlich zu dem oben beschriebenen Schnelltest wurde der Versuchswafer nach einer Standzeit von 16 Monaten erneut einer Gütemessung unterzogen. Auch nach dieser Standzeit ist ein deutlicher Effekt der Gasdiffusionsbarriere auf die Innendruckstabilität sichtbar. Am stabilsten ist der Innendruck somit auch langfristig, wenn die Unterbrechung umlaufend um den gesamten Drehratensensorkern verläuft. Doch bereits eine Barriere zwischen den benachbarten Kavernen von Drehraten- und Beschleunigungssensor eines Kombi-MEMS-Chips bewirkt einen positiven Effekt auf die Druckstabilität des Drehratensensors, da auf diese Weise desorbierter Wasserstoff aus der Beschleunigungssensorkaverne an der Diffusion in die evakuierte Drehratensensorkaverne gehindert wird. Auch wenn Diffusion über die Chipaußenseiten weiterhin möglich ist, ist die Druckstabilität der Drehratensensorkaverne durch die teilweise Barriere bereits deutlich verbessert.

Die Gasdiffusionsbarriere, realisiert durch Unterbrechungen in allen Siliziumoxidschichten des Sensors, die eine Verbindung zwischen Innen- und Außenseite der Kaverne darstellen, ist somit ein sehr effektives Mittel, um Druckänderungen durch Diffusion vorzubeugen und den Kaverneninnendruck auf diese Weise langfristig stabil zu halten.

Übersicht der Versuche zur Diffusion

Eine Übersicht über die hinsichtlich Diffusion untersuchten Schichtmaterialien und Prozessschritte zeigt Tabelle 4.8.

Tab. 4.8: Übersicht über die untersuchten Bestandteile der Waferprozessierung hinsichtlich Einflüssen auf den Kaverneninnendruck durch Diffusionsprozesse.

| Bestandteil | Methode | Ergebnis |
|---|--|--|
| Einkristallines Silizium (Substratwafer) | Drehratensensorwafer mit unterschiedlicher Substratdicke in Hochtemperaturlagerung | Kein signifikanter Einfluss als Diffusionspfad |
| Mikromechanischer Schichtstapel (Chipseitenwände) | Viertelweise angesägte Drehratensensorwafer in Hochtemperaturlagerung | Deutliche Druckänderung bei Chips mit angesägten Seiten |
| AlGe-Eutektikum | Kombi-MEMS-Chips mit verschiedenen Bondstegbreiten zwischen Nachbarkavernen, Waferbonden mit wasserstoffhaltigem Gas, Hochtemperaturlagerung | Kein signifikanter Einfluss als Diffusionspfad |
| Polykristallines Silizium | Kombi-MEMS: Testchips mit Unterbrechung in Si-Schicht, Hochtemperaturlagerung | Druckänderung größer als bei Referenzkaverne, Ursache unklar |
| Siliziumdioxid (LPCVD-TEOS-SiO ₂) | Kombi-MEMS: Testchips mit Unterbrechung in TEOS-SiO ₂ -Schicht, Hochtemperaturlagerung | Druckänderung geringer als bei Referenzkaverne: wichtiger Diffusionspfad |
| Siliziumdioxid (thermisches SiO ₂) | Kombi-MEMS: Testchips mit Unterbrechung in thermischer SiO ₂ -Schicht, Hochtemperaturlagerung | Druckänderung geringer als bei Referenzkaverne: wichtiger Diffusionspfad |

| Bestandteil | Methode | Ergebnis |
|-----------------------------------|---|--|
| Si-SiO ₂ -Grenzflächen | Kombi-MEMS: Testchips mit Unterbrechung in SiO ₂ -Schichten auf Wafern mit modifizierten Grenzflächen durch Anätzen in BOE-Ätzbad, Hochtemperaturlagerung | Kein signifikanter Einfluss von Grenzflächenmodifikationen auf Druckstabilität |
| SiO ₂ -Volumen | Kombi-MEMS: Testchips mit Unterbrechung in SiO ₂ -Schichten auf Wafern mit unterschiedlichen SiO ₂ -Dicken, Hochtemperaturlagerung | Je größer die SiO ₂ -Schichtdicke, desto größer die Druckänderung |
| | Drehratensensorwafer, viertelweise angesägt, Lagerung in wasserstoffhaltigem Gas. Lagerungsparameter abgeleitet von experimentell ermitteltem Diffusionskoeffizienten für Wasserstoff in Siliziumoxid | Druckänderung während Lagerung exakt vorher-sagbar, Hypothese bestätigt: Wasserstoff diffundiert durch SiO ₂ -Schichten |
| | Kombi-MEMS: Testchips mit unterbrochenen Schichten, Waferbonden mit wasserstoffhaltigem Gas, Hochtemperaturlagerung | Hypothese bestätigt: Wasserstoff diffundiert durch SiO ₂ -Schichten |

4.8 Laseraktivierter Getter

Die in den Abschnitten 4.6.8 und 4.7.8 beschriebenen Maßnahmen zur Stabilisierung des Kaverneninnendruckes durch Ausheizen der Kavernen vor dem Verschluss sowie Realisierung einer Gasdiffusionsbarriere tragen bereits sehr

effektiv zur Stabilisierung der Kaverneninnendrucke von Drehratensensoren bei.

Trotzdem gelangen über die jahrelange Lebensdauer eines Sensors jedoch noch immer Gasmoleküle in die Kavernen, die dort vor allem vor dem Hintergrund der fortschreitenden Miniaturisierung von MEMS-Bauteilen nicht erwünscht sind. Um die Stabilität des Kaverneninnendrucks noch weiter zu verbessern, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Maßnahme betrachtet.

4.8.1 Maßnahme für bessere Druckstabilität: Absorbierendes Material

Eine Möglichkeit, in Hohlräumen dauerhaft einen niedrigen Druck herzustellen, ist der Einsatz von Gettermaterialien. Diese binden nach Aktivierung ihrer absorbierenden Wirkung reaktive Gase, sodass ein Vakuum oder ein durch ein Edelgas eingestellter Druck konstant gehalten werden kann.

Der Einsatz von Gettermaterialien ist ein wirksames Mittel, um niedrige Kaverneninnendrucke zu realisieren. Wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, existieren verschiedene Technologien und Materialien, die als Getter eingesetzt werden können.

Eine große Herausforderung bei der Verwendung von Gettern in MEMS-Sensor-kavernen ist die Applikation der jeweiligen absorbierenden Materialien, die mit dem Prozessfluss der Sensorherstellung kompatibel sein muss. Zudem dürfen die Materialien nicht zu vermehrten Sensorausfällen durch Partikel oder andere Verunreinigungen führen. Damit die Gettermaterialien ihre Wirkung entfalten können, bedarf es meist einer thermischen Aktivierung. Auch dieser Schritt muss mit dem Aufbau und der Beschaffenheit der verwendeten Sensoren vereinbar sein.

Aufgrund dieser und weiterer Einschränkungen in der Wahl des Gettermaterials ist bei den Kombi-MEMS-Chips, die für die bisher beschriebenen Versuche in dieser Arbeit verwendet wurden, auf Getter verzichtet, stattdessen wurde der Innendruck der Drehratensensorkavernen mithilfe eines Laser-Reseals eingestellt, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben. Desorbate aus dem Bondprozess können

auf diese Weise aus der Kaverne entfernt werden. Reaktive Gase, die erst anschließend durch Desorptions- oder Diffusionsprozesse über die Lebenszeit des Sensors noch hinzukommen, könnten von einem Getter absorbiert werden, verbleiben bei der Reseal-Technologie ohne Getter jedoch in der Kaverne und können die Dämpfungseigenschaften des Sensors beeinflussen.

Um den Einfluss von langfristiger Desorption oder Diffusion auf die Dämpfungsatmosphäre zu minimieren, ist die Verwendung eines absorbierenden Materials denkbar, das den Innendruck nicht wie ein herkömmlicher Getter von Grund auf einstellen, sondern lediglich langfristig stabilisieren soll. Der Kaverneninnendruck wird nach wie vor durch die Gestaltung des Reseal-Prozesses bestimmt, während der Getter lediglich dazu dient, nach abgeschlossener Prozessierung gegebenenfalls hinzukommende Gase zu binden [79, 123].

Wie bei herkömmlichen Gettern muss das absorbierende Material auch hier in den Prozessfluss integrierbar sein und darf die Sensorfunktion nicht beeinträchtigen. Die Getterkapazität darf für die reine Druckstabilisierung jedoch deutlich geringer sein als bei Gettern in ihrer herkömmlichen Funktion, da lediglich eine geringere Menge von Gasmolekülen gebunden werden muss, wenn der gewünschte inertielle Druck zuvor bereits durch den Reseal eingestellt wurde. Dadurch kommen für den Getter zur langfristigen Stabilisierung des Innendrucks auch Materialien infrage, die nicht zur vollständigen Druckeinstellung ohne den Reseal geeignet wären.

Eine Herausforderung ist bei der Verwendung solcher stabilisierenden Getter, dass ihre Aktivierung frühestens beim endgültigen Verschluss der Drehratensensorkavernen erfolgen soll. Eine Aktivierung im Zuge des Bondprozesses, die bei herkömmlichen Gettern in Betracht gezogen werden kann, ist bei den verwendeten Kombi-MEMS-Chips wegen der erneuten Öffnung der Kavernen nicht sinnvoll. Wäre der Getter zu diesem Zeitpunkt schon aktiviert, würde er sich vollsaugen, sobald der Chip zur Druckeinstellung wieder geöffnet wird und müsste erneut aktiviert werden, um nach dem Reseal den Innendruck langfristig zu stabilisieren. Die endgültige Aktivierung des Gettermaterials kann deshalb erst ganz zum Schluss erfolgen.

Eine Möglichkeit, Energie in das Gettermaterial einzubringen, sodass die Getterwirkung aktiviert wird, bietet die Behandlung des Materials mit einem Laser [79].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Versuche mit Titan- und Germaniumschichten auf Siliziumwafern gemacht, in denen untersucht wurde, ob die Aktivierung des Gettermaterials durch eine Erwärmung mittels Laserstrahlung bei bereits verschlossener Kaverne realistisch ist.

Eine Herausforderung beim Einsatz von Gettern in Inertialsensoren auf Siliziumbasis ist die Kompatibilität der Gettermaterialien mit dem Herstellungsprozess der Wafer. Die Applikation und Strukturierung vieler gängiger Gettermaterialien ist nicht oder nur mit sehr großem Aufwand mit den nachfolgenden Prozessschritten der Sensorherstellung vereinbar. Etablierte Gettermaterialien wie Zirkonium-Legierungen haben zudem den Nachteil, dass sie zu Partikeln in den Sensorkavernen führen können.

Bei den Versuchen in dieser Arbeit wurden die gewünschten Kaverneninnendrucke im Rahmen des Waferbondprozesses oder mithilfe eines Laser-Reseals realisiert. Da sich die Innendrucke über lange Zeiträume jedoch nachträglich verändern können, wie die in vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Hochtemperatur- und Langzeitversuche gezeigt haben, kann der Einsatz von absorbierenden Gettermaterialien sinnvoll sein. Diese haben hier nicht die Aufgabe, ohne weitere Unterstützung den Druck einzustellen, sondern sollen lediglich dafür sorgen, dass der Druck langfristig stabil bleibt, indem sie nach Verschluss hinzukommende Gasmoleküle binden.

Die Anforderungen an die Getterwirkung der Materialien, die zu diesem Zweck verwendet werden, sind niedriger als die an herkömmliche Getter, da sie in diesem Fall zur Druckstabilisierung nur eine geringere Gasmenge aufnehmen müssen.

Somit kommen auch Materialien infrage, deren Getterwirkung zu schwach wäre, um den Innendruck um mehrere Millibar zu verringern, aber ausreicht, um die

vergleichsweise geringe Gasmenge zu binden, die den Kaverneninnendruck langfristig erhöht könnte.

Auch diese kleinen Getter bedürfen einer Aktivierung, um ihre Wirkung zu entfalten. Oftmals werden Getter im Zuge des Waferbondprozesses thermisch aktiviert. Da der finale Druck der Versuchschips jedoch durch einen anschließenden Laser-Reseal bestimmt werden soll, werden die Drehratensensorkavernen nach dem Bonden erneut geöffnet. Bei diesem Vorgehen ist eine Aktivierung während des Bondens nicht sinnvoll, da der Getter gesättigt ist, sobald er wieder mit der Umgebungsluft in Kontakt kommt. Es ist somit sinnvoll, ihn im Zuge des Laser-Reseals nach Evakuierung der Kaverne zu aktivieren, bevor sie, ohne zwischenzeitlichen Bruch des Vakuums, endgültig verschlossen wird.

Im Folgenden wird untersucht, inwieweit es möglich ist, ein Gettermaterial, das in die Kaverne integriert ist, mithilfe eines Lasers thermisch zu aktivieren. Betrachtet werden zwei verschiedene Materialien, die als Getter in Betracht kommen: Germanium und Titan.

Germanium wurde gewählt, da das Ergebnis eines Versuchs im Rahmen dieser Arbeit, beschrieben in Abschnitt 4.6.3, nahelegt, dass Germanium Desorbate aus dem Bondprozess binden kann. Trifft dies zu, kann eine Struktur aus Germanium verwendet werden, um langfristig auftretende Druckänderungen in der Drehratensensorkaverne zu verringern. Ein Vorteil bei der Verwendung von Germanium als Getter besteht darin, dass dieses Material ohnehin im Prozessfluss zur Herstellung der verwendeten Versuchschips vorgesehen ist, da auch die kappenseitigen Bondrahmen aus Germanium bestehen. Eine zusätzliche Germaniumstruktur ist somit kompatibel mit dem Sensorprozess und lässt sich unkompliziert in die Kappe der Drehratensensoren integrieren.

Ein weiteres Material, das für einen druckstabilisierenden Getter in Betracht gezogen und hinsichtlich einer möglichen Aktivierbarkeit durch einen Laser untersucht wurde, ist Titan. Dieses ist ein etabliertes Gettermaterial mit vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten, unter anderem auch in MEMS-Sensoren [42]. Die

Integration von Titan in den Verlauf der Waferprozessierung der verwendeten Versuchschips ist komplexer als im Fall von Germanium, da freiliegendes Titan bei der Entfernung der Opferschicht aus Siliziumoxid, die zur Freistellung der beweglichen Siliziummasse im Sensor dient, ebenfalls angegriffen und entfernt wird (vgl. Abschnitt 2.3.8). Die Titanstruktur muss somit vor der Fluss säure, die als Ätzmittel verwendet wird, geschützt oder andernfalls erst im Anschluss an das Opferschichtätzen appliziert werden.

Das Gettermaterial, das durch einen Laser thermisch aktiviert werden soll, kann kappenseitig in der Sensorkaverne platziert werden. Der untere Teil der Drehra-tensensorkaverne eines Versuchschips ist mit den notwendigen Sensorstrukturen bereits ausgefüllt. Auf der Kappenseite, in die eine Vertiefung von bis zu 100 μm getrennt ist, lässt sich ein Getter jedoch in die Versuchschips integrieren.

Um die Getterwirkung zu aktivieren, soll das Gettermaterial in Zusammenarbeit mit T. Menold (Bosch Corporate Research) mit einem Laser durch die Siliziumkappe des Chips hindurch erwärmt werden, ohne dass das Silizium dabei beschädigt wird. Abb. 4.40 zeigt das Vorgehen schematisch. Nachdem zunächst simulativ überprüft wurde, ob dieses Vorgehen für Germanium sowie Titan auf Silizium mit den vorhandenen Anlagen grundsätzlich möglich ist, wurden Versuche an Testwafern durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde jeweils ein unstrukturierter Siliziumwafer mit 750 nm Germanium bzw. Titan besputtert.

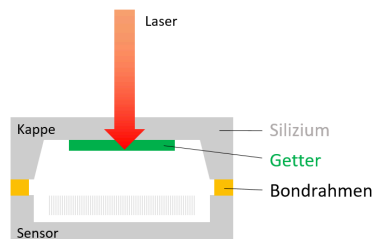


Abb. 4.40: Schematische Darstellung des Vorgehens zur thermischen Aktivierung von Gettermaterial in der Sensorkaverne mittels eines Laserstrahls durch die Siliziumkappe hindurch.

Da die Siliziumdicke eines Rohwafers mit $900\ \mu\text{m}$ deutlich größer ist als die Kappendicke eines realen Versuchschips, wurde vor dem Sputtern auf jedem Testwafer auf einem Feld von $2 \times 2\ \text{cm}^2$ $800\ \mu\text{m}$ in die Tiefe getrennt, sodass die Restsiliziumdicke an dieser Stelle mit etwa $100\ \mu\text{m}$ der realen Kappendicke angenähert wurde. Gleichzeitig war der Testwafer auf diese Weise noch immer stabil genug, um unbeschadet besputtert werden zu können.

Bei jedem der präparierten Testwafer wurden auf dem rückgedünnten Feld Versuche mit einem IR-Laser durchgeführt. Die Waferstücke wurden mit der besputterten Seite nach unten in die Probenkammer der Laseranlage gelegt und von oben mit dem Laser bestrahlt. Das Ziel war eine sichtbare Veränderung des aufgesputterten Materials ohne Veränderung der Siliziumfläche. Ein Schema des Versuchsaufbaus zeigt Abb. 4.41.

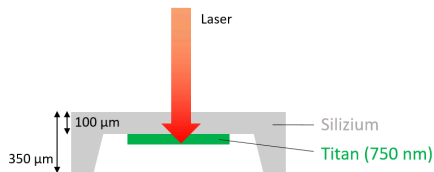


Abb. 4.41: Schematische Darstellung des Vorgehens beim Vorversuch zum Erwärmen einer aufgesputterten Titanschicht durch das Siliziumsubstrat hindurch. Der gleiche Aufbau gilt für den Versuch mit Germanium anstelle von Titan.

Bei jeder Probe wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, bei denen entweder der Fokus oder die Leistung des Laserstrahls variiert wurden. Eine Prüfung der bearbeiteten Probenstellen unter dem Mikroskop zeigte, dass es sowohl bei Silizium mit Titan-, als auch mit Germaniumbeschichtung möglich ist, auf der besputterten Probenseite eine Veränderung hervorzurufen, ohne das Silizium auf der Probenoberseite zu beschädigen.

Im Fall von Germanium scheint bei einer bestimmten Parameterkombination die Gefahr zu bestehen, dass die Beschichtung abplatzt. Das muss in einem Inertialsensor vermieden werden, da Partikel zum Ausfall des Sensors führen können. Bei der Titan-Probe zeigt sich dagegen bei einer Sichtprüfung

unter dem Mikroskop kein Hinweis auf vermehrte Partikelbildung. Hier ist an der Titanoberfläche eine Materialveränderung sichtbar, ohne dass die Haftung der Schicht erkennbar beeinträchtigt ist. Für weiterreichende Aussagen zur Schichthaftung nach der Laserbehandlung sind weiterführende Versuche notwendig.

Bei einer optischen Kontrolle wurden keine Hinweise darauf gefunden, dass die Struktur des Siliziums an der Probenoberfläche verändert wurde. Um zu überprüfen, inwieweit die Aufschmelzung der Beschichtung an der Schnittstelle zwischen Silizium und Titan oder Germanium zu Veränderungen des Siliziums führt, dient ein FIB-Schnitt, anhand dessen in einer EDX- bzw. TEM-Messung gezeigt werden kann, ob sich die Materialien an der Grenzfläche infolge der Laserbehandlung vermischt haben und wie die Beschaffenheit der Beschichtung ist. Dafür wurde zur Betrachtung eines Extremfalls eine Probe verwendet, bei der die Parameter der Laseranlage sowohl zu einer sichtbaren Aufschmelzung der Siliziumoberfläche als auch zu einer Veränderung der Beschichtungsfläche geführt haben. Das Aussehen der laserbehandelten Siliziumfläche zeigt Abb. 4.42.

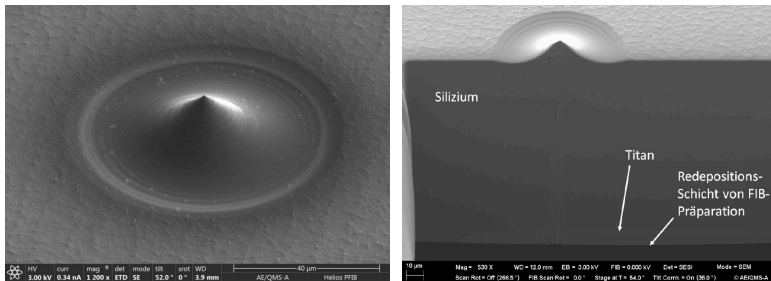


Abb. 4.42: Laserbehandelter Bereich der Probe aus titanbesputtertem Silizium. Links: Sicht von schräg oben. Rechts: Nach Präparation eines FIB-Schnittes.

Im Fall der Germaniumbeschichtung konnte keine Vermischung des Beschichtungsmaterials mit dem Siliziumsubstrat festgestellt werden. Hier zeigt eine EDX-Messung, dass das Germanium durch die Laserbehandlung aufgeschmolzen

wurde, zugleich wurde jedoch der Verdacht bestätigt, dass sich unter der Schicht Hohlräume gebildet haben und die Haftung an einigen Stellen vermindert ist, sodass sich Germaniumpartikel abgelöst haben, wie in Abb. 4.43 zu sehen.

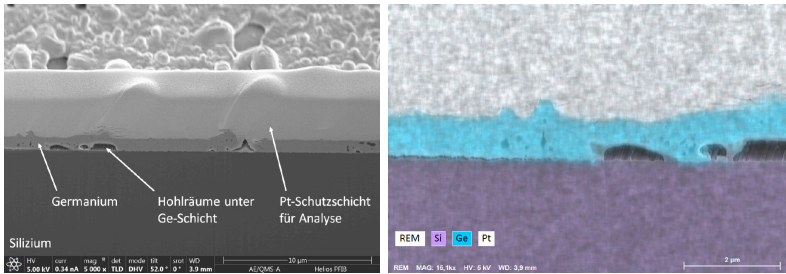


Abb. 4.43: Ergebnis einer Probe aus Silizium mit Germaniumbeschichtung als Versuch zur thermischen Aktivierbarkeit von Gettermaterialien mittels eines Lasers. Links: FIB-Schnitt, rechts: EDX-Verteilung von Ge und Si.

Der FIB-Schnitt der Probe mit Titanbeschichtung zeigt, dass auch das Titan aufgeschmolzen wurde. In diesem Fall wurden keine Abplatzungen beobachtet. Im Bereich der Aufschmelzungen hat sich jedoch eine dünne Übergangsschicht von wenigen Nanometern Schichtdicke zwischen Silizium und Titan gebildet, wie in einer EDX-Messung zu erkennen ist (s. Abb. 4.44). Diese Übergangsschicht trägt möglicherweise dazu bei, dass die Titanbeschichtung gut haftet und lässt aufgrund ihrer geringen Ausdehnung keine Beeinträchtigung der Getterfunktion des Titans erwarten.

Die beiden Versuchsreihen, bei denen die Proben aus Silizium mit gesputterter Beschichtung aus Titan oder Germanium einem Laserstrahl bei unterschiedlichen Parameterkombinationen von Leistung und Fokusslage des Laserstrahls ausgesetzt wurden, haben gezeigt, dass es möglich ist, die untersuchten Materialien durch eine Siliziumkappe hindurch zu erhitzen, ohne das Silizium zu beschädigen. Ein vielversprechendes Ergebnis ergab der Versuch mit Titanbeschichtung auf Siliziumsubstrat, bei dem die Beschichtung auch nach der Laserbehandlung noch gut haftet. Auch bei der Germaniumprobe konnte die Beschichtung ohne Beschädigung des Substrates erhitzt werden, die Haftung

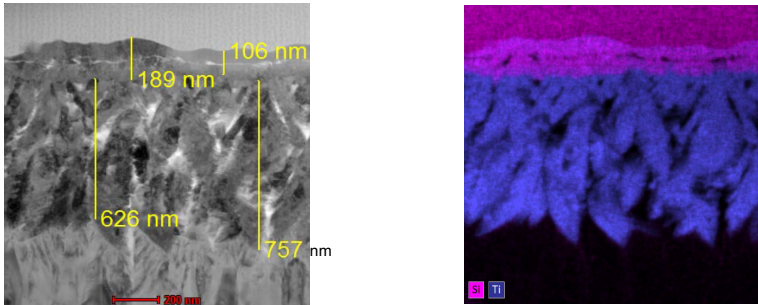


Abb. 4.44: Ergebnis der Analyse einer Probe aus titanbeschichtetem Silizium als Versuch zur thermischen Aktivierbarkeit von Gettermaterial mittels eines Lasers. Links: Aufnahme mit dem Rastertransmissionselektronenmikroskop, rechts: EDX-Elementverteilung von Ti und Si.

des Germaniums war jedoch nach dem Aufschmelzen geringer als bei der Titanprobe. Die Sichtprüfung am Mikroskop zeigt, dass dieser Effekt bei veränderten Parameterkombinationen des Lasers abgemildert werden konnte.

Um die Eigenschaften von Titan und Germanium als Gettermaterialien zu spezifizieren, sind weiterführende Versuche mit funktionalen Chips notwendig. Ist die Applikation des Titans in die Sensorprozessierung integriert, steht der weiteren Untersuchung eines Titanfeldes als laseraktiviertem Getter in der Kappe des Drehratensensors nichts im Wege. Da die Getterwirkung von Titan bereits bekannt ist, spricht vieles dafür, dass das Konzept erfolgreich umgesetzt werden kann.

Für eine erste Beurteilung der Germaniumfläche als laseraktivierter Getter wäre es möglich, Drehratensensorchips zu verwenden, die in Abschnitt 3.5.2 beschrieben sind. Diese Testchips, in deren Kavertie eine zusätzliche Germaniumfläche integriert ist, die für diesen Versuch genutzt werden kann, sowie Referenzchips ohne zusätzliche Germaniumfläche können erneut für diesen Versuch miteinander verglichen werden. Mithilfe von Gütemessungen zur Auswertung der Kavertieinnendrucke vor und nach der Laserbehandlung der Testchips kann ermittelt werden, wie gut die Wirksamkeit eines laseraktivierten Getters aus

Titan oder Germanium ist. Anhand von Drehratensensorwafern, auf denen sich sowohl Prototypen von Chips mit Gettermaterial als auch leere Referenzchips befinden, kann der Effekt der laseraktivierten Getter direkt beobachtet werden. Anschließend kann mithilfe beschleunigter Alterung oder in einem Langzeitversuch der Gettereffekt der laseraktivierten Materialien überprüft und quantifiziert werden.

Aufgrund der Versuchsergebnisse der Testchips mit zusätzlicher Germaniumfläche in einer Hochtemperaturlagerung, noch ohne Laseraktivierung, beschrieben in Abschnitt 4.6.3, und der oben beschriebenen Ergebnisse der Versuche zum laseraktivierten Gettermaterial besteht die Vermutung, dass ein laseraktivierter Getter in funktionalen Chips realisierbar ist.

5 Zusammenfassung und Fazit

5.1 Zusammenfassung

Die neuen Erkenntnisse, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, ermöglichen eine höhere Lebensdauer von verkappten Inertialsensoren auf Siliziumbasis, insbesondere von resonanten Drehratensensoren. Die Arbeit deckt Einflüsse auf die Dämpfungsatmosphäre der Sensoren auf, die deren Zuverlässigkeit langfristig beeinträchtigen können. Zunächst wird anhand von Restgasanalysen gezeigt, dass der gasförmige Kaverneninhalt, der nach abgeschlossener Waferprozessierung trotz Vakuumwaferbondens vorliegt, aus Wasserstoff besteht. Nach einer Güte-Druck-Kalibrierung lassen sich Drehratensensoren als hervorragende Druckmesssysteme nutzen, um geringste Druckänderungen in ihren Kavernen zu detektieren. Somit werden Analysen kleinster Kavernendruckänderungen auf Waferebene möglich, die je nach Versuch unterschiedliche Materialien oder Prozessschritte der Sensorherstellung in den Fokus nehmen. Auf diese Weise werden verschiedene Mechanismen identifiziert, die eine präzise Einstellung des Kavernendruckes beim Bonden behindern und schädlich für die Stabilität der Dämpfungsatmosphäre sind. Hervorzuheben sind dabei Desorption und Diffusion als dominierende Einflüsse auf den Kavernendruck. Für jeden dieser beiden Mechanismen wird eine Maßnahme vorgeschlagen, die die negativen Einflüsse auf die Lebensdauer der Sensoren wirksam vermindert. Zudem werden abschließend Versuchsergebnisse vorgestellt, die mit Blick auf absorbierend wirksame Schichten, die mithilfe eines Lasers thermisch aktiviert werden, eine weitere Möglichkeit zur Realisierung langfristiger Druckstabilität in den Sensorkavernen bieten.

Die vorgestellten Maßnahmen zur Verbesserung der Druckstabilität hinsichtlich Diffusions- und Desorptionseffekten sowie der Integration von laseraktivierten Gettern lassen sich kombinieren.

5.1.1 Desorption

Desorption wurde als einer der Mechanismen identifiziert, die großen Einfluss auf den Kavernendruck haben. Nach dem Waferbonden ist eine bedeutende Menge Wasserstoff in Drehratensensoren auffindbar, die nicht gezielt eingeschlossen wurde. Alle Schichtmaterialien des Sensoraufbaus sowie ausgewählte Schritte des Herstellungsprozesses (Waferreinigung nach Aluminiumätzen, Gasphasenätzen mit HF, Waferbonden) von Inertialsensoren wurden hinsichtlich ihrer Wirkung als Wasserstofflieferanten untersucht, u.a. mithilfe von Nuklearen Reaktionsanalysen, Thermodesorptions-Massenspektrometrie und Druckmessungen bei verschiedenen Testchipkonfigurationen. Anhand der Ergebnisse wurde die Hypothese bestätigt, dass der auffindbare Wasserstoff vorrangig aus einem Belag auf den Aluminiumstrukturen stammt. Der Belag bildet sich im Verlauf der Sensorherstellung als Nebenprodukt des Gasphasenätzprozesses mit Flusssäure, in dem die Sensorstrukturen durch Entfernung des Opferoxids freigestellt werden.

Der Einfluss von Desorbaten auf den Kavernendruck kann minimiert werden, indem vor dem endgültigen Verschluss der Chips ein Ausheizschritt in den Waferbond- oder Laser-Reseal-Prozess integriert wird. Auf diese Weise werden Ausgasungen vorweggenommen und können abgepumpt werden, bevor die Kavernen verschlossen werden. Beim Waferbonden lässt sich der Effekt des Ausheizens durch die Kombination mit Abstandshaltern verstärken, die ins Chipdesign integriert sind. Diese halten die sensor- und kappenseitigen Bondrahmen im Bondprozess längstmöglich auf Distanz und erleichtern das Abpumpen von Desorbaten aus den Sensorkavernen vor dem endgültigen Verschluss. Auch langfristig sind mit dieser Methode keine großen Druckänderungen durch Desorptionsprozesse zu erwarten. Da die Desorbate andernfalls aus den Kavernen nach außen diffundieren und zu Änderungen der Dämpfungseigenschaften

führen können, trägt das Ausheizen der Chips vor Verschluss dazu bei, den Kavernendruck langfristig stabil zu halten und die Lebensdauer der Sensoren zu erhöhen.

5.1.2 Diffusion

Diffusion wurde als zweiter grundlegender Mechanismus identifiziert, der den Kavernendruck beeinflusst. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass Diffusionsvorgänge durch Kavernenwände von verkappten Sensoren insbesondere über längere Zeiträume zu Änderungen der Dämpfungsatmosphäre und des Kavernendrucks führen. Nachdem die oben umrissenen Untersuchungen gezeigt haben, dass nach dem Waferbonden Wasserstoff in den Sensorkavernen vorliegt, deuten weitere Versuche darauf hin, dass dieser Wasserstoff nicht unbegrenzt in den Kavernen verbleibt, sondern teilweise nach außen diffundiert.

Um Diffusionspfade im Aufbau der Sensoren zu identifizieren, werden in dieser Arbeit alle Materialien des Schichtstapels eines Sensors mithilfe von geeigneten Testchips, Wafern mit variierenden SiO_2 -Schichtdicken und viertelweise angesägten Wafern in beschleunigter Alterung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit als Diffusionspfade betrachtet. Die Untersuchungen führen zu der Hypothese, dass die Wasserstoffdesorbate vorrangig durch Siliziumoxidschichten diffundieren, die eine Verbindung vom Kaverneninneren nach außen an die Umgebungsatmosphäre bilden.

Anhand der experimentellen Ergebnisse wird ein Diffusionskoeffizient für Wasserstoff in Siliziumdioxid bestimmt, für den es in der Literatur nur spärliche Vergleichswerte gibt. Die Hypothese von SiO_2 -Schichten als Diffusionspfade sowie der experimentell ermittelte Diffusionskoeffizient werden in einem abschließenden Versuch bestätigt, indem die Diffusionsrichtung durch Lagerung von Versuchswafern in wasserstoffhaltiger Atmosphäre in kalkulierbarem Ausmaß umgekehrt wird.

Die experimentellen Daten erlauben zudem eine Simulation des Diffusionsverhaltens für eine Sensorkaverne anhand eines FE-Modells, die eine Vorhersage des Kavernendrucks über lange Zeiträume ermöglicht. Auf diese Weise lassen

sich die Auswirkungen von Diffusionsvorgängen über die Lebensdauer eines Sensors einschätzen. Die Simulation zeigt, dass bei der untersuchten Temperatur von 150 °C langfristig eine nicht zu unterschätzende Druckänderung durch Diffusion zu erwarten ist, die zu einer Änderung des Messverhaltens von Inertialsensoren führt. Im Zuge der wachsenden Miniaturisierung von Sensoren fallen Änderungen der Dämpfungsatmosphäre zunehmend stärker ins Gewicht. Da Druckänderungen durch Diffusion auch bei niedrigeren Temperaturen unausweichlich sind, sollten sie bei der Entwicklung zukünftiger MEMS-Inertialsensoren berücksichtigt werden.

Als wirksame Maßnahme zur Überwindung der Schwierigkeiten aufgrund von Diffusionsvorgängen wird eine Diffusionsbarriere vorgestellt, die in das Sensorlayout integrierbar ist. Hierfür werden alle relevanten SiO₂-Schichten umlaufend um die Sensorkaverne unterbrochen und mit der darauffolgenden Siliziumschicht verfüllt, die für Wasserstoffmoleküle deutlich undurchlässiger ist. Auf diese Weise verbleiben die Desorbate auch langfristig größtenteils in der Kaverne und die Druckstabilität lässt sich signifikant verbessern.

5.2 Fazit

Aus allen Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Verkapselte MEMS-Inertialsensoren auf Siliziumbasis enthalten nach dem Verschluss der Sensorkavernen Gase. Diese bewirken einen gegenüber den Prozessparametern im Bondprozess erhöhten Kavernendruck.
- Die Gase beeinflussen das Dämpfungsverhalten resonanter Inertialsensoren.
- Der gasförmige Kaverneninhalt besteht hauptsächlich aus Wasserstoff.
- Der Wasserstoff entstammt einem Belag auf Aluminiumstrukturen des Sensors, der als Nebenprodukt des Gasphasenätzprozesses mit Flusssäure

im Verlauf der Sensorherstellung entsteht. Während des Waferbondens oder beim Laser-Re Seal desorbiert der Wasserstoff, vorrangig bei Temperaturen über 150 °C. Nach der Waferprozessierung ist der Wasserstoff in den Kavernen eingeschlossen.

- Die Menge eingeschlossener Desorbate lässt sich durch Ausheizen der Kavernen unmittelbar vor dem endgültigen Verschluss (ohne Bruch des Vakuums) minimieren. Je heißer und länger der Ausheizschritt abhängig vom Sensordesign gestaltet werden kann, desto wirksamer lassen sich Desorbate bereits vor Verschluss abpumpen.
- Über längere Zeiträume diffundiert eingeschlossener Wasserstoff aus den Kavernen nach außen.
- Signifikante Diffusionspfade sind die Siliziumdioxidschichten, die eine Verbindung vom Kaverneninneren nach außen zur Umgebungsatmosphäre bilden.
- Der Diffusionskoeffizient von Wasserstoff in den TEOS-SiO₂-Schichten bei 150 °C beträgt $(6,45 \pm 1,3) \cdot 10^{-15} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.
- Über lange Zeiträume hat die Druckänderung durch Diffusion bei 150 °C einen bedeutenden Einfluss auf das Messverhalten von Drehratensensoren. Auch bei Normalbedingungen ist ein nicht zu unterschätzender Einfluss über die Lebensdauer eines Sensors wahrscheinlich.
- Der Einfluss der Diffusion lässt sich durch eine Diffusionsbarriere minimieren, die ins Chipdesign integrierbar ist.
- Als zusätzliche Maßnahme für eine bessere Druckstabilität kommen absorbierende Materialien in Betracht, die durch die Siliziumkappe eines Sensors hindurch mithilfe eines Lasers thermisch aktiviert werden könnten. Vorversuche zeigen, dass dieses Vorgehen machbar ist.

6 Ausblick

Die vorliegende Arbeit gibt auf wichtige Fragestellungen eine klare Antwort. Dennoch kamen im Verlauf der Versuche Fragen auf, deren tiefergehende Untersuchung den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte. Einige Vorschläge für weiterführende Versuche sind im Folgenden zusammengestellt.

- Bei den Testchips mit unterbrochener Siliziumschicht fällt auf, dass die Druckänderung in einer Lagerung bei 150 °C stärker ist als bei Referenzchips ohne Siliziumunterbrechung (Abschnitt 4.7.2). Der Grund für diese größere Druckänderung bei Unterbrechung des Siliziums sollte untersucht werden. Möglicherweise spielen verschiedene Arten von Diffusion (Grenzflächendiffusion, Volumendiffusion) oder unterschiedliche Löslichkeiten von Wasserstoff in den beteiligten Schichten eine Rolle.
- Für ein umfassenderes Bild von Diffusionseinflüssen auf den Kavernendruck ist es sinnvoll, den Diffusionskoeffizienten von Wasserstoff in Siliziumdioxid auch für weitere Temperaturen zu bestimmen. Auf diese Weise ist die Angabe des Diffusionskoeffizienten abhängig von der Temperatur möglich. Langfristige Druckänderungen aufgrund von Diffusion bei Realbedingungen (Raumtemperatur oder Temperaturprofile) sind auf dieser Grundlage besser vorhersagbar. Für die Ermittlung des temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten bieten sich weitere Lagerungen von angesägten Wafern bei verschiedenen Temperaturen an. Ab 200 °C sind jedoch verstärkt Druckänderungen durch Desorptionseffekte in den Kavernen zu berücksichtigen, die die Diffusionseffekte überlagern, s. Abschnitt 4.6.7.

- Der Belag auf den Aluminiumstrukturen, der sich im Laufe des Gasphasenätzprozesses bildet, stellt die dominierende Wasserstoffquelle in den Sensorkavernen dar (s. Abschnitt 4.6.2). Möglicherweise lässt sich die Belagsbildung durch geeignete Prozessführung vermindern, oder die Zusammensetzung des Belags kann beeinflusst werden, sodass die Bildung von Desorbaten verhindert wird. Für dahingehende Untersuchungen sind weitere Versuche notwendig.
- Die Ursache der Kreissignatur, die bei Lagerung ab 200 °C zu beobachten ist (Abschnitt 4.6.7), sollte weiter untersucht werden. Auch ob das Auftreten der Kreissignatur durch einen In-situ-Ausheizschritt im Bondprozess vermieden werden kann, wie er in Abschnitt 3.5.6 beschrieben ist, könnte Gegenstand weiterer Versuche sein.
- Die Ergebnisse der Vorversuche zu laseraktivierten Gettermaterialien in Abschnitt 4.8 sind vielversprechend, der Nachweis der Wirksamkeit der Getter in realen Sensorkavernen steht jedoch noch aus. Hierfür müssen Sensoren mit den entsprechenden Getterschichten hergestellt werden, deren Druckstabilität nach der thermischen Aktivierung mittels Laser ausgewertet wird. Idealerweise werden Referenzchips ohne Getter auf demselben Wafer realisiert, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Neben Titan und Germanium können auch weitere Materialien hinsichtlich ihrer Laseraktivierbarkeit und absorbierenden Wirkung getestet werden.

A Anhang

Güte-Druck-Zusammenhang

Zu Bild 4.2:

Die experimentell ermittelten Zusammenhänge für Güte Q und Kaverneninnendruck p sind die folgenden.

$$Q_{He} = 6688p^{-0,92}$$

$$Q_{Ne} = 3614p^{-0,95}$$

$$Q_{Luft} = 3127p^{-0,96}$$

$$Q_{N_2} = 2906p^{-0,89}$$

Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse wurde der folgende Zusammenhang zwischen Q und p für Wasserstoff als Dämpfungsgas errechnet:

$$Q_{H_2} = 10925p^{-0,9}$$

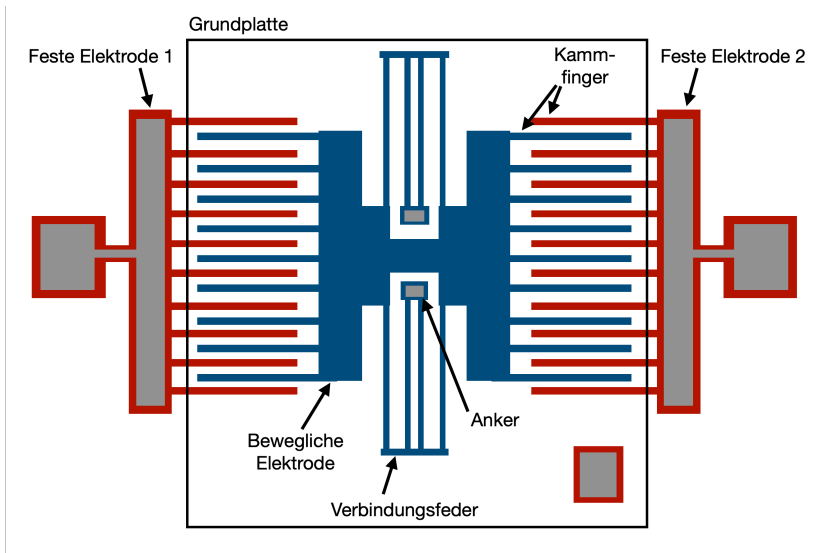


Abb. A.1: Schematische Darstellung eines elektrostatischen Kammantriebs; Abbildung nach [124].

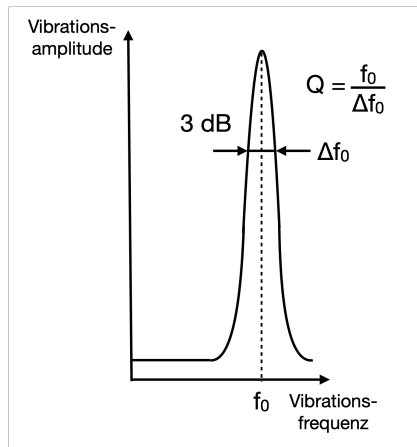


Abb. A.2: Aus der Resonanzfrequenz und der Breite des Resonanzpeaks bei -3 dB lässt sich der Gütefaktor berechnen; Abbildung nach [41].

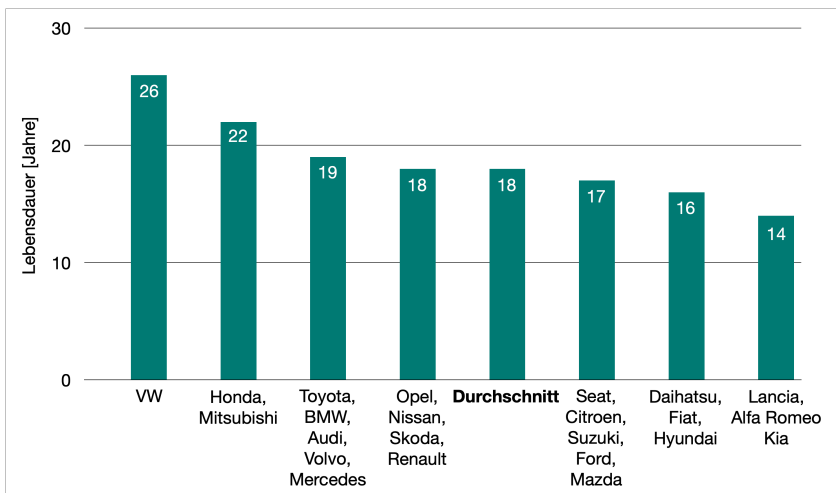


Abb. A.3: Typische Lebensdauer von Autos in Deutschland nach Automarken (Stand 2014); Abbildung nach [125].

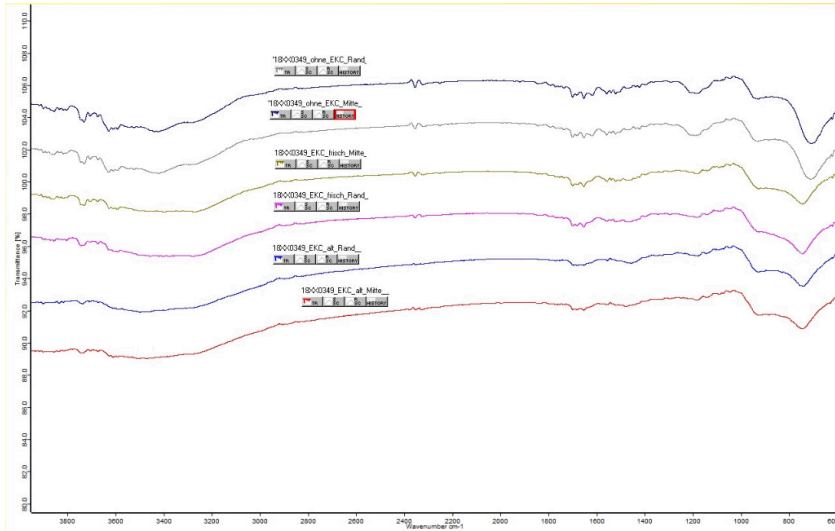


Abb. A.4: Ergebnis der FT-IR-Analyse von drei unstrukturierten, aluminiumbeschichteten Versuchswafern, die mit verschiedenen Varianten einer Reinigungslösung behandelt wurden, die in der Sensorprozessierung standardmäßig nach dem Aluminiumätzen verwendet wird. Wafer 1: Analyse ohne vorausgehende Behandlung mit Reinigungslösung (Referenz), Wafer 2: Behandlung mit frischer Reinigungslösung ohne Rückstände, Wafer 3: Behandlung mit gebrauchter Reinigungslösung mit hohem Anteil von Rückständen aus vorhergehenden Reinigungsprozessen. Aufnahme der FT-IR-Spektren jeweils in der Wafermitte und am Wafertrand.

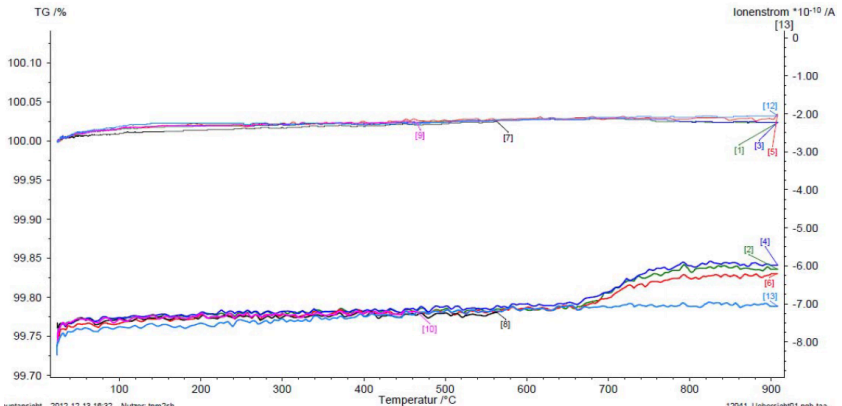


Abb. A.5: Ergebnis der Thermodesorptionsanalyse von Proben mit ausgebildeten Sensorstrukturen (Kurvenverlauf [8], schwarz) sowie aus Silizium mit AlGe-Beschichtung ohne den Belag, der beim Gasphasenätzen entsteht (Kurvenverlauf [10], pink) im Massenspektrometer.

Weitere Kurvenverläufe: [2], grün, [4], dunkelblau und [6], rot: strukturierte Kappenwaferstücke. Nur bei diesen Proben ist eine Wasserstofffreisetzung ab ca. 660 °C zu beobachten. [13], hellblau: unbeschichtetes Siliziumwaferstück.

Die Kurven [1], [3], [5], [7], [9] und [12] gehören zu einer zusätzlich durchgeführten thermogravimetrischen Analyse. Die freigesetzte Wasserstoffmenge war jedoch in allen Fällen zu gering, um eine messbare Gewichtsänderung der Proben hervorzurufen, die Kurven sind somit nicht aussagekräftig.

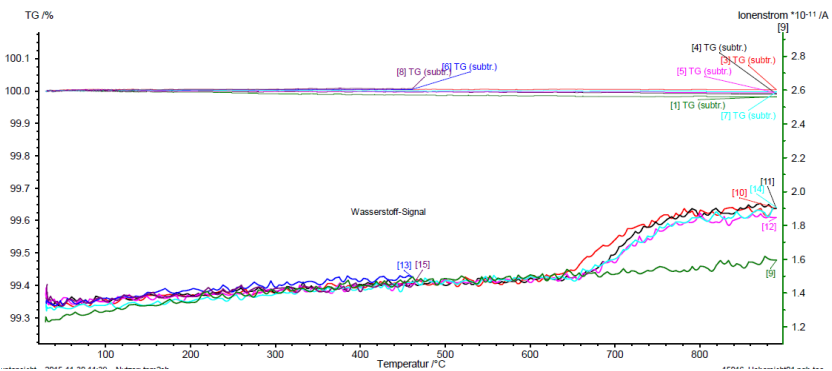


Abb. A.6: Ergebnis der Thermodesorptionsanalyse von Proben mit Germanium im Massenspektrometer. Der detektierte Ionenstrom der im Massenspektrometer ionisierten Wasserstoffmoleküle kann an der rechten Achse abgelesen werden. Schwarz [10] und rot [11]: mit Germanium vollflächig beschichtete Siliziumwaferstücke; rosa [12] und türkis [14]: Stücke eines strukturierten Kappenwafers, der Germaniumbondrahmen enthält; dunkelgrün [9]: unbeschichtetes Siliziumwaferstück. Bei Proben mit Germanium wird ab ca. 650 °C bis zur Endtemperatur des Versuchs Wasserstoff freigesetzt.

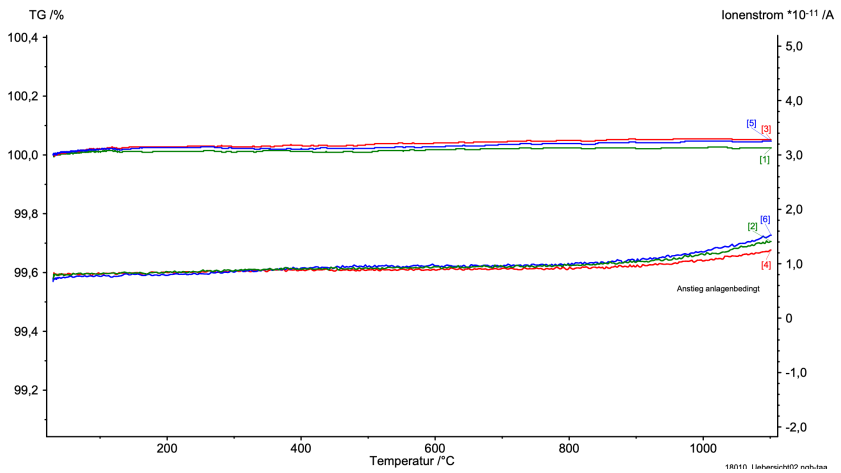


Abb. A.7: Ergebnis der TD-MS-Analyse von in den Abschnitten 4.6.6 und 4.6.5 beschriebenen Proben, bestehend aus Silizium und Siliziumdioxid. [2]=TEOS, [4]=TEOS+Epi-Si und [6]=TEOS nach Entfernung von Epi-Si. Der Ionenstrom von im Massenspektrometer ionisierten Wasserstoffmolekülen ist an der rechten Achse ablesbar. Die oberen Kurven, bezeichnet mit [1],[3] und [5]), zeigen das Signal einer zusätzlichen thermogravimetrischen Analyse (linke Achse), der freigesetzte Wasserstoff war jedoch zu leicht, um eine Signaländerung hervorzurufen.

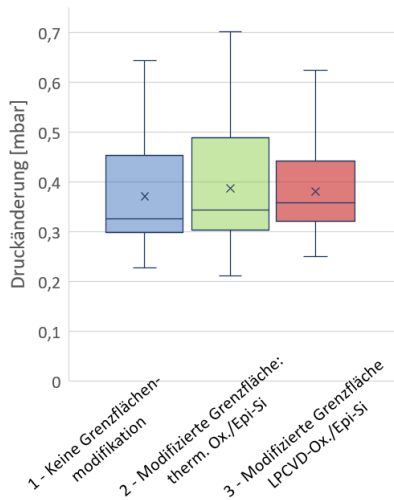


Abb. A.8: Druckänderung nach Lagerung (1000 h, 150 °C) von Drehratensensoren auf Kombi-MEMS-Wafern. Wafer 1: Referenz; Wafer 2: thermisches SiO₂/Si-Grenzfläche modifiziert durch BOE-Ätzbad. Bei Wafer 3 wurde der gleiche Vorgang zwischen der LPCVD-Abscheidung des TEOS-Oxids und der nachfolgenden Siliziumepitaxie durchgeführt, sodass hier eine andere SiO₂/Si-Grenzfläche modifiziert ist.

| Gehalt [%] | Gruppe A | Gruppe A | Gruppe B | Gruppe B | Gruppe C | Gruppe C | Gruppe D | Gruppe D | Gruppe E | Gruppe E | Gruppe F | Gruppe F | Gruppe G | Gruppe G |
|-------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| H ₂ | 99,0 | 98,0 | 97,0 | 98,0 | 95,0 | 96,0 | 97,0 | 97,0 | 95,0 | 94,0 | 97,0 | 93,0 | 94,0 | 94,0 |
| CO ₂ | 0,9 | 1,4 | 2,9 | 1,6 | 3,6 | 3,3 | 3,3 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 2,5 | 5,1 | 4,8 | 4,8 |
| CH ₄ ? | | | | | (1,3) | (0,8) | | (0,9) | (1,4) | (1,8) | | (1,7) | (1,5) | (1,2) |
| | nicht angesägt, Rand 1000 h, 150 °C | nicht angesägt, Rand 240 h, 200 °C | nicht angesägt, Rand 120 h, 250 °C | nicht angesägt, Rand 24 h, 300 °C | nicht angesägt, Mitte 120 h, 250 °C | angesägt, Mitte 120 h, 250 °C | angesägt, Rand 120 h, 250 °C | | | | | | | |
| | V1 | V1 | V1 | V1 | V1 | V4 | V4 | | | | | | | |

Abb. A.9: Ergebnisse der Restgasanalysen von Chips, die angesägten Wafern nach Hochtemperaturlagerung entnommen waren. Rot hinterlegte Felder: Lagerungsart der Chips und Ort der Chips auf dem Wafer (V1: ungesägtes Viertel, V4: in beide Richtungen angesägtes Viertel entsprechend Abb. 3.10). Für jede Variante wurden zwei Chips analysiert, jeweils in die Versuchsgruppen A bis G zusammengefasst. Rote Zahlen in Klammern: Werte, die an der Nachweisgrenze liegen. Sie zeigen lediglich ohne quantitative Bewertung an, dass Hinweise auf CH₄ vorliegen. Die prozentualen Gehaltsangaben beziehen sich auf die Summe der analysierten Bestandteile. Die Summen der Gehalte weichen durch Rundung z.T. von 100 % ab.

Veröffentlichungen

M. Winker, R. Hausner, A. Guber: Zwei verschiedene Kaverneninnendrucke auf einem MEMS-Wafer durch gestaffeltes Bonden mit modifizierten Germaniumbondrahmen. MikroSystemTechnik Kongress 2017: MEMS, Mikroelektronik, Systeme, 23.–25. Oktober 2017, München, Proceedings S. 333–336

M. Winker, Ralf Hausner, A. Guber: Two different cavity pressures in a single MEMS chip realized in one bonding process. WaferBond 17: Conference on Wafer Bonding for Microsystems, 3D- and Wafer Level Integration, 27.–29. November 2017, Leuven, Belgien, Proceedings S. 63–64

H. Stahl, A. Scheurle, H. Specht, **M. Winker**, R. Hausner, V. Schmitz. Patent: DE102016221055A1, US10336610B2. Method for producing a micromechanical component; angemeldet am 26.10.2016, veröffentlicht am 26.4.2018

M. Kopf, R. Mogor-Györffy, A. Breitling: Hydrogen gas diffusion influences cavity pressure of encapsulated inertial sensors, Journalpublikation eingereicht.

Literaturverzeichnis

- [1] Lammel, G. The future of MEMS sensors in our connected world, 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Estoril, Portugal, **2015**; pp. 61–64.
- [2] Gomez, U.-M. BOSCH MEMS sensors: enabler for the IoT. Vortrag Mitgliederversammlung des VDE 2017, Website aufgerufen am 18.09.2019, <https://www.vde-wuerttemberg.de/de/veranstaltungen/berichte-zu-vergangenen-veranstaltungen/2017-05-22----vortrag-gomez>.
- [3] Gang, Q., and Yi-Xian, C. Research and design of wearable human motion capture system, 7th International Conference on Social Network, Communication and Education (SNCE 2017), Shenyang, China, **2017**.
- [4] Büttgenbach, S. *Mikrosystemtechnik: Vom Transistor zum Biochip*; Springer Berlin Heidelberg, **2016**.
- [5] International Technology Roadmap for Semiconductors 2012. Präsentation auf Website, aufgerufen am 10. November 2017, www.eet.bme.hu/~mizsei/mikrorejegy/MEMS_12052012.pdf.
- [6] Werthschuetzky, R., and Wilde, J. e. a. Sensor-Technologien 2022, *AMA Fachverband für Sensorik e.V., Berlin, 2017*,
- [7] MEMS-Sensoren als Bausteine der vernetzten Welt. Website, aufgerufen am 17.01.2018, <http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/mems-sensoren-als-bausteine-der-vernetzten-welt-35265.html>.

- [8] Marek, J. MEMS-Sensoren im Überblick, *Automobil-Elektronik*, **2007**, April, 2/2007, 16–18.
- [9] Paul, H., Binder, J., Bäuml, H., Kleckers, T., Horn, M., and Höflinger, F. *Druck-, Kraft-, Drehmoment- und Inertialsensoren*, in: *Sensortechnik*; Springer Berlin Heidelberg, **2014**; pp. 433–571.
- [10] Tränkler, H.-R., and Reindl, L. M. *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*; Springer Berlin Heidelberg, **2015**.
- [11] Peripherer Beschleunigungssensor - Sensorsystem zur Aufprallerkennung. Website, aufgerufen am 06.11.2020, <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/fahrsicherheitssysteme/fu%C3%9Fg%C3%A4ngerschutz/peripherer-beschleunigungssensor/>, Bosch Mobility Solutions.
- [12] Hilleringmann, U. *Mikrosystemtechnik: Prozessschritte, Technologien, Anwendungen*; Springer Berlin, **2006**.
- [13] Kempe, V. *Inertial MEMS: principles and practice*; Cambridge University Press, Cambridge, **2011**.
- [14] Classen, J., Frey, J., Kuhlmann, B., Ernst, P., and Bosch, R. *MEMS gyroscopes for automotive applications*, in: *Advanced Microsystems for Automotive Applications*; Springer Berlin, **2007**; pp. 291–306.
- [15] Perlmutter, M., and Breit, S. The future of the MEMS inertial sensor performance, design and manufacturing, 2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Karlsruhe, **2016**; pp. 1–12.
- [16] Reif, K. *Automobilelektronik*; Springer Vieweg, Wiesbaden, **2007**.
- [17] Vandenbrouck, F., Berthier, L., and Gheusi, F. Coriolis force in geophysics: an elementary introduction and examples, *European Journal of Physics*, **2000**, 21(4), 359.

-
- [18] Li, Q., Xiao, D., Zhou, X., Xu, Y., Zhuo, M., Hou, Z., He, K., Zhang, Y., and Wu, X. 0.04 degree-per-hour MEMS disk resonator gyroscope with high-quality factor (510 k) and long decaying time constant (74.9 s), *Microsystems & nanoengineering*, **2018**, 4(1), 1–11.
- [19] Menz, W., Mohr, J., and Paul, O. *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*; Wiley-VCH, Weinheim, **2012**.
- [20] Guber, A. E. Grundlagen der Mikrosystemtechnik I. Vorlesung am Karlsruher Institut für Technologie, Wintersemester 2013/14.
- [21] Classen, J., Reinmuth, J., Kälberer, A., Scheurle, A., Günther, S., Kiesel, S., Schellin, B., Bräuer, J., and Eicher, L. Advanced surface micromachining process – A first step towards 3D MEMS, 30th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Las Vegas, USA, **2017**; pp. 314–318.
- [22] Tilli, M., Motooka, T., Airaksinen, V.-M., Franssila, S., Paulasto-Krockel, M., and Lindroos, V. *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*; Elsevier, Amsterdam, **2015**.
- [23] Korvink, J. G., and Greiner, A. *Semiconductors for micro- and nanotechnology: an introduction for engineers*; Wiley-VCH, Weinheim, **2002**.
- [24] Laermer, F., and Urban, A. Milestones in deep reactive ion etching, The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS'05, Seoul, Korea (South), **2005**; pp. 1118–1121.
- [25] An, L., Lai, K., Chay, W., and Hua, Y. A study on EKC265 bath life and fluorine and carbon contamination on bond pads, ICSE'98. 1998 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Bangi, Malaysia. Proceedings (Cat. No. 98EX187), **1998**; pp. 9–12.

- [26] Steven, L. H. J., Bliznetsov, V., Wei, D., Dexian, T., and Wickramanayaka, S. Comparison of aluminum post etch cleaning on MEMS structures using formulated organic solvent cleaners, 2014 IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapur, **2014**; pp. 762–767.
- [27] Dawson, S. C. Material Safety Data Sheet EKC Technology, Version 2004. DuPont Electronic Technologies, Dokument auf Website, aufgerufen am 15.08.2019, https://uwaterloo.ca/giga-to-nanoelectronics-centre/sites/ca.giga-to-nanoelectronics-centre/files/uploads/files/ekc_265.pdf.
- [28] Kobayashi, S., Sakuraba, M., Matsuura, T., Murota, J., and Mikoshiba, N. Initial growth characteristics of germanium on silicon in LPCVD using germane gas, *Journal of crystal growth*, **1997**, 174(1–4), 686–690.
- [29] Murota, J., and Ono, S. Low-temperature epitaxial growth of Si/Si_{1-x}Gex/Si heterostructure by chemical vapor deposition, *Japanese journal of applied physics*, **1994**, 33(4S), 2290.
- [30] Leancu, R., Moldovan, N., Csepregi, L., and Lang, W. Anisotropic etching of germanium, *Sensors and Actuators A: Physical*, **1995**, 46(1–3), 35–37.
- [31] Primak, W., Kampwirth, R., and Dayal, Y. Peroxide etching of germanium, *Journal of the Electrochemical Society*, **1967**, 114(1), 88–91.
- [32] Shim, K., Kil, Y., Yang, H., Park, B., Yang, J., Kang, S., Jeong, T., and Kim, T. S. Characteristics of germanium dry etching using inductively coupled SF₆ plasma, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **2012**, 15(4), 364–370.
- [33] Oehrlein, G., Bestwick, T., Jones, P., Jaso, M., and Lindström, J. Selective dry etching of germanium with respect to silicon and vice versa, *Journal of The Electrochemical Society*, **1991**, 138(5), 1443–1452.

-
- [34] Hausner, R. Wafer-bonding for MEMS – status and trends, *ECS Transactions*, **2014**, 64(5), 245–251.
- [35] Zoberbier, M., and Heller, M. Wafer level packaging using high force bonding of AlGe. Artikel aus dem SÜSS-Report 2016, Website aufgerufen am 25.01.2018, https://www.suss.com/technical-publications/wp_wafer-level-packaging-using-high-force-bonding-zoberbier.pdf.
- [36] Sood, S. Advanced metal-eutectic bonding for high volume MEMS WLP, IEEE MEMS Bay Area Meeting, San Francisco, CA, **2014**; Präsentation auf Website: http://sites.ieee.org/scv-mems/files/2013/09/2014_2_26_IEEE-MEMS-Sood-Handouts.pdf, aufgerufen am 25.01.2018.
- [37] Corman, T., and Enoksson, P. e. a. Gas damping of electrostatically excited resonators, *Sensors and Actuators A: Physical*, **1997**, 61(1–3), 249–255.
- [38] Harris, C. M., and Piersol, A. G. *Harris' shock and vibration handbook*; McGraw-Hill New York, **2002**; Vol. 5.
- [39] Plaßmann, W., and Schulz, D. *Handbuch Elektrotechnik*; Springer Vieweg, Wiesbaden, **2016**.
- [40] Korvink, J., and Anders, J. *Micro and Nano Scale NMR: Technologies and Systems*; Wiley-VCH, Weinheim, **2018**.
- [41] Stemme, G. Resonant silicon sensors, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **1991**, 1(2), 113.
- [42] Reinert, W. Neon Ultra-Feinlecktest zur Vorhersage der Vakuumerhaltung resonanter Mikrosensoren. Ph.D. thesis, Christian-Albrechts-Universität Kiel, **2007**.

- [43] Tudor, M., Andres, M., Foulds, K., and Naden, J. Silicon resonator sensors: interrogation techniques and characteristics, *IEE Proceedings D-Control Theory and Applications*, **1988**; pp. 364–368.
- [44] Weinberg, M., Candler, R., Chandorkar, S., Varsanik, J., Kenny, T., and Duwel, A. Energy loss in MEMS resonators and the impact on inertial and RF devices, *TRANSDUCERS 2009 – International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, Dencer, CO, **2009**; pp. 688–695.
- [45] Tenholte, D. Ein MEMS Vakuumsensor nach dem Reibungsprinzip. Ph.D. thesis, Universität Chemnitz, **2009**.
- [46] Schaaf, S. A., and Chambré, P. L. *Flow of rarefied gases*; Princeton University Press, Princeton, NJ, **1961**.
- [47] Blom, F., Bouwstra, S., Elwenspoek, M., and Fluitman, J. Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, **1992**, *10(1)*, 19–26.
- [48] Christian, R. The theory of oscillating-vane vacuum gauges, *Vacuum*, **1966**, *16(4)*, 175–178.
- [49] Newell, W. E. Miniaturization of tuning forks, *Science*, **1968**, *161(3848)*, 1320–1326.
- [50] Li, Q., Goosen, J., Van Keulen, F., and Van Beek, J. Gas ambient dependence of quality factor in MEMS resonators, *IEEE Conference SENSORS 2009*, Christchurch, New Zealand, **2009**; pp. 1040–1043.
- [51] De Wolf, I., Jourdain, A., De Moor, P., Tilmans, H., and Marchand, L. Hermeticity testing and failure analysis of MEMS packages, 14th

- International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, Bangalore, Indien, **2007**; pp. 147–154.
- [52] Schultes, M. *Abgasreinigung: Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Vergleich*; Springer Berlin Heidelberg, **2011**.
- [53] Karge, H. G., and Weitkamp, J. *Adsorption and diffusion*; Springer Berlin Heidelberg, **2008**; Vol. 7.
- [54] Bathen, D., and Breitbach, M. *Adsorptionstechnik*; Springer Berlin Heidelberg, **2013**.
- [55] Brehm, A. Stofftransport und Makrokinetik, *Skript zum Praktikum Technische Chemie - Adsorption, Universität Oldenburg*, **2001**,
- [56] Hamann, C. H., Hoogestraat, D., and Koch, R. *Grundlagen der Kinetik: Von Transportprozessen zur Reaktionskinetik*; Springer Berlin, **2018**.
- [57] Atkins, P. W., and De Paula, J. *Physikalische Chemie*; Wiley VCH, Weinheim, **2013**.
- [58] Keller, J. U., and Staudt, R. *Gas adsorption equilibria: experimental methods and adsorptive isotherms*; Springer US, Heidelberg, New York, **2005**.
- [59] Wiegand, G. *Physikalische Eigenschaften von Gasen*, in: *Gasesstechnik in Theorie und Praxis*; Springer Vieweg Wiesbaden, **2016**; pp. 7–118.
- [60] Schmidt, C., and Dietrich, L. *Chemie für Biologen*; Springer Spektrum, Wiesbaden, **2014**.
- [61] Mehrer, H. *Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes*; Springer Berlin Heidelberg, **2007**; Vol. 155.
- [62] Worch, H., Ed. *Werkstoffwissenschaft*, 10th ed.; Wiley-VCH: Weinheim, **2011**.

- [63] Callister, W. D., Rethwisch, D. G., and Scheffler, M. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung*; Wiley-VCH, Weinheim, **2012**.
- [64] Shelby, J. E. *Handbook of gas diffusion in solids and melts*; ASM international, Russell Township, Ohio, **1996**.
- [65] Föll, H. Vorlesung: Einführung in die Materialwissenschaft I, 2014. Website, aufgerufen am 11.3.2019, https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_6/backbone/r6_2_2.html.
- [66] Schumicki, G., Bündgens, N., Seegebrecht, P., Evelbauer, T., Fehling, H., Fock, J., Frick, J., Schneider, R., Strycharczyk, B., and Zimmermann, F. *Prozesstechnologie: Fertigungsverfahren für integrierte MOS-Schaltungen*; Springer Berlin Heidelberg, **1991**.
- [67] Barrer, R. M. The mechanism of activated diffusion through silica glass, *Journal of the Chemical Society*, **1934**, 378–386.
- [68] Candler, R. N., Hopcroft, M. A., Kim, B., Park, W.-T., Melamud, R., Agarwal, M., Yama, G., Partridge, A., Lutz, M., and Kenny, T. W. Long-term and accelerated life testing of a novel single-wafer vacuum encapsulation for MEMS resonators, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **2006**, 15(6), 1446–1456.
- [69] Stahl, H., Scheurle, A., Specht, H., Winker, M., Hausner, R., and Schmitz, V. Method for producing a micromechanical component. **2019**; US Patent 10,336,610.
- [70] Winker, M., Hausner, R., and Guber, A. Zwei verschiedene Kaverneninnendrucke auf einem MEMS-Wafer durch gestaffeltes Bonden mit modifizierten Germaniumbondrahmen, MikroSystemTechnik Kongress 2017: MEMS, Mikroelektronik, Systeme, 23.–25. Oktober 2017 in München, **2017**; pp. 333–336.

- [71] Winker, M., Hausner, R., and Guber, A. Two different cavity pressures in a single MEMS chip realized in one bonding process, WaferBond 17: Conference on Wafer Bonding for Microsystems, 3D- and Wafer Level Integration, 27.–29. November 2017 in Leuven, Belgien, **2017**; pp. 63–64.
- [72] Gonska, J., Ametowobla, M., and Reinmuth, J. Method for producing a micromechanical component. **2016**; US Patent App. 15/117,854.
- [73] Saksaganskii, G. L. *Getter and Getter-Ion Vacuum Pumps*; Routledge/Taylor & Francis Group, London, **2019**.
- [74] Boffito, C., Ferrario, B., Della Porta, P., and Rosai, L. A nonevaporable low temperature activatable getter material, *Journal of Vacuum Science and Technology*, **1981**, 18(3), 1117–1120.
- [75] Doni, F., Boffito, C., and Ferrario, B. Hydrogen isotope sorption and recovery by a nonevaporable getter combined with a chemical compressor material, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **1986**, 4(6), 2447–2451.
- [76] Tien, C. *Introduction to Adsorption: Basics, Analysis, and Applications*; Elsevier, Amsterdam, **2018**.
- [77] Danielson, P. How to use getters and getter pumps, *R&D Magazine*, **2001**, 43(2), 53–55.
- [78] Jousten, K. *Handbuch Vakuumtechnik*; Springer Vieweg, Wiesbaden, **2018**.
- [79] Breitling, A., and Ametowobla, M. Sensor element having laser-activated getter material. **2018**; US Patent App. 15/781,777.
- [80] Sattler, R. Physikalisch basierte Mixed-Level Modellierung von gedämpften elektromechanischen Mikrosystemen. Ph.D. thesis, Technische Universität München, **2005**.

- [81] High Temperature Storage Life (JESD22-A103E). Global standards for the microelectronics industry by JEDEC, Solid State Technology Association, South Arlington, VA, 2015.
- [82] Schatz, G., Weidinger, A., and Deicher, M. *Nukleare Festkörperphysik: Kernphysikalische Messmethoden und ihre Anwendungen*; Vieweg+Teubner Verlag/Springer Wiesbaden, **2010**.
- [83] Blazevic, A. Hochauflösende Schichtanalytik mit hochenergetischen schweren Ionen. Ph.D. thesis, Freie Universität Berlin, **1999**.
- [84] Strub, E. Kalibrierung analytischer Verfahren und chemische Charakterisierung dünner Schichten mit Teilchenbeschleunigern. Habilitationsschrift, Universität zu Köln, **2014**.
- [85] Verfügbare Methoden der Ionenstrahlanalytik am Ionenstrahlzentrum. Website, aufgerufen am 17.09.2019, <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=29856&pNid=309>.
- [86] Silvestri, Z., Azouigui, S., Bouhtiyya, S., Macé, S., Plimmer, M., Pinot, P., Tayeb-Chandoul, F., and Hannachi, R. Thermal desorption mass spectrometer for mass metrology, *Review of Scientific Instruments*, **2014**, 85(4), 045111.
- [87] Zitomer, F. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis, *Analytical Chemistry*, **1968**, 40(7), 1091–1095.
- [88] Schmitz, V., and Grosse, A. Verfahren zum eutektischen Bonden von Wafern und Wafervverbund/Method for eutectic bonding of wafers, and a wafer bond. Patent, **2017**; DE102016210007A1, WO/2017/211654.
- [89] Grosse, A., and Schmitz, V. Method for bonding wafers eutectically, and a wafer composite. **2019**; US Patent App. 16/307,179.
- [90] ANSYS, ANSYS 2020 R1 Documentation, Mechanical APDL - Theory Reference. **2020**.

-
- [91] Wong, E.-H., and Park, S. Moisture diffusion modeling – A critical review, *Microelectronics Reliability*, **2016**, 65, 318–326.
- [92] Möller, D. *Luft: Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht*; Walter de Gruyter, Berlin, **2011**.
- [93] Roedel, W., and Wagner, T. *Strahlung und Energie in dem System Atmosphäre/Erdoberfläche*, in: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*; Springer Berlin Heidelberg, **2011**; pp. 1–64.
- [94] Van Wieringen, A., and Warmoltz, N. On the permeation of hydrogen and helium in single crystal silicon and germanium at elevated temperatures, *Physica*, **1956**, 22(6–12), 849–865.
- [95] Frank, R. C., and Thomas Jr, J. The diffusion of hydrogen in single-crystal germanium, *Journal of physics and chemistry of solids*, **1960**, 16(1–2), 144–151.
- [96] Lee, R. Diffusion of hydrogen in natural and synthetic fused quartz, *The Journal of Chemical Physics*, **1963**, 38(2), 448–455.
- [97] Hatch, J. E., Ed. *Aluminum: properties and physical metallurgy*; American Society for Metals: Metals Park, Ohio, **1984**; Angefertigt unter der Schirmherrschaft der Aluminum Association.
- [98] Ransley, C. The solubility of hydrogen in liquid and solid aluminium, *Journal of the Institute of Metals*, **1948**, 74, 599–620.
- [99] Herres, W., and Zachmann, G. Charakterisierung von Coatings und dünnen Schichten mit Hilfe der FT-IR-Spektroskopie, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, **1984**, 319(6), 701–705.
- [100] Ritala, H., Kiihamäki, J., and Heikkilä, M. Studies on aluminium corrosion during and after HF vapour treatment, *Microelectronic Engineering*, **2010**, 87(3), 501–504.

- [101] Alberici, S., Coulon, D., Joubin, P., Mignot, Y., Oggioni, L., Petruzza, P., Piumi, D., and Zanotti, L. Surface treatment of wire bonding metal pads, *Microelectronic engineering*, **2003**, 70(2–4), 558–565.
- [102] Anyalebechi, P. N. *Analysis and thermodynamic prediction of hydrogen solution in solid and liquid multicomponent aluminum alloys*, in: *Essential Readings in Light Metals*; Springer, Chambridge, **2016**; pp. 185–200.
- [103] Anyalebechi, P. N. Analysis of the effects of alloying elements on hydrogen solubility in liquid aluminum alloys, *Scripta metallurgica et materialia*, **1995**, 33(8), 1209–1216.
- [104] Eichenauer, W. The solubility of hydrogen and deuterium in high-purity aluminium at 400-630 C, *Z Metallkunde*, **1968**, 59(8), 613–616.
- [105] Ichimura, M., Katsuta, H., Sasajima, Y., and Imabayashi, M. Hydrogen and deuterium solubility in aluminum with voids, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **1988**, 49(10), 1259–1267.
- [106] Talbot, D. Effects of hydrogen in aluminium, magnesium, copper, and their alloys, *International Metallurgical Reviews*, **1975**, 20(1), 166–184.
- [107] Wolverton, C., Ozoliņš, V., and Asta, M. Hydrogen in aluminum: First-principles calculations of structure and thermodynamics, *Physical Review B*, **2004**, 69(14), 144109.
- [108] Barrer, R. M. *Diffusion in and through solids*; Cambridge, England: The University Press; New York: Macmillan, **1941**.
- [109] Beyer, W., and Zastrow, U. Solubility and diffusion of hydrogen in hydrogenated crystalline and amorphous silicon, *Journal of non-crystalline solids*, **1998**, 227, 880–884.

-
- [110] Haken, H., and Wolf, H. C. *Molekülphysik und Quantenchemie: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*; Springer, Berlin, **2013**.
- [111] Beyer, W. Incorporation and thermal stability of hydrogen in amorphous silicon and germanium, *Journal of non-crystalline solids*, **1996**, 198, 40–45.
- [112] Holleman, A. F., Wiberg, E., and Wiberg, N. *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, 102nd ed.; Walter de Gruyter, Berlin, **2007**.
- [113] Pankove, J. I., and Johnson, N. M. *Hydrogen in Semiconductors: Hydrogen in Silicon, Kapitel 10: Hydrogen Migration and Solubility in Silicon*; Academic Press, San Diego, CA, **1991**; Vol. 34.
- [114] Nickel, N., Jackson, W., and Walker, J. Hydrogen migration in polycrystalline silicon, *Physical Review B*, **1996**, 53(12), 7750.
- [115] Kim, B., Candler, R. N., Melamud, R., Yoneoka, S., Lee, H. K., Yama, G., and Kenny, T. W. Identification and management of diffusion pathways in polysilicon encapsulation for MEMS devices, 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Tucson, AZ, USA, **2008**; pp. 104–107.
- [116] Kim, B., Candler, R. N., Melamud, R., Hopcroft, M. A., Yoneoka, S., Lee, H. K., Agarwal, M., Chandorkar, S. A., Yama, G., and Kenny, T. W. Hermeticity and diffusion investigation in polysilicon film encapsulation for microelectromechanical systems, *Journal of applied physics*, **2009**, 105(1), 013514.
- [117] Jackson, W., Johnson, N., Tsai, C., Wu, I.-W., Chiang, A., and Smith, D. Hydrogen diffusion in polycrystalline silicon thin films, *Applied physics letters*, **1992**, 61(14), 1670–1672.

- [118] Shackelford, J. F., Studt, P. L., and Fulrath, R. M. Solubility of gases in glass. II. He, Ne, and H₂ in fused silica, *Journal of Applied Physics*, **1972**, 43(4), 1619–1626.
- [119] Shang, L., Chou, I.-M., Lu, W., Burruss, R. C., and Zhang, Y. Determination of diffusion coefficients of hydrogen in fused silica between 296 and 523 K by Raman spectroscopy and application of fused silica capillaries in studying redox reactions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **2009**, 73(18), 5435–5443.
- [120] Kopf, M., Mogor-Györffy, R., and Breitling, A. Hydrogen gas diffusion influences cavity pressure of encapsulated inertial sensors. Journalpublikation eingereicht.
- [121] Breitling, A., Schwenk, C., Kueppers, H., Schittenhelm, N., and Schmitz, V. Micro-mechanical component. **2018**; US Patent 10,059,583.
- [122] Breitling, A., Schwenk, C., Kueppers, H., Schittenhelm, N., and Schmitz, V. Micromechanisches Bauelement. **2019**; Patentanmeldung Deutschland, Nr. DE102016214966A1.
- [123] Breitling, A., Reichenbach, F., Reinmuth, J., and Amthor, J. Additional surface for stabilizing the internal cavity pressure over the lifetime. **2017**; US Patent App. 15/368,951.
- [124] Ristic, L. Sensor technology and devices. **1994**.
- [125] Typische Lebensdauer von Autos in Deutschland nach Automarken (Statista, 2014). Website, aufgerufen am 24. April 2020, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/>.

