

Entwicklung einer Dünnschichtverkappungstechnologie für oberflächennahe Mikrostrukturen

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Danny Reuter

geboren am 26. Mai 1974 in Karl-Marx-Stadt (jetzt Chemnitz)

eingereicht am 24. Oktober 2007

Gutachter: Prof. Dr. Dr. Prof. h.c. mult. Thomas Geßner
Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Mehner
Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel

Tag der Verleihung: 21. Mai 2008

URL: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2008/0072>

Bibliografische Beschreibung

Entwicklung einer Dünnschichtverkappungstechnologie für oberflächennahe Mikrostrukturen

Reuter, Danny – 221 Seiten, 124 Abbildungen, 26 Tabellen, 155 Literaturstellen

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Dissertation, 2007

Stichworte

Air gap Insulated Microstructures

Dünnschichtverkappung

Oberflächenmikromechanik

Plattentheorie

Waferbonden

CF-Polymer

HARMS

organische Opferschicht

Schichtspannungen

Wafer-Level-Packaging

Referat

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues Verfahren zur Dünnschichtverkappung von oberflächennahen Mikrostrukturen vorgestellt. Ausgehend von den speziellen Anforderungen an die Verkappung oberflächennaher Mikrostrukturen, insbesondere von Strukturen mit hohem Aspektverhältnis, wurden die Verwendung eines Fluor-Kohlenstoff-Polymers als Opferschichtmaterial und die Eignung unterschiedlicher Schichtstapel zur Realisierung der Dünnschichtkappe untersucht. Die resultierende Technologie ermöglicht eine durchgehend trockenchemische Prozessierung.

Für die Abschätzung der notwendigen Schichtdicken und den geometrischen Entwurf der Kappenstrukturen, wurden auf Basis der Plattentheorie analytische und numerische Modelle erstellt. Verschiedene Materialkombinationen bestehend aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid und Aluminium wurden hinsichtlich ihrer mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften untersucht und bewertet. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung und Optimierung der Opferschichtprozesse, sowie deren Integration in die Gesamttechnologie. Die Eignung der plasmagestützten Prozesse zur Abscheidung und Strukturierung des Opferpolymers wurde durch die Fertigung von verkapselten Beschleunigungssensoren nachgewiesen. Ein ausreichender hermetischer Verschluss der Dünnschichtkappe konnte durch die Messung der viskosen Dämpfung an Feder-Masse-Schwingern bestätigt werden.

Für meine Frau Tina und meine Familie

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	11
Vorwort	17
1 Einleitung	19
1.1 <i>Wafer-Level-Packaging</i> – Schlüssel zur industriellen Massenfertigung von Mikrosystemen	19
1.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	20
2 Verfahren zur Verkappung von oberflächennahen Mikrostrukturen	23
2.1 Grundlagen des Packagings von Mikroelektromechanischen Systemen . . .	23
2.1.1 MEMS- versus Mikroelektronik-Packaging	23
2.1.2 Funktionen des Packagings	25
2.1.2.1 Mechanischer Träger	27
2.1.2.2 Interaktion mit der Umwelt	28
2.1.2.3 Wärmeabführung	29
2.1.2.4 Schutz vor Umwelteinflüssen	29
2.1.3 Methoden des MEMS Packaging	32
2.2 Technologien zur Fertigung oberflächennaher Mikrostrukturen	34
2.2.1 Opferschichttechnologien	36
2.2.2 Opferschichtfreie Technologien	38
2.3 Anforderungen an das Verkappungsverfahren	42
2.4 Verkappung mittels Waferbondprozessen	44

2.4.1	Direkte Waferbondprozesse	45
2.4.2	Waferbondprozesse mit Zwischenschichten	47
2.5	Integrierte Verkappungsverfahren	52
2.5.1	Dünnschichtverkappung mittels Gasphasenabscheidung	53
2.5.2	Dünnschichtverkappung mittels galvanischer Abscheidung	58
2.5.3	Polymerbasierte Dünnschichtkappen	59
3	Konzeption der integrierten Verkappungstechnologie	61
3.1	Zusammenfassung der Rahmenbedingungen	61
3.2	Grundkonzept der neuen Verkappungstechnologie	63
3.3	Anforderungen an die Funktionsschichten	65
3.3.1	Anforderungen an die Opferschicht	65
3.3.2	Anforderungen an die Membranschicht	66
3.3.3	Anforderungen an die Verschlusschicht	67
3.4	Realisierte Technologievarianten	67
3.4.1	Technologievariante A auf Basis von PECVD-Prozessen	68
3.4.2	Technologievariante B mit elektrochemischer Abscheidung der Membranschicht	70
4	Mechanischer Entwurf der Dünnschichtkappe	73
4.1	Grundlagen der Plattentheorie	75
4.2	Analytische Näherungslösung für die Dünnschichtkappe	81
4.3	Modellierung der Dünnschichtkappe mittels FEM	85
4.4	Kopplung des FEM- Modells mit der analytischen Näherungslösung	90
5	Technologieentwicklung	95
5.1	Experimentelle Voraussetzungen	95
5.1.1	Probenpräparation und Anlagentechnik	95
5.1.2	Messverfahren und Messtechnik	99
5.2	Werkstoffuntersuchungen	102

5.2.1	Mechanische Eigenspannungen im Schichtstapel der Dünnschichtkappe	104
5.2.1.1	Schichtspannungen in den PECVD-Schichten	106
5.2.1.2	Spannungsrelaxation und thermomechanisches Verhalten der gesputterten Aluminiumschicht	111
5.2.1.3	Thermomechanisches Verhalten des Schichtstapels	113
5.2.1.4	Schichtspannungen im galvanisch abgeschiedenen Nickel	116
5.2.2	Bestimmung des E- Moduls der Kappenmaterialien	119
5.2.3	Haftfestigkeit der Kappenmaterialien	120
5.2.4	Zusammenfassung	122
5.3	Opferschichttechnik mittels CF- Polymer	122
5.3.1	PECVD von Fluorkohlenstoff- Polymeren	123
5.3.2	Abscheideprozess und Eigenschaften der verwendeten CF- Schicht	124
5.3.3	Abscheidung von CF- Polymer zur Planarisierung von Mikrostruk- turen	126
5.3.4	Ätzung von CF- Polymeren mittels Plasmaprozessen	131
5.3.5	Anisotrope Strukturierung des CF- Polymers	133
5.3.6	Isotrope Entfernung des CF- Polymers	141
5.3.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	146
5.4	Realisierung der Membranschicht mittels $\text{SiO}_x\text{:H}_y$	147
5.4.1	Abscheidung der Membranschicht	147
5.4.2	Strukturierung der Ätzöffnungen	150
5.4.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	153
5.5	Verschluss der Dünnschichtkappe	154
5.5.1	Verschluss der Ätzöffnungen durch Schichtabscheidung aus der Dampfphase	154
5.5.2	Prüfung des dichten Verschlusses der Ätzöffnungen	158
5.5.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	162

6.1	Entwurf des Beschleunigungssensors	165
6.1.1	Das Feder - Masse - Dämpfer - System	166
6.1.2	Kapazitive Signaldetektion	168
6.1.3	Luftdämpfung in lateral bewegten Mikrostrukturen	170
6.1.4	Design und Dimensionierung	171
6.2	Herstellung der verkapselten Mikrostruktur	173
6.3	Experimentelle Charakterisierung	174
6.3.1	Messaufbau	175
6.3.2	Ergebnisse	177
6.4	Ausblick auf weitere Untersuchungen	180
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	181
7	Zusammenfassung und Ausblick	183
A	Bestimmung der Haftfestigkeit von Schichten nach ASTM D3359	187
B	Realisierte Dünnschichtkappen aus Nickel	189
C	Teststrukturen	191
	Literaturverzeichnis	193
	Abbildungsverzeichnis	209
	Tabellenverzeichnis	219
	Selbständigkeitserklärung	221
	Thesen	223
	Lebenslauf	226
	Eigene Veröffentlichungen	227

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

AIM	<i>Air gap Insulated Microstructure</i> (HARMS-Technologie)
APCVD	<i>Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition</i> (Atmosphärendruck-CVD)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Standardisierungsorganisation)
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BESOI	<i>Bond and Etch-Back Silicon-on-Insulator</i> (Herstellungstechnologie für SOI-Wafer)
BCB	Benzocyclobuten
BFL	Glanzzusatz für Nickelelektrolyte
BiCMOS	Kombination von Bipolar- und CMOS-Technologie
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Technology</i> (Komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter Technologie)
CF	Kohlenstoff- Fluor
CMP	<i>Chemical Mechanical Polishing</i> (Chemisch-mechanisches Polieren)
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i> (Chemische Dampfphasenabscheidung)
DC	<i>Direct Current</i> (Gleichstrom)
DI-Wasser	Deionisiertes Wasser
EDX	<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (Energiedispersive Röntgenspektroskopie)
FEM	Finite-Elemente-Methode
HARMS	<i>High Aspect Ratio Microstructures</i> (Strukturen mit hohem Aspektverhältnis)
HDR	<i>High Deposition Rate</i> (hohe Abscheiderate)
HF	Hochfrequenz
IC	<i>Integrated Circuit</i> (Integrierter Schaltkreis)

ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i> (Induktiv gekoppeltes Plasma)
LDR	<i>Low Deposition Rate</i> (niedrige Abscheiderate)
LISA	<i>Lateral Isolated Silicon Accelerometer</i> (HARMS-Technologie)
LPCVD	<i>Low Pressure Chemical Vapor Deposition</i> (Niederdruck-CVD)
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches System
MOEMS	Mikro-Opto-Elektro-Mechanisches System
NF	Niederfrequenz
PECVD	<i>Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition</i> (Plasmagestützte CVD)
PE-SiO	SiO _x :H _y
PE-SiN	SiN _x :H _y
PLE	Plasmalackentfernung
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i> (Physikalische Dampfphasenabscheidung)
RCA	Verfahren zur nasschemischen Reinigung von Wafern nach W. Kern
REM	Rasterelektronenmikroskop
RIE	<i>Reactive Ion Etching</i> (Reaktives Ionenätzen)
SBM	<i>Surface Bulk Micromachining</i>
SCREAM	<i>Single Crystal Reactive Etching and Metallization</i> (HARMS-Technologie)
SCP	<i>Single-Chip-Packaging</i> (Chiphäusung auf Chipebene)
SIMOX	<i>Separation by Implanted Oxygen Technology</i>
SDB	Silizium-Direkt-Bonden
SMT	<i>Surface Mount Technology</i> (Oberflächenmontagetechnik)
SOI	<i>Silicon-on-Insulator</i> (Siliziumsubstrat mit vergrabem Oxid)
SOP	<i>Small-Outline Package</i> (Standardgehäusotyp)
SU-8	Fotolack der Firma <i>Microchem Corp.</i>
TFE	<i>Thin-Film-Encapsulation</i> (Dünnschichtverkappung)
TMAH	Tetramethyl-Ammonium-Hydroxid
WLP	<i>Wafer-Level-Packaging</i> (Chiphäusung auf Waferebene)
ZfM	Zentrum für Mikrotechnologien

Symbole

a	Breite einer Platte Beschleunigung
a_S	Stützsäulenabstand einer Platte
b	Länge einer Platte
b_f	Federbreite

b_S	Stützsäulenabstand einer Platte
B	3-dB Bandbreite
c	Federsteifigkeit
c_{BFL}	Konzentration von BFL im Elektrolyten
c_S	Schallgeschwindigkeit
$c_{S,Luft}$	Schallgeschwindigkeit in Luft (330 m/s)
C	Kapazität
C_p	Parasitärkapazität
C_v	Verschlusscharakteristik
$d_{ätz}$	Materialabtrag
d_{CF}	Polymerschichtdicke
d_f	Schichtdicke
d_s	Substratdicke
d_{OS}	Opferschichtdicke
d_{SiO}	Membranschichtdicke
D	Plattensteifigkeit
	Dämpfungsmaß
D_{Loch}	Lochdurchmesser
D_t	Transformierte Plattensteifigkeit eines Schichtverbundes
e_f	Elektrodenüberlappung
E	Elastizitätsmodul
	Elektrisches Feld
f	Frequenz
f_G, f_{G1}, f_{G2}	Grenzfrequenz
F	Kraft
F_{el}	Elektrostatische Kraft
F_D	Dämpfungskraft
G	Schubmodul
h	Plattendicke
$h_{ätz}$	Ätztiefe
h_f	Federhöhe, Strukturhöhe
H	Komplexe Übertragungsfunktion
$H_{ätz}$	Ätzhomogenität
i_u	Umladestrom
I_t	Torsionssteifigkeit
k	Dämpfungskonstante
Kn	Knudsen-Zahl

K_r, K_t	Rotatorische und translatorische Nachgiebigkeit
l	Seitenlänge
l_f	Federlänge
l_u	Laterale Unterätzung
m	Höhe der Kavität Masse
M_x, M_y	Biegemomente
M_{xy}, M_{yx}	Torsionsmomente
Ma	Mach-Zahl
n	Verschiebung der neutralen Fläche in einem Schichtstapel Anzahl der Elektrodenpaare pro Sensorseite
N_x, N_y	Normalkräfte
N_{xy}, N_{yx}	Querkräfte in einer Scheibe
p	Druck Impuls
p_0	Druckdifferenz zwischen Kavität und Umgebung
p_k	Kavitätinnendruck
Q	Resonanzgüte
Q_x, Q_y	Querkräfte in einer Platte
$r_{ätz}$	Ätzrate
r_d	Abscheiderate
r_s	Krümmungsradius
Re	Reynolds-Zahl
R_p, R_s	Reflexionskoeffizienten für parallel/senkrecht polarisiertes Licht
R_{\square}	Schichtwiderstand
s	Elektrodenabstand
S	Empfindlichkeit
$S_{ätz}$	Ätzselektivität
t	Zeit
ΔT	Temperaturdifferenz
u	Verschiebungen in x-Richtung
u_w	Anregungsspannung
U	Elektrische Spannung
U_{pol}	Polarisationsspannung
v	Verschiebungen in y-Richtung Geschwindigkeit
v_{Fluid}	Fluidgeschwindigkeit

v_v	Verschlussgeschwindigkeit
V	Vergrößerungsfunktion
V_S	Seitenlängenverhältnis einer Platte
w	Durchbiegung einer Platte
w_G	Grabenbreite
W_{el}	Elektrostatische Feldenergie
x	Auslenkung
x_0	Grundauslenkung
\tilde{x}	Komplexe Schwingamplitude
z	Grabentiefe
α	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
α_B	Böschungswinkel
β	Phasenwinkel
γ	Grad der Anisotropie
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Schubdehnungen
Δ	Phasenwinkeldifferenz zwischen paralleler und senkrechter Teilwelle
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Dehnungen
ε_0	Dielektrizitätskonstante
ε_r	Relative Dielektrizitätskonstante
η	Abstimmungsverhältnis
η_v	Dynamische Viskosität
η_{eff}	Effektive dynamische Viskosität
Θ	Einfallswinkel der Teilchen
κ	Korrekturkoeffizient zur Berücksichtigung der Ätzöffnungen
λ	Wellenlänge
	Mittlere freie Weglänge
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
ρ_{el}	Spezifischer Widerstand
ρ_{rk}	Quotient der Reflexionskoeffizienten
σ_s	Schichtspannung
σ_i	Intrinsische Schichtspannung
σ_{th}	Thermische Schichtspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannungen
τ	Korrekturkoeffizient zur Berücksichtigung einer nachgiebigen Einspannung
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Schubspannungen
Φ	Airysche Spannungsfunktion

Ψ	Amplitudenverhältnis zwischen paralleler und senkrechter Teilwelle
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenkreisfrequenz
ω_c	<i>Cut-Off</i> -Frequenz
ω_{res}	Resonanzkreisfrequenz

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mikrotechnologien der Technischen Universität Chemnitz im Rahmen der vom BMBF geförderten Forschungsprojekte INNOSACHS und ASIL. Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Zentrums für Mikrotechnologien, der Professur Mikrotechnologien der TU Chemnitz und dem Institutsteil *Multi Device Integration* des Fraunhoferinstitutes IZM für das hervorragende Arbeitsklima, die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bei allen Präparationen und Experimenten.

Mein besonderer Dank gilt:

Prof. Dr. Dr. Prof. h.c. mult. Thomas Geßner für die Ermutigung zum Schreiben dieser Arbeit, für die wertvollen Hinweise und Anregungen und die gewährten Freiheiten zum selbständigen Arbeiten,

Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Mehner und Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme der Gutachtertätigkeit,

Dr.-Ing. Andreas Bertz für die ausgezeichnete und fruchtbare Zusammenarbeit, die Vielzahl von anregenden Diskussionen und die wissenschaftliche Betreuung,

meinen Kollegen Dipl.-Ing. Thomas Werner, Dr.-Ing. Christian Lohmann, Dipl.-Ing. Matthias Küchler und Dipl.-Phys. Matthias Uhlig für die zahlreichen interessanten Diskussionen und die vielfältig gewährte Unterstützung,

Dr.-Ing. Andreas Bertz und Dipl.-Ing. Thomas Werner sowie meiner Frau Tina für die Durchsicht der Arbeit,

meinen langjährigen Mitstreitern in beiden Büros für die lockere Arbeitsatmosphäre und die philosophischen Exkurse beim Kaffee,

Dipl.-Ing. Iris Höbelt und Dipl.-Ing. Monika Henker für ihre Geduld bei der Anfertigung elektronenmikroskopischer Aufnahmen sowie Dr.-Ing. Dirk Scheibner und Dipl.-Ing. Michael Rennau für die Durchführung elektrischer Messungen an zahlreichen Teststrukturen,

allen Studenten, die durch ihre Arbeiten einen Beitrag zur Entwicklung der Verkappungstechnologie geleistet haben, insbesondere Dipl.-Ing. Markus Nowack.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Frau Tina bedanken, für ihre Unterstützung, Aufmunterung und Motivation, und bei meiner Familie, ohne deren Rückhalt während meiner gesamten Ausbildung diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 *Wafer-Level-Packaging* – Schlüssel zur industriellen Massenfertigung von Mikrosystemen

Die Mikrosystemtechnik wird als eine der wichtigsten Zukunftstechnologien für das 21. Jahrhundert betrachtet. Sie ermöglicht die unmittelbare Verknüpfung der Mikroelektronik mit der nichtelektrischen Umwelt in miniaturisierten Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS). Die bekanntesten Beispiele von bereits kommerzialisierten Produkten sind Inertialsensoren, Drucksensoren, Tintenstrahl Druckköpfe sowie Mikrospiegel für Scanner und Bildprojektoren. Im Jahr 2006 konnte mit Mikrosystemen weltweit ein Umsatz von 6 Mrd. \$ erzielt werden [1].

Ein großer Teil des Erfolges basiert auf der Verwendung der aus der Mikroelektronik stammenden Siliziumtechnologie. Die zur Verfügung stehenden Prozesse und Anlagen sind durch immense Investitionen in die Halbleiterindustrie hoch entwickelt und weitgehend standardisiert. Außerdem besitzt Silizium neben seinen Halbleitereigenschaften hervorragende mechanische Eigenschaften [2], weshalb es sich sehr gut als Funktions- und Konstruktionswerkstoff eignet.

Trotz der beachtlichen wirtschaftlichen Erfolge einzelner Anwendungen konnte bisher nur ein kleiner Teil der entwickelten Mikrosysteme in Produkte umgesetzt werden. Der wichtigste Grund dafür ist die große Vielfalt der Mikrosysteme, die die Anwendung standardisierter Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) aus der Mikroelektronikfertigung verhindert. Um die spezifischen Anforderungen eines Mikrosystems zu berücksichtigen wird die AVT bisher an das Mikrosystem angepasst und oftmals auf Chipebene realisiert (*Single-Chip-Packaging*, SCP). Dies führt zu hohen Kosten, die von 20 % für einen einfachen Drucksensor im Kunststoffgehäuse bis zu 95 % der Gesamtherstellungs-

kosten für einen Drucksensor mit besonders hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Robustheit reichen können [3]. Die AVT, für die auch der englische Begriff Packaging verwendet wird, ist deshalb der limitierende Faktor für die Marktdurchdringung von massenproduzierten MEMS, bis preiswerte, hoch integrierte und technologieübergreifende Packaging-Lösungen verfügbar sind [4].

Aufgrund dieser Tatsache ist das *Wafer-Level-Packaging* (WLP) von MEMS – das alle auf Waferebene durchgeführten AVT-Prozesse bezeichnet – seit Ende der neunziger Jahre in den Blickpunkt von Forschung und Entwicklung getreten. Die Anwendung von WLP-Verfahren erhöht nicht nur die Ausbeute es reduziert die Kosten des Packagings auch erheblich im Vergleich zu SCP Methoden und wird deshalb als Schlüsseltechnologie für die industrielle Massenfertigung eines Mikrosystems angesehen [5].

Zwei unterschiedliche Ansätze werden für das WLP verfolgt. Zum einen das Waferbonden, bei dem ein oder mehrere Wafer auf den MEMS-Wafer aufgebracht werden um eine schützende Kappe zu bilden. Die entwickelten Bondverfahren sind in der industriellen Produktion bereits gut etabliert, haben aber auch einige Nachteile. Erstens erhöht der um die Mikrostruktur erforderliche Bondrahmen die Chipgröße und damit die Kosten. Zweitens werden die Chips um 200–500 μm höher, so dass sie nicht in Standardgehäuse passen. Die Reduzierung der Chiphöhe durch Abdünnen des Waferstapels bzw. die Verwendung von höheren Gehäusen steigert wiederum die Herstellungskosten. Drittens erfordern die Bondprozesse zum Teil eine sehr saubere und glatte Waferoberfläche um einen hermetischen Verschluss zu realisieren [6].

Der zweite Ansatz ist die Dünnschichtverkappung. Sie beruht auf der Verwendung von Schichtabscheidungs- und Strukturierungsprozessen zur Erzeugung einer dünnen Membran als schützende Kappe. Der zusätzliche Flächenverbrauch und die Höhe der Kappe sind bei dieser Methode gering, so dass die Forderung nach Kostenreduzierung erfüllt wird. Bisher existieren allerdings nur wenige, aufgrund von Prozessinkompatibilität auf spezielle MEMS-Technologien beschränkte Verfahren. Eine technologieübergreifende Lösung unter Nutzung herkömmlicher Halbleiterprozesse ist deshalb von großem Interesse.

1.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen Technologie zur Dünnschichtverkappung oberflächennaher Mikrostrukturen, insbesondere Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis. Wesentlich ist dabei die Nutzung eines auf Fluor und Kohlenstoff basierenden Polymers als organische Opferschicht. Die Abscheidung und die Entfernung des Polymers

sind gegenüber vielen Materialien der Halbleiterfertigung prozesskompatibel und ermöglichen deshalb die Integration in unterschiedliche Mikrotechnologien.

Für die Realisierung der strukturellen Schichten der Dünnschichtkappe werden zwei Technologievarianten verfolgt, die auf der galvanischen Abscheidung von Nickel bzw. auf der chemischen Dampfphasenabscheidung von Siliziumdioxid basieren. Zum einen wird die Eignung der Materialien innerhalb der Dünnschichtkappe untersucht, zum anderen wird die Integration unterschiedlicher Schichtabscheidungsprozesse und damit die prozesstechnische Flexibilität der Verkappungstechnologie demonstriert.

Um die Hauptfunktion der Dünnschichtkappe, den Schutz der Mikrostruktur vor mechanischer Beeinflussung, Schmutz und Feuchtigkeit, nachzuweisen wurden Demonstratoren gefertigt und experimentell untersucht. Die Herstellung erfolgte mittels der am Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM) entwickelten und patentierten AIM-Technologie. Die in dieser Arbeit im Detail vorgestellte Technologievariante wurde aus diesem Grund für AIM-Strukturen optimiert.

Kapitel 2 geht auf den aktuellen Stand des MEMS-Packagings ein. Es werden Herstellungstechnologien oberflächennaher Mikrostrukturen und die wichtigsten Verkappungsverfahren beschrieben.

Kapitel 3 stellt die Konzeption des neuen Verkappungsverfahrens vor. Die technologischen Rahmenbedingungen werden zusammengefasst und die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Schichten der Kappe definiert.

Kapitel 4 befasst sich mit dem Entwurf der Dünnschichtkappe. Dazu werden die Durchbiegung der Dünnschichtkappe in Folge eines Druckunterschiedes zwischen der verschlossenen Kavität und der Umwelt, sowie die daraus resultierenden mechanischen Spannungen betrachtet. Für die Berechnung der Durchbiegung wird eine analytische Näherungslösung auf Basis der Kirchhoffschen Gleichungen hergeleitet um den Einfluss der Parameter zu analysieren. Um die dabei vernachlässigten Schichtspannungen und geometrischen Nichtlinearitäten zu berücksichtigen, werden außerdem numerische FEM-Modelle erstellt und die Durchbiegung sowie die mechanischen Spannungen simuliert.

Kapitel 5 behandelt die Untersuchung relevanter Werkstoffeigenschaften sowie die Entwicklung der technologischen Prozesse und deren Integration in die Gesamttechnologie. Die verwendeten Werkstoffe werden bezüglich ihrer mechanischen Eigenspannungen, ihres E-Moduls und ihrer Haftfestigkeit untersucht. Besonderes Augenmerk liegt auf den Prozessen zur Bearbeitung der polymeren Opferschicht. Sowohl die Abscheidung, als auch die Strukturierung des CF-Polymers werden detailliert beschrieben. Der Verschluss der Dünnschichtkappe wird durch eine interferometrische Verwölbungsmessung bewertet.

Kapitel 6 beschreibt den Entwurf und die Herstellung eines Beschleunigungssensors in AIM-Technologie unter Anwendung der Dünnschichtverkappung zur Verkapselung der Mikrostruktur. Die Charakterisierung bezüglich der Dichtigkeit der Verkappung erfolgt durch die Bestimmung des Kavitätinnendruckes über die *Squeeze-Film*-Dämpfung. Dazu wird die Übertragungsfunktion der Sensoren mittels der 2f-Methode aufgenommen und mit Messwerten einer Referenzstruktur, die in einer Vakuumkammer betrieben wurde, verglichen.

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und zieht Schlussfolgerungen hinsichtlich weiterer notwendiger Entwicklungen.

Kapitel 2

Verfahren zur Verkappung von oberflächennahen Mikrostrukturen

2.1 Grundlagen des Packagings von Mikroelektromechanischen Systemen

In diesem Abschnitt sollen zunächst die grundlegenden Aspekte des Packagings von Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS) behandelt werden, um später, unter Berücksichtigung der Herstellungstechnologien für Mikrostrukturen, die Anforderungen an eine Verkappungstechnologie zu definieren. Dazu werden die Funktionen und Methoden des MEMS-Packagings dargestellt. Da in der Mikroelektronikfertigung bereits hoch entwickelte und standardisierte Packagingprozesse zur Verfügung stehen, werden zunächst die wesentlichen Unterschiede zwischen Mikroelektronik und MEMS betrachtet.

2.1.1 MEMS- versus Mikroelektronik-Packaging

Das Ziel des Packagings von MEMS ist die „Verpackung“ von Komponenten und Systemen in einer schützenden Hausung. Es verwandelt eine Mikrostruktur oder ein Mikrosystem in ein nützliches Bauteil, das sicher und zuverlässig mit seiner Umgebung interagiert [7]. In dieser Zielstellung unterscheidet sich das MEMS-Packaging nicht vom Packaging in der Mikroelektronik.

Obwohl für die Fertigung von siliziumbasierten Mikrosystemen die gleichen oder ähnliche Technologien wie für die Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen verwendet werden, können die ausgereiften und standardisierten Methoden des Mikroelektronik-Packagings dennoch nicht problemlos auf Mikrosysteme angewendet werden. Trotz der verwandten Herstellungsprozesse gibt es einige wesentliche Unterschiede zwischen diesen

Systemen. Die wichtigsten, besonders im Bezug auf die Aufbau- und Verbindungstechnik, sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Vergleich von mikromechanischen Systemen mit mikroelektronischen Schaltungen (nach Hsu [3])

Mikromechanische Systeme	Mikroelektronik
Dreidimensionale Strukturen	Vornehmlich zweidimensionale Strukturen
Bewegliche Elemente	Stationäre Dünnschicht-Strukturen
Benötigt Integration von Mikromechanik und Mikroelektronik	Keine Integration notwendig
Realisierung vielfältiger Funktionen biologischer, chemischer, optischer und elektromechanischer Natur	Übertragung von Elektrizität zur Erfüllung elektrischer Funktionen
Viele Komponenten sind notwendig um die Schnittstelle zu den Arbeitsmedien und der Umwelt zu realisieren	IC-Chips sind durch die Verkapselung geschützt vor Umwelteinflüssen
Vielzahl von Materialien wird verwendet	Wenige Materialien werden verwendet
Weniger elektrische Durchführungen und Zuleitungen	Große Zahl an elektrischen Durchführungen und Zuleitungen
Relativ einfache Strukturen	Komplexe Strukturen mit hoher Bauteildichte
Entwurfsmethoden und Standards fehlen	Gut etablierte Entwurfsmethoden und Standards verfügbar
Packaging-Technologien sind nicht ausgereift	Ausgereifte Packaging-Technologien verfügbar
Montage erfolgt meist manuell	Montage erfolgt vollautomatisch
Zuverlässigkeits- und Funktionstests sind nicht standardisiert	Dokumentierte Standards sind verfügbar
Vielfältige Herstellungstechnologien	Standardisierte Herstellungstechnologien

Hinsichtlich des Packagings sind die möglichen Ausfallursachen eines Systems von besonderer Bedeutung. Neben einigen Ursachen, die sowohl mikromechanische Systeme als auch Mikroelektronik betreffen, gibt es eine Reihe weiterer Ausfallursachen, die spezifisch für Mikrosysteme sind:

- allgemeine Ausfallursachen von MEMS und ICs
 - Mechanischer Bruch oder Ermüdung des Materials
 - Reibung und Verschleiß
 - Delamination von Schichten
 - Korrosion von Metallschichten

- spezifische Ausfallursachen für MEMS
 - Empfindlichkeit gegenüber Partikeln
 - Korrosion und *sticking* (z. B. durch Reste ausgegaster Kleber)
 - Haftreibung beweglicher Elemente
 - Höhere Empfindlichkeit gegenüber thermomechanischen Spannungen als ICs
 - Beeinflussung durch Spannungsrelaxation

Aufgrund dieser Unterschiede ergeben sich spezielle Anforderungen an das Packaging von MEMS, die in den folgenden Abschnitten anhand der Funktionen des Packagings dargestellt werden.

2.1.2 Funktionen des Packagings

Das Packaging dient der Integration aller Komponenten eines Systems, die für dessen Funktion notwendig sind, bei gleichzeitiger Minimierung der Baugröße, des Gewichts, der Komplexität, der Störanfälligkeit und der Kosten [8]. Als Systemtechnik erfüllt das Packaging von Mikrosystemen ebenso wie das Packaging von elektronischen Geräten dabei vielfältige Funktionen, sowohl für die Einzelkomponenten, als auch für das Gesamtsystem: die mechanische Fixierung, die Gewährleistung der Interaktion mit anderen Systemkomponenten und der Umwelt, die Abführung von Wärme sowie den Schutz vor störenden Umwelteinflüssen (Abb. 2.1).

Für die Realisierung dieser Funktionen im System hat sich die Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik zu einer Hierarchie von Verdrahtungsebenen entwickelt, die in vier Ebenen unterteilt werden kann [9]. Diese Packaging-Level sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Level 1 ist das Chipgehäuse, das die Verbindung von Bauelement und Leiterplatte realisiert. Level 2 ist die Leiterplatte, auf der die gehauten Schaltkreise und diskreten Bauelemente zu Funktionseinheiten zusammengefügt werden. Level 3 ist das Chassis bzw. das Motherboard auf dem mehrere Funktionseinheiten zusammengefügt werden. Level 4

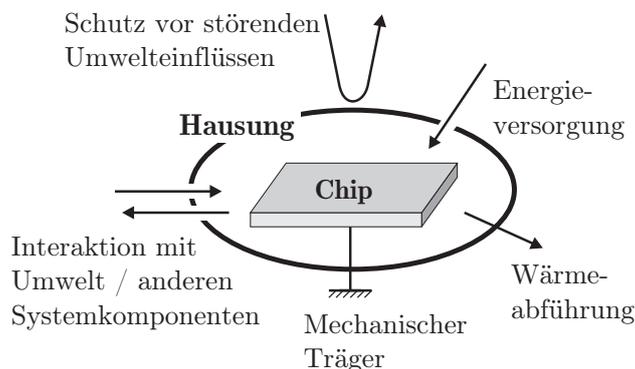


Abbildung 2.1: Funktionen und Schnittstellen, die das Gehäuse eines elektrischen Bauelementes realisieren oder gewährleisten muss.

steht für das gesamte System. Aufgrund der Komplexität von integrierten Schaltkreisen wird deren Metallisierungssystem als 5. Verdrahtungsebene betrachtet und, da die Prozessschritte zur Erzeugung der Metallisierung vor der Vereinzelung der Wafer in Chips stattfinden, als Packaging-Level 0 bezeichnet. Jede dieser Ebenen muss dabei alle Funktionen des Packagings realisieren.

Aufgrund der zusätzlichen Anforderungen an das Packaging von MEMS ist die Einteilung in vier oder fünf hierarchische Packaging-Level meist nicht anwendbar [10]. Während das Packaging-Level 0 in der Mikroelektronik vor allem die Funktion der Verdrahtungsebene erfüllt und nur eine geringe Schutzfunktion hat, dient es bei MEMS vordergründig dem mechanischen und gegebenenfalls dem hermetischen Verschluss der Mikrostrukturen. Eine zentrale Rolle nimmt die Integration der Mikroelektronik mit dem Wandlerelement ein. Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Methoden unterschieden: der monolithischen und der hybriden Integration. Als monolithische Integration bezeichnet man die Fertigung aller Komponenten des Mikrosystems auf einem Chip. Dies hat erhebliche Kostenvorteile bei der Herstellung zur Folge, erfordert aber einen wesentlich höheren Entwicklungsaufwand oder ist technisch nicht möglich. Bei der hybriden Integration wird die Elektronik und das Wandlerelement mittels der Aufbau- und Verbindungstechnik vereint, nachdem sie auf getrennten Substraten gefertigt wurden. Dadurch ist die Herstellung der einzelnen Komponenten technologisch weniger anspruchsvoll, es steigt aber der Aufwand für das Packaging.

Im Folgenden werden die Funktionen des Packagings im Einzelnen betrachtet und an Beispielen der Mikroelektronik und der Mikrosystemtechnik veranschaulicht. Zum einen, um die Besonderheiten des Packagings von Mikrosystemen gegenüber der Mikroelektronik

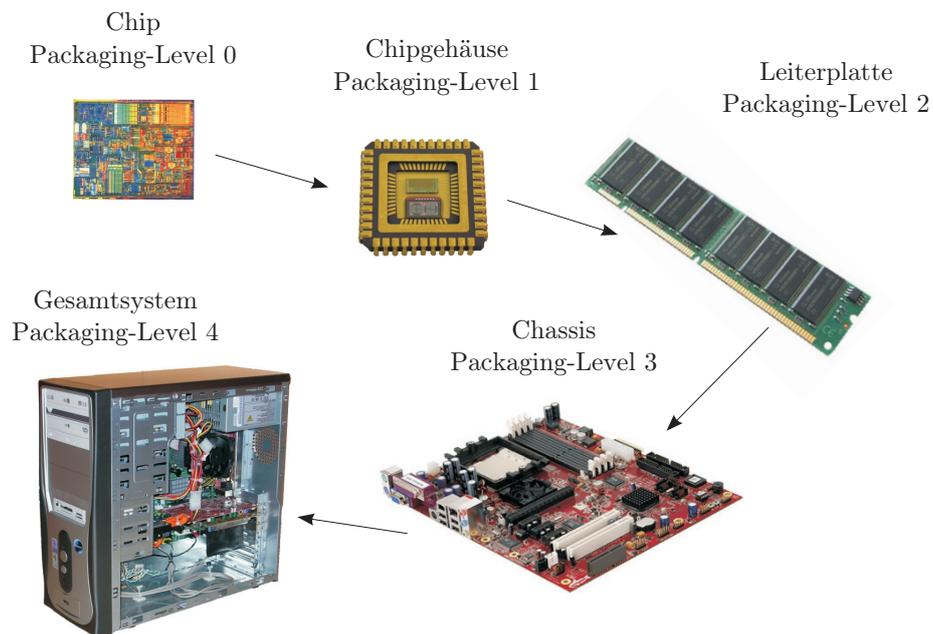


Abbildung 2.2: Hierarchie der Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik/Gerätetechnik.

zu verdeutlichen, zum anderen, um die sich daraus ergebenden Anforderungen an eine Packaging-Technologie abzuleiten.

2.1.2.1 Mechanischer Träger

Der mechanische Träger eines Bauteils muss dessen geometrische Lage fixieren und ihm Stabilität geben. Er muss das Bauteil vor mechanischem und thermischem Schock, Vibrationen und anderen mechanischen Einflüssen schützen und dabei den Eintrag von mechanischen Spannungen in das Bauteil vermeiden oder minimieren. Da bei der Paarung von Werkstoffen mit unterschiedlichen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten Deformationen und innere mechanische Spannungen verursacht werden können, sollte bei der Wahl des Trägermaterials auf einen möglichst ähnlichen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten wie der des Bauteils geachtet werden. Alternativ kann eine elastische Zwischenschicht zur mechanischen Entkopplung von Bauteil und Träger verwendet werden. Als Trägermaterial für Si-Chips kommen Silizium, Keramik, Leiterplattenmaterial (bestehend aus Glashartgewebe und Epoxid), Kunststoffe und Metalle zum Einsatz [11]. Die wichtigsten Verfahren zur Montage des Chips auf den Träger, dem so genannten *Die-Bonden*, sind Lötten, Eutektisches Bonden und Kleben.

2.1.2.2 Interaktion mit der Umwelt

Die Interaktion mit der Umwelt beruht in der Mikroelektronik auf der Versorgung mit elektrischer Energie und der Kommunikation mit anderen Systemkomponenten über die elektrischen Signalleitungen. Diese Basisfunktionen sind ebenfalls für Mikrosysteme notwendig, auch wenn neueste Entwicklungen autarke Systeme anstreben, die mit einer Energiequelle ausgestattet sind oder aus ihrer Umgebung direkt Energie gewinnen und den notwendigen Datenverkehr drahtlos, z. B. über Funk, realisieren. Die elektrische Kontaktierung der Chips mit dem Gehäuse kann durch Drahtbonden, Flip-Chip-Bonden oder *Tape-Automated-Bonding* erfolgen (Abb. 2.3).

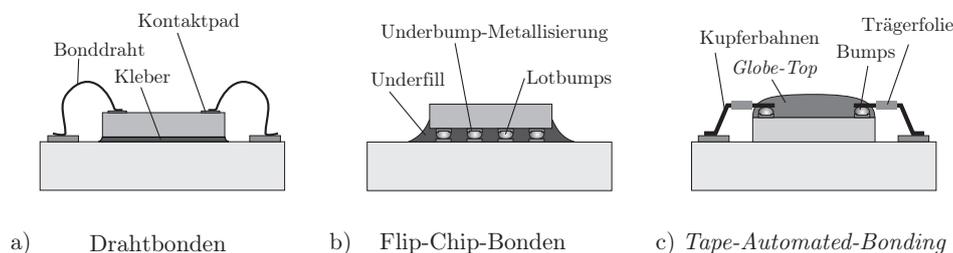


Abbildung 2.3: Elektrische Chipkontaktierungen in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik: a) durch Drahtbondung, b) durch Flip-Chip-Bonden, c) durch *Tape-Automated-Bonding*

Die beiden industriell relevanten Drahtbondverfahren sind das Ultraschallbonden (*Wedge/Wedge-Bonding*) mit Al-Draht und das Thermosonicbonden (*Ball/Wedge-Bonding*) mit Au-Draht. In beiden Fällen entstehen Verbindungen aus dünnem Draht (Durchmesser von 15 μm bis 625 μm), die an den Enden mit den Anschlussmetallisierungen des Chips und des Trägers verschweißt sind. Diese Verfahren werden in der Regel zur Kontaktierung von Chips in Gehäusen verwendet, können aber auch bei der Direktmontage auf Leiterplatten eingesetzt werden.

Ein Verfahren, bei dem alle Kontakte eines Chips gleichzeitig hergestellt werden ist das Flip-Chip-Bonden. Es entspricht dem Prinzip der SMT-Montage (*Surface Mount Technology*) und wird dazu verwendet, um ungehauste Chips *face-down* auf den Bauelementeträger (z. B. Leiterplatte) in einem Arbeitsschritt zu montieren und zu kontaktieren [12]. Für diese Kontaktierungsvariante werden *Bumps* (Lothöcker) auf einen der beiden Verbindungspartner aufgebracht. Im Falle von umschmelzbaren *Bumps* werden die Bauelemente durch *Reflow-Löten* montiert, im Falle von nicht umschmelzbaren *Bumps* (*Stud-Bumps*) durch Kleben.

Eine weitere, für hohe Kontaktierungsdichten verwendete Methode zur Verbindung aller Kontakte in einem Schritt ist das *Tape-Automated-Bonding*. Dabei werden Chip und Trä-

ger über Kupferleitbahnen, die sich auf einer Trägerfolie befinden, elektrisch verbunden. Diese Technik kann sowohl zur Chipkontaktierung im Gehäuse, als auch als *First-Level-Package* bei einer Direktmontage auf der Leiterplatte (Level 2) angewendet werden [9].

In der Mikrosystemtechnik wird über die elektrische Signalübertragung hinaus mindestens eine physikalische oder chemische Größe gemessen oder beeinflusst. Beispiele hierfür sind Druck, Temperatur, Feuchtigkeit, Vibrationen, mechanischer Schock, mechanische Spannungen, Licht, die Durchflussmenge eines flüssigen oder gasförmigen Mediums und die Konzentration oder chemische Zusammensetzung eines Stoffes. Es kann deshalb notwendig sein, die sensitiven oder aktorischen Elemente des Mikrosystems offen zu realisieren.

2.1.2.3 Wärmeabführung

Die Abführung von Wärme zum Schutz der Bauelemente vor thermischer Zerstörung ist vor allem in der Mikroelektronik aufgrund der hohen Elementdichte von Bedeutung. Dazu werden die Wärmewiderstände der Gehäusekomponenten minimiert und gegebenenfalls Kühlkörper verwendet um die Wärme effektiver an die Umgebung abzugeben. Durch Zwangsbelüftung des Kühlkörpers oder des Gehäuses kann die abtransportierte Wärmemenge noch gesteigert werden.

Im Allgemeinen ist die Abführung von Wärme für das Packaging von Mikrosystemen eine untergeordnete Aufgabe, dennoch können thermische Aspekte relevant sein. Hoffmann stellt in [13] einen Gassensor vor, der in der Abgasanlage eines Kraftfahrzeugs in einem Temperaturbereich von 400-500 °C arbeitet. Da zwischen den unterschiedlichen Messzellen Temperaturunterschiede bis zu 100 K vorkommen, die Temperatur in einer Messzelle aber auf ein Kelvin geregelt wird, muss der niedrige thermische Widerstand des Siliziums berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde unterhalb der Messzellen das Substrat auf eine Membran zurückgeätzt und der Chip an Au-Bonddrähten, isoliert zum Gehäuse, aufgehängt (Abb. 2.4).

2.1.2.4 Schutz vor Umwelteinflüssen

Der Schutz vor störenden Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, Schmutz, elektromagnetische Wellen oder aggressive Medien ist wichtig für die Funktion, Zuverlässigkeit und Lebensdauer eines Bauelementes. Der Feuchtigkeitsschutz nimmt dabei eine wichtige Stellung ein, da kondensierte Feuchtigkeit an Bauelementen zu Korrosion, Elektromigration und hohen Leckströmen führen kann [14]. Sowohl für Mikroelektronik als auch für Mikrosysteme ist deshalb ein hermetischer Verschluss wünschenswert oder sogar notwendig. Entsprechend der Umgebungsbedingungen im Betrieb des Systems muss also ein geeigneter Dich-

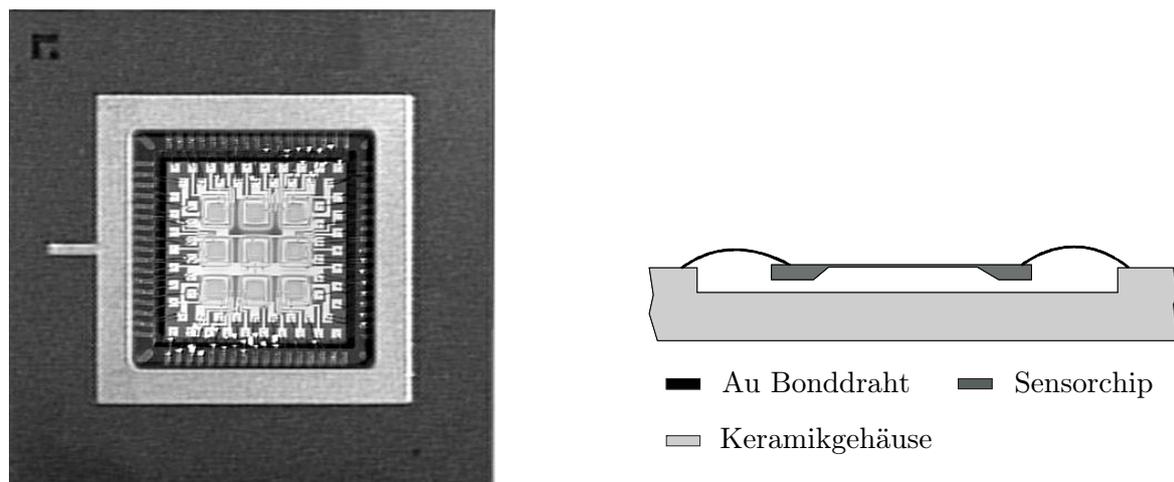


Abbildung 2.4: Montage eines Gassensorchips unter thermischen Gesichtspunkten: a) Lichtmikroskopische Aufnahme des Gassensors im Keramikgehäuse b) Seitenansicht des an Golddrähten aufgehängten Sensorchips [13]

tungswerkstoff gewählt werden, um den Feuchtigkeitsschutz zu gewährleisten. Obwohl im Prinzip alle Materialien für Feuchtigkeit durchlässig sind, besitzen Gläser, Metalle oder Keramik eine um mehrere Größenordnungen niedrigere Permeabilität (Durchlässigkeit) für Feuchtigkeit als organische Materialien (Abb. 2.5). Dennoch bieten Kunststoffgehäuse für einige Anwendungen ausreichenden Schutz, weshalb deren Verwendung im Einzelfall abzuwägen ist.

Mikroelektronische Chips werden üblicherweise am Ende der Prozesskette mit einer Passivierungsschicht bedeckt, die einen gewissen Schutz vor Feuchtigkeit bietet, so dass eine Hausung in einem nichthermetischen Kunststoffgehäuse ermöglicht wird (Abb. 2.6a). Für Anwendungen mit besonders hohen Anforderungen an die Hermetizität (z. B. Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt) können Keramik- oder Metallgehäuse verwendet werden. (Abb. 2.6b). Eine Vielzahl unterschiedlicher Gehäusevarianten – von *Dual-Inline* über *Ball-Grid-Array* bis hin zum *Chip-Scale-Package* – stehen heute standardisiert zur Verfügung. Nähere Ausführungen zu Gehäusetypen und zu den Besonderheiten von Kunststoff-, Keramik- und Metallgehäusen können in [9] nachgelesen werden. Eine kostensparende Aufbauvariante ist die so genannte *Chip-on-Board*-Montage, bei der das Bauelement ohne Gehäuse auf die Leiterplatte aufgeklebt wird. Der Schutz des Bauelementes erfolgt dann mittels *Globe-Top* – einer Vergussmasse (Epoxidharz, Silikongel) die das Bauelement und die Bonddrähte umhüllt (Abb. 2.6c) [12].

Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, müssen Mikrosysteme mit ihrer Umwelt in unterschiedlicher Art und Weise interagieren. Dennoch muss das System vor unerwünsch-

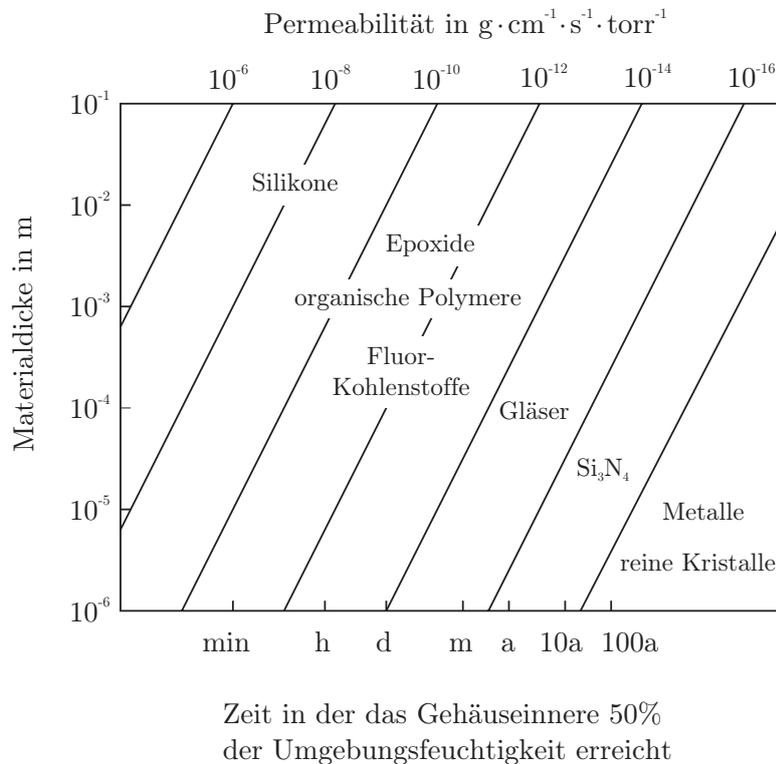


Abbildung 2.5: Darstellung der Permeabilität verschiedener Dichtungswerkstoffe gegenüber Feuchtigkeit für eine definierte Geometrie und der daraus resultierenden Zeit in der das Gehäuseinnere 50 % der Umgebungsfeuchtigkeit aufgenommen hat (nach [14])

ten Umwelteinflüssen geschützt werden. Die Forderung nach hermetischem Verschluss steht dann im Widerspruch zu der Notwendigkeit, die sensorischen oder aktorischen Elemente des Mikrosystems zugänglich zu gestalten. Die AVT von Mikrosystemen ist deshalb sehr vielfältig und anwendungsspezifisch, und deshalb bisher nicht standardisiert.

MEMS und MOEMS (Mikro-Opto-Elektro-Mechanische Systeme) sind darüber hinaus auch empfindlich gegenüber mechanischer Beeinflussung. Neben dem Ausschluss von Feuchtigkeit besteht also die Notwendigkeit nach mechanischem Schutz der Mikrostrukturen. Dieser mechanische Schutz ist nicht nur während des Betriebes eines Bauelementes wichtig, sondern muss auch schon während der Packaging-Prozesse gewährleistet werden. Das Vereinzeln der Wafer in Chips durch Trennschleifen stellt bereits eine erhebliche Beanspruchung dar. Die Kühlflüssigkeit (in der Regel deionisiertes Wasser) spült während des Prozesses generierte Diamant- und Siliziumpartikel über den Wafer. Diese können sich in offenen Gräben ansammeln, bewegliche Strukturen zerstören und optische Oberflächen schädigen. Eine Alternative ist die Vereinzelnung der Chips durch Laserstrahlschneiden.

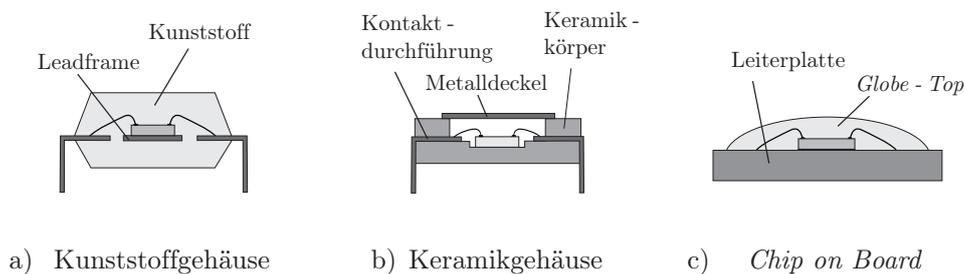


Abbildung 2.6: Hausungsvarianten von Bauelementen zum Schutz vor Umwelteinflüssen a) Kunststoffgehäuse b) Keramikgehäuse c) Direktmontierter Chip mit Vergussmasse (Globe-Top)

Dieses Verfahren ist jedoch viel zeitaufwendiger als Trennschleifen und deutlich kostenintensiver. Die Handhabung von Chips mit ungeschützten mechanischen oder optischen Mikrostrukturen ist ein weiterer kritischer Schritt. Ebenso ist ein Verkapseln in einem Kunststoffgehäuse mittels Spritzguss, wie es in der Mikroelektronik weit verbreitet ist, nicht ohne einen mechanischen Schutz der Mikrostrukturen möglich.

2.1.3 Methoden des MEMS Packaging

MEMS Packaging-Methoden können anhand des Integrationsgrades wie folgt klassifiziert werden [15]:

- *Single-Chip-Packaging* (SCP)
- waferbasiertes SCP
- *Wafer-Level-Packaging* (WLP)

Man spricht von SCP, wenn standardisierte oder modifizierte IC Gehäuse, z. B. TO-Gehäuse, Keramikgehäuse oder Premolded Kunststoffgehäuse, verwendet werden, um MEMS Chips zu hausen. Wie in Abbildung 2.7a) zu sehen ist, werden die Chips vor der Hausung vereinzelt. Es ist also ein temporärer Schutz während des Wafersägens notwendig. Es kann z. B. eine organische Opferschicht auf die Strukturen abgeschieden werden um diese zu umhüllen. Nach dem Vereinzeln wird die Opferschicht entfernt. Diese Technik wird von Texas Instruments für die Herstellung der DMD™ Arrays verwendet [16]. Eine andere praktizierte Methode ist die Verwendung einer Temperatur- oder UV-empfindlichen selbstklebenden Folie. Die Folie wird vor dem Vereinzeln auf den Wafer aufgeklebt, so dass die Mikrostrukturen abgedeckt sind. Die getrennten Chips werden dann einer erhöhten Temperatur oder einer definierten Dosis UV-Strahlung ausgesetzt, um die Klebekraft der

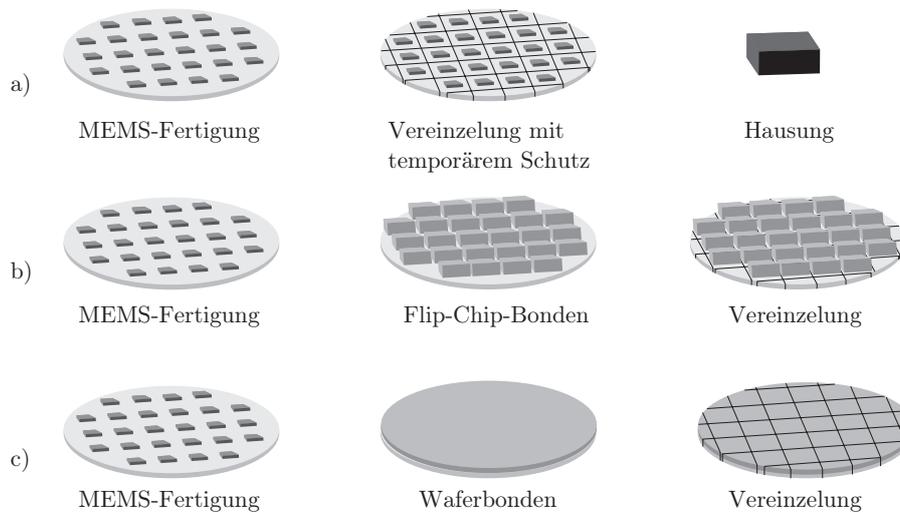


Abbildung 2.7: Schematischer Ablauf des a) SCP b) waferbasiertes SCP c) WLP

Folie auf annähernd Null herabzusetzen, so dass sie zerstörungsfrei von den Mikrostrukturen abgelöst werden kann.

Das waferbasierte SCP beruht auf dem Verkappen der Mikrostrukturen mit einzelnen Chips im Waferverbund (s. Abb. 2.7b). Nach dem Verkappungsschritt, der mittels *Pick-and-Place*-Anlagen durchgeführt wird, können weitere Standardprozesse, insbesondere das Vereinzeln, auf Waferebene durchgeführt werden. Eine konsequente Weiterführung dieses Ansatzes ist die Methode des *Wafer-Level-Packagings* (Abb. 2.7c). Sie beruht auf der Verkappung der Mikrostrukturen im Waferverbund mittels Waferbondprozessen oder der Abscheidung und Strukturierung dünner Schichten. In Anlehnung an die Mikroelektronik wird diese Art der Verkappung auch als *Zero-Level-Packaging* bezeichnet. Ein Hauptziel des WLP ist der mechanische Schutz der filigranen Mikrostrukturen, es können jedoch auch die elektromagnetische Schirmung des Mikrosystems, die Durchführung elektrischer Kontakte, die Montage von Funktionselementen oder andere Aufgaben der AVT realisiert werden.

Waferbondprozesse haben eine breite Akzeptanz, sowohl in der Forschung als auch in der MEMS Industrie, erlangt. Nachteilig ist jedoch der hohe Platzbedarf von mindestens 200 μm um die gesamte Struktur für den Bondrahmen, der die Kappe mit dem Strukturchip verbindet. Des Weiteren erhöht sich die Dicke des Chips um 200-500 μm , so dass einige IC-Standardgehäuse, wie z. B. ein *Small-Outline Package* (SOP) mit 1,5 mm Bauhöhe, nicht verwendet werden können. Sowohl die Verwendung von Spezialgehäusen, als auch das Abdünnen des Waferstapels erhöhen jedoch die Kosten.

Das WLP von Mikrostrukturen mit Dünnschichtkappen das in dieser Arbeit Anwendung findet, benötigt sowohl horizontal als auch vertikal weniger Platz auf dem MEMS-Chip als gebondete Kappen. Dabei ist der Aufwand hinsichtlich der Herstellungskosten pro Wafer ähnlich, was zu geringeren Stückkosten pro Chip führt. Die Dünnschichtverfahren sind zwar meist spezifisch für eine jeweilige MEMS-Technologie und benötigen deshalb einen höheren Entwicklungsaufwand, dieser wird jedoch bei ausreichend hohen Stückzahlen gerechtfertigt. Aus diesem Grund ist die Dünnschichtverkappung von Mikrostrukturen eine bedeutende Technologie für die Massenfertigung von MEMS.

2.2 Technologien zur Fertigung oberflächennaher Mikrostrukturen

Die drei im Moment bedeutendsten Technologiekonzepte zur Herstellung von siliziumbasierten Mikrostrukturen sind die Volumenmikromechanik, die Oberflächenmikromechanik und die oberflächennahe Volumenmikromechanik. Die Volumenmikromechanik ist gekennzeichnet durch die Strukturierung der Form- und Funktionselemente in der gesamten Waferdicke durch vornehmlich nasschemische Ätzverfahren und dem anschließenden flächigen Fügen von weiteren Wafern, dem Waferbonden [16]. Das Waferbonden dient dabei nicht nur dem Verkapseln der Strukturen, sondern auch der Montage von Elemente eines Mikrosystems in vertikaler Richtung. So werden beispielsweise bei kapazitiv wirkenden Beschleunigungssensoren die Elektroden mit der seismischen Masse verbunden und gleichzeitig der Elektrodenabstand und der Innendruck des Systems definiert [17]. Damit werden wesentliche Parameter des Sensors wie mechanische Dämpfung und die kapazitive Empfindlichkeit direkt beeinflusst. Die Volumentechnologien sind inzwischen sehr ausgereift und werden zur industriellen Produktion von z. B. Inertial- und Drucksensoren verwendet. Dennoch werden sie mehr und mehr durch die Technologien zur Erzeugung oberflächennaher Mikrostrukturen, aufgrund von Kostenvorteilen und der Möglichkeit zu monolithischer Integration mit der Mikroelektronik ersetzt. Für die vorliegende Arbeit sind die Volumentechnologien nicht von Belang, da Waferbondprozesse und damit der Verschluss der Mikrostrukturen integraler Bestandteil dieser Verfahren sind.

Die Oberflächenmikromechanik bezeichnet Technologien, bei denen Schichtsysteme auf der Waferoberfläche zur Realisierung dreidimensionaler Elemente dienen. Der wesentliche Vorteil dieser Technologien ist die Verwendung von Trockenätzverfahren zur lateralen Strukturierung. Damit verbunden sind weitere Miniaturisierung, geringere Fertigungstoleranzen, ein höherer Freiheitsgrad bei dem Entwurf des Layouts und die Integrierbarkeit mit der Elektronik [18]. Wesentlich für die Oberflächenmikromechanik ist die Verwen-

dung einer vergrabenen Opferschicht unter mindestens einer strukturellen Schicht. Dünne Strukturen zu erzeugen ist dagegen heute kein charakteristisches Merkmal mehr für die Oberflächenmikromechanik, da bei den wichtigsten Technologien, sowohl der Polysilizium-Technologie als auch bei einigen SOI-Technologien (*Silicon-on-Insulator*), Strukturhöhen von mindestens 15 μm realisiert werden können [19, 20].

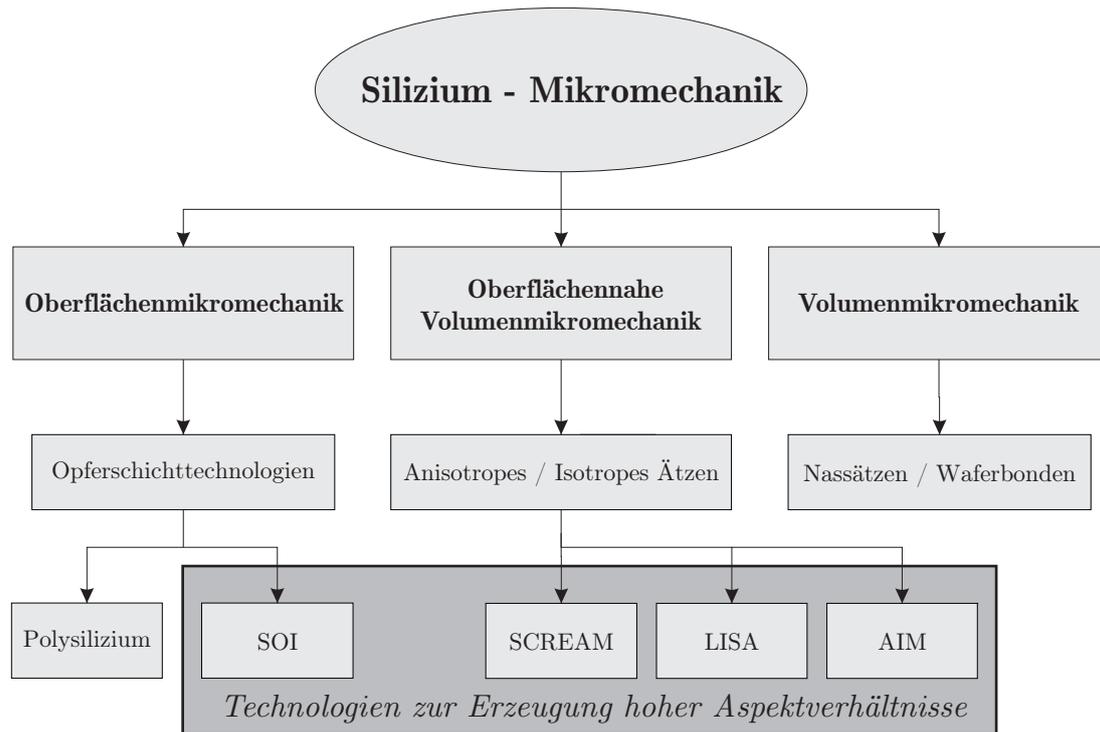


Abbildung 2.8: Übersicht aktueller Technologien der Silizium-Mikromechanik [21]

Die Technologien der oberflächennahen Volumenmikromechanik basieren auf dem anisotropen Trockenätzen von schmalen, tiefen Gräben in das Siliziumsubstrat und dem anschließenden isotropen Ätzen zur Freilegung der beweglichen Strukturen. Damit können Strukturen mit sehr hohem Aspektverhältnis, also dem Verhältnis von Strukturhöhe zu Strukturbreite, so genannte HARMS (*High Aspect Ratio Microstructures*) erzeugt werden. Diese HARMS verbinden damit die Vorteile der Volumenmikromechanik (einkristallines Silizium, große Massen, hohe Quersteifigkeiten der Federn, große Signalamplituden) mit den Vorteilen der Oberflächenmikromechanik (geringe Fertigungstoleranzen, kleine laterale Ausdehnung, monolithische Integrierbarkeit).

Der Oberflächenmikromechanik und der oberflächennahen Volumenmikromechanik ist gemein, dass die MEMS auf einem Siliziumsubstrat gefertigt werden. Waferbondverfahren dienen lediglich zur Erzeugung von Substraten mit vergrabenen Oxidschichten, sind an-

sonsten jedoch nicht der Basistechnologie zuzuordnen. Es sind also zusätzliche Schritte notwendig, um die freiliegenden beweglichen Elemente zu schützen.

Hinsichtlich der Verkappungstechniken ist die Unterteilung der Verfahren zur Herstellung oberflächennaher Mikrostrukturen in Opferschichttechnologien und opferschichtfreie Technologien sinnvoll, weil aus der Verwendung einer Opferschicht mögliche Verkappungsprozesse abgeleitet werden können. In Abbildung 2.8 ist die beschriebene Systematik der siliziumbasierten Mikromechanik in Anlehnung an T. Geßner [21] dargestellt. Die in der Abbildung angegebenen Technologiebeispiele werden im Folgenden hinsichtlich der sich daraus ergebenden Anforderungen für die Verkappungstechnologie kurz beschrieben.

2.2.1 Opferschichttechnologien

Die Opferschichttechnologien zur Erzeugung von Mikrostrukturen sind gekennzeichnet durch eine vergrabene Opferschicht, die sich unter der strukturellen Schicht befindet. Das zu Grunde liegende Opferschichtprinzip nutzt die Selektivität von Ätzprozessen gegenüber unterschiedlichen Materialien zur Freilegung von Strukturen. In den frühen achtziger Jahren wurden an der *University of California* in Berkley die ersten polykristallinen Silizium-Mikrostrukturen auf einer Opferschicht aus Siliziumdioxid hergestellt [22]. Bei dieser Polysilizium-Technologie werden sowohl die Opferschicht als auch die Struktur-schicht mit Schichtabscheidungsverfahren auf das Trägersubstrat aufgebracht, bevor sie strukturiert werden und die Opferschicht selektiv zum Polysilizium entfernt wird. Abbildung 2.9 zeigt den prinzipiellen Technologieablauf. Der mehrschichtige Aufbau aus unterschiedlichen Materialien verursacht mechanische Spannungen und kann zur Deformation der Strukturen und des Substrates führen [23]. Diese Spannungen und die niedrige Rate der Abscheidungsprozesse für Polysilizium begrenzen die erreichbare Schichtdicke und damit das Aspektverhältnis der Strukturen.

Aufgrund der CMOS-Kompatibilität, der relativ niedrigen Herstellungskosten und der Entwicklung spezieller, integrierter WLP-Verfahren (Abschnitt 2.5), ist diese Technologie seit den neunziger Jahren kommerzialisiert und es sind Massenprodukte wie z. B. monolithisch [24] oder hybrid [25] integrierte Beschleunigungssensoren verfügbar.

Bei den SOI-Technologien besteht die Strukturschicht, im Gegensatz zur Polysilizium-technologie, aus einkristallinem Silizium. Die so genannten SOI-Substrate, d.h. Substrate mit einer einkristallinen Siliziumschicht auf vergrabendem Siliziumdioxid, werden durch sehr unterschiedliche, aber meist aufwändige Verfahren hergestellt. Bei BESOI (*Bond and Etch-Back of Silicon-on-Insulator*) werden ein Trägerwafer und ein Strukturwafer aus Silizium gebondet und letzterer bis auf die Dicke der späteren Strukturhöhe abgedünnt.

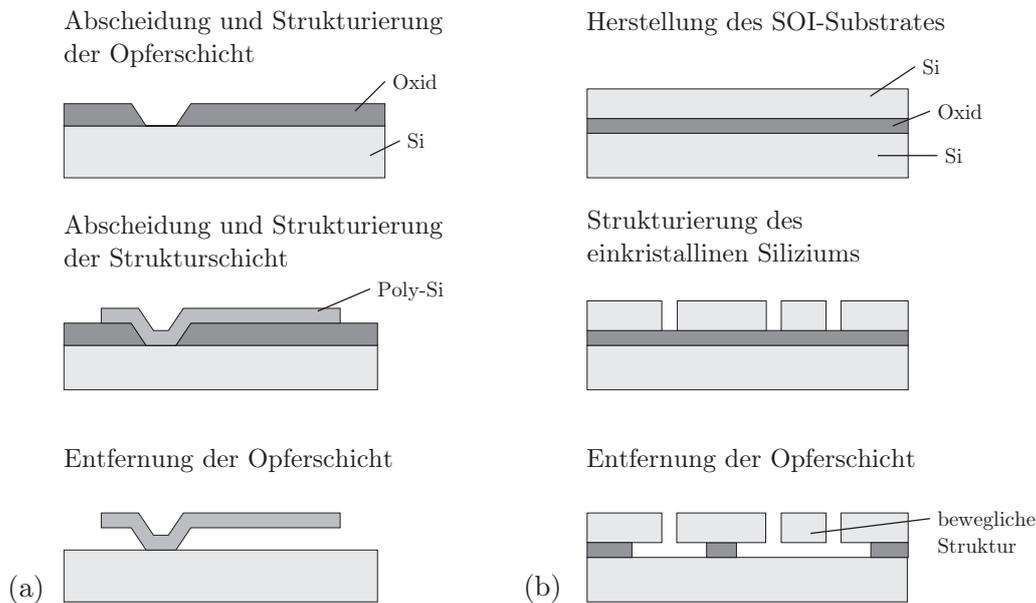


Abbildung 2.9: Schematischer Prozessablauf der Oberflächentechnologien (a) Polysilizium-Technologie (b) SOI-Technologie

SIMOX (*Separation by Implanting of Oxygen*) basiert auf der Tiefenimplantation von Sauerstoff und der darauf folgenden Oxidation bei hohen Temperaturen [26]. Seit einigen Jahren wird in zunehmenden Maße das hochproduktive Verfahren *Smart Cut*[™] von *Soitec* verwendet [27]. Dabei wird von einem gebondeten Waferpaar eine Siliziumschicht mittels implantierten Wasserstoffs bei einer Hochtemperaturbehandlung abgesprengt.

Die detaillierte Prozessfolge der einzelnen Technologien ist sehr unterschiedlich, kann aber im Prinzip auf das Strukturieren des Siliziums und das Freilegen der Strukturen durch Entfernen der Opferschicht zurückgeführt werden. Da die Dicke der einkristallinen Siliziumschicht wesentlich höher sein kann als bei der Polysilizium-Technologie, lassen sich damit auch HARMS mit den bereits genannten Vorteilen herstellen.

Eine Schwierigkeit, die allen Opferschichttechnologien innewohnt, ist das Entfernen der Opferschicht zur Freilegung der Strukturen. Bei nasschemischer Prozessführung tritt das Problem des Klebens der Strukturen auf [28]. Verschiedene Prozesse wie die superkritische Trocknung, die Behandlung mit Ammoniumfluorid zur Erzielung von Antihafteigenschaften sowie das Ätzen in der Gasphase wurden entwickelt, sind aber aufwändig und damit nicht kostengünstig [29, 30, 31]. Außerdem treten – wie auch bei der Polysiliziumtechnologie – mechanische Spannungen aufgrund des Schichtaufbaus aus unterschiedlichen Materialien auf. Vorteilhaft für die anwendbaren Verkappungsverfahren ist bei den vorgestellten Opferschichttechnologien das Fehlen von Metallschichten und anderer tempe-

raturempfindlicher Werkstoffe. Demnach sind Verfahren mit hohen Prozesstemperaturen möglich, wenn keine monolithische Integration mit der Elektronik angestrebt wird.

2.2.2 Opferschichtfreie Technologien

Die opferschichtfreien Technologien der oberflächennahen Volumenmikromechanik haben sich seit ihrer ersten Anwendung vor allem durch die rasanten Fortschritte der Trockenätzprozesse zu einer großen Vielfalt entwickelt [32]. Es sollen deshalb an dieser Stelle nur drei Technologien exemplarisch vorgestellt werden, um die Besonderheiten und die Bedingungen, die bei der Verkappung der Strukturen berücksichtigt werden müssen, darzustellen, wobei die an der TU Chemnitz etablierten Technologien im Vordergrund stehen.

SCREAM - Technologie

Ein typisches Beispiel opferschichtfreier Verfahren ist die SCREAM-Technologie (*Single Crystal Reactive Etching and Metallization*), die 1994 von K.A. Shaw [33] vorgestellt wurde und in einer speziellen Variante auch am Zentrum für Mikrotechnologien in Chemnitz angewendet wird [34]. Sie ermöglicht die Realisierung der Mikrostrukturen mit nur einer Lithografieebene durch die konsequente Anwendung selbstjustierender Prozesse. Diese Technologie ist deshalb sehr kostengünstig, ermöglicht Strukturen mit hohem Aspektverhältnis und ist post-CMOS-kompatibel.

Der Prozessablauf ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Thermisches Oxid dient als Hartmaske bei der tiefen anisotropen Siliziumätzung. Die so erzeugten, bis zu 50 µm tiefen, Gräben werden mittels eines PECVD-Siliziumoxids (Plasmagestützte chemische Dampfphasenabscheidung) passiviert und nachfolgend mit einem anisotropen Ätzprozess, dem so genannten *Spacer*-Ätzen, geöffnet. Durch eine isotrope Ätzung des Siliziums können nun die Strukturen unterhöhlt und damit freigelegt werden. Das Passivierungsoxid dient außerdem als Isolationsschicht zwischen dem Siliziumsubstrat und der abschließend aufgedampften Metallschicht aus Aluminium. Die Bedeckung der Seitenwände mit dem Metall ist unter anderem vom Aspektverhältnis der Gräben abhängig, so dass bei tiefen schmalen Gräben oftmals nicht die gesamte Seitenwand metallisiert wird. Da alle Strukturen metallisiert werden, erfolgt die Potentialtrennung zwischen unterschiedlichen Komponenten über Isolationströgen, die alle Strukturen umgeben (s. Abb. 2.11).

Aufgrund der dünnen Oxidschicht zwischen Aluminium und Substrat sowie der großen Fläche dieses Schichtstapels, der die gesamte Oberfläche der Strukturen bedeckt, treten bei SCREAM hohe Parasitärkapazitäten auf. Sie übersteigen die Nutzkapazität oftmals um ein Vielfaches, und erschweren die Signaldetektion vor allem bei statischen Anwen-

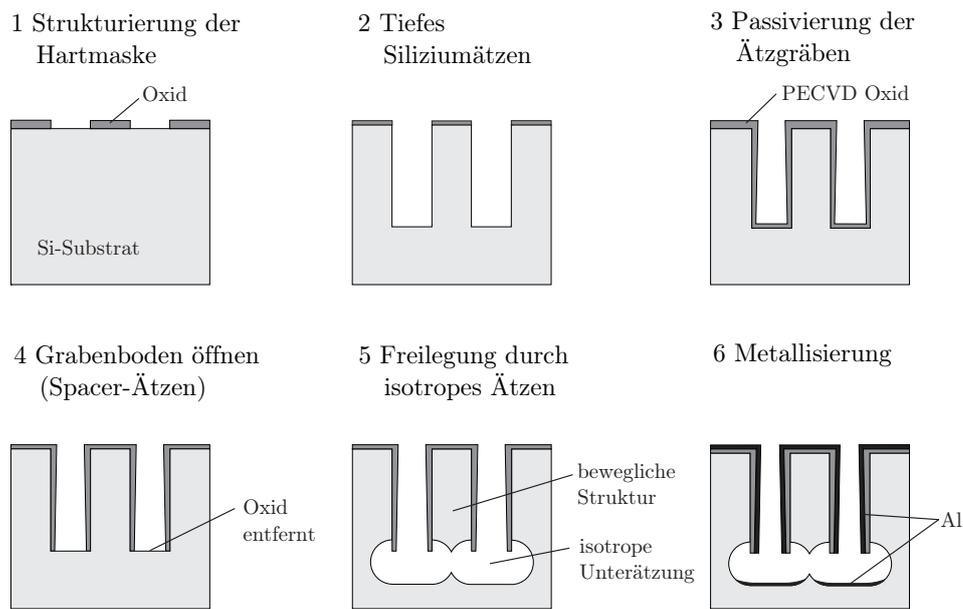


Abbildung 2.10: Prinzipdarstellung des Prozessablaufs der SCREAM-Technologie

dungen. Zudem führen die mechanischen Spannungen infolge der Schichtabscheidungen zu Verformungen der Strukturen [35]. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten der Schichten sind diese Verformungen temperaturabhängig, und bedingen einen hohen Temperaturgang der so hergestellten Mikrosysteme.

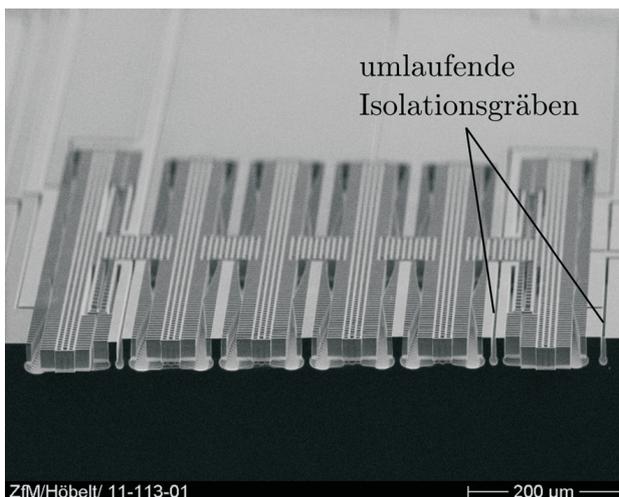


Abbildung 2.11: REM-Aufnahme eines Vibrationssensors in SCREAM-Technologie

Aus diesen Gründen entstanden unterschiedliche Lösungsansätze mit dem Ziel, die Siliziumelemente selbst gegen das Substrat elektrisch zu isolieren. Durch die Verwendung hochdotierter Wafer kann das Silizium als elektrische Leitung fungieren und die zusätzlichen Schichten auf den beweglichen Elementen entfallen. Realisiert wird die Isolation zum Substrat durch die Verwendung von Anker-elementen, die aus dem Bulksilizium herausgearbeitet werden und sowohl die mechanische Befestigung, als auch die elektrische Kontaktierung gewährleisten. Zwei dieser Lösungsansätze sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

LISA - Technologie

Bei der LISA-Technologie (*Lateral Isolated Silicon Accelerometer*) [36] erfolgt die Isolation durch oxidgefüllte Gräben. Die Anker werden über Metallleitbahnen kontaktiert, die sich nur im Außenbereich auf einer Isolationsschicht befinden. Der Prozessablauf beruht auf vier Lithografieebenen und ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Mit der ersten Ebene werden die Isolationsgräben durch anisotrope und isotrope Ätzverfahren strukturiert und mittels thermischer Oxidation verfüllt. Mit der zweiten Lithografie werden Kontaktfenster geöffnet, um die Leitbahnen mit den Siliziumankern zu verbinden. Die dritte Maskenebene dient der Strukturierung der Metallschicht und mit der vierten Ebene werden schließlich die Siliziumelemente definiert.

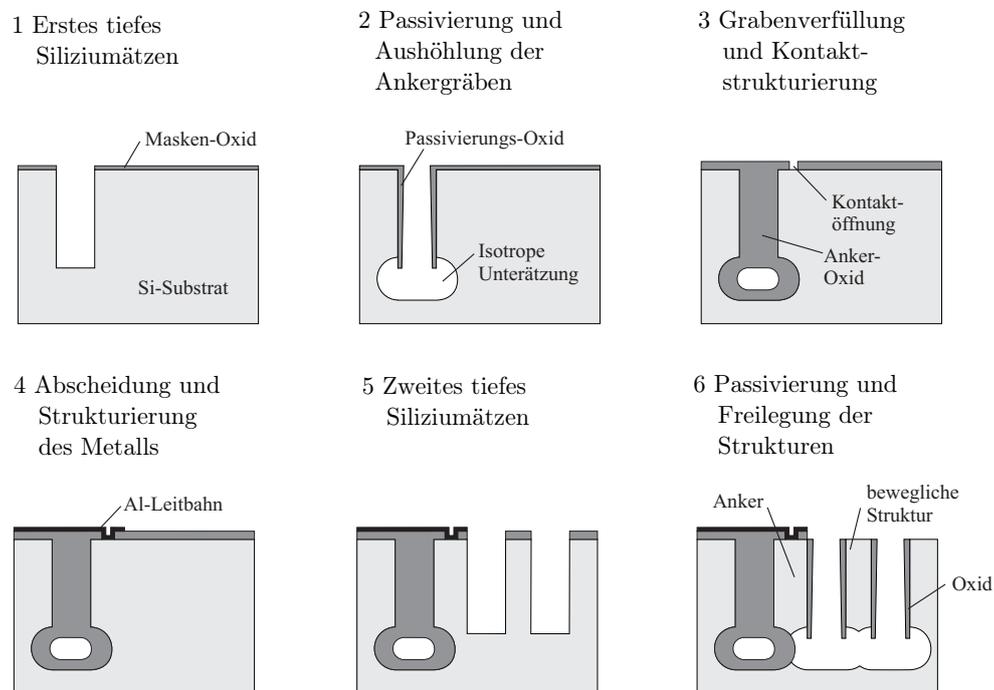


Abbildung 2.12: Prinzipdarstellung des Prozessablaufs der LISA-Technologie

Die Freilegung erfolgt wie bei SCREAM durch eine isotrope Siliziumätzung über passivierte Seitenwände. Dabei kann die Passivierung während des Freilegens durch ein Siliziumoxid [37] oder durch ein Fluor-Kohlenstoff Plasmapolymere (CF-Polymer) [38] erfolgen. Letzteres hat den Vorteil, dass es relativ einfach wieder entfernt werden kann und damit keine zusätzlichen Schichten auf den mechanisch wirksamen Siliziumstrukturen verbleiben. Der Hauptnachteil ist die aufwändige Prozessierung durch die zweimalige Tiefenätzung. Aufgrund der thermischen Oxidation zur Verfüllung der Gräben ist diese Technologie nicht CMOS-kompatibel.

AIM - Technologie

Den Ansatz, Ankerelemente aus dem Siliziumsubstrat herauszulösen und isoliert aufzuhängen setzt die an der TU Chemnitz entwickelte AIM-Technologie (*Air gap Insulated Microstructures*) konsequent fort [39]. Dabei werden aber im Gegensatz zu LISA die Ankerstrukturen und die mechanischen Elemente gleichzeitig strukturiert und freigelegt. Die Aufhängung erfolgt über Träger, die aus einem Isolator-Metall-Stapel bestehen und sich auf der Waferoberfläche befinden. In Abbildung 2.13 ist eine Ankerstruktur mit den für AIM typischen Trägern zu sehen. Die Isolation des Ankers und der gesamten Struktur erfolgt durch einen Luftspalt, statt durch Siliziumoxid. Der schematische Technologieablauf ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

Mit der ersten Lithografieebene werden im Isolatorstapel, bestehend aus Siliziumoxid und Siliziumnitrid, Kontaktfenster geöffnet. Das nachfolgend gesputterte Aluminium wird strukturiert um Leitbahnen zu erzeugen und dient als Maske für die Rückätzung des Isolatorstapels. Als Hartmaske für das tiefe Siliziumätzen wird PECVD-Oxid aufgebracht und mit der dritten Lithografieebene strukturiert. Die Erzeugung der Strukturen im Silizium erfolgt durch einen vierstufigen Prozess *in situ*. Dieser setzt sich aus der anisotropen Tiefenätzung des Siliziums, der Passivierung der Seitenwände mit einem CF-Polymer, der Öffnung der Passivierung am Grabenboden mit einem *Spacer*-Ätzschritt und aus der Freilegung der Strukturen mit einer isotropen Ätzung zusammen. Abschließend werden das Silizium unter den Trägern und das Maskenoxid entfernt [40].

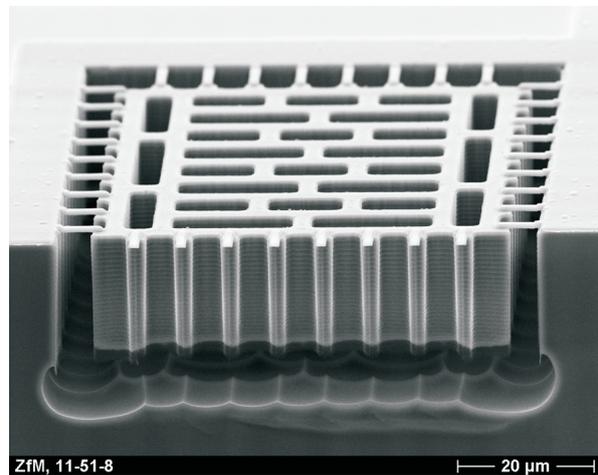


Abbildung 2.13: REM-Aufnahme einer an Al-Trägern aufgehängenen AIM-Ankerstruktur

Diese Technologie vereint die Vorteile verschiedener anderer oberflächennaher Technologien (einkristallines Silizium, einfache Prozessierung, keine zusätzlichen Schichten auf den mechanischen Elementen, geringe Toleranzen). Kritisch zu betrachten ist die Aufhängung der Anker an den Trägern, da die Stabilität gegenüber den Strukturen aus Silizium schwächer ist. Vor allem für die Zuverlässigkeit und das Langzeitverhalten von AIMs ist die Belastbarkeit der Träger von entscheidender Bedeutung [41].

In Bezug auf die Verkappungsprozesse der opferschichtfrei hergestellten Mikrostrukturen ist festzuhalten, dass Metallschichten schon vor den Verkappungsprozessen vorhanden

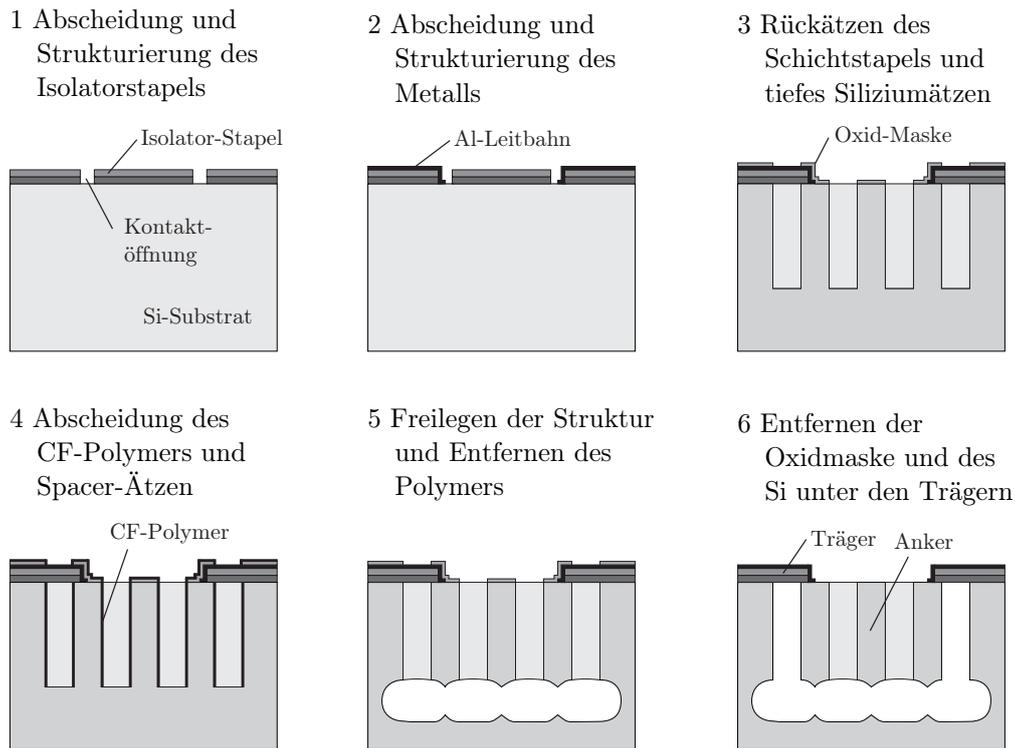


Abbildung 2.14: Prinzipdarstellung des Prozessablaufs der AIM-Technologie

sind, was vor allem die möglichen Prozesstemperaturen einschränkt. Da bei diesen Verfahren keine vergrabenen Leitbahnen erzeugt werden können, sind entweder umlaufende Isolationsgräben zu verschließen (z. B. SCREAM-Technologie), oder aber eine Leitbahntopologie zu überwinden (z. B. AIM- und LISA-Technologie).

2.3 Anforderungen an das Verkappungsverfahren

Aus den spezifischen Besonderheiten der oberflächennahen Mikrostrukturen ergeben sich im Vergleich zur Bulk-Mikromechanik sowohl technologische als auch konstruktive Unterschiede in der Art der Verkappung. Die Anforderungen an die Verkappung oberflächennaher Mikrostrukturen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Mikrostrukturen setzen sich meist aus Schichtstapeln unterschiedlicher Materialien zusammen, die nicht die Oberflächengüte von einkristallinem Silizium oder thermisch aufgewachsenem Oxid besitzen. Vor allem aufgrund der trockenchemischen Ätzprozesse mit mechanischem Ätzanteil, wie z. B. reaktives Ionenätzen (*Reactive Ion Etching*, RIE), sind die Oberflächen teilweise stark aufgeraut.

- Die Schichten weisen in der Regel eine Topologie durch zum Teil vergrabene Strukturen, Leitbahnsysteme oder umlaufende Isolationsgräben auf. Prozesse zur Einebnung von Oberflächen wie beispielsweise chemisch-mechanisches Polieren (*Chemical Mechanical Polishing*, CMP) können nicht eingesetzt werden. Ein sicherer und zuverlässiger Verschluss muss über diese Stufen oder Gräben gewährleistet werden.
- Opferschichtfreie Verfahren verwenden Metalle, vor allem Aluminium, zur Leitbahnführung und Kontaktierung. Im Gegensatz zu Opferschichtverfahren kann die Metallisierung nicht nach dem Verkappen am Ende der Prozesskette stattfinden, da sie bei diesen Verfahren in den Prozessablauf integriert ist. Nachfolgende Prozesse müssen also kompatibel zur Metallisierung sein (thermisch und chemisch).
- Die Verkappung über Leitbahnen hinweg erfordert eine hochohmige Kappe oder eine isolierende Schicht dazwischen, um die unterschiedlichen elektrischen Potentiale nicht miteinander zu verbinden.
- Oberflächennahe Strukturen sind äußerst empfindlich gegenüber Feuchtigkeit, da die Gefahr des Klebens besteht (s. Abschn. 2.2.1). Nasschemische Reinigungsschritte oder Oberflächenbehandlungen sind deshalb nicht geeignet. Für Verfahren mit Opferschichten, bei denen aufwändige nasschemische Prozesse zur Opferschichtätzung entwickelt wurden, können diese Prozesse auch für die Verkappung eingesetzt werden. Für opferschichtfreie Verfahren, bei denen die komplett trockene Prozessierung ein wichtiger Vorteil ist, kommen nasschemische Prozesse nicht in Frage.
- Die Chipflächen sind kleiner als bei der Volumenmikromechanik. Es steht also weniger Fläche für die Verkappungstechnologie zur Verfügung, um nicht das Verhältnis von Nutzfläche zu Packagingfläche unverhältnismäßig anzuheben, und damit den Kostenvorteil gegenüber der Volumenmikromechanik zu verlieren.
- Die Kontaktierung erfolgt über metallisierte Pads, die sich neben den Strukturen befinden. Sowohl für Drahtbondverbindungen als auch für Flip-Chip-Verbindungen muss der Zugang zu diesen Bereichen erhalten bleiben, oder die Kontakte müssen durch die Kappe nach außen geführt werden.
- Oberflächennahe Technologien werden zur Massenfertigung billiger Mikrosysteme verwendet. Das *Wafer-Level-Packaging* darf den dadurch vorgegebenen engen Kostenrahmen nicht übersteigen. Die Prozessabläufe zur Verkappung müssen also einfach und effektiv sein, aber trotzdem die Aufgabe, die Strukturen über die Lebensdauer des Mikrosystems zu schützen, zuverlässig erfüllen.

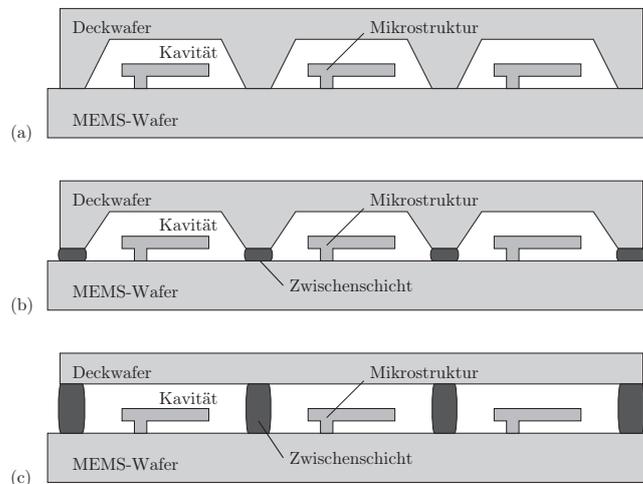


Abbildung 2.15: Prinzipdarstellung der Verkapselung von mikromechanischen Strukturen bei der Verwendung von Waferbondprozessen; (a) Zwischenschichtfreie Waferbondprozesse mit strukturiertem Deckelwafer; (b) Waferbondprozesse mit Zwischenschichten und strukturiertem Deckelwafer (c) Waferbondprozesse mit Zwischenschichten und unstrukturiertem Deckelwafer

Neben diesen spezifischen technologischen Anforderungen an die Verkapselung oberflächennaher Mikrostrukturen, müssen auch die allgemeinen Funktionen des Packagings von MEMS, wie sie in Abschnitt 2.1.2 dargelegt worden sind, berücksichtigt werden. Im Hinblick darauf werden in den nächsten Abschnitten unterschiedliche, bereits bekannte Technologieansätze diskutiert und bewertet.

2.4 Verkappung mittels Waferbondprozessen

Ein technologischer Ansatz zur Verkapselung von oberflächennahen Mikrostrukturen auf Waferebene ist das Waferbonden. Dabei wird ein Deckelwafer, der entweder vorstrukturierte Kavitäten besitzt oder einen Abstandsrahmen auf seiner Oberfläche aufweist, gegen den MEMS-Wafer flächig gefügt. Eine Darstellung der prinzipiellen Verfahrensweise zeigt die Abbildung 2.15. Für das Fügen von Wafern existieren zwei Arten von Prozessen: das direkte zwischenschichtfreie Bonden (Abb. 2.15 a) und das Bonden unter Verwendung einer Zwischenschicht (Abb. 2.15 b, c) [3].

Die Vorteile der Waferbondprozesse liegen in der Verfügbarkeit von geeigneten produktionsstauglichen Anlagen und bewährten Prozessabläufen. Mit der Wahl des Prozesses und

der verwendeten Materialien kann sowohl die Kontrollierbarkeit der eingeschlossenen Atmosphäre als auch die Qualität des hermetischen Einschlusses gezielt beeinflusst werden. Nachteilig sind hingegen die zusätzlichen Prozessschritte, die notwendige Chipfläche für den Bondpadzugang, die meist eingeschränkte Topografie von Leitungsdurchführungen, die teilweise hohen Prozesstemperaturen sowie lange Prozesszeiten. Vor allem Prozesse mit organischen Materialien als Zwischenschicht finden deshalb in letzter Zeit verstärkt Anwendung [42].

Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren kurz vorgestellt, um sie hinsichtlich ihrer Integrationsfähigkeit in oberflächennahe Technologien und der im vorhergehenden Abschnitt genannten Anforderungen zu bewerten.

2.4.1 Direkte Waferbondprozesse

Die beiden in der Mikrosystemtechnik verbreiteten Verfahren zum direkten Verbinden zweier Substrate sind das Silizium-Direkt-Bonden (SDB) und das Anodische Bonden.

Silizium - Direkt - Bonden

Das SDB wurde entwickelt, um blanke Silizium-Wafer zur Erzeugung von Substraten für die Leistungselektronik [43] und Wafer mit Siliziumoxid an der Oberfläche für die Herstellung von SOI-Substraten [44] miteinander zu fügen. Dabei waren hohe Temperaturen von 800 °C bis 1100 °C notwendig, um eine feste Bondverbindung zu gewährleisten. Heute ist es ein verbreitetes Verfahren zur Herstellung von Mikrosystemen unter Verwendung strukturierter Wafer. Neben Silizium und Oxidschichten sind auch Siliziumnitrid und andere Halbleitermaterialien wie GaAs als Bondpartner möglich [45]. Durch die Entwicklung von Niedrigtemperaturbondverfahren [46] konnten die Bondtemperaturen (bei realistischen Prozesszeiten) bis auf 200 °C abgesenkt werden.

Wichtig für eine gute Bondung ist die Oberflächenbeschaffenheit der Wafer. Die Oberflächenrauheit sollte unter 4 nm betragen [47], zudem ist eine geringe Verwölbung der Wafer ebenfalls vorteilhaft. Der prinzipielle Prozessablauf besteht aus einer Vorbehandlung der Wafer, dem Raumtemperatur-Bondschrift und der nachfolgenden bereits erwähnten Temperaturbehandlung. Die Vorbehandlung der Wafer dient der Reinigung und der Oberflächenaktivierung. Eine verbreitete Möglichkeit ist hierbei die Erzeugung hydrophiler Oberflächen, die durch die Chemisorption von Wasser in Form von OH-Gruppen (hydroxilierte Oberfläche), an denen Wasser wiederum physisorbiert, entstehen. Durch die Annäherung zweier Wafer bei Raumtemperatur bilden sich an den Kontaktstellen spontan Wasserstoffbrücken zwischen den hydrophilen Oberflächen aus [17].

Die Vorbehandlung kann in einem Tauchbad in RCA-Reiniger, $\text{H}_2\text{O}_2\text{--H}_2\text{SO}_4$ oder heißer Salpetersäure mit nachfolgender Spülung in deionisiertem Wasser (DI-Wasser) erfolgen. Eine Oberflächenaktivierung ist alternativ (falls eine Behandlung in reaktiven Medien nicht möglich ist) oder zusätzlich (um die Zahl der OH-Gruppen zu erhöhen) in einem Sauerstoffplasma möglich [48]. Auch in diesem Fall werden die Wafer in DI-Wasser gespült bzw. gelagert, um die Sättigung der freien Bindungen (mit anderen als mit Wassermolekülen) vor dem Bondprozess zu verhindern. Bei der Verwendung von blanken Siliziumwafern kann auch ein spontanes Bonden von hydrophoben Oberflächen genutzt werden. Dazu werden die Wafer nach einer optionalen Reinigung in verdünnte Flusssäure getaucht, um das natürliche Oxid zu entfernen, nachfolgend getrocknet und ohne weitere wässrige Behandlung verbondet [49]. Um vergleichbare Bondfestigkeiten wie bei hydrophilen Oberflächen zu erreichen sind bei der abschließenden Temperung jedoch höhere Temperaturen notwendig.

Sowohl die Vorbehandlung in einem Sauerstoffplasma als auch die Temperaturen bei Niedertemperaturverfahren sind mit oberflächennahen Mikrostrukturen kompatibel. Die eingeschränkten Materialkombinationen und die Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit schließen die Anwendung des SDB für die Verkappung der meisten oberflächennahen Mikrostrukturen jedoch aus. Eine Möglichkeit, die nur in einigen Sonderfällen angewendet werden kann, ist in [50] beschrieben. Hier erfolgt die Einebnung der Oberfläche durch eine Polysiliziumabscheidung und nachfolgendem Polieren mittels CMP. Da das Polysilizium nicht selektiv auf den Sensorwafer aufgebracht werden kann, muss es nachfolgend im Bereich der mechanischen Strukturen entfernt werden. Für mikromechanische Strukturen aus Silizium ist das wiederum nicht selektiv möglich.

Anodisches Bonden

Das Anodische Bonden wird gewöhnlich für die Verbindung von Glas mit Silizium benutzt, ermöglicht darüber hinaus aber auch die Verbindung jeder alkalireichen Glasschicht mit quasi jeder Metallschicht [51]. Voraussetzungen sind saubere und ebene Waferoberflächen und eine gute Anpassung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Fügepartner, weshalb bevorzugt Pyrex-Glas (Corning #7740) zum Bonden mit Silizium Verwendung findet. Während des Bondprozesses werden die Wafer auf eine Temperatur zwischen $180\text{ }^\circ\text{C}$ und $500\text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt und eine Gleichspannung im Bereich 200 V bis 1000 V angelegt [3]. Durch die elektrostatischen Kräfte wird eine Annäherung der Wafer erreicht, die zu einer festen und hermetisch dichten Bondverbindung führt. Dabei ist das selektive Fügen von strukturierten Wafern ebenso möglich wie die ganzflächige Verbindung von Wafern.

Mittels Opferschichttechnologien hergestellte Mikrostrukturen, die eingebettete Leitbahnen zwischen Kontaktpad und Mikrostruktur aufweisen, können mittels Anodischem Bonden mit einem Glaswafer hermetisch verschlossen werden [52, 32, 53]. Der hermetische Verschluss über Leitbahnen hinweg, wie er beispielsweise bei AIM gefordert ist, stellt eine Schwierigkeit dar, da in einem Bereich neben Stufen keine Bondung stattfindet. Das Verfahren ist aufgrund der notwendigen elektrischen Spannung nicht CMOS-kompatibel. Aus dem gleichen Grund kann es notwendig sein, mechanisch sensible Oberflächenstrukturen zu schirmen, um sie nicht den elektrostatischen Kräften auszusetzen und damit zu zerstören [3]. Ein weiterer Nachteil sind die trotz Materialanpassung vorhandenen mechanischen Spannungen zwischen Silizium und Glas, die sich vor allem in einer erhöhten Temperaturempfindlichkeit des Mikrosystems äußern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die direkten Bondverfahren nur in Einzelfällen und speziell angepasst an die jeweilige Anwendung für die Verkappung tauglich sind. Als technologische Plattform für das kostengünstige *Wafer-Level-Packaging* von oberflächennahen Mikrostrukturen sind sie aufgrund der hohen Anforderungen an die Fügepartner und der damit verbundenen aufwändigen Prozessierung nicht geeignet.

2.4.2 Waferbondprozesse mit Zwischenschichten

Die auf der Verwendung einer Zwischenschicht basierenden Bondverfahren, die in der Fachliteratur auch unter der Bezeichnung Thermokompressionsbonden zusammengefasst werden, weisen hinsichtlich der Verkapselung von Mikrostrukturen gegenüber den direkten Bondverfahren einige Vorteile auf:

- Die Verfahren sind, mit Ausnahme des Eutektischen Bondens, relativ anspruchslos bezüglich der Oberflächentopografie, der Sauberkeit und der zu bondenden Materialien
- die Zwischenschicht kann strukturiert aufgebracht, bzw. direkt mittels Lithografie strukturiert werden; damit kann der Abstand der Wafer durch die Dicke der Zwischenschicht eingestellt werden und es ist keine Strukturierung der Wafer notwendig
- trotz Erhebungen oder Gräben auf der Waferoberfläche können hermetisch dichte Kavitäten erzeugt werden
- die Prozesstemperaturen sind niedrig und die CMOS-Kompatibilität gewährleistet
- es sind keine speziellen Vorbehandlungen der Waferoberflächen und nicht das Anlegen eines elektrischen Feldes notwendig.

Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Methoden, die verwendeten Zwischenschichten und die wesentlichen Parameter.

Tabelle 2.2: Überblick über angewandte Bondtechniken basierend auf Zwischenschichten

Bondmethode	Material	Temperatur	Bemerkungen
Eutektisches Bonden	Metalle (Au) Lote (Pb/Sn)	363 °C (Si/Au) 183 °C	hohe Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit; große Bondkraft notwendig
Glaslotbonden	Glaspaste	420...500 °C	hoher Flächenbedarf; Auftrag mittels Siebdrucks
Adhesives Bonden mit Polymeren	Epoxidharze BCB Polyimide Fotolacke	100...300 °C	geringe oder keine Hermetizität; niedrige Temperaturen; einfache Strukturierung

Eutektisches Bonden

Das Eutektische Bonden zwischen Silizium und einer Goldschicht auf dem Gegenwafer findet im Bereich der niedrigsten Schmelztemperatur einer Au-Si-Legierung oberhalb 363 °C statt. Die so hergestellte Verbindung ist hermetisch dicht und sehr fest, das Verfahren stellt aber ähnlich hohe Anforderungen an die Waferoberfläche wie Direktbondprozesse. Große Flächen lassen sich nur schwierig bonden und natürliches Oxid auf dem Si-Wafer verhindert eine Bondung [54]. Ein Prozess basierend auf lokaler Erhitzung der Bondflächen auf 410 °C wird von Lin in [55] vorgeschlagen. Die Erhitzung wird durch einen Stromfluss durch die Bondflächen erreicht. Dazu müssen alle Chips einzeln kontaktiert werden. Für Massenfertigungen ist dieses Verfahren nur bedingt geeignet, da eine zuverlässige Kontaktierung über den gesamten Wafer schwierig zu realisieren ist.

Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung eines niedrig schmelzenden Lotes wie beispielsweise einer Pb-Sn-Legierung [56]. In diesem Fall wird die Zwischenschicht auf beide Wafer, also auch auf den Mikrostrukturwafer, aufgebracht. Dafür können eine galvanische Abscheidung oder Siebdruck verwendet werden. Beide Verfahren bedingen einen Schutz der Mikrostrukturen, da diese andernfalls zerstört würden.

Glaslotbonden

Ein in der industriellen Fertigung bereits etabliertes Verfahren zum Verkappen von oberflächennahen Mikrostrukturen ist das Glaslotbonden (auch Glas-Fritte-Bonden). Dabei

wird ein Gemisch aus Glaspartikeln (Glas-Fritte), organischen Bindern und Lösungsmitteln mittels Siebdrucks auf einen Wafer als Rahmenstruktur aufgebracht. Nach dem Austreiben der Lösungsmittel des Binders werden die verbliebenen Glaspartikel aufgeschmolzen, so dass sie eine kompakte Struktur ergeben. Anschließend werden die Wafer unter Druck und bei einer Temperatur zwischen 400 °C und 500 °C miteinander verbondet. Die Parameter hängen stark von der verwendeten Glaspaste ab, die kommerziell (z. B. *Ferro Corporation* oder *Schott AG*) erhältlich ist [57].

Die Oberflächenbeschaffenheit der Bondpartner bezüglich Material, Rauigkeit und Partikeldichte /-größe spielt eine untergeordnete Rolle für eine zuverlässige Bondung. Leitbahnen können durch den Bondrahmen durchgeführt und tiefe Gräben, wie bei der SCREAM-Technologie, können zuverlässig verkapselt werden. Die Dichtheit von mittels Glaslots gebondeten Kavitäten wurde hinreichend nachgewiesen [58]. Das Glaslotbenden erfüllt damit die Anforderungen, um oberflächennahe Mikrostrukturen hermetisch zu verkapseln, auch wenn die benötigte Prozesstemperatur in einigen Fällen (z. B. Integration mit Mikroelektronik) kritisch sein kann.

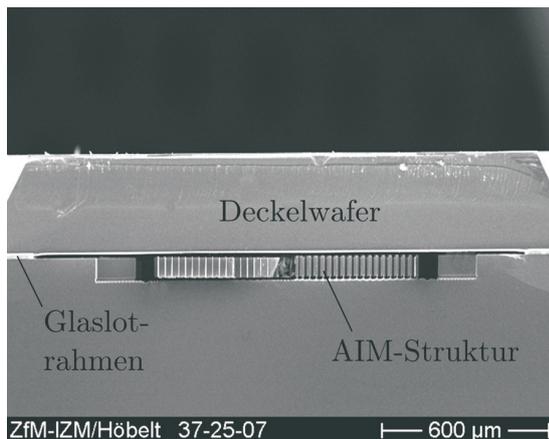


Abbildung 2.16: REM-Aufnahme des Querschnitts einer mittels Glaslotbenden verkapselten AIM-Struktur

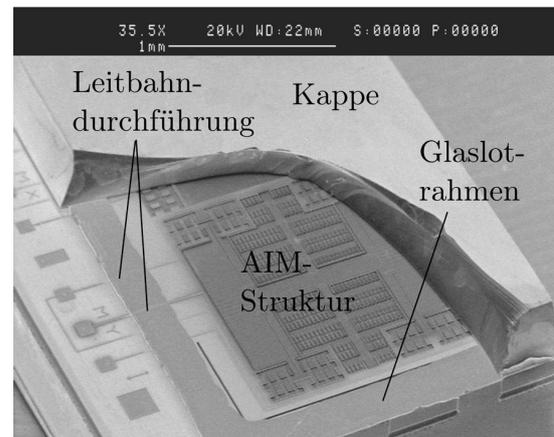


Abbildung 2.17: REM-Aufnahme eines geöffneten, mittels Glaslotbenden verkapselten AIM-Inertialsensors

In der Vergangenheit wurden oberflächennahe Mikrostrukturen, wie z. B. Inertialsensoren, die in SCREAM- und in AIM-Technologie hergestellt worden sind, mittels Glaslotbenden hermetisch verschlossen (s. Abb. 2.16 und 2.17). Der wesentliche Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch der hohe Flächenbedarf für den Bondrahmen. Ein Grund dafür ist der Auftrag und die Strukturierung der Paste mittels Siebdruck. Die zu erreichenden Strukturabmessungen sind durch die Maschengröße des Siebes auf ca. 200 µm begrenzt. Außerdem ist die Positioniergenauigkeit nicht mit lithografischen Prozessen vergleichbar. Eine Alternative zum Siebdruck ist derzeit aber nicht absehbar [59]. Ein weiterer Grund

für den hohen Flächenbedarf ist die Verbreiterung der Lotstege durch den Druck der während des Bondens auf die Glasschmelze wirkt. Da ein hoher Flächenbedarf in der Mikrotechnologie immer höhere Kosten bedeutet, stellt sich die Frage nach alternativen Methoden.

Adhäsives Bonden mittels Polymeren

Dieses Verfahren ermöglicht das Fügen von unterschiedlichen Materialien bei niedrigen Temperaturen von unter 200 °C. Außerdem ist es weniger stör anfällig gegenüber Partikeln oder Unebenheiten als Direktbondverfahren oder das Eutektische Bonden. Die Materialien sind in der Halbleitertechnologie etabliert, der Auftrag erfolgt durch Aufschleudern (*Spin-Coating*) und die Strukturierung wird direkt (fotostrukturierbare Polymere) oder indirekt (Trockenätzen) mittels Lithografie realisiert. Damit liegen die möglichen Geometrieabmessungen und Toleranzen im Bereich der Mikrostrukturen. Die Dicke der Schichten ist variabel und Stufen können überdeckt oder eingeebnet werden [60]. Ein bedeutender Nachteil gegenüber Glas und Metallen ist die höhere Permeabilität gegenüber Gas- und Wassermolekülen, wie es in Abbildung 2.5 auf Seite 31 zu sehen ist.

Das Funktionsprinzip basiert auf der Benetzung der Waferoberfläche mit einer Flüssigkeit und der damit verbundenen Planarisierung der rauen Oberfläche. Die Atome oder Moleküle der beiden Fügepartner und der Zwischenschicht werden in ausreichend nahen Abstand gebracht, so dass die Adhäsionskräfte wirken können. Wichtig ist dabei eine gute Benetzung der Waferoberfläche. Diese wird erreicht, wenn die Oberflächenenergie der Flüssigkeit niedriger ist, als die des zu benetzenden Substrates [61].

Als Bondzwischen-schicht wurden mittlerweile sehr unterschiedliche organische Materialien wie Negativlacke, Epoxydharze, Polyimide und *Spin-On-CF*-Polymere untersucht [62, 63]. Dabei ist für die Anwendung als Verkappungsverfahren eine selektive Bondung mittels der strukturierten Zwischenschicht eine entscheidende Voraussetzung. Für diesen Zweck haben sich vor allem Bencocyclobutene (BCB) [64] und der Negativlack SU-8 [65] als besonders geeignet herausgestellt. Beide haben hervorragende chemische, mechanische und elektrische Eigenschaften und die Erzeugung fester Bondverbindungen ist auch nach der Fotostrukturierung noch gegeben. Am Zentrum für Mikrotechnologien wurde ein Bondprozess unter Verwendung von SU-8 entwickelt, mit dem SCREAM-Sensoren verkappert wurden [66]. Abbildung 2.18 zeigt eine REM-Aufnahme des Querschnitts durch einen solchen Sensor, Abbildung 2.19 zeigt die Draufsicht auf einen verkapperten Chip. In beiden Aufnahmen kann man erkennen, wie das SU-8 die Isolationsgräben abdeckt und somit eine Kontaktierung der Bondpads durch Öffnungen im Deckelwafer zulässt. Johnson und Nagale verzichten auf den Deckelwafer und verwenden ausschließlich SU-8

als Kappe [67]. Die Kappenstruktur wird dazu auf einem separaten Wafer prozessiert und mittels adhesiven Bondens auf den Strukturwafer transferiert.

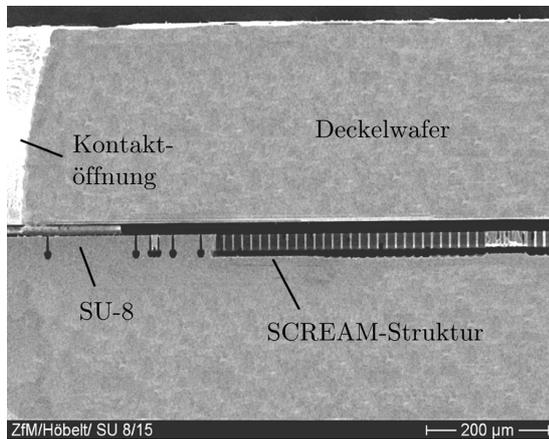


Abbildung 2.18: REM-Aufnahme des Querschnitts durch einen mittels SU-8-Bonden verkappten Inertialsensors in SCREAM-Technologie

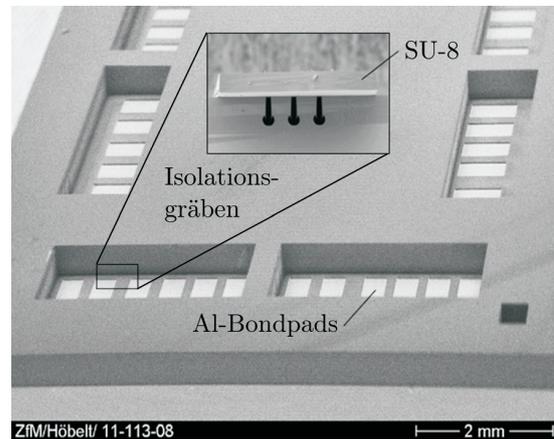


Abbildung 2.19: Draufsicht auf einen verkappten SCREAM-Chip, bei dem die Isolationsgräben zwischen den Bondpads durch SU-8 verschlossen werden

Mit beiden Varianten wird ein ausreichender Schutz vor Flüssigkeiten und Partikeln gewährleistet. Ein hermetisch dichter Verschluss der Kavitäten wird damit jedoch nicht erreicht. Die Verwendung von BCB als Zwischenschicht führt ebenfalls nicht zu hermetisch dichten Verbindungen [68]. Um dennoch gasdichte Verkappungen zu realisieren, besteht die Möglichkeit eine Diffusionsbarriere über die Kappe abzuscheiden, so wie es Oberhammer in [69] mittels Siliziumnitrid vorschlägt. In Abbildung 2.20 ist das Prinzip dargestellt. Dazu muss die Kappe aber umlaufend zurückgedünnt werden, damit die Zwischenschicht zwischen Strukturwafer und Deckelwafer von der Barriere abgedeckt wird. Das ist mit zusätzlichem Aufwand verbunden und auch nicht in jedem Fall möglich.

Die Bondverfahren mit Verwendung einer Zwischenschicht, besonders das Glaslotbonds und das Adhäsive Bonds sind aus technologischer Sicht geeignet, oberflächennahe Mikrostrukturen zu verkappen, sie weisen aber auch spezifische Nachteile auf, wodurch alternative Methoden notwendig werden. In erster Linie sind sie – wie auch die direkten Bondverfahren – kostenintensiv, da ein zweites Substrat prozessiert werden muss. Der Bondrahmen ist aus technologischen Gründen meist größer als für die Dichtigkeit der Verbindung notwendig, und vergrößert somit die notwendige Chipfläche ohne zusätzlichen Nutzen. Polymere als Zwischenschicht benötigen außerdem eine zusätzliche Diffusionsbarriere, um hermetisch dichte Kavitäten zu erzeugen.

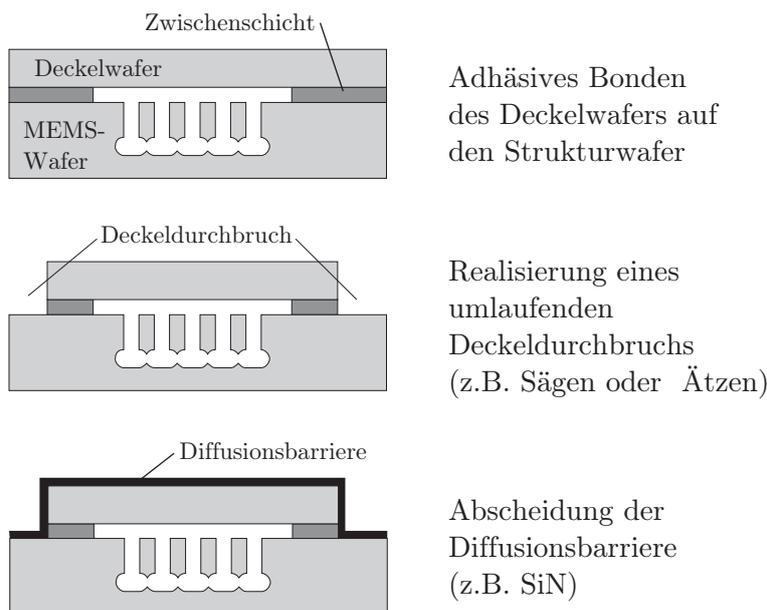


Abbildung 2.20: Schematischer Ablauf zum hermetischen Verschluss einer mittels Adhäsiven Bondens erzeugten Kavität

2.5 Integrierte Verkappungsverfahren

Ein völlig anderer Ansatz als das Aufbringen eines massiven Deckels durch Waferbonden ist die Integration der Verkappungsprozesse in die Technologie zur Herstellung der oberflächennahen Mikrostrukturen, das so genannte *Thin-Film-Encapsulation* (TFE, zu deutsch Dünnschichtverkappung). Bei diesen Verkappungsverfahren kommen ausschließlich Schichtabscheidungs- und Strukturierungsprozesse zum Einsatz, ohne die Verwendung zusätzlicher Substrate. Die schützende Kappe besteht aus einer oder mehreren dünnen Schichten, die sich wie eine Kuppel über die Mikrostrukturen spannen. Das Grundprinzip ist in Abbildung 2.21 illustriert.

Drei grundlegende Teilschritte liegen diesen Technologien zugrunde. Zur Erzeugung der Kavität zwischen den Nutzstrukturen und der Dünnschichtkappe wird zuerst eine Opferschicht aufgetragen und strukturiert. Diese Opferschicht muss die Gräben der Mikrostrukturen verschließen und eine möglichst ebene Oberfläche bilden, auf der dann nachfolgend eine Membranschicht abgeschieden wird. Diese Schicht wird strukturiert um Ätzöffnungen in lateraler (Abb. 2.21a) oder vertikaler (Abb. 2.21b) Richtung zu realisieren. Durch diese Öffnungen hindurch wird die Opferschicht entfernt. Abschließend wird durch eine dritte Schichtabscheidung die Dünnschichtkappe hermetisch verschlossen. Der dabei eingeschlossene Innendruck in der Kavität hängt sehr stark vom Prozessdruck während des Verschlussprozesses ab.

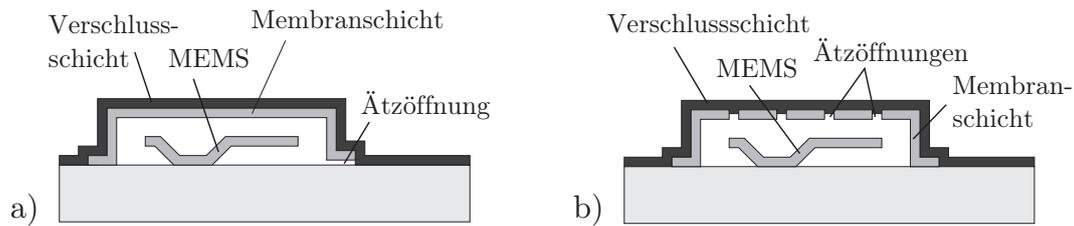


Abbildung 2.21: Prinzipdarstellung von Dünnschichtpackages a) mit lateralen Ätzöffnungen; b) mit vertikalen Ätzöffnungen

Wie die Bezeichnung „integrierte Verkappungsverfahren“ bereits deutlich macht, kommen diese sehr technologiespezifisch zum Einsatz, da die Technologien zur Herstellung der oberflächennahen Mikrostrukturen unterschiedliche Teilprozesse und Materialien bedingen. So bietet sich bei Opferschichtverfahren wie SOI oder Polysiliziumtechnologie die Verwendung des Opferoxids auch für die Verkappungstechnologie an. Bei Verfahren der oberflächennahen Volumenmikromechanik, bei denen bereits vor der Verkappung die Metallisierung notwendig ist, kann Siliziumdioxid dagegen nicht verwendet werden, da eine selektive Entfernung nicht möglich wäre. Aufgrund dieser technologiespezifischen Eigenheiten entstehen zum Teil hohe Entwicklungskosten. Deshalb zielen die integrierten, auf Schichtabscheidung basierenden Verkappungsverfahren in erster Linie auf die Massenproduktion von MEMS ab, bei denen auf Grund der hohen Stückzahl die Entwicklungskosten durch die verringerten Produktionskosten wieder erwirtschaftet werden können.

Im Folgenden werden verschiedene, aus der Fachliteratur bekannte und zum Teil bereits industriell eingesetzte Verkappungstechnologien für oberflächennahe Mikrostrukturen beschrieben. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der möglichen Integration in unterschiedliche oberflächennahe Mikrotechnologien, insbesondere zur Herstellung von HARMS wie AIM oder SCREAM, aus der die Notwendigkeit der in dieser Arbeit beschriebenen Technologie abgeleitet werden kann.

2.5.1 Dünnschichtverkappung mittels Gasphasenabscheidung

Für die integrierte Verkappung von oberflächenmikromechanischen Bauelementen, die mittels Opferschichttechnologien hergestellt wurde, bietet sich, wie bereits angesprochen, die Verwendung des Opferoxids für die Erzeugung der Kavität an. Bereits 1984 stellten Guckel und Burns eine Technologie zur Erzeugung von vakuumdichten Kavitäten vor [70], die auf der Abscheidung einer Polysiliziumkappe über einer SiO_2 -Opferschicht und deren späterer Herauslösung durch Ätzkanäle beruhte. Diese Technologie diente damals zwar nicht vordergründig dem WLP sondern der Erzeugung der mikromechanischen Komponente, viele Technologien lassen sich aber auf diesen Ansatz zurückführen.

Silizium - Membran

Die integrierte Verkappung innerhalb einer SOI-Technologie, deren Prozessablauf in Abbildung 2.22 zu sehen ist, stellte Partridge [71] vor. Nach der Übertragung der Strukturen in das Silizium mittels anisotropen Siliziumätzens wird in diesem Fall, statt der Opferschichtätzung, eine weitere Oxidschicht mittels Niederdruck-CVD (LPCVD) abgeschieden und damit die Mikrostrukturen überdeckt sowie die spätere Kavität definiert. Nach deren Strukturierung wird Silizium mit einer Dicke $>20\ \mu\text{m}$ epitaktisch aufgebracht. Über der Opferschicht wächst dabei Polysilizium und über den Siliziumbereichen einkristallines Silizium auf. Diese Schicht stellt die spätere Mikrokappe dar. Nach der Planarisierung mit CMP werden Löcher in das Silizium geätzt, um Öffnungen zu schaffen, durch die das Siliziumoxid entfernt werden kann und um die elektrische Kontaktierung durch die Kappe hindurch zu gewährleisten. Für die Opferschichtätzung wird gasförmige Flußsäure verwendet, um das bereits erwähnte Kleben zu vermeiden. Der Verschluss der Ätzöffnungen erfolgt wiederum mittels LPCVD-SiO₂. Abschließend wird diese Verschlusschicht strukturiert, um die Mikrostrukturen mittels Aluminiumpads zu kontaktieren. Der in den Kavitäten eingeschlossene Innendruck von 700 Pa wurde mittels Gütemessung an Resonatoren bestimmt.

Der prinzipiell gleiche Prozessablauf wird in [72] in Kombination mit einer Polysilizium-Technologie angewandt. Es werden abwechselnd Polysilizium und Siliziumdioxid abgeschieden, und so die Leitbahnebene, die Mikrostrukturenschicht, die Dünnschichtkappe und die beiden Opferschichten erzeugt. Auch in diesem Fall wird das Siliziumdioxid mittels HF-Gasphasenätzung herausgelöst. Im Unterschied zu der SOI-Variante wird optional eine auf Titan basierende Getterschicht auf die oberste Polysiliziumschicht aufgebracht und als Verschlusschicht eine Aluminiumlegierung verwendet. Neben dem Verschluss der Ätzöffnungen wird so gleichzeitig die Kontaktierung realisiert.

R. Aigner demonstriert in [73] eine CMOS-kompatible integrierte Verkappungstechnologie auf der Basis von Siliziumoxid als Opferschicht und Polysilizium als struktureller Schicht. Die Prozessabfolge bis zur Strukturierung der Membranschicht entspricht den bereits vorgestellten Verfahren. Als Verschlusschicht für die Ätzöffnungen dienen die dielektrischen Passivierungsschichten des verwendeten BiCMOS-Prozesses. Nachdem die Kavitäten verschlossen sind, erfolgt das *Backend-Processing*, d.h. das Metallisierungssystem für die Mikroelektronik und die Kontakte für die Mikromechanik werden strukturiert und nach außen geführt.

Trotz der demonstrierten CMOS-Kompatibilität können diese Schichtsysteme nicht für die integrierte Verkappung von opferschichtfrei hergestellten oberflächennahen Mikrostrukturen verwendet werden. Neben den teilweise zu hohen Prozesstemperaturen

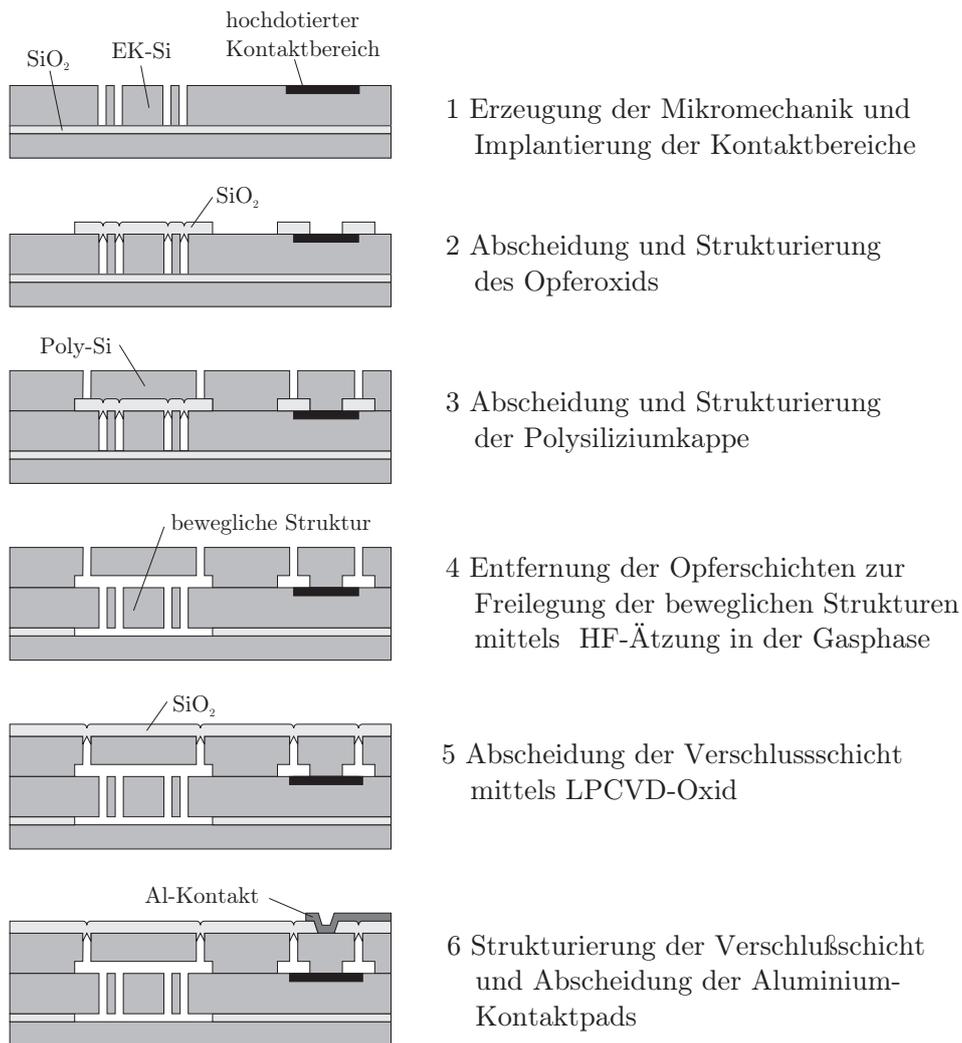


Abbildung 2.22: Prozessablauf der auf epitaktisch aufgewachsenem Polysilizium basierenden Verkappungstechnologie für SOI-Mikrostrukturen [71]

(Gasphasenepitaxie, LPCVD) ist das Ausschlusskriterium die Entfernung des Siliziumdioxids. Bei allen drei in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten opferschichtfreien Technologien sind sowohl Siliziumoxid als auch Metalle (Aluminium) integrale Bestandteile der Mikrostrukturen. Eine selektive Entfernung der Opferschicht ist damit nicht möglich.

Siliziumnitrid - Membran

Eine weitere Möglichkeit der integrierten Verkappung von mikromechanischen Komponenten unter Verwendung von Siliziumdioxid als Opferschicht ist die Abscheidung von Siliziumnitrid als Material für die Dünnschichtkappe. Erstmals wurde diese Technik in [74] zur vakuumdichten Einhüllung eines Glühdrahtes aus Polysilizium vorgestellt. Die Anwendung dieser Technologie zur Verkappung einer mikromechanischen Resonatorstruk-

tur aus Polysilizium wird in [75] gezeigt. Der verwendete Prozessablauf ist in Abbildung 2.23 dargestellt. Nach der Trockenätzung des strukturellen Polysiliziums wird, statt der nun folgenden Opferschichtätzung, SiO_2 (z. B. $7\ \mu\text{m}$) mittels LPCVD abgeschieden und dabei die mikromechanische Struktur überdeckt. Die spätere Kavität wird durch eine Ätzung des Opferoxids in gepufferter Flusssäure definiert. Zur Erzeugung von flachen Ätzkanälen, die den Zugang des Ätzmediums an die Opferschicht gewährleisten, wird eine weitere dünne Opferoxidschicht (z. B. $1\ \mu\text{m}$) aufgebracht und ebenfalls strukturiert. Über diesen Schichtstapel wird spannungsarmes Siliziumnitrid mittels LPCVD abgeschieden und die Eintrittsöffnungen oberhalb der Ätzkanäle durch Trockenätzen realisiert. Die Entfernung des SiO_2 innerhalb der so erzeugten Siliziumnitridkappe erfolgt mit konzentrierter Flusssäure. Zur Vermeidung des Klebens der sensiblen polykristallinen Strukturen wird die superkritische Trocknung mittels CO_2 angewandt [29]. Der Verschluss der Eintrittsöffnungen erfolgt durch die Abscheidung einer weiteren spannungsarmen Siliziumnitridschicht bei ca. 40 Pa.

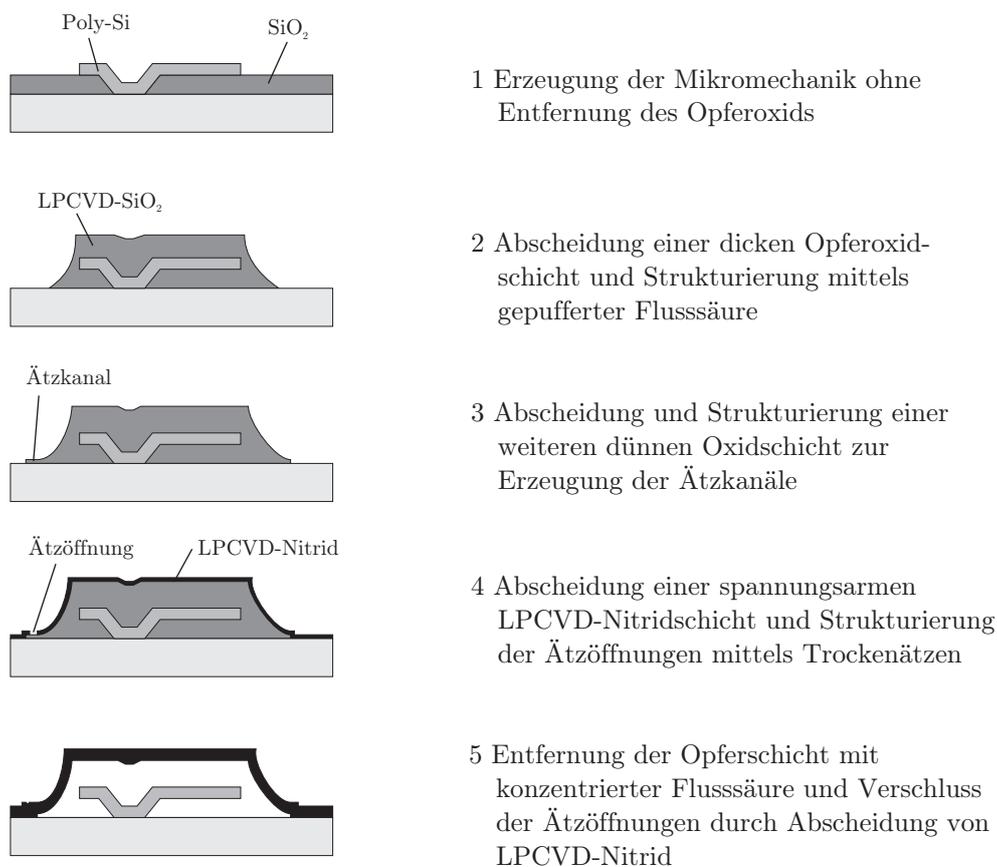


Abbildung 2.23: Prozessablauf der Verkappungstechnologie für Polysilizium-Mikrostrukturen basierend auf einer Siliziumnitridkappe nach [75]

Ein Nachteil dieser Technologievariante ist das Eindringen des Prozessgases während der LPCVD durch die Ätzkanäle, wodurch die Mikrostruktur mit Siliziumnitrid bedeckt wird. Wenn statt der LPCVD eine PECVD für die Nitridabscheidung verwendet wird, verringert sich dieses Problem aufgrund der günstigeren Abscheidecharakteristik. Die beschriebenen Probleme bei der Anwendung auf opferschichtfreie Mikrotechnologien aufgrund des Siliziumdioxids als Opferschicht und der hohen Prozesstemperaturen gelten für dieses Verfahren genauso, wie für die Verfahren mit Silizium als Kappenmaterial.

Poröse Membranen

Die Erzeugung der Ätzzugangsöffnungen wird in den bisher vorgestellten Technologien mittels Lithografie und anschließendem Trockenätzen realisiert. Dabei ergibt sich die Möglichkeit der Herstellung von seitlichen Ätzöffnungen oder vertikalen Ätzöffnungen, die sich nur am Rand der Membran befinden. Beide bedingen eine lange Ätzzeit. Die Verwendung von vertikalen Ätzöffnungen, die über die gesamte Membran verteilt sind, hat den Nachteil, dass bei der Abscheidung der Verschlussschicht auch Material auf den Mikrostrukturen abgeschieden wird. Um das zu umgehen, kann eine poröse Membran auf die Opferschicht aufgebracht werden, durch die das Ätzmedium zur Opferschicht gelangt, ohne jedoch eine Abscheidung von Material auf den Mikrostrukturen während des Verschlusses der Membran zuzulassen.

Die Verwendung einer dünnen (130-190 nm) undotierten oder in situ dotierten Polysiliziummembran, die durchlässig für HF ist, schlägt Lebouitz in [76] vor. Dazu werden in eine spannungsarme LPCVD-Nitridmembran Öffnungen geätzt, die mit dem porösen Polysilizium bedeckt sind. Die Nitridmembran ist dabei die mechanisch tragende Schicht. Durch diese Öffnungen wird das Opferoxid mit HF entfernt und die poröse Schicht mit Siliziumnitrid verschlossen.

Um das poröse Polysilizium als tragende Schicht zu verwenden, muss die Schichtdicke stark erhöht werden. Eine Durchlässigkeit für die Flusssäure ist dann nicht mehr gegeben. Durch ein elektrochemisches Ätzen können jedoch gezielt vertikale Poren in das Silizium eingebracht und das darunter liegende Opferoxid mittels HF herausgeätzt werden [77].

Die Verwendung von porösen Membranen stellt eine interessante Alternative zur direkten Strukturierung von Ätzöffnungen bei der integrierten Verkappung von opferschichtbasierten Mikrostrukturen dar. Für die Mikrostrukturen der oberflächennahen Volumemikromechanik muss aus den bereits genannten Gründen eine andere Opferschicht als Siliziumoxid gefunden werden.

2.5.2 Dünnschichtverkappung mittels galvanischer Abscheidung

Die integrierte Verkappung von Oberflächenmikrostrukturen durch galvanisch abgeschiedene Schichten ermöglicht die Verwendung von organischen Opferschichten (z. B. Fotolacke), da die Prozesstemperaturen ausreichend niedrig sind. In [78] wird eine Technologie unter Verwendung von galvanisch abgeschiedenem Gold zur Erzeugung von selbsttragenden Schichten vorgestellt. Die Entfernung des als Opferschicht dienenden Fotolackes erfolgt nasschemisch mit Aceton. Die Ätzöffnungen werden mit dem Fotolack AZ4562 von *Clariant* verschlossen. Neben dem nichthermetischen Verschluss durch den Fotolack, ist die Lackentfernung mit Aceton problematisch, da die Gefahr des Klebens der Mikrostrukturen besteht.

Eine integrierte vakuumdichte Verkappungstechnologie mit galvanisch abgeschiedenem Nickel als Membranschicht und zwei alternativen Verschlussstechniken wird in [79] vorgestellt. Um die Ätzöffnungen mit einer Dünnschichtabscheidung verschließen zu können (Abb. 2.24 a), werden seitliche Ätzkanäle durch einen Al/Cr-Stapel definiert. Als Opferschicht wird Fotolack verwendet, der über die Mikrostrukturen aufgebracht wird. Nach dem Sputtern einer Startschicht und der Strukturierung einer zweiten Lackebene, wird das Nickel galvanisch aufgewachsen und durch die Lackebene additiv strukturiert. Der Lack, die Startschicht und das Aluminium werden nacheinander entfernt, so dass die seitlichen Ätzöffnungen den Zugang zum Inneren der Kavität freigeben. Der Opferlack und das Opfersilizium unter den Mikrostrukturen werden mittels TMAH herausgelöst. Die Ätzöffnungen werden durch das Sputtern einer Goldstartschicht und die anschließende Goldgalvanik verschlossen.

Diese Technik ist aufgrund der zusätzlichen Aluminiumschicht schwierig zu integrieren und die dünnen Ätzöffnungen erschweren die Freitäzung der Kavität. Große Ätzöffnungen im Bereich der Dicke der Opferschicht sind verhältnismäßig einfach zu erzeugen. Sie erleichtern das Entfernen der Opferschicht, aber der Verschluss kann nicht mit Dünnschichtverfahren erfolgen (Abb. 2.24 b). Vorgeschlagen wird deshalb die Verwendung eines niedrigschmelzenden Lotes, das auf die Dünnschichtkappe aufgedruckt und in kontrollierter Atmosphäre geschmolzen wird. In diesem Fall wird der Opferlack direkt auf die Mikrostruktur aufgebracht, die Startschicht aufgedampft und strukturiert und über eine Lackmaske das Nickel galvanisch abgeschieden. Dabei bleibt die Opferschicht an einigen Stellen seitlich geöffnet, so dass Ätzöffnungen über die gesamte Dicke der Opferschicht (8 μm) entstehen. Der Opferlack und das Silizium unter den Mikrostrukturen werden mit TMAH entfernt, dabei wird eine superkritische Trocknung in CO_2 angewandt. Das Lot (63 Sn/37 Pb) wird mit Schablonendruck aufgetragen und in einer Vakuumkammer geschmolzen so dass die gesamte Mikrokappe bedeckt wird.

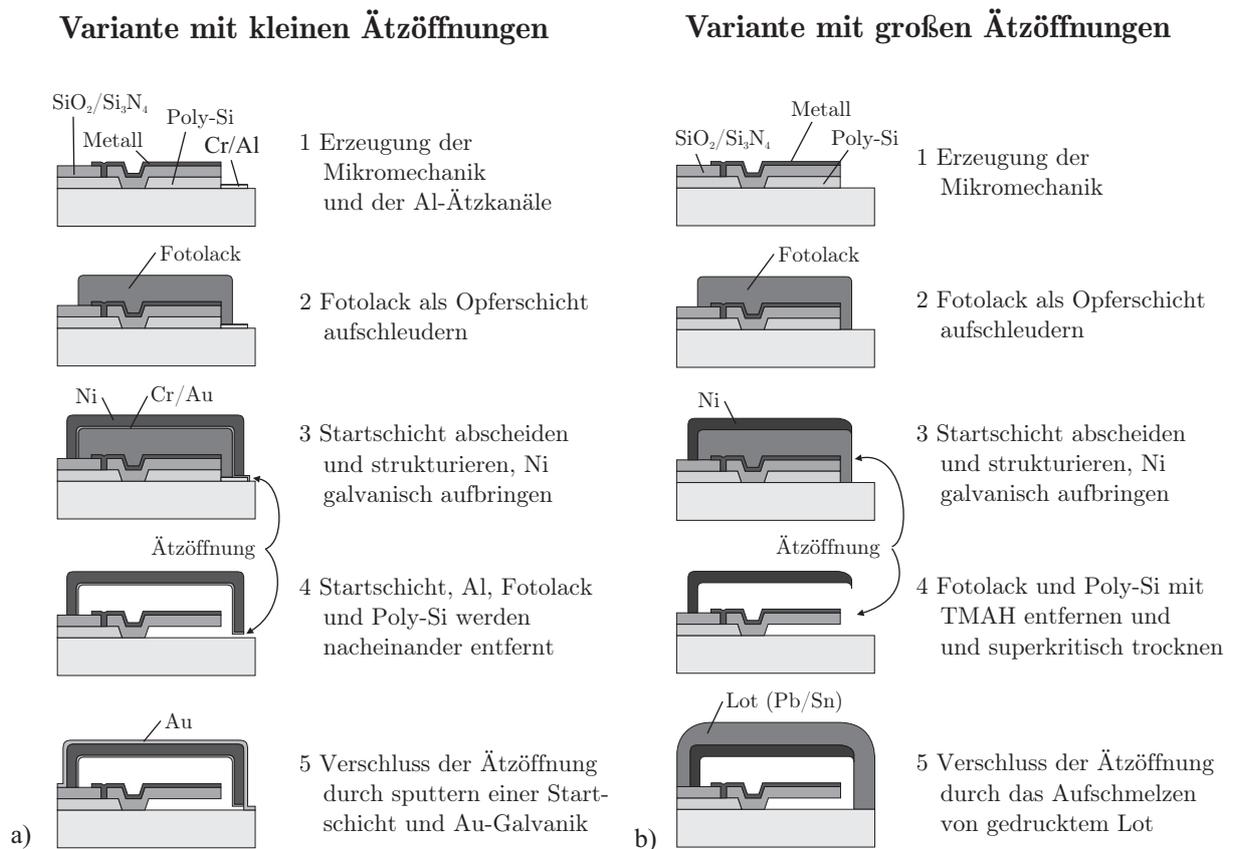


Abbildung 2.24: Prozessablauf der Dünnschichtverkappung mittels Nickelgalvanik a) mit kleinen Ätzöffnungen und Verschluss durch dünne Schichten (Sputtern und Galvanik) b) mit großen Ätzöffnungen und Verschluss durch Lotschmelze [79]

Die galvanische Abscheidung einer Membran in Verbindung mit einer organischen Opferschicht ist ein aussichtsreicher Technologieansatz zur hermetischen Verkappung oberflächennaher Mikrostrukturen. Die Prozesstemperaturen sind niedrig und die Opferschicht lässt sich selektiv zu den Mikrostrukturen entfernen. Es bleibt aber offen, wie bereits freigelegte Strukturen der oberflächennahen Volumenmikromechanik mit einer organischen Schicht homogen bedeckt werden können, ohne diese zu zerstören.

2.5.3 Polymerbasierte Dünnschichtkappen

Die auf Polymeren basierenden integrierten Verkappungsverfahren verwenden nicht nur für die Opferschicht organisches Material, sondern auch für die selbsttragende Kappe. Der Negativlack SU-8, der bereits in Abschnitt 2.4.2 als Material zum adhäsiven Waferbonden angesprochen wurde, eignet sich aufgrund seiner mechanischen Stabilität, der chemischen Widerstandsfähigkeit und der Tatsache, dass er fotostrukturierbar ist, für die Verwendung

als strukturelle Schicht. Das Patent [80] beschreibt eine Technologie zum Verkappen von *Bulk-Acoustic-Wave*-Filtern auf Basis von SU-8 (Abb. 2.25).

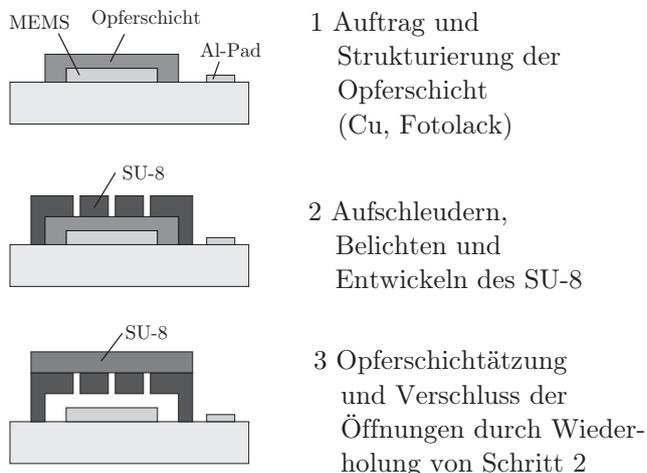


Abbildung 2.25: Schematischer Ablauf der SU-8 Dünnschichtverkappungstechnologie [81]

Als Opferschicht kann im einfachsten Fall Fotolack, aber auch Kupfer oder andere selektiv zu SU-8 zu entfernende Metalle verwendet werden. Die Opferschicht wird, wie bei den anderen integrierten Technologien, auf die Mikrostrukturen aufgetragen, so dass sie diese einhüllt. Das SU-8 wird auf den Wafer aufgeschleudert und so strukturiert, dass eine Kappe mit Öffnungen auf der Oberseite entsteht. Durch diese Öffnungen wird die Opferschicht, im Fall von Fotolack mit Aceton, entfernt. Abschließend wird eine weitere Schicht SU-8 aufgetragen und belichtet, so dass die Öffnungen verschlossen werden. Die Öffnungen

sind dabei so dimensioniert, dass der Negativlack aufgrund seiner hohen Viskosität nicht in die Kavität eindringt. Da die Permeabilität von SU-8 gegenüber Gasen und Feuchtigkeit relativ hoch ist, sind die so hergestellten Verkappungen nicht hermetisch dicht.

Eine Technik, die auf der thermischen Zersetzung des Polymers Unity™ der Firma *Promerus LLC* und der Erzeugung der Kappe aus dem Polymer Avatrel™ der gleichen Firma basiert, hat einen ähnlichen Prozessablauf wie die Technologie mit SU-8 [82]. Im Unterschied dazu werden keine Löcher in der Membran benötigt, da die Opferschicht thermisch zersetzt wird. Die gasförmigen Reaktionsprodukte durchdringen die Kappe und werden so aus der Kavität abtransportiert. Nach der Opferschichtentfernung wird die Polymerkappe durch eine Metallisierung mit Chrom hermetisch verschlossen. Dabei besteht jedoch die Gefahr von Mikrorissen in der Metallschicht aufgrund von Eigenspannungen.

Die polymerbasierten integrierten Verkappungsverfahren, insbesondere die beiden genannten Technologien, sind prozesskompatibel mit den oberflächennahen Mikrotechnologien. Die Temperaturen sind niedrig und die Opferschichtentfernung erfolgt selektiv zu Silizium, Siliziumoxid und Metallen. Die fehlende Hermetizität der SU-8-Technik und die Gefahr von Mikrorissen in der Chromschicht und die damit verbundene Undichtheit der Kappe, schränken diese Verfahren auf Anwendungen, bei denen keine oder nur geringe Hermetizität gefordert ist, ein.

Kapitel 3

Konzeption der integrierten Verkappungstechnologie

3.1 Zusammenfassung der Rahmenbedingungen

Ausgehend von der Aufgabenstellung eine Dünnschichtverkappung für oberflächennahe Mikrostrukturen zu realisieren, wurden zunächst die Rahmenbedingungen für die zu entwickelnde Technologie erarbeitet. Berücksichtigt wurden dabei sowohl fertigungstechnische als auch ökonomische Gesichtspunkte. Die wichtigsten Punkte sind im Folgenden genannt:

- Ziel ist die Verkappung von oberflächennahen Mikrostrukturen, die sowohl auf opferschichtfreien als auch auf opferschichtbehafteten Technologien basieren
- die Erzeugung der Kappe soll mittels Abscheidung dünner Schichten erfolgen
- die Opferschicht muss selektiv zu Silizium, Siliziumoxid, Siliziumnitrid und Aluminium entfernbar sein
- die Prozessführung für alle opferschichtbezogenen Prozesse ist trocken zu realisieren
- die Technologie sollte im Hinblick auf eine monolithische Integration CMOS-kompatibel sein
- die Dünnschichtkappe sollte einen hermetischen Verschluss realisieren
- es wird eine kostengünstige und massenproduktionstaugliche Technologie angestrebt

Die technologischen Anforderungen, die sich aus dem WLP von oberflächennahen Mikrostrukturen sowohl für opferschichtfreie als auch für opferschichtbehaftete Technologien

ergeben, wurden bereits im Abschnitt 2.3 zusammengefasst. Im Gegensatz zu Waferbondverfahren sollen keine zusätzlichen Wafer, sondern mittels Abscheidungsprozessen erzeugte dünne Schichten zur Verkappung der Mikrostrukturen verwendet werden. Dadurch entfällt der technologisch aufwändige und zeitintensive Waferbondprozess. Die Chipfläche kann reduziert werden, da kein umlaufender Bondrahmen benötigt wird, und die Gesamthöhe des Chips kann verkleinert werden.

Die Dünnschichtverkappung von Mikrostrukturen basiert grundsätzlich auf einer Opferschicht als temporärem Abstandshalter zwischen den Strukturen und der Kappe. Da die Opferschichtätzung selektiv zu vielen verschiedenen Materialien, wie z. B. Si, SiO₂, Si₃N₄ und Al, sein muss, bietet sich die Verwendung einer organischen Opferschicht an. Diese kann mittels eines plasmachemischen Sauerstoffprozesses entfernt werden. Dieser Prozess ist hochselektiv und zudem trocken, womit die Gefahr des *stickings* beseitigt wird. Die dabei auftretenden niedrigen Prozesstemperaturen sind eine Basis für die angestrebte CMOS-Kompatibilität der Verkappungstechnologie.

Hervorzuheben ist die Notwendigkeit, im Fall von opferschichtfreien Mikrostrukturen vollständig freigelegte und damit mechanisch bewegliche Elemente zu prozessieren. Der Auftrag der Opferschicht muss folglich mechanisch schonend realisiert werden, um ein Zerstören der beweglichen Strukturen zu vermeiden. Das Aufschleudern oder Sprühbeschichten organischer Opferschichtmaterialien wie Fotolack oder Polyimid kann diese Forderung nicht zuverlässig gewährleisten. Außerdem weisen die Strukturen, insbesondere die Gräben und Löcher, Aspektverhältnisse von bis zu 50:1 auf, was das vollständige Verfüllen dieser Öffnungen erschwert. Der Auftrag der Opferschicht und der Verschluss der Öffnungen sollte deshalb an der Oberfläche der Mikrostrukturen realisiert werden. Aus diesen Gründen wird eine trockenchemische Abscheidung des organischen Materials angestrebt.

Für viele mikromechanische Systeme, insbesondere kapazitive Wandler, ist der Schutz vor Feuchtigkeit und damit der hermetische Verschluss eine zwingende Voraussetzung für eine zuverlässige Wirkungsweise über die gesamte Lebensdauer des Systems. Neben der mechanischen Stabilität der Kappe ist also auch die Dichtheit gegenüber Feuchtigkeit eine grundlegende Forderung. Darüber hinaus kann eine Vakuumdichtheit gefordert sein, wenn ein definierter Druck in der Kavität eingeschlossen werden muss. Die Leckrate muss dann so niedrig sein, dass der eingeschlossene Druck über einen definierten Zeitraum innerhalb geeigneter Toleranzen gehalten werden kann.

Da die oberflächennahen Mikrostrukturen zumeist für eine kostengünstige Massenfertigung konzipiert sind, wird diese auch für die Verkappungstechnologie angestrebt. Das erfordert die Verwendung von hochproduktiven industrietauglichen Anlagen und Standardprozessen. Ein wichtiger Kostenvorteil ist die Vermeidung von Waferbondprozessen.

Darüber hinaus sind eine minimale Anzahl von Lithografieebenen und eine insgesamt möglichst einfache Prozessführung anzustreben.

3.2 Grundkonzept der neuen Verkappungstechnologie

Die neue Verkappungstechnologie basiert wie die bereits in Abschnitt 2.5 vorgestellten integrierten Verkappungsverfahren auf drei Funktionsschichten:

1. einer Opferschicht, mittels derer die Gräben und Öffnungen der Mikrostruktur verschlossen und der Abstand zwischen der Mikrostruktur und der späteren Kappe definiert werden
2. einer darauf abgeschiedenen Membranschicht, die die Grundlage für die spätere Kappe darstellt, und in der Öffnungen für die Entfernung der Opferschicht realisiert werden müssen
3. einer Verschlusschicht, die die Öffnungen in der Membranschicht und damit die Dünnschichtkappe hermetisch verschließt

Abbildung 3.1 stellt schematisch den Schichtaufbau der Verkappungstechnologie dar. Im Gegensatz zu den bekannten Verfahren beruht der neue Ansatz auf der Verwendung eines CF-Polymers als Opferschicht. Die Abscheidung erfolgt mittels PECVD, die anisotrope Strukturierung mittels reaktiven Ionenätzens (RIE) und die isotrope Entfernung unter der Membranschicht mittels chemischen Plasmaätzens, das in der Mikrotechnik zur Plasmalackentfernung (PLE) verwendet wird. Damit sind alle Prozessschritte, bei denen die Mikrostrukturen nicht vollständig bedeckt sind, trockenchemisch realisiert. Außerdem ist ein Höchstmaß an Selektivität bei der Opferschichtätzung gegenüber den gängigsten anorganischen Materialien in der Mikrotechnik gewährleistet.

Aufgrund der hohen Ätzrate des CF-Polymers (1-10 $\mu\text{m}/\text{min}$) bei der Veraschung im Sauerstoffplasma ist eine Anordnung der Ätzzugangsöffnungen in großem Abstand voneinander, und damit außerhalb der Mikrostrukturen, möglich. Abbildung 3.2a) zeigt die Verteilung dieser Öffnungen in engem Raster über die gesamte Fläche der Mikrokappe, wie es bei integrierten Verkappungstechnologien mit Siliziumoxid als Opferschicht notwendig ist. Aufgrund der geringen Ätzrate bei der Entfernung des Siliziumoxids beträgt der Abstand der Löcher in etwa der doppelten Opferschichtdicke. In Abbildung 3.2b) ist die Anordnung der Ätzzugangsöffnungen am Rand der Mikrokappe, und damit außerhalb beweglicher Elemente, dargestellt. Der Abstand der Öffnungen kann aufgrund der

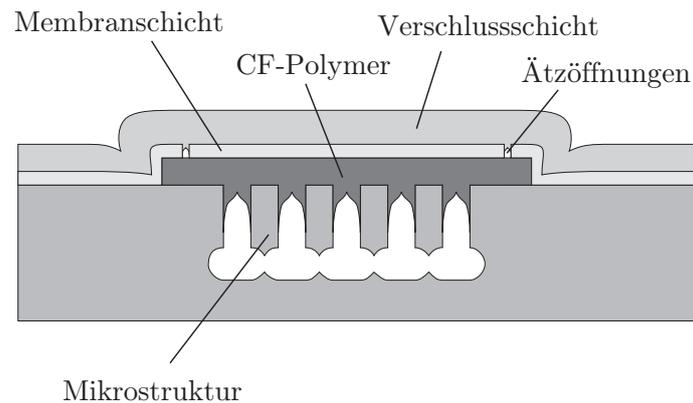


Abbildung 3.1: Darstellung der drei Funktionsschichten die für die Erzeugung der Dünnschichtkappe abgeschieden, strukturiert und gegebenenfalls entfernt werden

hohen Ätzrate von organischen Materialien im Sauerstoffplasma das 10- bis 20-fache der Opferschichtdicke betragen. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber anderen Technologien. Eine Abscheidung von Material durch die Ätzöffnungen während des Verschlussprozesses ist damit unkritisch. Außerdem ist dadurch der negative Einfluss der Ätzöffnungen auf die mechanische Stabilität der Mikrokappe geringer. Die mögliche Temperaturbelastung während der nachfolgenden Prozesse wird durch die Verwendung des Polymers nicht wesentlich herabgesetzt, da es bis zu 400 °C temperaturstabil ist [83].

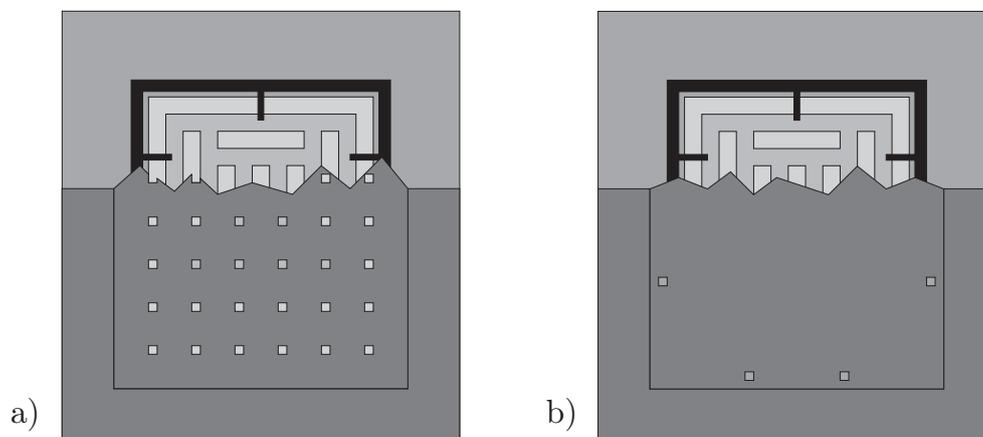


Abbildung 3.2: a) Verteilung der Ätzöffnungen in engem Raster – erforderlich bei geringen Ätzraten der Opferschicht b) Anordnung der Ätzöffnungen am Rand der Membranschicht oberhalb unstrukturierter Gebiete

Für die Erzeugung der Membranschicht kommen sowohl die chemische als auch die physikalische Dampfphasenabscheidung in Frage. Darüber hinaus ist auch die elektrochemische Abscheidung einer Metallschicht, wie z. B. Nickel, anwendbar. Mit diesem Verfahren können wesentlich höhere Schichtdicken als mit den Abscheidungsverfahren aus der Dampfphase erzielt werden. Da während dieses nasschemischen Prozesses die Mikrostrukturen von der

Opferschicht abgedeckt sind, verstößt die Anwendung der elektrochemischen Abscheidung nicht gegen die Vorgabe, die Mikrostrukturen trocken zu prozessieren.

Die Ätzöffnungen können, wie bereits in Abschnitt 2.5 auf Seite 52 dargestellt, lateral oder vertikal in die Membranschicht eingebracht werden. Daraus ergeben sich unterschiedliche Varianten des Verschlussprozesses. Vertikale Öffnungen lassen sich bevorzugt mit Abscheidungen aus der Dampfphase verschließen, während laterale Öffnungen auch durch das Aufschmelzen eines Lotes verschlossen werden können. Letztere Variante hat den Vorteil, dass während des Schmelzprozesses der Druck in der Kavität in einem großen Bereich eingestellt werden kann, was bei CVD- oder PVD-Prozessen nicht möglich ist.

Die Verschlusschicht kann sich aus einer oder mehreren Teilschichten zusammensetzen. Die Kriterien für die Materialauswahl sind dabei die Dichtheit der Kappe und die resultierenden mechanischen Spannungen im Schichtstapel. Eine Charakterisierung hinsichtlich dieser Eigenschaften ist, neben der Untersuchung der Beständigkeit gegenüber Druck- und Temperaturbelastungen, für die Beurteilung der Technologie sehr wichtig.

3.3 Anforderungen an die Funktionsschichten

Aus den Anforderungen an die Verkappungstechnologie und die Eigenschaften der Dünnschichtkappe lassen sich Anforderungen an die einzelnen Funktionsschichten ableiten. Diese differenzierte Betrachtung ist wichtig – sowohl für die Auswahl und Optimierung der Teilprozesse als auch für die Integration der Prozesse in die Gesamttechnologie – da sich daraus Anforderungen an die jeweiligen Materialeigenschaften ergeben. Zum Teil werden bereits angesprochene Fakten zusammengefasst, zum Teil ergeben sich aber auch einzelne Forderungen neu aus der Wahl eines Materials bzw. eines Prozesses.

3.3.1 Anforderungen an die Opferschicht

Die Anforderungen an die Opferschicht sind:

- mechanisch schonender Auftrag auf die teilweise beweglichen Mikrostrukturen
- Abscheidetemperatur unter 450 °C
- Verschluss sämtlicher Öffnungen in der Mikrostruktur
- trockenchemische Entfernung
- selektive Entfernung gegenüber Silizium, Siliziumoxid und Aluminium

Die einzelnen Punkte wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten angesprochen und erläutert. Durch die Verwendung eines mittels PECVD abgeschiedenen organischen Materials werden diese Forderungen in hohem Maße erfüllt. Das verwendete CF-Polymer ermöglicht darüber hinaus nachfolgende Prozesstemperaturen bis zu 400 °C aufgrund der für ein Polymer relativ hohen Temperaturstabilität.

3.3.2 Anforderungen an die Membranschicht

Die Anforderungen an die Membranschicht lauten:

- Abscheidetemperatur maximal 400 °C
- möglichst konforme Abscheidecharakteristik
- hochauflösende Strukturierung der Schicht (für vertikale Ätzöffnungen)
- hohe Haftfestigkeit auf dem Untergrund
- geringe mechanische Spannungen in der Schicht
- Resistenz gegenüber den Ätzprodukten der Opferschichtätzung (fluorhaltige Verbindungen)
- mechanische Stabilität

Aus der Verwendung des CF-Polymers als Opferschicht ergeben sich für die Membranschicht die maximale Abscheidetemperatur von 400 °C und die Forderung nach chemischer Resistenz gegenüber den fluorhaltigen Ätzprodukten der Opferschichtätzung. Aus diesem Grund scheidet z. B. Siliziumnitrid als Membranmaterial aus, obwohl es aufgrund seiner günstigen mechanischen Eigenschaften gut geeignet wäre.

Eine ausreichend konforme Abscheidecharakteristik ist wichtig, um stabile vertikale Seitenwände zu realisieren. Bezüglich der mechanischen Stabilität sind weiterhin eine hohe Haftfestigkeit auf dem Untergrund und möglichst geringe Schichtspannungen anzustreben. Neben dem verwendeten Material hat auch die mögliche Schichtdicke einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Membranschicht.

Für die Integration vertikaler Ätzöffnungen ist eine hochauflösende anisotrope Strukturierung der Membranschicht notwendig, da sich der Durchmesser der Ätzöffnungen sowohl auf die notwendige Dicke der Verschlusschicht, als auch auf die Menge des durch die Öffnungen abgeschiedenen Materials auswirkt. Zu berücksichtigen ist dabei der Einfluss des Lochdurchmessers auf die Ätzrate der Opferschicht.

3.3.3 Anforderungen an die Verschlussschicht

Für die Verschlussschicht ergeben sich die folgenden Anforderungen:

- Abscheidetemperatur maximal 450 °C
- Abscheidecharakteristik mit nicht konformer Stufenüberdeckung
- hohe Haftfestigkeit auf der Membranschicht
- geringer Eintrag mechanischer Spannungen
- hohe mechanische Stabilität
- hohe Hermetizität

Um möglichst wenig Material innerhalb der Kavität, insbesondere auf den Mikrostrukturen, abzuscheiden, wird eine nichtkonforme Stufenüberdeckung durch den Abscheidungsprozess angestrebt. Dafür eignen sich sowohl PECVD- als auch PVD-Prozesse. Die Schicht sollte eine gute Haftung zum Untergrund aufweisen und nur geringe mechanische Spannungen in den Schichtstapel eintragen. Von großer Bedeutung ist eine geringe Permeabilität gegenüber Feuchtigkeit, um die Hermetizität der Dünnschichtkappe zu erzielen.

3.4 Realisierte Technologievarianten

Basierend auf der Grundidee ein Polymer als Opferschicht zu verwenden, wurden zwei unterschiedliche Technologievarianten zur Erzeugung der Dünnschichtkappe untersucht und hinsichtlich der technologischen Realisierbarkeit sowie der anwendungsbezogenen Anforderungen bewertet. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Varianten liegt in der Realisierung der Membranschicht. Eine durchgängig trockenchemisch prozessierte Variante stützt sich im Wesentlichen für alle drei Funktionsschichten auf PECVD-Prozesse. Bei der zweiten Technologievariante wird dagegen für die Realisierung der Membranschicht die elektrochemische Abscheidung von Nickel verwendet. Der Verschluss der Kavität kann mittels eines PECVD- oder eines PVD-Prozesses erfolgen. Beide Technologievarianten sind als konkurrierende Ansätze zu betrachten.

Unabhängig von der technologischen Realisierung der Dünnschichtkappe kann der Verschluss der Kavität auch durch einen *Reflow*-Prozess realisiert werden. Neben den vertikalen Ätzöffnungen werden dann zusätzlich laterale Öffnungen in der Dünnschichtkappe

generiert. Die vertikalen Öffnungen dienen weiterhin der Opferschichtentfernung und werden mit der Verschlusschicht abgedeckt. Die lateralen Öffnungen – und damit die Kavität der Dünnschichtkappe – werden anschließend durch den *Reflow*-Prozess unter kontrollierter Atmosphäre verschlossen. Damit kann der Innendruck der Kavität unabhängig vom Prozessdruck während des Verschlusses der Ätzöffnungen eingestellt werden. Diese Verschlussvariante wurde von B. Stark [79] bereits erfolgreich demonstriert und ist deshalb kein Gegenstand dieser Arbeit.

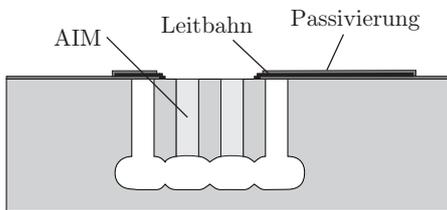
3.4.1 Technologievariante A auf Basis von PECVD-Prozessen

Der Prozessablauf dieser Technologievariante ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Ausgehend von einem Wafer mit fertig prozessierten Mikrostrukturen wird das CF-Polymer mittels PECVD ganzflächig abgeschieden. Alle Öffnungen der Mikrostruktur werden dabei verschlossen. Durch die Schichtdicke dieser Opferschicht wird der spätere Abstand zwischen der Oberseite der mikromechanischen Elemente und der Dünnschichtkappe vorgegeben. Auf das CF-Polymer wird in situ PECVD-Siliziumoxid ($\text{SiO}_x\text{:H}_y$) – im Folgenden als PE-SiO bezeichnet – aufgebracht, das nachfolgend als Hartmaske für die Strukturierung des Polymers dient. Nach der Polymerstrukturierung wird eine weitere Schicht PE-SiO als Membranschicht über die Opferschicht abgeschieden. Im Anschluss werden durch die zweite Lithografieebene die Öffnungen für die Opferschichtätzung definiert und mittels RIE in die Membranschicht übertragen.

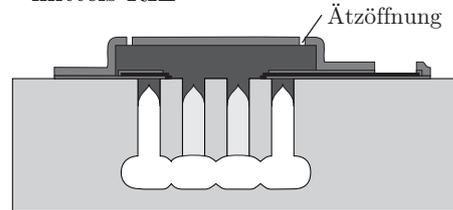
Die Entfernung des CF-Polymers erfolgt mit einem isotropen sauerstoffbasierten Ätzprozess in einem Barrelreaktor. Anschließend werden die Ätzöffnungen durch eine weitere PE-SiO-Schicht verschlossen. Dabei wird der Prozessdruck im Inneren der Kappe eingeschlossen. Eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften kann durch die zusätzliche Abscheidung von PECVD-Siliziumnitrid ($\text{SiN}_x\text{:H}_y$) – im Folgenden als PE-SiN bezeichnet – erreicht werden. Das PE-SiN besitzt einen deutlich höheren E-Modul und eine höhere Bruchfestigkeit als das PE-SiO (Abschnitt 5.2.2), und die resultierende Schichtspannung im Gesamtschichtstapel kann mittels der Abscheideparameter des PE-SiN gezielt eingestellt werden (Abschnitt 5.2.1). Außerdem ist das PE-SiN, das als Verkappungsmaterial für die Passivierung von mikroelektronischen Bauteilen verwendet wird, im Gegensatz zu Siliziumoxid eine sehr gute Feuchtigkeitsbarriere [84]. Für die Membranschicht ist das PE-SiN nicht geeignet, da es gegenüber den Reaktionsprodukten der Opferschichtätzung nicht chemisch beständig ist.

Ein weiteres Material welches als Verschlusschicht verwendet werden kann, ist mittels PECVD abgeschiedenes amorphes Silizium ($\alpha\text{-Si}$). Als Membranschicht ist es jedoch nicht

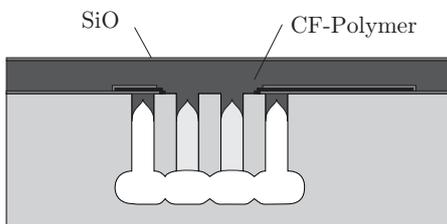
1 Fertig prozessierte Mikrostruktur
(z.B.: AIM)



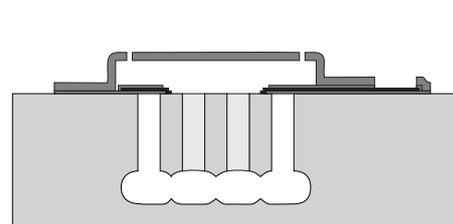
5 Zweite Lithografieebene:
Strukturierung der Membranschicht
mittels RIE



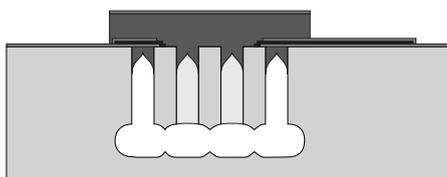
2 Abscheidung der Opferschicht und
der Hartmaske in situ mittels PECVD



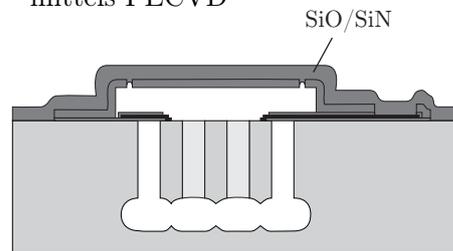
6 Opferschichtätzung mittels
O₂-Plasmas



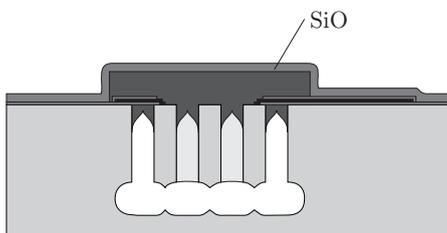
3 Erste Lithografieebene:
Strukturierung des CF-Polymers
mittels RIE



7 Abscheidung der Verschlusschicht
mittels PECVD



4 Abscheidung der Membranschicht
mittels PECVD



8 Dritte Lithografieebene:
Strukturierung der Kontaktöffnungen

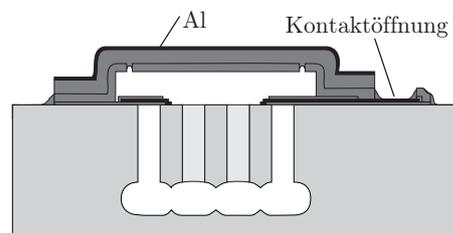


Abbildung 3.3: Prozessablauf der Technologievariante auf Basis von PECVD-Prozessen

geeignet, da es, wie PE-SiN, gegenüber den fluorhaltigen Reaktionsprodukten der Opferschichtätzung chemisch nicht resistent ist. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wurde α -Si nicht untersucht, da es aus anlagentechnischen Gründen nicht zur Verfügung stand.

Als Hartmaske für die abschließende Öffnung der Kontaktpads dient eine gesputterte Aluminiumschicht. Diese verbleibt auf dem Schichtstapel als Diffusionsbarriere gegen Feuchtigkeit und Gase. Die Doppelschicht aus PE-SiN und Aluminium erhöht die Zuverlässigkeit der Verkapselung im Hinblick auf Störstellen in den Schichten (*Pin Holes*).

Durch den Verschluss der Dünnschichtkappe mittels einer Schichtabscheidung, ist der verbleibende Druck in der Kavität vom Prozessdruck des Abscheideprozesses abhängig. Bei der PECVD liegt der Prozessdruck zwischen 10 Pa und 1000 Pa. Ist ein höherer Druck erforderlich, ist es möglich die Verschlusschicht mittels APCVD abzuschneiden [85]. Der Prozessdruck liegt für die APCVD zwischen 10 kPa und 100 kPa. Niedrigere Drücke als bei der PECVD sind mit Sputterprozessen realisierbar. Die Prozessdrücke liegen in diesem Fall unter 1 Pa.

Die Vorteile dieser Technologievariante sind: die Möglichkeit der Kompensation der resultierenden Schichtspannung in der Kappe, die niedrigen Prozesstemperaturen und die durchgängig trockene Prozessierung, die das Problem des Klebens beseitigt. Aus ökonomischer Sicht ist die Anlagen-Kompatibilität der Prozesse von Vorteil. Die Abscheidung des PE-SiO und des PE-SiN kann in einer zweiten Prozesskammer in der gleichen Anlage wie die Abscheidung des CF-Polymers erfolgen, die Strukturierung aller drei Schichten kann sogar in einer Ätzkammer durchgeführt werden. Von Nachteil sind die im Vergleich zu Nickel geringere mechanische Festigkeit der PECVD-Schichten und die geringen Abscheideraten gegenüber der elektrochemischen Abscheidung.

3.4.2 Technologievariante B mit elektrochemischer Abscheidung der Membranschicht

Die zweite Technologievariante basiert auf der elektrochemischen Abscheidung der Membranschicht. Der Prozessablauf ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Nach der Abscheidung und Strukturierung der Opferschicht – entsprechend der bereits beschriebenen Technologievariante – wird die Startschicht für die Galvanik aufgebracht. Für die Versuche wurde Kupfer als Startschicht für die elektrochemische Nickelabscheidung verwendet. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Entfernung des CF-Polymers mittels Wasserstoff realisiert werden sollte, um nicht die ansonsten abgedeckte Kupferschicht in den Ätzöffnungen zu oxidieren. Als Membranschicht sind andere elektrochemisch abscheidbare Metalle, wie Kupfer und Gold, aufgrund der geringen Prozesskompatibilität weniger gut geeignet als

Nickel. Kupfer oxidiert unter Gegenwart von Sauerstoff und beide Metalle sind ohne die Verwendung geeigneter Diffusionsbarrieren nicht CMOS-kompatibel.

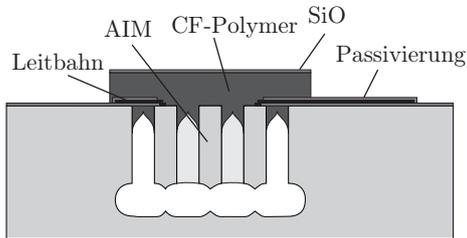
Auf der Startschicht wird eine Lackmaske erzeugt, über die das Nickel nachfolgend abgeschieden wird. Diese additive Strukturierung ist notwendig, da das galvanisch abgeschiedene Nickel aufgrund der in die Schicht eingebauten Badzusätze sehr ätzresistent ist. Die Ätzöffnungen werden dann durch die Entfernung der Lackmaske sowie der Startschicht freigelegt, so dass die Opferschicht geätzt werden kann. Der Verschluss der vertikalen Ätzöffnungen kann, wie bei Technologievariante A, durch einen PECVD-Prozess oder eine PVD-Abscheidung erfolgen.

Ein Vorteil bei der Verwendung von Nickel ist die niedrige Abscheidetemperatur von unter 100 °C. Außerdem hat Nickel ein höheres E-Modul und eine höhere Bruchfestigkeit als PE-SiO (vgl. Abschn. 5.2.4) und die Schicht kann ohne prozesstechnischen Aufwand in Dicken von mehreren zehn Mikrometern aufgewachsen werden. Die notwendige mechanische Stabilität der Dünnschichtkappe ist deshalb mit geringerem Aufwand zu erreichen.

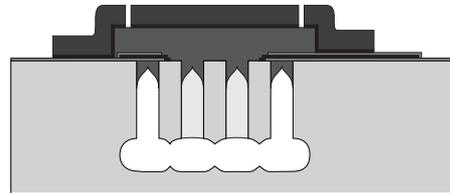
Das größte Problem bei der Verwendung von Nickel sind die nach einer Temperaturbelastung in der Nickelschicht verbleibenden hohen mechanischen Eigenspannungen. Die nach der Abscheidung in der Schicht verbleibende Spannung kann durch den Badzusatz BFL in einem bevorzugten Bereich eingestellt werden, nach einer Temperaturbehandlung bis 200 °C verschieben sich jedoch die Werte unabhängig davon auf über 400 MPa (vgl. Abschn. 5.2.1.4). Diese Spannungen bedeuten eine hohe mechanische Belastung der Kappe, welche die Zuverlässigkeit des Systems verringert. Trotz der hohen Eigenspannungen in der Nickelschicht konnte durch einen Tempersschritt eine gute Haftung sowohl des Nickels als auch der Startschicht auf dem Substrat erzielt werden (vgl. Abschn. 5.2.3).

Die Versuche zur Schichthaftung und zu den Eigenspannungen wurden innerhalb einer Diplomarbeit durchgeführt [86]. Dabei konnte die technologische Realisierbarkeit einer Dünnschichtkappe mittels galvanischer Abscheidung in Verbindung mit CF-Polymer als Opferschicht nachgewiesen werden. Trotz aller technologischer Vorteile der elektrolytischen Abscheidung – niedrige Anlagenkosten, hohe Schichtdicken, einfache Strukturierung, niedrige Prozesstemperaturen – überwiegen die nachteiligen Materialeigenschaften des Nickels ebenso wie die des Kupfers und des Goldes in Verbindung mit herkömmlichen oberflächennahen Siliziumtechnologien. Aus diesem Grund liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Technologievariante A. Neben den Ergebnissen der Schichtspannungs- und Haftfestigkeitsmessungen in Abschnitt 5.2 werden im Anhang B einige mikroskopische Aufnahmen von hergestellten Dünnschichtkappen aus Nickel gezeigt. Für prozesstechnische Einzelheiten sei auf die angegebene Diplomarbeit verwiesen.

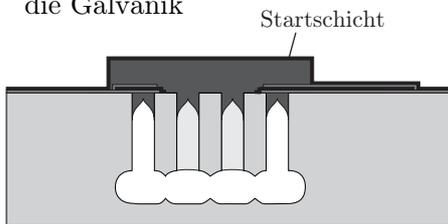
1 Abscheidung und Strukturierung der Opferschicht



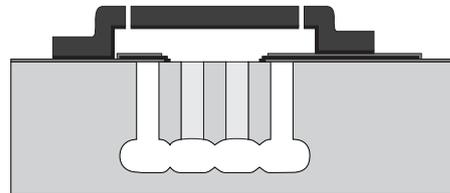
5 Entfernen des Fotolackes und Strukturierung der Startschicht



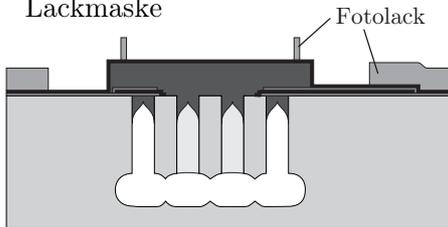
2 Entfernung der Hartmaske und Abscheidung einer Startschicht für die Galvanik



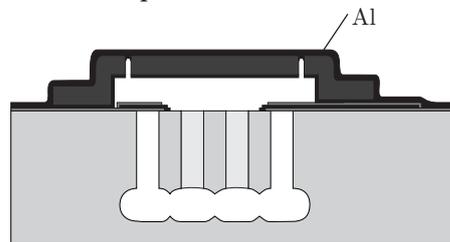
6 Opferschichtätzung



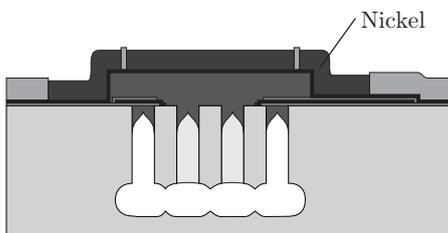
3 Zweite Lithografieebene: Strukturierung einer negativen Lackmaske



7 Abscheidung der Verschlusschicht mittels Sputtern



4 Stromlose Abscheidung von Nickel über die Lackmaske



8 Dritte Lithografieebene: Strukturierung der Kontaktöffnungen

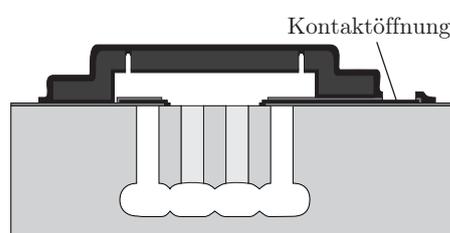


Abbildung 3.4: Prozessablauf der Technologievariante mit elektrochemischer Abscheidung der Membranschicht

Kapitel 4

Mechanischer Entwurf der Dünnschichtkappe

Für die Eignung der Dünnschichtkappe als *Zero-Level-Package* ist, neben der Hermetizität, ihre mechanische Festigkeit die wichtigste Eigenschaft. Diese wird vor allem durch Unterschiede zwischen dem in der Kavität herrschenden Druck und dem Umgebungsdruck des Mikrosystems beansprucht (Abb. 4.1). Ursachen dafür sind der während des Verschlussprozesses in der Kavität eingeschlossene niedrige Prozessdruck und im Falle der Hausung in Kunststoffgehäusen die während des Spritzgießens auftretenden hohen Prozessdrücke [9]. Die daraus resultierenden Entwurfskriterien sind die Durchbiegung w der Kappe in Richtung der Mikrostrukturen und die dabei auftretenden mechanischen Spannungen. Die Durchbiegung der Kappe kann zur Unterschreitung eines benötigten Mindestabstandes zur Mikrostruktur oder im Extremfall zum direkten Kontakt mit ihr führen. Um eine Zerstörung der Kappe zu vermeiden dürfen die mechanischen Spannungen in den Schichten die Bruchfestigkeit der Kappenmaterialien nicht übersteigen.

Das mechanische Verhalten der Dünnschichtkappe wird von den Materialeigenschaften und von der Geometrie der Dünnschichtkappe bestimmt. Da die Materialeigenschaften durch die Wahl des Materials und der Abscheideparameter nur begrenzt variiert werden können, müssen demzufolge durch die Dimensionierung der Kappengeometrie die notwendige Biegesteifheit der Kappe gewährleistet und die dabei auftretenden Spannungen minimiert werden. Dabei können sich durchaus Forderungen an technologische Parameter, wie z. B. die Schichtdicke oder die Abscheidecharakteristik einer Schicht, ergeben.

Bei der Dünnschichtkappe handelt es sich im mechanischen Sinn um eine Platte, d.h. ein orthogonal zu seiner Mittelfläche belastetes ebenes Flächentragwerk. Die analytische Beschreibung erfolgt mit der Plattentheorie, einer zweidimensionalen Näherung der dreidimensionalen Elastizitätstheorie [87]. Sie dient der Berechnung der Durchbiegungsfunktion

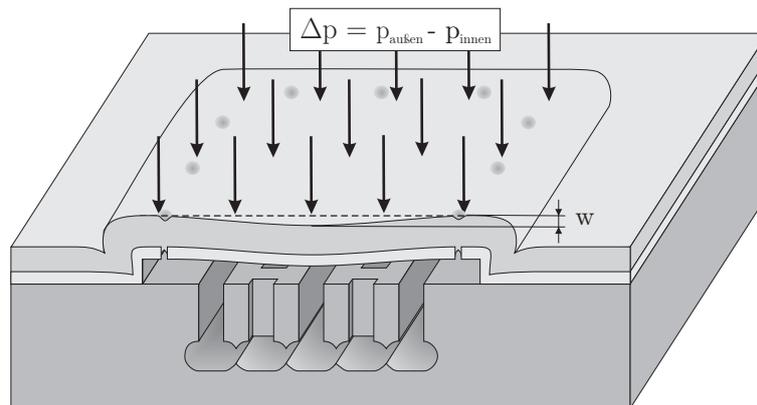


Abbildung 4.1: Mechanische Beanspruchung der Dünnschichtkappe

einer Platte bei gegebenen Randbedingungen und Lasten. Analytisch kann bei Verwendung geeigneter Funktionen eine exakte Lösung für einzelne Spezialfälle ermittelt werden. Für allgemeinere Fälle ist das jedoch nicht möglich, so dass meist Näherungsverfahren verwendet werden. Dabei unterscheidet man analytische und numerische Näherungsverfahren. Beispiele für analytische Verfahren sind:

- das Verfahren von Ritz [88],
- das Verfahren von Galerkin [88] und
- das Verfahren nach Lévy [89].

Numerische Verfahren, die für die Berechnung von Flächentragwerken verwendet werden, sind:

- die Finite-Elemente-Methode (FEM) [90] und
- die Finite-Differenzen-Methode [91].

Für die Dünnschichtkappe ist aufgrund ihrer Geometrie eine exakte analytische Lösung der Durchbiegungsfunktion nicht möglich. Die Modellierung der Dünnschichtkappe mit numerischen Methoden ermöglicht zwar eine realistische Beschreibung der Geometrie, sie ist jedoch für die Entwurfsoptimierung nicht zweckmäßig, da jede Variation eines Parameters eine neue numerische Berechnung notwendig macht. Für ein besseres Verständnis über den Einfluss der einzelnen Entwurfsparameter wird deshalb eine analytische Berechnung der maximalen Durchbiegung angestrebt. Dafür soll eine auf vereinfachenden Annahmen beruhende analytische Näherungslösung hergeleitet werden, die auf der Basis von FEM-Simulationen an die reale Struktur angepasst werden kann [71, 92]. Diese Vorgehensweise

scheint angebracht, da das Ziel nicht die exakte Beschreibung des Verhaltens der Platte ist, sondern lediglich maximal zulässige Werte für die Durchbiegung der Dünnschichtkappe ermittelt werden sollen.

Für die Analyse der auftretenden mechanischen Spannungen ist ein detailgetreues Modell wichtig, da geometrische Unstetigkeiten wie Kerben, Ecken und Kanten, durch die sogenannte Kerbwirkung starke Spannungsüberhöhungen zur Folge haben [18]. Diese können für die Festigkeitsanalyse von großer Bedeutung sein. Aufgrund dessen wurden die mechanischen Spannungen mittels FEM-Simulationen ermittelt.

4.1 Grundlagen der Plattentheorie

Die Platte im Sinne der Elastizitätstheorie ist ein ebenes Flächentragwerk mit einer im Vergleich zu den lateralen Abmessungen a und b kleinen und konstanten Dicke h , das senkrecht zu seiner Mittelfläche belastet wird und bei dem Biegeverformungen auftreten. Tritt die Belastung des Flächentragwerks dagegen nur in der Ebene auf, spricht man von einer Scheibe. Die Mittelfläche wird dann nur verzerrt, es treten aber keine Biegungen auf. Abbildung 4.2 zeigt beide Elementtypen mit den dazugehörigen Schnittgrößen: die Biegemomente M_x, M_y , die Torsionsmomente M_{xy}, M_{yx} , die Querkräfte Q_x, Q_y, N_{xy}, N_{yx} sowie die Normalkräfte N_x und N_y . Diese werden mittels der im verformten Körper auftretenden Normalspannungen σ und Schubspannungen τ (Abb.4.3) wie folgt definiert:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ M_{yx} \end{pmatrix} = \int_{h/2}^{-h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yx} \end{pmatrix} z dz, \quad (4.1)$$

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \int_{h/2}^{-h/2} \begin{pmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} dz, \quad (4.2)$$

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ N_{yx} \end{pmatrix} = \int_{h/2}^{-h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yx} \end{pmatrix} dz. \quad (4.3)$$

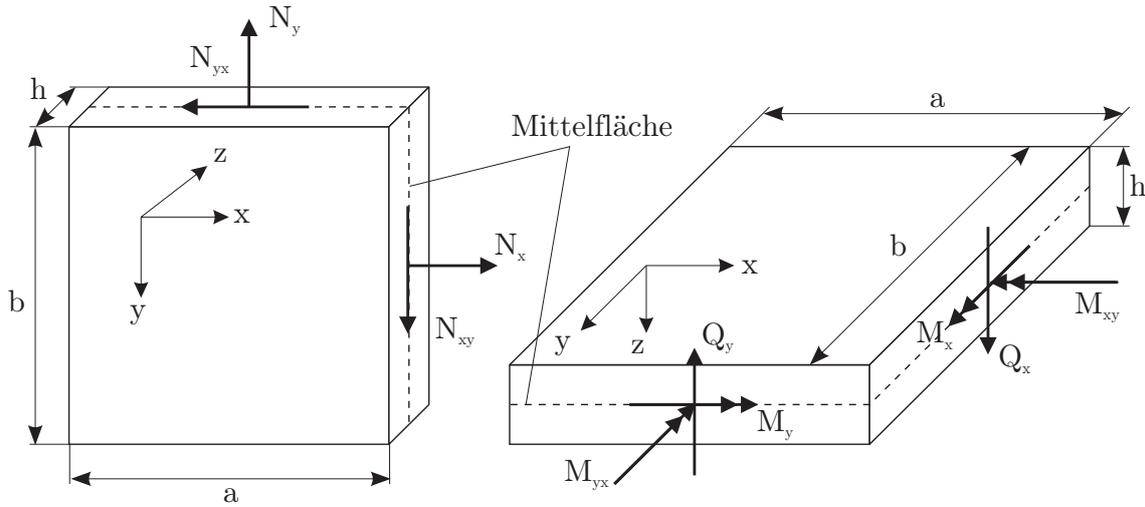


Abbildung 4.2: Definition der Scheiben- und Plattenschnittgrößen sowie der Bemessung ebener Flächentragwerke [88]

Die folgenden Betrachtungen gelten unter der Voraussetzung linearem Materialverhaltens, d.h. es gilt das Hookesche Gesetz. Dieses beschreibt mittels der Materialparameter Elastizitätsmodul E , Schubmodul G und Querkontraktionszahl ν die Beziehungen im verformten Körper zwischen den Dehnungen $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ und den Spannungen $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, sowie zwischen den Schubdehnungen $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ und den Schubspannungen $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$. Unter der Annahme isotropen und homogenen Materials können diese Beziehungen wie folgt beschrieben werden [93]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)],\end{aligned}\tag{4.4}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}.\tag{4.5}$$

Die Materialparameter sind durch die Gleichung

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}\tag{4.6}$$

miteinander verknüpft. Je nach Dickenverhältnis, d.h. dem Verhältnis von Plattendicke h zur kürzeren Seitenlänge der Platte a und dem Verhältnis von Durchbiegung w zu

Plattendicke h wurden entsprechend der daraus resultierenden Annahmen unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt. Tabelle 4.1 fasst die wichtigsten Theorien zusammen.

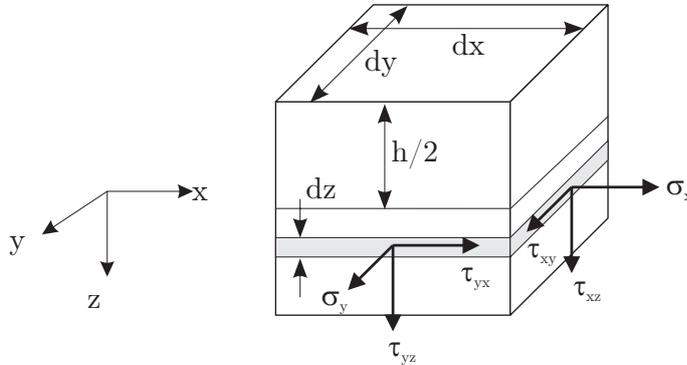


Abbildung 4.3: Definition der Spannungen am differentiell kleinen Plattenelement

Da das Dickenverhältnis der Dünnschichtkappe im Bereich $0,02 < h/a < 0,1$ liegt und es sich damit um eine sogenannte dünne Platte handelt, kann für die Berechnung eine zweidimensionale Plattentheorie verwendet werden. Der allgemeinste Fall ist dabei die Theorie nach von Kármán, da sie große Durchbiegungen dünner Platten berücksichtigt. Es gelten die beiden Annahmen [89, 88]:

- 1 Die Dehnung ε_z und die Gleitungen γ_{xz} und γ_{yz} sind so klein, dass sie vernachlässigt werden können, d.h. eine Normale zur unverformten Plattenmittelfläche bleibt auch nach der Verformung Normale zur Plattenmittelfläche.
- 2 Die Spannung σ_z normal zur Plattenmittelfläche ist klein im Vergleich zu den anderen Spannungen und kann vernachlässigt werden.

Da im allgemeinen Fall nicht die Einschränkung kleiner Verschiebungen gilt, müssen die Gleichgewichtsbedingungen am verformten Körper formuliert werden. Außerdem sind die Modellgleichungen von Scheibe und Platte nichtlinear und sie müssen gekoppelt betrachtet werden. Für ein differentiell kleines Element (Abb. 4.3) gilt:

$$N_{xy} = N_{yx}, \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = 0, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0, \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y = 0, \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + p + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0. \quad (4.12)$$

Tabelle 4.1: Klassifizierung ebener Flächentragwerke hinsichtlich vereinfachender Modellannahmen [88, 94]

	h/a	w/h	ANNAHMEN	THEORIE
sehr dünne Platten	< 0,02		Biegesteifigkeit wird vernachlässigt, geometrisch nichtlinear	Membrantheorie
dünne Platten mit großen Durchbiegungen	0,02 – 0,1	0,2 – 5	geometrisch nichtlinear	von Kármán
dünne Platten mit kleinen Durchbiegungen	0,02 – 0,1	< 0,2	keine Querschubverzerrungen, geometrisch linear	Kirchhoff
Platten mittlerer Dicke	0,1 – 0,2		mit Querschubverzerrungen, geometrisch linear	Reissner, Minddlin
dicke Platten	> 0,2		kein zweidimensionales Plattenmodell	dreidimensionale Modellgleichungen

Da die Scheibenschnittkräfte keine Momente am Rand der Elemente hervorrufen, können diese bei der kinematischen Beschreibung der Biege- und Torsionsmomente vernachlässigt werden. Unter Berücksichtigung der 1. Annahme $\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$ wird der Verzerrungszustand wie folgt beschrieben:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} (a), \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} (b), \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0 (c), \quad (4.13)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} (a), \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 (b), \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 (c). \quad (4.14)$$

Dabei sind u, v und w die Verschiebungen in x -, y - und z -Richtung. Integriert man die Gleichungen 4.13 c, 4.14 b und c nach z und setzt die Ergebnisse in die restlichen Gleichungen ein, ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (4.15)$$

Wendet man die 1. Annahme in den Gleichungen des Hookschen Gesetzes 4.4 und 4.5 an, ergibt sich für die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x), \quad \tau_{xy} = G \gamma_{xy}. \quad (4.16)$$

Setzt man nun die Gleichungen 4.15 in die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen ein, erhält man:

$$\sigma_x = \frac{-Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad \sigma_y = \frac{-Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad \tau_{xy} = \frac{-Ez}{1+\nu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (4.17)$$

Unter Verwendung dieser Terme im Gleichungssystem 4.1 errechnen sich die Biegemomente und das Torsionsmoment mit

$$\begin{aligned} M_x &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ M_y &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \\ M_{xy} &= -D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Dabei ist D die Plattensteifigkeit

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (4.19)$$

Für die vertikalen Querkräfte Q_x und Q_y ergeben sich durch Einsetzen der Gleichungen 4.18 in die Gleichgewichtsbeziehungen 4.10 und 4.11 die Ausdrücke

$$Q_x = -D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad Q_y = -D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right). \quad (4.20)$$

Für die kinematischen Gleichungen, die den Verzerrungszustand des Körpers geometrisch beschreiben, müssen die Dehnungen der Plattenmittelfläche berücksichtigt werden. Die Gleichungen 4.13 und 4.14 müssen demzufolge um diese Terme erweitert werden:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (4.21)$$

Durch zweifache Differenzierung von ε_x nach y , ε_y nach x und γ_{xy} nach x und y ergibt sich folgende verknüpfte Beziehung:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}. \quad (4.22)$$

Unter Verwendung des Gleichungssystems 4.3 berechnen sich die Dehnungen ε_x , ε_y und der Schub γ_{xy} nach dem Hookschen Gesetz (Gln. 4.4 und 4.5) aus:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{Eh} (N_x - \nu N_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{Eh} (N_y - \nu N_x), \quad \gamma_{xy} = \frac{N_{xy}}{Gh}. \quad (4.23)$$

Der sich beim Einsetzen dieser Gleichungen in die Gleichung 4.22 ergebende Ausdruck wird, wie die Gleichgewichtsbedingungen 4.8 und 4.9, durch die Airysche Spannungsfunktion $\phi(x, y)$ erfüllt [89]. Diese ist mit den Scheibenschnittgrößen durch die Gleichungen

$$N_x = h \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \quad N_y = h \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}, \quad N_x = -h \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (4.24)$$

verknüpft. Die Gleichungen 4.24 und 4.23 ergeben, eingesetzt in die Beziehung 4.22 die Differentialgleichung

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right]. \quad (4.25)$$

Die Gleichungen 4.24 sowie 4.20, eingesetzt in die Gleichgewichtsbedingung 4.12, ergeben die zweite Differentialgleichung

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{h}{D} \left[\frac{p}{h} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right]. \quad (4.26)$$

Diese sogenannten von Kármánschen Differentialgleichungen (Gln. 4.25 und 4.26) beschreiben das mechanische Verhalten dünner Platten. Die geschlossene Lösung dieser gekoppelten, nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen ist jedoch für praktische Anwendungsfälle sehr aufwändig oder unmöglich, weshalb die bereits angesprochenen Näherungsverfahren wie z. B. die Verfahren von Ritz oder Galerkin verwendet werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit die Gleichungen zu vereinfachen. Die in Tabelle 4.1 aufgeführte Theorie von Kirchhoff für dünne Platten mit kleinen Durchbiegungen $w/h < 0,2$ stützt sich auf zwei weitere Annahmen [89]:

- 3 Die Auslenkung der Plattenmittelfläche ist klein verglichen mit der Plattendicke, so dass die Krümmung der Fläche sehr klein ist und deren Quadrat verglichen mit 1 vernachlässigt werden kann.
- 4 Die Plattenmittelfläche wird nicht gedehnt.

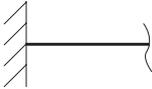
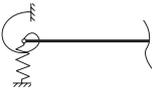
Die Gleichgewichtsbedingungen können am unverformten Tragwerk formuliert werden, die Modellgleichungen sind linear und es gilt das Superpositionsprinzip. Aufgrund der 4. Annahme werden die Scheibenschnittgrößen zu Null (Gln. 4.24), die Gleichung 4.25 entfällt und Gleichung 4.26 vereinfacht sich zu der linearen Kirchhoffschen Plattendifferentialgleichung:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D}. \quad (4.27)$$

Durch Integration dieser Gleichung und Ermittlung der Integrationskonstanten unter Einbeziehung der Randbedingungen ergibt sich die Durchbiegungsfunktion, mit der die Normal- und Schubspannungen durch Einsetzen in die Gleichungen 4.17 ermittelt werden können.

Wie bereits erwähnt müssen die Randbedingungen, d.h. die Kräfte, Momente, Verschiebungen und Neigungen an den Rändern der Platte, für die Lösung der Differentialgleichungen berücksichtigt werden. Die Lösung der Gleichung 4.27 setzt z. B. zwei Randbedingungen an jedem der vier Ränder einer Platte voraus, um die acht Schnittgrößen zu ermitteln. Tabelle 4.2 fasst die in der Mikromechanik am häufigsten auftauchenden Lagerungsarten von Plattenrändern nach [88] zusammen. Dabei sind K_t die translatorische Nachgiebigkeit und K_r die rotatorische Nachgiebigkeit einer elastischen Lagerung.

Tabelle 4.2: Überblick über die Lagerungsarten von Platten und die dazugehörigen Randbedingungen [88]

LAGERUNGSART	LAGERSYMBOL	1.RAND-BEDINGUNG	2.RAND-BEDINGUNG
starre Einspannung		$w = 0$	$\frac{\partial w}{\partial x} = 0$
freier Rand		$q_x = 0$	$M_x = 0$
elastische Lagerung mit Einspannung		$q_x = K_t w$	$M_x = \frac{1}{K_r} \frac{\partial w}{\partial x}$

4.2 Analytische Näherungslösung für die Dünnschichtkappe

Zunächst soll die reale Geometrie der Dünnschichtkappe betrachtet werden, um ein möglichst zweckmäßiges Modell für die analytische Näherungslösung abzuleiten. Abbildung 4.4 zeigt die charakteristische Geometrie einer Dünnschichtkappe. Es handelt sich um eine Rechteckplatte mit den Seitenlängen a und b ($a \leq b$), die an allen vier Seiten nachgiebig eingespannt ist. Die Platte besteht aus der Membranschicht mit der Dicke h_2 , welche

die Ätzöffnungen enthält, und der darüber liegenden Verschlusschicht mit der Dicke h_1 . Der Abstand m zwischen der Platte und dem Substrat resultiert aus der Schichtdicke der Opferschicht. Die optionale Anordnung von Stützsäulen über die gesamte Fläche der Dünnschichtkappe dient der Versteifung der Platte. Dabei ergeben sich neue effektive Seitenlängen, a_s und b_s , die dem Abstand der Stützsäulen entsprechen.

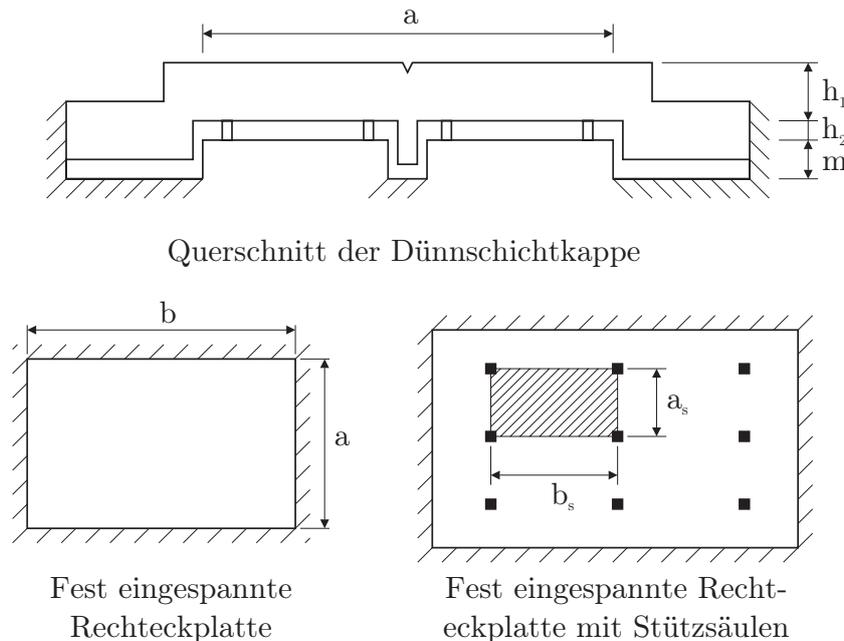


Abbildung 4.4: Dimensionen der Dünnschichtkappe

Mit der Festlegung des Entwurfskriteriums, die Durchbiegung der Platte auf maximal 20 % der Gesamtplattendicke h ($h = h_1 + h_2$) zu beschränken, kann die Dünnschichtkappe als Kirchhoffplatte modelliert werden. Unter Vernachlässigung

- des Mehrschichtaufbaus,
- des *Stress-Stiffening*-Effektes,
- der nachgiebigen Einspannung
- und der Ätzöffnungen

ist die Dünnschichtkappe eine fest eingespannte Rechteckplatte. Nach der Streifenmethode, einer Approximation nach H. Grashof, ergibt sich dann für die maximale Auslenkung w_{max} in der Mitte der Platte [89]:

$$w_{max} = \frac{p_0 a^4}{384D \left[\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 1 \right]} . \quad (4.28)$$

Als Last wirkt der Druck p_0 , der aus dem Druckunterschied zwischen Kavität und Umwelt resultiert. Diese Gleichung liefert kein exaktes Ergebnis. Sie ist aber für die Dimensionierung der Dünnschichtkappe prinzipiell gut geeignet, da der berechnete Wert höher ist als die tatsächliche Auslenkung. Es muss lediglich untersucht werden, inwieweit die vernachlässigten Eigenschaften der Kappe zu berücksichtigen sind.

Zunächst soll der Mehrschichtaufbau der Dünnschichtkappe in die Berechnung einbezogen werden. Bei Verwendung von PE-SiO sowohl für die Membran-, als auch für die Verschlusschicht, kann dieser Schichtstapel als eine Schicht betrachtet werden, da die Materialparameter identisch und die Schichten fest miteinander verbunden sind. Wird auf das PE-SiO zusätzlich Aluminium abgeschieden oder die Verschlusschicht mittels PE-SiN realisiert, muss die Platte als Mehrschichtverbund modelliert werden.

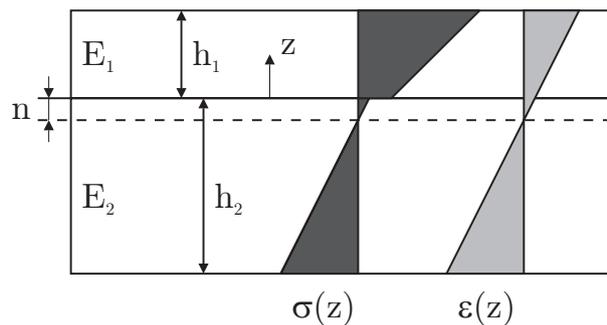


Abbildung 4.5: Spannungs- und Dehnungsverlauf in einem Schichtverbund (nach [95])

Die klassische Laminattheorie [96] geht von einer festen Verbindung zwischen den Schichten aus, d.h. die Schichten können nicht gegeneinander verschoben werden und verhalten sich somit wie eine einzelne Schicht. Die Dehnung ändert sich linear über die Dicke der Schichten hinweg und verläuft stetig über die Grenzfläche, während sich die Spannung in der Platte an der Grenzfläche unstetig ändert (siehe Abb. 4.5). Die ungedehnte neutrale Fläche, die sich bei der Biegung von Platten aus einer Einzelschicht bei $h/2$ befindet, verschiebt sich von der Grenzfläche zweier Schichten um den Betrag n [95]:

$$n = \frac{h_1 - \frac{h_2^2 E_2}{h_1 E_1}}{2 \left(1 + \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} \right)} . \quad (4.29)$$

Analog zu einer Einzelschicht können die Dehnungs-Verschiebungs-Beziehungen (Gln. 4.15), die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen (Gln. 4.16) und die Schnittgrößen (Gln. 4.1) für jede einzelne Schicht des Verbundes formuliert werden. Vorausgesetzt es gelten die

Annahmen für eine dünne Platte mit kleiner Durchbiegung, ergibt sich die Kirchhoffsche Differentialgleichung 4.27 als Beschreibung, jedoch mit einer transformierten Plattensteifigkeit D_t , welche die unterschiedlichen E-Moduln der Schichten und die Dicken der Einzelschichten mit einbezieht. Die transformierte Plattensteifigkeit für den in Abbildung 4.5 dargestellten Schichtstapel lautet [95]:

$$D_t = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{\frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} \left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{h_2^2 E_2}{h_1^2 E_1}\right)^2}{1 + \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1}}. \quad (4.30)$$

In der Dünnschichtkappe treten technologiebedingte intrinsische und thermische Schichtspannungen (vgl. Abschnitt 5.2.1) sowie Spannungen infolge der Auslenkung der Platte auf. Aus diesen inneren Spannungen resultieren Kräfte in der Plattenebene, die von den durch die Flächenlast bedingten, senkrecht zur Platte wirkenden Kräften und Momenten überlagert werden. Die Folge ist der so genannte *Stress-Stiffening*-Effekt, der eine Änderung der Plattensteifigkeit bewirkt [18]. Dabei bewirken Zugspannungen eine Erhöhung und Druckspannungen eine Verringerung der Steifigkeit. Für die Berechnung eines solchen kombinierten Lastfalles muss das Gleichungssystem aus den Gleichungen 4.8, 4.9 und 4.20 eingesetzt in Gleichung 4.12 gelöst werden. Da die analytische Näherungslösung keine exakte Beschreibung der vorhandenen Dünnschichtkappe darstellt, sondern vielmehr die Einflüsse der einzelnen geometrischen Parameter auf die Durchbiegung der Platte beschreiben soll, wird dieser Effekt in der analytischen Näherungslösung vernachlässigt. In den FEM-Simulationen von konkreten Strukturen wurde der Einfluss des *Stress-Stiffening* auf die Durchbiegung der Platte berücksichtigt.

Die Einbeziehung der nachgiebigen Einspannung in die Lösung der Differentialgleichung mittels der Randbedingungen (Gln. in Tab.4.2) ist schwierig, da die translatorischen und rotatorischen Randnachgiebigkeiten K_t und K_r nicht bekannt sind. Der Grund dafür ist die Form der Seitenwände, die bedingt durch die Herstellungstechnologie keine triviale Geometrie besitzen. Alternativ lässt sich die nachgiebige Einspannung als eine Vergrößerung der Plattenfläche betrachten [71] und kann durch den Koeffizienten τ in der Gleichung mit fester Einspannung 4.28 berücksichtigt werden:

$$w_{max} = \frac{p_0 (a + \tau a)^4}{384 \kappa D \left[\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 1 \right]}. \quad (4.31)$$

Die Randnachgiebigkeit ist von der Geometrie der Seitenwände und damit von der Dicke der abgeschiedenen Schichten abhängig. Bei gegebener Abscheidecharakteristik, d.h.

dem Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Schichtdicke an einer Stufe, ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen τ und der Schichtdicke h . Außerdem geht die Höhe der Kavität m sowie in geringem Maße das Verhältnis der Seitenlängen $V_S = b/a$ ein. Die Ermittlung von τ erfolgte durch die Approximation von FEM-Simulationsergebnissen (s. Abschnitt 4.4). Für die Berücksichtigung der reduzierten Plattensteifigkeit durch die Ätzöffnungen in der Platte schlägt Partridge die Einführung eines weiteren Korrekturfaktors κ in Gleichung 4.31 vor [71]. Der Einfluss der Ätzöffnungen wurde ebenfalls mittels FEM untersucht.

Da die erreichbaren Schichtdicken durch die verwendeten Abscheideverfahren begrenzt sind, muss bei der Verkappung von großflächigen Strukturen die effektive Plattenfläche reduziert werden, um dennoch eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten. Dies kann durch die Einführung von Stützsäulen realisiert werden (Abb. 4.4). In [89] wird folgende Gleichung für die maximale Durchbiegung einer mit rechteckig angeordneten Säulen gestützten dünnen Platte mittels der Anwendung von Lévy's Ansatz hergeleitet:

$$w_{max} = \frac{p_0 b_s^4}{384D} - \frac{p_0 a_s^3 b_s}{2\pi^3 D} \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_n}{n^3} - \frac{\alpha_n + \tanh \alpha_n}{n^3 \tanh^2 \alpha_n} + \frac{(-1)^{n/2}}{n^3} \frac{\alpha_n + \tanh \alpha_n}{\sinh \alpha_n \tanh \alpha_n} \quad (4.32)$$

$$\alpha_n = \frac{n\pi b_s}{2a_s} \quad a_s \leq b_s$$

Dabei wird ein Abschnitt zwischen vier Säulen als eine gleichförmig belastete, an den Ecken aufliegende Rechteckplatte betrachtet. Diese Gleichung gilt unter der Voraussetzung einer gleichförmigen Last p_0 , einem kleinen Querschnitt der Säulen im Vergleich zum Abstand, einer gleichmäßigen Anordnung der Säulen und einer großen Plattengesamtfläche im Vergleich zu den Säulenabständen. Falls diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, können die Stützen nur in einem numerischen Modell berücksichtigt werden.

4.3 Modellierung der Dünnschichtkappe mittels FEM

Die analytische Lösung von partiellen Differentialgleichungen ist für praktische Anwendungsfälle aufgrund komplexer Geometrien und Nichtlinearitäten nicht immer möglich. Die Anwendung numerischer Lösungsverfahren ermöglicht dagegen die Berechnung praktischer Problemstellungen mit ausreichender Genauigkeit. Dafür wird das Kontinuum in eine endliche Anzahl diskreter Elemente zerlegt und näherungsweise beschrieben.

Eines der wichtigsten numerischen Verfahren ist die Finite Element Methode (FEM). Sie basiert auf einer Vielzahl von Approximationsverfahren. Neben verallgemeinerten Verfah-

ren wie der Methode des gewichteten Residuums oder des Variationsprinzips vom Minimum der potentiellen Energie, kann auch ein physikalisches Prinzip verwendet werden. Das ist für die Strukturmechanik das Prinzip der virtuellen Verrückungen (Prinzip der virtuellen Arbeit). Letzteres besagt, dass die aufgrund von äußeren Lasten geleistete virtuelle Arbeit gleich der virtuellen Formänderungsenergie ist [90, 26]. Die in den Energieintegralen auftretenden unbekanntenen Verschiebungen werden durch lineare Ansatzfunktionen approximiert. Die Gleichgewichtsbedingungen werden dadurch nicht mehr exakt, sondern nur noch im Mittel erfüllt.

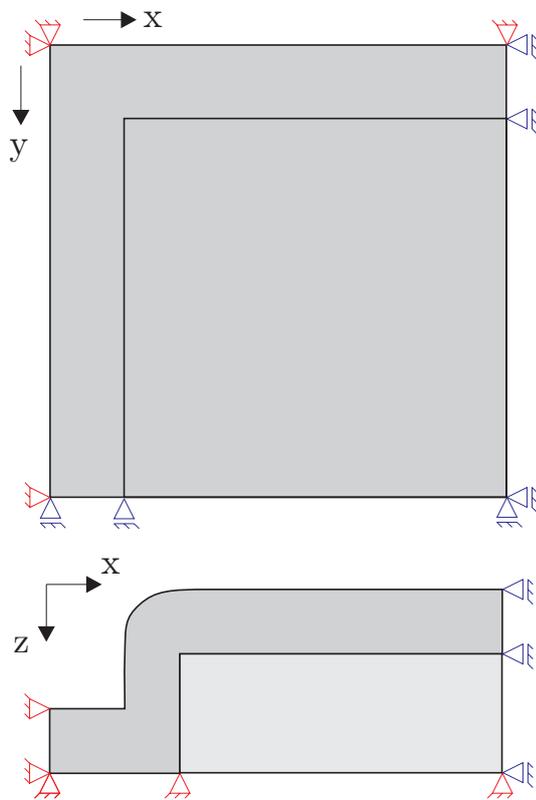


Abbildung 4.6: Prinzipskizze des FEM-Modells mit Rand- und Symmetriebedingungen (rot – Randbedingung, blau – Symmetriebedingung)

Randbedingungen. Aufgrund seiner Symmetrie wurde nur ein Viertel der Kappenstruktur modelliert und Symmetriebedingungen eingesetzt, die ebenfalls in der Skizze eingezeichnet sind. Die Netzdicke wurde durch ein vereinfachtes Modell, für das die Gleichung 4.28 gültig ist, mit fest eingespannter Platte und ohne Berücksichtigung von Ätzöffnungen sowie Vorspannungen geprüft.

In der vorliegenden Arbeit wurde für die numerische Analyse mittels FEM das kommerzielle Programm ANSYS verwendet. Da für die Festigkeitsanalyse das dynamische Verhalten der Dünnschichtkappe nicht relevant ist, wurden ausschließlich statische, nichtlineare Simulationen durchgeführt. Dabei wurden die Eigenspannungen der Schichten in der Plattenebene durch den Befehl *istress* und der *Stress-Stiffening*-Effekt durch den Befehl *sstiff,on* berücksichtigt. Die Modelle wurden mit SOLID92 Strukturelementen frei vernetzt. Dabei handelt es sich um Tetraeder mit vier Eckknoten und sechs Seitenmittenknoten. Elemente mit Seitenmittenknoten wurden gewählt, um der reduzierten Genauigkeit der frei vernetzten Tetraederelemente entgegenzuwirken.

Die Modelle wurden parametrisiert erstellt. Dies ermöglichte die schnelle Modifizierung hinsichtlich Schichtdicke und Plattenfläche der Dünnschichtkappe. Abbildung 4.6 zeigt eine Skizze des Modells mit den verwendeten

Die Simulationsergebnisse für die Durchbiegung der Platte bei 100 kPa Drucklast werden mit den analytisch ermittelten Werten in den Abbildungen 4.7 und 4.8 verglichen. Für den innerhalb der Verkappungstechnologie relevanten Bereich der geometrischen Abmessungen einer Platte stimmt die numerische mit der analytischen Rechnung in ausreichendem Maße überein. Für große Auslenkungen von mehr als 20% der Plattendicke weichen die analytischen Werte erwartungsgemäß (Abschn. 4.1) von den Simulationsergebnissen ab, da die Versteifung durch Zugkräfte in der Plattenebene in Gleichung 4.28 nicht berücksichtigt wird.

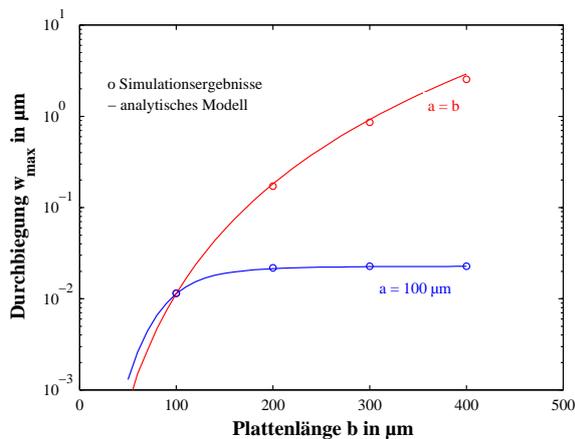


Abbildung 4.7: Vergleich der Ergebnisse des vereinfachten FEM-Modells mit denen von Gleichung 4.28 in Abhängigkeit der Plattenlänge bei einer Plattendicke von $6,5 \mu\text{m}$

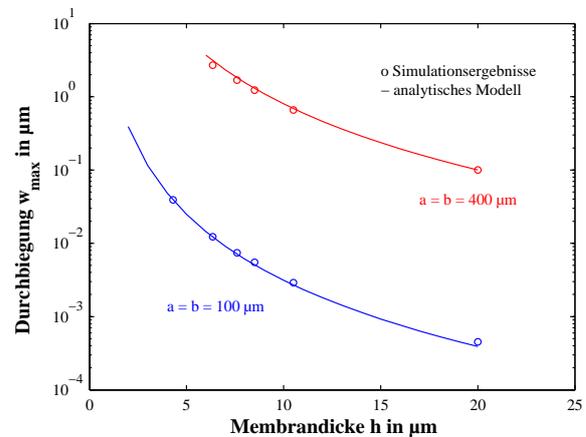


Abbildung 4.8: Vergleich der Ergebnisse des vereinfachten FEM-Modells mit denen von Gleichung 4.28 in Abhängigkeit der Plattendicke

Um die Verwendung des Befehls *istress* für die Berücksichtigung der Eigenspannung in den Schichten zu bewerten, wurde die Verwölbung einer Teststruktur berechnet und deren tatsächliche Durchbiegung mittels Mireau-Interferometer gemessen (Abschn. 5.5.2). Die Teststruktur bestand aus einer $1,5 \mu\text{m}$ dicken PE-SiO-Membran ($E = 50 \text{ MPa}$, $\sigma_S = -20 \text{ MPa}$) mit einer Plattenfläche von $1200 \times 400 \mu\text{m}^2$. Da die Oxidschicht nicht verschlossen wurde, resultierte die Verwölbung der Struktur ausschließlich aus der Eigenspannung in der Schicht. In Abbildung 4.9 ist das Ergebnis der Simulation zu sehen. Die Oxidschicht wölbt sich aufgrund der Druckspannung im ersten (und letzten) Drittel um $2,8 \mu\text{m}$ nach oben und in der Mitte um $2,5 \mu\text{m}$ nach unten. Dieses Verhalten zeigt auch die reale Struktur in Abbildung 4.10. Die Oxidschicht wird außen um jeweils $2,95 \mu\text{m}$ und $3,07 \mu\text{m}$ nach oben und in der Mitte um $2,3 \mu\text{m}$ nach unten gewölbt. Sowohl die Verformung der Platte durch die Eigenspannungen, als auch das nichtlineare Verhalten durch den *Stress-Stiffening*-Effekt werden ausreichend genau berechnet.

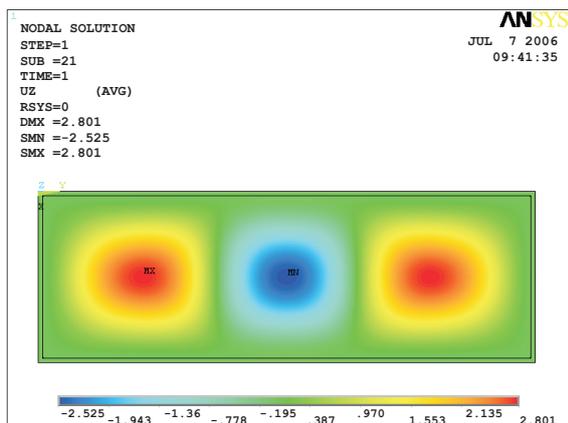


Abbildung 4.9: Simulation der Verwölbung einer $1200 \times 400 \mu\text{m}^2$ großen und $1,5 \mu\text{m}$ dicken SiO-Membran infolge einer Eigenspannung von -20 MPa

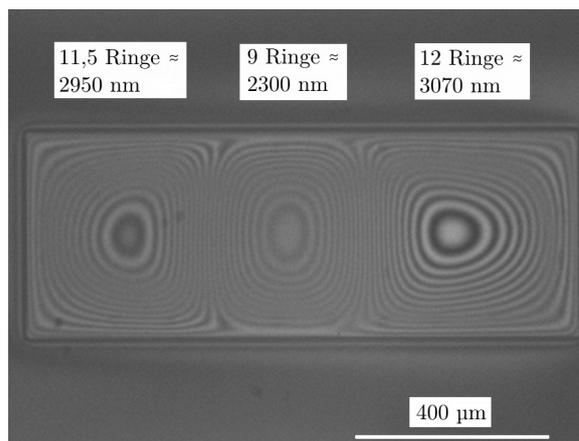


Abbildung 4.10: Mittels Mireau-Interferometer ermittelte Verwölbung einer $1200 \times 400 \mu\text{m}^2$ großen und $1,5 \mu\text{m}$ dicken SiO-Membran

Für die Evaluierung des vollständigen, der realen Kappenstruktur entsprechenden FEM-Modells wurden verschlossene Teststrukturen verwendet. Die tatsächliche Verwölbung der Strukturen wurde ebenfalls mittels Mireau-Interferometer gemessen. Da kein signifikanter Einfluss der Ätzöffnungen, sowohl auf die Durchbiegung der Dünnschichtkappe als auch auf die mechanischen Spannungen festgestellt werden konnte (Abschn. 4.4), wurden diese Öffnungen im Modell nicht berücksichtigt. Die Seitenlängen der quadratischen Teststrukturen betragen $400 \mu\text{m}$ und die Dicke der Schichten sowie deren Zusammensetzung wurden variiert.

Abbildung 4.11 zeigt die Ergebnisse für Schichtstapel aus PE-SiO, PE-SiO mit $2,0 \mu\text{m}$ Al und PE-SiO mit $2,0 \mu\text{m}$ PE-SiN. Für jede Schichtkombination wurde jeweils nur die Dicke der PE-SiO-Schicht verändert. Wie in dem Diagramm zu sehen ist, stimmen die Messwerte unter Berücksichtigung der Messunsicherheit von $\pm 128 \text{ nm}$ gut mit den Simulationsergebnissen überein. Im Hinblick darauf, dass der Entwurf und die Modellierung der Dünnschichtkappe einer Abschätzung der maximal auftretenden Durchbiegung dienen, ist die Genauigkeit der Ergebnisse ausreichend hoch.

Bezüglich der Materialzusammensetzung der Dünnschichtkappe besitzt der Schichtstapel aus PE-SiO und PE-SiN erwartungsgemäß die größte Steifigkeit, wie die Werte bei $6,3 \mu\text{m}$ Gesamtschichtdicke deutlich zeigen. Für die Verringerung der Durchbiegung um einige Größenordnungen ist sowohl die Verwendung von PE-SiN als auch die Erhöhung der Schichtdicke – im Rahmen der technologischen Möglichkeiten – nicht ausreichend. Aussichtsreicher ist dagegen die Reduzierung der effektiven Plattenfläche. Die Kürzung der Seitenlänge einer $6,5 \mu\text{m}$ dicken, quadratischen Platte von $400 \mu\text{m}$ auf $100 \mu\text{m}$ vermin-

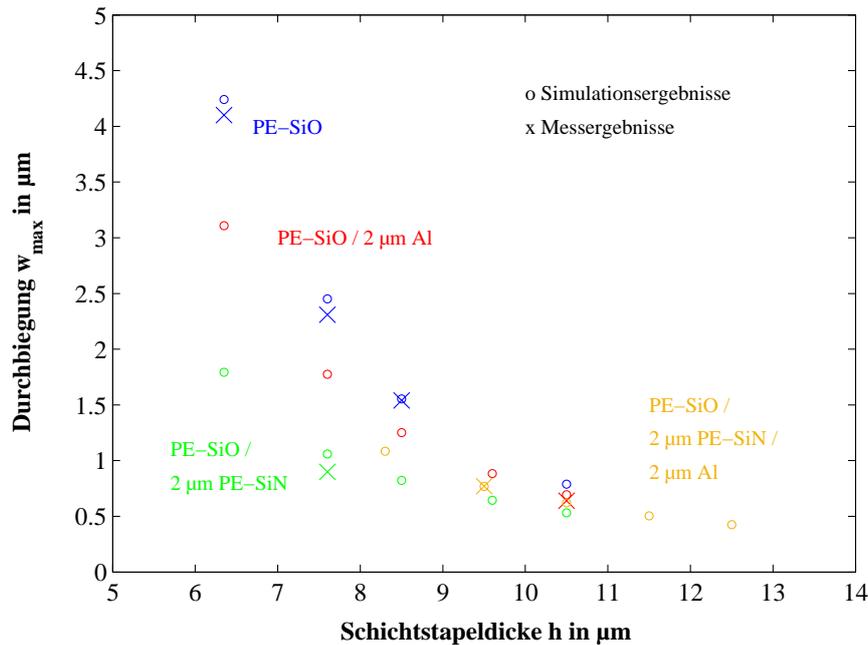


Abbildung 4.11: Simulations- und Messergebnisse für die Durchbiegung von quadratischen Teststrukturen mit einer Plattenfläche von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ und unterschiedlichen Schichtkombinationen bei einer Flächenlast von 100 kPa ; die Schichtstapeldicke gibt die Gesamtdicke des Schichtstapels an und die Größe der Datenpunkte (Kreuze) entspricht der Messunsicherheit von $\pm 128 \text{ nm}$

dert die Durchbiegung beispielsweise um mehr als zwei Dekaden (Abb. 4.8). Bei einer rechteckigen Plattenfläche kann dabei der Effekt genutzt werden, dass ab einem Seitenlängenverhältnis $b:a$ von 2:1 eine Verlängerung der Seitenlänge b keinen Einfluss auf die maximale Durchbiegung der Platte hat (Abb. 4.7).

Neben der Durchbiegung wurden auch die in Folge der Verformung der Dünnschichtkappe auftretenden mechanischen Spannungen qualitativ analysiert. Ziel dabei war die Ermittlung der Spannungsverteilung, vor allem die Lokalisierung von Spannungsmaxima in der Dünnschichtkappe. Die exakten Beträge der berechneten Spannungen waren dabei weniger von Interesse, da die für die Beurteilung der Bruchfestigkeit relevante tatsächliche Bruchspannung der Schichten nicht bekannt ist. Die Oberflächenbeschaffenheit eines Materials hat großen Einfluss auf die Bruchspannung, so dass die tatsächlichen Werte die aus der Literatur um ein Vielfaches unterschreiten können (Abschn. 5.2.2). Außerdem sind die Spannungen an Kerben sehr stark vom Kerbradius abhängig. Dieser unterliegt jedoch technologischen Einflüssen und ist messtechnisch schwierig zu erfassen. Da die Spannungsmaxima an den Kerben der Platteneinspannung auftreten (Abb. 4.12), können die berechneten Werte an diesen Stellen stark fehlerbehaftet sein.

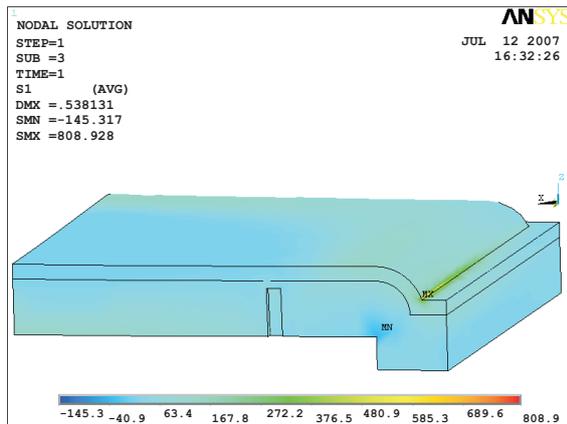


Abbildung 4.12: Simulationsergebnis für die 1. Hauptspannung in einer $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe bestehend aus dem Schichtstapel $7,6 \mu\text{m}$ PE-SiO und $2,0 \mu\text{m}$ Al bei einer Drucklast von 10 MPa

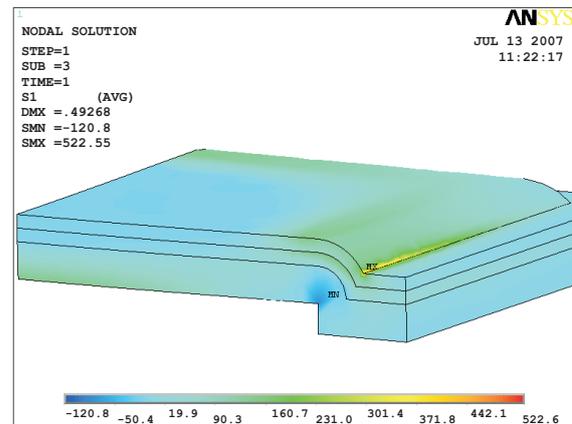


Abbildung 4.13: Simulationsergebnis für die 1. Hauptspannung in einer $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe bestehend aus dem Schichtstapel $5,5 \mu\text{m}$ PE-SiO, $2,0 \mu\text{m}$ PE-SiN und $2,0 \mu\text{m}$ Al bei einer Drucklast von 10 MPa

Aus den Simulationsergebnissen für die mechanischen Spannungen wird ersichtlich, dass die konkaven Kanten an der Einspannung der Dünnschichtkappe die Schwachstelle bezüglich der Bruchfestigkeit darstellen. Durch eine möglichst homogene Kantenbedeckung des Abscheideprozesses sollte deshalb ein großer Kerbradius angestrebt werden. Außerdem können die Spannungen an der Einspannung der Dünnschichtkappe durch die Reduzierung der Auslenkung (infolge einer dickeren Verschlusschicht) deutlich verringert werden. Abbildung 4.12 zeigt die 1. Hauptspannung in einer insgesamt $9,6 \mu\text{m}$ dicken und $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe unter 10 MPa Drucklast. Drücke in dieser Größenordnung treten beim Spritzguss von Kunststoffgehäusen auf und sind deshalb relevant für die Festigkeitsbetrachtungen. In Abbildung 4.13 ist zum Vergleich die 1. Hauptspannung in einem Dreifachstapel aus $5,5 \mu\text{m}$ PE-SiO, $2,0 \mu\text{m}$ PE-SiN und $2,0 \mu\text{m}$ Al dargestellt. Bei annähernd gleicher Gesamtdicke, können durch die Verwendung der PE-SiN-Zwischenschicht die Auslenkung und die Spannungen in der Kappe deutlich reduziert werden.

4.4 Kopplung des FEM-Modells mit der analytischen Näherungslösung

Die analytische Näherungslösung dient aufgrund ihrer Unzulänglichkeiten in der Beschreibung der realen Dünnschichtkappe dem Grobentwurf, dem eine Optimierung mittels FEM-Simulationen folgt. Je weiter die analytische Lösung von den genaueren numerischen Be-

rechnungen abweicht, desto mehr Simulationen müssen iterativ durchgeführt werden, um zu dem gewünschten Ergebnis zu gelangen. Für eine Reduzierung des Simulationsaufwandes soll die Genauigkeit der analytischen Näherungslösung für den Grobentwurf von Dünnschichtkappen durch die Berücksichtigung der realen Geometrie erhöht werden.

In Gleichung 4.31 auf Seite 84 wurden zu diesem Zweck bereits die Koeffizienten τ und κ eingeführt. Durch τ wird die nachgiebige Einspannung der Platte beschrieben und mit κ die verringerte Steifigkeit durch die Ätzöffnungen berücksichtigt. Die Ermittlung der Koeffizienten erfolgte durch Regression anhand von Simulationsergebnissen für unterschiedliche Geometrien. Zunächst wurde jedoch untersucht, ob die Einflüsse der Ätzöffnungen und der Einspannung auf die Durchbiegung der Platte signifikant sind.

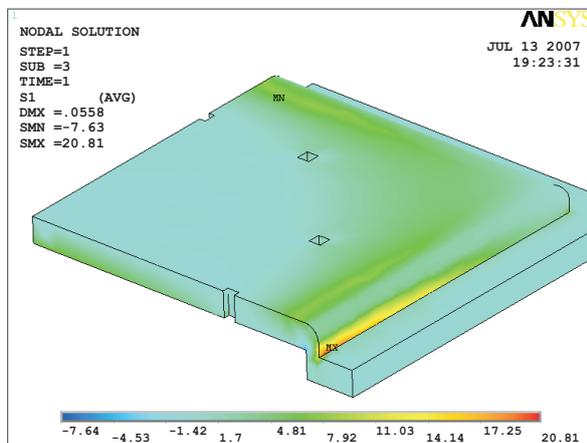


Abbildung 4.14: FEM-Simulation für die 1. Hauptspannung in einer $4,3\ \mu\text{m}$ dicken Dünnschichtkappe mit Ätzöffnungen

der analytischen Näherungslösung wie auch in den FEM-Modellen vernachlässigt werden. Der Koeffizient κ entfällt bzw. besitzt den Wert Eins.

Im Gegensatz zu den Ätzöffnungen führt die reale Einspannung der Dünnschichtkappe zu einer deutlichen Erhöhung der maximalen Plattendurchbiegung im Vergleich zu einer fest eingespannten Platte. Die Durchbiegung der nachgiebig eingespannten Platte ist bei gleicher Drucklast um 30 % größer als die der fest eingespannten (Abb. 4.15). In dem Modell der realen Einspannung sind auch Verschiebungen deutlich außerhalb der eigentlichen Platte zu erkennen. Dies entspricht dem Ansatz, die nachgiebige Einspannung als Verlängerung der Plattenfläche durch den Koeffizienten τ in Gleichung 4.31 zu betrachten. Dabei beeinflussen die Schichtdicke h , die Höhe der Kavität m und das Verhältnis der Seitenlängen $V_S = b/a$ den Betrag von τ .

Für die Bewertung des Einflusses der Ätzöffnungen wurden Dünnschichtkappen von $1,5\ \mu\text{m}$ bis $10,5\ \mu\text{m}$ Dicke und einer Fläche von $100 \times 100\ \mu\text{m}^2$ bis $400 \times 400\ \mu\text{m}^2$ modelliert. Die Größe der Ätzöffnungen wurde zwischen $1,2\ \mu\text{m}$ und $3\ \mu\text{m}$ variiert und in Abständen zwischen $20\ \mu\text{m}$ und $50\ \mu\text{m}$ angeordnet. Für keine der simulierten Geometrien konnte eine Änderung der Durchbiegung im Vergleich zu einer Dünnschichtkappe ohne Ätzöffnungen festgestellt werden. Eine Bildung von Spannungskonzentrationen an den Öffnungen konnte ebenfalls nicht festgestellt werden (Abb. 4.14). Demzufolge können die Ätzöffnungen in

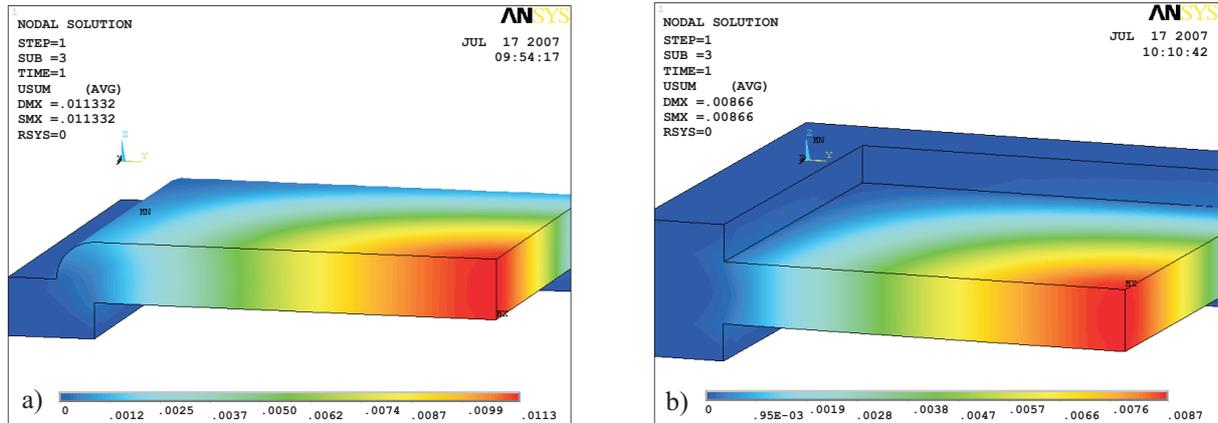


Abbildung 4.15: Vektorsumme der Verschiebungen in Folge einer Drucklast von 100 kPa in a) dem Modell der Dünnschichtkappe b) einer fest eingespannten Platte

Für die Ermittlung von τ wurde das Modell der Dünnschichtkappe jeweils mit fester und nachgiebiger Einspannung simuliert und dabei die drei Parameter h , m und V_S variiert. Die Eigenspannungen in der Platte wurden auf Null gesetzt, da sie in die analytische Näherungslösung nicht einbezogen sind. Das Gültigkeitskriterium für Kirchhoffplatten $w/h < 0,2$ wurde berücksichtigt und nur kleine Auslenkungen berechnet. Mittels der Simulationsergebnisse konnte die folgende Regressionsfunktion für τ bestimmt werden:

$$\tau = 0,19 \left(\frac{2 \cdot h + m}{a} \right)^{0,6} \cdot (1,8 - 5 \cdot e^{(-2,5V_S)}). \quad (4.33)$$

Das Ergebnis der Approximation der analytischen Näherungslösung an die reale Geometrie der Dünnschichtkappe durch τ ist in den Abbildungen 4.16, 4.17 und 4.18 gezeigt. In den Diagrammen sind die maximalen Durchbiegungen von Dünnschichtkappen unter 100 kPa Drucklast in Abhängigkeit der drei geometrischen Parameter m , V_S und h dargestellt. Es werden jeweils die Ergebnisse der analytischen Näherungslösung mit denen der FEM-Simulation (unter Vernachlässigung der Eigenspannung) verglichen. In den für die Verkappungstechnologie interessanten Bereichen der Parameter stimmen die Ergebnisse sehr gut überein.

Einen Vergleich der angepassten Näherungslösung mit dem vollständigen FEM-Modell zeigt Abbildung 4.19. In dem Diagramm sind die berechneten maximalen Durchbiegungen von Dünnschichtkappen aus PE-SiO mit -20 MPa Schichtspannung unter einer Last von 100 kPa dargestellt. Außerdem ist die zulässige maximale Durchbiegung für Kirchhoffplatten ($w = h/5$) eingezeichnet. Der in der analytischen Näherungslösung nicht berücksichtigte *Stress-Stiffening*-Effekt führt oberhalb dieser Grenze zu einer Versteifung der Platte und damit zu geringeren Durchbiegungen.

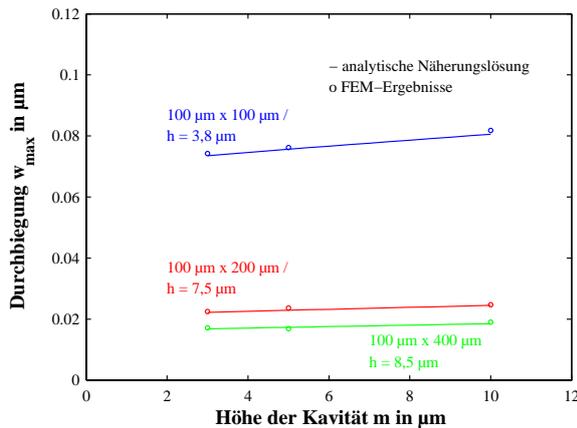


Abbildung 4.16: Abhängigkeit der Plattendurchbiegung von der Höhe der Kavität bei 100 kPa Drucklast

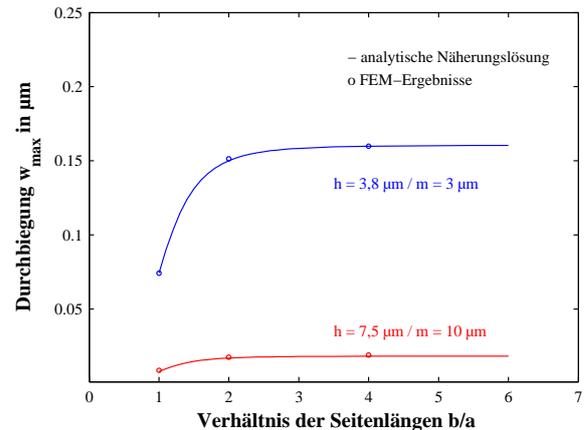


Abbildung 4.17: Abhängigkeit der Durchbiegung vom Verhältnis der Seitenlängen einer Platte V_S bei 100 kPa Drucklast

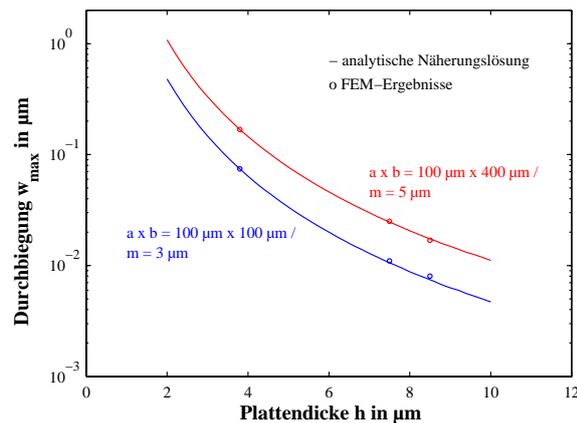


Abbildung 4.18: Abhängigkeit der Durchbiegung von der Plattendicke bei 100 kPa Drucklast

Der Einfluss einer negativen Eigenspannung (Druckspannung) von -20 MPa auf die Durchbiegung von Dünnschichtkappen wird ebenfalls in Abbildung 4.19 verdeutlicht. Während Zugspannungen generell zu einer Versteifung der Platte führen, können Druckspannungen sowohl eine Erweichung, als auch eine scheinbare Versteifung der Platte zur Folge haben. Letzteres geschieht, wenn die aus der Druckspannung resultierende Verwölbung der Platte eine Vorzugsrichtung entgegengesetzt zur äußeren Last besitzt. Eine Vorzugsrichtung

kann sich z. B. aus der Geometrie der Platte ergeben. Für die $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ große Platte in Abbildung 4.19 nimmt dieser Effekt mit steigender Schichtdicke zu. Dominiert die Auslenkung aufgrund der äußeren Lasten die aus den Eigenspannungen resultierende Auslenkung, wird die Vorzugsrichtung der Kraftwirkung aufgehoben und die Druckspannungen führen zu einer Erweichung der Platte. Die Simulationsergebnisse für die $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ große Struktur zeigen eine Erweichung gegenüber den ohne Eigenspannungen berechneten Werten für eine Plattendicke von $6,3 \mu\text{m}$ und $7,5 \mu\text{m}$. Für geringere Plattendicken nimmt die Steifigkeit aufgrund des *Stress-Stiffening*-Effektes wieder zu.

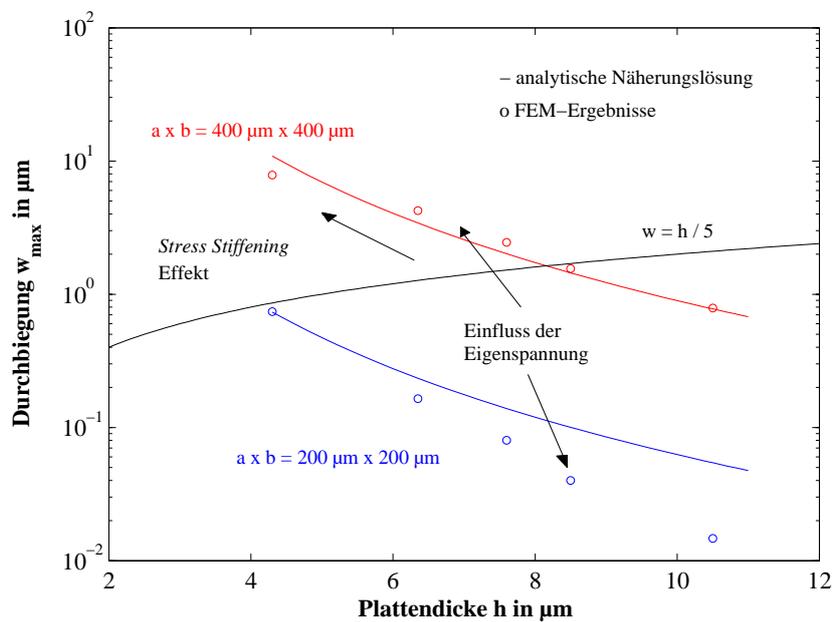


Abbildung 4.19: Vergleich der angepassten analytischen Näherungslösung mit dem vollständigen FEM-Modell anhand der maximalen Durchbiegung für Dünnschichtkappen unterschiedlicher Plattenfläche und -dicke bei 100 kPa Drucklast und -20 MPa Eigenspannung; die Gültigkeitsgrenze der Kirchhoffschen Gleichungen ($w = h/5$) ist ebenfalls angegeben

Kapitel 5

Technologieentwicklung

Für die Technologie zur Dünnschichtverkkappung von Mikrostrukturen sind sowohl einige mechanische Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe als auch die technologischen Prozesse für deren Bearbeitung wichtige Einflussfaktoren. In diesem Kapitel wird deshalb sowohl auf die Untersuchung relevanter Werkstoffeigenschaften als auch auf wichtige Einzelprozesse eingegangen. Allgemeine prozesstechnische Grundlagen und halbleitertechnologische Standardprozesse werden nicht tiefer gehend behandelt, dazu wird an entsprechenden Stellen auf geeignete Fachliteratur verwiesen. Lediglich die speziell für die Dünnschichtverkkappung modifizierten Prozesse werden ausführlich erläutert. Zuvor werden alle für die Durchführung der Prozesse und der Materialcharakterisierung notwendigen Anlagen, Geräte und Messverfahren vorgestellt.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Prozessschritte beziehen sich ausschließlich auf die Technologievariante A. Technologievariante B unterscheidet sich lediglich durch die Verwendung des galvanischen Nickels, das mit kommerziell erhältlichen Standardprozessen abgeschieden wurde. Die Angaben dazu sind im folgenden Abschnitt enthalten und können in [86] detailliert nachgelesen werden. Auf die umfassende Darstellung dieser Technologievariante wird verzichtet, da sich die Verwendung von Nickel aufgrund der hohen thermischen Spannungen in Verbindung mit Silizium als Substrat als nachteilig erwiesen hat. Die dazu durchgeführten Untersuchungen werden im Abschnitt 5.2.1.4 dargelegt.

5.1 Experimentelle Voraussetzungen

5.1.1 Probenpräparation und Anlagentechnik

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Halbleitersubstrate aus Silizium mit einem Durchmesser von 100 mm und 150 mm verwendet. Die Abscheide- und Strukturierungsprozesse wur-

den in kommerziell erhältlichen Anlagen durchgeführt. Vor der Prozessierung wurden die Wafer gekennzeichnet und einer Kernschen Reinigung unterzogen. Für die lithografische Strukturübertragung kam der *I-Line* Waferstepper „GCA 6300“ zum Einsatz. Die für die Abscheidung, Strukturierung und Entfernung der Schichten verwendeten Anlagen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

PECVD - Anlage „Precision 5000“

Die PECVD-Anlage „Precision 5000 DxZ“ von *Applied Materials* ist eine Einscheiben-Clusteranlage mit zwei 6-Zoll *Dual-Frequency* DxZ Prozesskammern. Die Elektrode ist in beiden Kammern höhenverstellbar und beheizt. Über Adapterwafer können auch 4-Zoll-Wafer bearbeitet werden. Für die vorliegende Arbeit wurde die Anlage zur Abscheidung von $\text{SiO}_x:\text{H}_y$ (PE-SiO), $\text{SiN}_x:\text{H}_y$ (PE-SiN) und des CF-Polymers verwendet. Die Anlagenparameter sind in Tabelle 5.1 angegeben.

Tabelle 5.1: Parameter der PECVD-Anlage „P 5000“

Prozessdruck	5...700 Pa
Abscheidetemperatur	20...450 °C
HF-Leistung (13,56 MHz)	0...1000 W
LF-Leistung (100...450 kHz)	0...600 W
Prozessgase	CH_4 , C_4F_8 , O_2 , NH_3 SiH_4 , N_2O , N_2

Trockenätzenanlagen

Die Trockenätzenanlage „Plasmalab System 100 ICP“ der Firma *Oxford Instruments Plasma Technology* ist eine Einscheiben-RIE-Anlage mit Planarreaktor, induktiv gekoppelter Plasmaquelle (Inductively Coupled Plasma, ICP) und höhenverstellbarer unterer Elektrode. Es können Wafer mit einem Durchmesser von 100 mm und 150 mm bearbeitet werden. Mit dieser Anlage wurden im Rahmen dieser Arbeit das PE-SiO, das PE-SiN und das CF-Polymer strukturiert. Die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Der PlasmaStripper „300“ von der *TePla AG* wird für die Entfernung von organischen Materialien, vor allem Fotolack, verwendet. Die Anlage besitzt einen *Barrel*-Reaktor mit Mikrowellengenerator und Infrarot-Temperatursensor. In dieser Anlage wurde die Opferschichtätzung durchgeführt. Die Anlagenparameter sind in Tabelle 5.3 angegeben.

Tabelle 5.2: Parameter der RIE-Anlage „Plasmalab System 100 ICP“

Prozessdruck	0,4...10 Pa
Elektrodentemperatur	0...20 °C
ICP-Leistung (13,56 MHz)	0...3000 W
Bias-Leistung (13,56 MHz)	0...300 W
Prozessgase	SF ₆ , O ₂ , Ar, CF ₄ , C ₄ F ₈ CHF ₃ , NF ₃ , H ₂ , N ₂

Tabelle 5.3: Parameter des Mikrowellen-Plasmastrippers „300“

Prozessdruck	20...200 Pa
Kammertemperatur	bis 200 °C
Mikrowellenleistung (2,45 GHz)	0...1000 W
Prozessgas	O ₂

Die Trockenätzanlage „XPL 251“ der Firma *Secon* ist eine Einscheiben-RIE-Anlage für Wafer mit einem Durchmesser von 100 mm. Sie besitzt zwei Planarreaktoren, wovon einer mit einem Mikrowellengenerator ausgestattet ist. Die Anlage ist zum Trockenätzen von Si, Al, Ti, W und anderen Metallschichten geeignet. Aufgrund des Charakters einer Laboranlage, bei der die meisten Parameter innerhalb der technischen Grenzen frei eingestellt werden können, wurde die Anlage für Veraschungsversuche von Fotolack verwendet. Die Anlagenparameter können der folgenden Tabelle 5.4 entnommen werden.

Tabelle 5.4: Parameter der Trockenätzanlage „XPL 251“

Prozessdruck	0,1...100 Pa
Elektrodentemperatur	45...100 °C
Mikrowellenleistung (2,45 GHz)	0...800 W
HF-Leistung (13,56 MHz)	0...750 W
LF-Leistung (100...400 kHz)	0...500 W
Prozessgase	SF ₆ , CF ₄ , CH ₄ , BCl ₃ Cl ₂ , N ₂ , O ₂ , Ar, H ₂

PVD - Anlagen

Das Sputtersystem „MS 150 x 4“ der Firma *FHR Anlagenbau GmbH* ist eine Einscheiben-Horizontalanlage für Wafer mit einem Durchmesser von 100 mm und 150 mm. Die Substrataufnahme wird durch spezielle Auflageteller realisiert, wodurch auch Einzelchips prozessiert werden können. Die Maschine besitzt zwei Prozesskammern, eine für die Wafer-vorbehandlung durch Sputterätzen und eine für die Schichtabscheidung durch Sputtern. Letztere ist mit vier Doppelringmagnetronquellen DRM 250 ausgestattet, die mit einer maximalen Leistung von 20 kW im DC-Betrieb belastet werden können. Im HF-Betrieb beträgt die maximale Leistung 1,6 kW. Der Basisdruck liegt bei 10^{-5} Pa und als Arbeitsdruck wird 0,7 Pa verwendet. Mit dieser Anlage wurde das Aluminium abgeschieden.

Die Vertikalsputteranlage „MRC 643“ der Firma *Materials Research Corporation* ist eine *Batch*-Anlage, die es ermöglicht neun Wafer gleichzeitig zu beschichten. Die Anlage verfügt über eine beheizbare Schleusenkammer sowie über eine Prozesskammer mit drei Targetplätzen und einer kombinierten Heiz- und Sputterätzstation. Der Basisdruck der Anlage liegt bei 10^{-5} Pa und der Arbeitsdruck kann zwischen 0,7 und 3,3 Pa variiert werden. Die Anlage kann sowohl im DC- als auch im HF-Betrieb mit einer Leistung von 0,5 bis 6 kW betrieben werden. Mit dieser Anlage wurde Kupfer als Startschicht für die elektrolytische Nickelabscheidung gesputtert.

Die Horizontalsputteranlage „HZSÜ-03“ der Firma *Elektromat Dresden* verfügt über eine Schleusenkammer sowie eine Prozesskammer mit drei Targetplätzen und einer Heizstation. Ebenfalls vorhanden ist eine Reaktivgassteuerung. Der Basisdruck liegt bei $1,0 \cdot 10^{-5}$ Pa. Mit dieser Anlage wurden die Haftsicht Titan und die Diffusionsbarriere Titanitrid für die Kupferstartschicht gesputtert.

Galvanikanlage „Compacta“

Die für die Nickelabscheidung verwendete Anlage „Compacta“ der Firma *Max Schlötter GmbH & Co. KG* wird standardmäßig für die Leiterplattenbeschichtung eingesetzt. Als Prozessparameter können über die Steuereinheit sowohl die Temperatur der Elektrolytlösung, als auch die Stromstärke, die Prozesszeit und die Geschwindigkeit der Substrat-halterbewegung variiert werden. Die Nasszellenstrecke besteht aus den Vorbehandlungsbädern (Reiniger, Mikrobeize, Dekapierer), den Becken für die nach jedem Arbeitsschritt nötigen Spritz- und Kaskadenspülungen sowie der eigentlichen Elektrolysezelle. Als Elektrolyt wurde das kommerzielle Nickelbad „Norma“ verwendet. Die Zusammensetzung ist in Tabelle 5.5 angegeben.

Tabelle 5.5: Zusammensetzung des Nickelbades „Norma“

Bestandteil	Konzentrationsbereich
Nickel	40 ... 80 g/l
Chlorid	8 ... 15 g/l
Borsäure	35 ... 45 g/l
Nickelbadzusatz Slotonik M	keine Angaben
Nickelbadzusatz BFL	keine Angaben

5.1.2 Messverfahren und Messtechnik

Schichtspannungsmessungen

Die Schichtspannungsmessungen wurden mit dem Messsystem „FLX 2900“ der Firma *Tencor* durchgeführt. Das Messprinzip basiert auf der Ermittlung der durch die Schichtspannungen hervorgerufenen Waferkrümmung. Dazu wird das Profil des Substrates vor und nach der Beschichtung mittels Lasertriangulation vermessen und so die Differenz der Krümmungsradien r_s ermittelt. Anhand der Materialkonstanten des Substrates (E-Modul E_s und Querkontraktionszahl ν_s) sowie der Substratdicke d_s und der Schichtdicke d_f kann die Eigenspannung σ_s in der Schicht mit der Stoney-Gleichung berechnet werden [97]:

$$\sigma_s = \frac{E_s}{6(1 - \nu_s)} \cdot \frac{d_s^2}{d_f} \cdot \frac{1}{r_s}. \quad (5.1)$$

Diese Gleichung gilt für Schichtdicken, die deutlich kleiner als die Substratdicke sind und für Verwölbungen, die maximal ein Verhältnis von 1:2 zur Substratdicke aufweisen. Außerdem besteht die Möglichkeit den Probenraum bis 900 °C zu erwärmen, um so die Temperaturabhängigkeit der Schichtspannung zu untersuchen. Um die Oxidation der Proben zu verhindern kann der Probenraum mit Stickstoff gespült werden.

Der Messfehler des Gerätes bezüglich der Krümmungsradien wird vom Hersteller mit >10 km angegeben (zufälliger Fehler). Hinzu kommt der Fehler bei der Bestimmung der Schichtdicke. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass der relative Fehler kleiner als 10% ist. Von jeder Probe wurde die Spannung parallel und senkrecht zur Hauptphase gemessen und daraus der Mittelwert gebildet. Für die Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens der Schichten wurde nur in einer Richtung gemessen.

Schichtdickenbestimmung mittels Ellipsometrie

Die Ellipsometrie ist ein zerstörungsfreies optisches Messverfahren, welches die Änderung des Polarisationszustandes einer reflektierten elektromagnetischen Welle misst. Mit dieser Methode können der Brechungsindex und die Schichtdicke einer oder mehrerer optisch transparenter Schichten auf Siliziumsubstraten ermittelt werden. Die Änderung des Polarisationszustandes wird durch den komplexen Quotienten ρ_{rk} des Reflexionskoeffizienten R_p für parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht und des Reflexionskoeffizienten R_s für senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht wie folgt beschrieben

$$\rho_{rk} = \frac{R_p}{R_s} = \tan \Psi \cdot e^{\Delta}. \quad (5.2)$$

Ψ und Δ sind die so genannten ellipsometrischen Winkel, wobei $\tan \Psi$ das Amplitudenverhältnis und Δ die Phasenwinkeldifferenz zwischen der parallelen und senkrechten Teilwelle beschreiben.

Das für die Schichtdickenmessungen verwendete spektroskopische Ellipsometer „SE 850“ der Firma *SENTECH Instruments GmbH* nutzt als Lichtquelle eine Xenon-Lampe mit einer Wellenlänge von 350...1700 nm und erreicht damit in Abhängigkeit von der Schichtdicke eine Genauigkeit von ca. 10 Ångström.

Schichtdickenbestimmung mittels Schichtwiderstandsmessung

Für die Schichtdickenmessung an unstrukturierten Metallschichten wird die Schichtwiderstandsmessung eingesetzt. Der Schichtwiderstand R_{\square} , der in Ω/\square angegeben wird, ist der elektrische Widerstand eines quadratischen Schichtausschnittes entlang einer Seite. Er hängt nur vom spezifischen Widerstand ρ_{el} und der Dicke der Schicht ab, da für einen quadratischen Schichtausschnitt mit der Seitenlänge l und der Dicke d_f

$$R_{\square} = \frac{l \cdot \rho_{el}}{l \cdot d_f} = \frac{\rho_{el}}{d_f} \quad (5.3)$$

gilt. Die Bestimmung des Schichtwiderstandes R_{\square} erfolgte mit dem automatischen 4-Spitzen Messplatz „Omnimap RS50e“ der Firma *KLA-Tencor Prometrix*. Die vier Messspitzen sind in einer Reihe angeordnet. Über zwei Spitzen wird ein Strom in die Schicht eingespeist, um die über den anderen beiden Spitzen abfallende Spannung zu messen.

Um dieses Verfahren für die Schichtdickenbestimmung einzusetzen, muss der spezifische Widerstand der zu messenden Schicht bekannt sein. Dazu wird an einem Referenzwafer mit bekannter Schichtdicke der Schichtwiderstand gemessen, und darüber der spezifische Widerstand berechnet.

Topografiebestimmung

Für die Abbildung der Topografie standen neben diversen Lichtmikroskopen die Rasterelektronenmikroskope „Cambridge Stereoscan S 260“ von *Leica* und „Gemini 982“ der Firma *LEO Zeiss* zur Verfügung. Letzteres ist mit einem Röntgenspektrometer der Firma *Röntec GmbH* für die energiedispersive Röntgenanalyse (energy-dispersive X-Ray, EDX) ausgestattet.

Mittels des Profilometers „Alpha-Step 200“ von *Tencor* können die Rauigkeit und die Topografie von Oberflächen sowie die Dicke von Schichten erfasst werden. Dabei wird das Oberflächenprofil mit der Stylus-Methode abgebildet, indem eine Diamantnadel mit konstanter Geschwindigkeit über die Probe gezogen wird. Die Schichtdickenmessung erfolgt an Stufen, die zuvor durch Strukturierungsprozesse erzeugt wurden. Voraussetzung für eine genaue Messung sind eine hinreichend harte Schicht und ein ausreichend ebenes Substrat. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass variierende Schichteigenschaften, wie z. B. Brechungsindex oder spezifischer Widerstand, keinen Einfluss auf das Messergebnis haben. Der Spitzenradius der verwendeten Diamantnadeln betrug 2,5 bzw. 12,5 μm . Die vertikale Messgenauigkeit wird mit 5 nm angegeben.

Bestimmung der Haftfestigkeit von Schichten

Die Bestimmung der Haftfestigkeit wurde mit dem Tapetest nach Standard ASTM D3359-02 [98] durchgeführt. Die Vorgehensweise ist im Anhang A erläutert.

Messung der Plattendurchbiegung mittels Mirau - Interferometrie

Für die Messung der Dünnschichtkappenverwölbung in Folge von Eigenspannungen in den Schichten oder einer Druckdifferenz zwischen der Kavität und der Umwelt wurde ein Mikroskop mit einem Interferenz-Objektiv nach Mirau verwendet. Mit dieser Messeinrichtung ist es möglich das Höhenprofil einer Fläche zu bestimmen.

Das Mirau-Interferometer arbeitet mit einer Weißlichtquelle und einem monochromatischen Filter der Wellenlänge $\lambda=515\text{ nm}$. Die Interferenzen entstehen durch die Überlagerung von zwei Teilstrahlen, die durch Aufspalten des aus dem Objektiv tretenden Lichtes an einem teildurchlässigen Spiegel entstehen. Nach der Reflexion am Objekt bzw. dem Referenzspiegel vereinigen sich die Teilstrahlen und interferieren miteinander. Je nach Gangunterschied zwischen Mess- und Referenzstrahl entstehen helle (Interferenzmaxima) und dunkle (Interferenzminima) Interferenzstreifen. Der Abstand zwischen zwei Interferenzmaxima bzw. -minima entspricht jeweils dem Gangunterschied zwischen den Teilstrahlen und damit einem Höhenunterschied auf dem Objekt von $\lambda/2$.

Bestimmung des E-Moduls mittels Nanoindenter

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls der verwendeten Schichtmaterialien erfolgte mittels des Nanoindentationsgerätes „UMIS-2000“ der Firma *CSIRO* in Zusammenarbeit mit der Professur „Physik fester Körper“ an der TU Chemnitz. Bei diesem ursprünglich für die Härtebestimmung entwickelten Verfahren wird die Probe mit einem definierten Lastzyklus be- und entlastet. Dabei wird kontinuierlich die Eindringtiefe des Indenters in die Probe aufgezeichnet. Der dabei ermittelte Zusammenhang aus Last und Eindringtiefe kann für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls verwendet werden. Auf Basis der von Schwarzer [99] verallgemeinerten Hertzschen Theorie zum Kugeleindruckversuch, können mittels kugelförmigem Indenter auch bis zu fünf geschichtete Materialien analysiert werden. Die Theorie beruht auf der Übertragung der Methode der Spiegelladungen aus der Elektrostatik auf den mechanischen Kontakt mit Hilfe der modernen Potentialtheorie. Die Grundlagen sowie die Anwendung des Verfahrens zur Bestimmung von Eigenschaften geschichteter Materialien sind in [99] und [100] dargelegt.

5.2 Werkstoffuntersuchungen

Die Eigenschaften der Dünnschichtkappe werden erheblich von den verwendeten Materialien beeinflusst. Wie bei mikromechanischen Elementen im Allgemeinen, so ist auch in diesem speziellen Fall die messtechnische Charakterisierung der Materialeigenschaften am Mikrosystem selbst nicht oder nur eingeschränkt möglich. Die Strukturabmessungen im Mikrometer- und Submikrometerbereich, die komplexe geometrische Anordnung der Werkstoffe und die daraus resultierende Überlagerung unterschiedlicher Effekte erschweren oder verhindern die Bestimmung der Werkstoffparameter. Aus diesem Grund erfolgten die Untersuchungen der materialbezogenen Eigenschaften an speziell für die Messungen abgeschiedenen ganzflächigen Schichten. Die Schichtdicken und Materialkombinationen wurden analog zu denen in der Dünnschichtkappe präpariert. Dabei wurden die Abscheidebedingungen variiert, da diese teilweise einen erheblichen Einfluss auf die Materialeigenschaften besitzen.

Die Auswahl der Werkstoffe erfolgte anhand der Materialeigenschaften und vor allem unter Berücksichtigung der Integrierbarkeit in die Verkappungstechnologie sowie der Kompatibilität zu HARMS, insbesondere AIMS. In Abschnitt 3.3 wurden diesbezüglich bereits Anforderungen an die Schichtwerkstoffe formuliert. Das CF-Polymer als Opfermaterial wurde vor allem aufgrund der prozesstechnischen Möglichkeiten gewählt. Die trockene Abscheidung aus der Dampfphase und die hochselektive, trockene Entfernung im Sauerstoffplasma gaben den Ausschlag für dieses Material. Dennoch sind Materialeigenschaften

wie die Temperaturstabilität, die Haftfestigkeit sowie niedrige Schichtspannungen wichtig für die Integration in die Technologie.

Die Dünnschichtkappe kann in Abhängigkeit der Technologievariante aus unterschiedlichen Materialkombinationen bestehen. Für die Abscheidung der Schichten kommen dabei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Die Wahl des Verfahrens hängt vom Material selbst, den verfahrensspezifischen Materialeigenschaften sowie von der Prozesstemperatur des Verfahrens ab. Thermische Oxidation und Gasphasenepitaxie können beispielsweise aufgrund der hohen Prozesstemperaturen nicht verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden als Schichtabscheidungsverfahren die plasmagestützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) und die physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) verwendet. Die Verfahren werden in den Abschnitten 5.3 – 5.5 hinsichtlich des Einflusses auf die Prozessintegration kurz bewertet. Darüber hinaus wurden auch Versuche mit der galvanischen Abscheidung von Nickel als alternative Technologievariante durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden ebenfalls in diesem Kapitel dargestellt.

Aufgrund der Tatsache, dass die Dünnschichtkappe dem Schutz des Mikrosystems dient, sind in erster Linie mechanische Eigenschaften der Kappenmaterialien interessant. Für die Festigkeit der Kappe sind ein möglichst hoher E-Modul, eine hohe Haftfestigkeit auf dem Untergrund und eine Minimierung der Eigenspannungen in den Schichten bzw. dem Schichtstapel wichtig. Darüber hinaus können der elektrische Widerstand oder die Durchschlagsfestigkeit der Materialien von Bedeutung sein, falls direkter Kontakt mit den Leitbahnen besteht. Bei Verwendung von dielektrischen Schichten wie Siliziumoxid oder Siliziumnitrid kann jedoch von einer ausreichenden elektrischen Isolation ausgegangen werden. Eine Schirmung gegen elektromagnetische Strahlung, die ebenfalls gefordert sein kann, wird durch die Beschichtung der Kappe mit einem Metall (beispielsweise Aluminium) gewährleistet.

Die Hermetizität ist neben der mechanischen Festigkeit die wichtigste geforderte Eigenschaft der Dünnschichtkappe (Abschn. 2.1.2.4). Die Permeabilität des Schichtstapels, insbesondere der Verschlusschicht, ist deshalb ein weiterer wichtiger Parameter, der von den verwendeten Materialien abhängt. Darüber hinaus haben aber auch die dreidimensionale komplexe Geometrie (Schichtstapel mit Ätzöffnungen und Stufen) und die Grenzflächen zwischen den Schichten einen erheblichen Einfluss auf die Dichtheit der Dünnschichtkappe. Aus diesen Gründen wurde nicht die Permeabilität der Einzelschichten als Materialparameter ermittelt, sondern die tatsächlich interessierende Dichtheit der Dünnschichtkappe an gefertigten Teststrukturen untersucht (Abschn. 6.3).

5.2.1 Mechanische Eigenspannungen im Schichtstapel der Dünnschichtkappe

In dünnen Schichten treten nach deren Abscheidung auf ein Substrat in der Regel mechanische Spannungen σ_s , so genannte Schichtspannungen bzw. Eigenspannungen, auf. Diese setzen sich aus der intrinsischen Spannung σ_i und der thermischen Spannung σ_{th} zusammen:

$$\sigma_s = \sigma_i + \sigma_{th}. \quad (5.4)$$

Die intrinsische Spannung beruht auf der während des Abscheideprozesses entstehenden Unordnung im Gefüge einer Schicht (Gitterbaufehler). Ursachen hierfür können der Einbau von Fremdatomen, eine Gitterfehlpassung, die Ausheilung von Fehlstellen sowie Versetzungen, eine Rekristallisation, die Phasenumwandlung oder auch Korngrenzenwachstum sein [101]. Entscheidenden Einfluss haben dabei die Abscheidetemperatur, der Inertgasdruck oder die Energie eines Ionenbeschusses. Eine Berechnung der intrinsischen Spannung ist nicht möglich. Es existieren zwar Modelle für diverse Schichtwachstumsphänomene, die Vorgänge sind aber zu komplex, um die intrinsische Eigenspannung einer Schicht zuverlässig vorauszusagen.

Die thermische Spannungskomponente ist auf unterschiedliche thermische Ausdehnungen von Substratmaterial und Schichtmaterial infolge einer Temperaturänderung nach der Abscheidung zurückzuführen. In Abhängigkeit der materialspezifischen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Substrat α_{sub} und Schicht α_{film} , dem Elastizitätsmodul E_{film} und der Poisson-Zahl ν_{film} der Schicht, sowie der Temperaturdifferenz ΔT kann die thermische Spannung berechnet werden:

$$\sigma_{th} = \frac{E_{film}}{1 - \nu_{film}} (\alpha_{film} - \alpha_{sub}) \Delta T. \quad (5.5)$$

Schichtspannung und Elastizitätsmodul sind im Allgemeinen tensorielle Größen. Die Deformation des Wafers durch Schichtspannungen ist allerdings nur auf die Komponente parallel zur Waferoberfläche zurückzuführen. Nur diese Komponente wird mit dem verwendeten Verfahren (s. Abschn. 5.1.2) gemessen. Da die untersuchten Schichten als isotrop angesehen werden können und die Siliziumwafer orthotrop sind, d.h. in den beiden gemessenen Richtungen (parallel und senkrecht zur Hauptphase) die gleichen Materialeigenschaften besitzen, werden die Schichtspannungen im Folgenden als skalare Größe betrachtet.

Wie bereits im Kapitel 3 dargestellt, ist die Dünnschichtkappe aus einem Schichtstapel von bis zu drei unterschiedlichen Materialien (s. Abb. 5.1) zusammengesetzt. Bei Technologievariante A besteht die Membranschicht aus PE-SiO. Die Verschlusschicht setzt sich aus einer Kombination von PE-SiO und Aluminium oder aus PE-SiO, PE-SiN und Aluminium zusammen. Bei Technologievariante B besteht die Membranschicht aus Nickel und die Verschlusschicht aus Aluminium. Unter der Annahme, dass die Höhe der Schichtspannung nicht von der Schichtdicke abhängt und gleichmäßig über diese verteilt ist, kann die Gesamtspannung eines Schichtstapels näherungsweise aus den Dicken (d_j) und den Schichtspannungen (σ_j) der j Einzelschichten mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\sigma_{ges} = \sum_j \sigma_j \frac{d_j}{\sum_j d_j}. \quad (5.6)$$

Die nach der Abscheidung verbleibenden Eigenspannungen in den Schichten variieren bei allen verwendeten Materialien in Abhängigkeit der Prozessparameter. Die Prozess Temperatur, die Abscheiderate und die Plasmaleistung sind die wichtigsten Einflussgrößen bei den PECVD-Schichten. Die resultierende Gesamtschichtspannung im Mehrschichtsystem kann also durch die gezielte Beeinflussung der Schichtspannung einer Einzelschicht mittels der Prozessparameter, und durch die geeignete Kombination der Schichten entsprechend der Gleichung 5.6 eingestellt werden.



Abbildung 5.1: Übersicht über die Materialpaarungen der verwendeten Schichtstapel

Neben den Prozessparametern haben auch nachfolgende Temperaturbehandlungen (*annealing*) und eine zeitabhängige Relaxation infolge der Dehnung von Materialien Einfluss auf die intrinsische Spannung in einer Schicht. Deshalb wurden die Schichtspannungen sowohl der Einzelschichten, wie auch der Schichtstapel experimentell bestimmt und der Einfluss einiger Prozessparameter, sowie das thermomechanische und das Langzeitverhalten charakterisiert. Dazu wurden sowohl Messungen bei Raumtemperatur, als auch über Heiz- und Abkühlzyklen durchgeführt. Die notwendigen zerstörungsfreien Schichtdickenmessungen wurden für die Isolatormaterialien mittels Ellipsometrie und für die Metalle mittels Schichtwiderstandsmessungen durchgeführt.

5.2.1.1 Schichtspannungen in den PECVD-Schichten

Für die Abscheidung des PE-SiO standen auf der Anlage „P5000“ zwei Standardprozesse zur Verfügung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht modifiziert wurden. Es handelt sich dabei um einen Hochrateprozess (HDR-SiO) mit einer Abscheiderate von 1000 nm/min und einen Niedrigraterprozess (LDR-SiO) mit 300 nm/min. Die Prozessparameter sind in Tabelle 5.6 gegenübergestellt. Um die mit diesen Prozessen erzeugten PE-SiO Schichten bezüglich der Eigenspannungen zu vergleichen, wurden Wafer mit Schichtdicken zwischen 200 nm und 3000 nm beschichtet. Die Messungen wurden unmittelbar nach der Abscheidung durchgeführt. In Abbildung 5.2 ist zu sehen, dass im Hochrate-Oxid deutlich höhere Druckspannungen als im Niedrigrater-Oxid vorhanden sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei höheren Abscheideraten verstärkt Wasserstoff und OH-Gruppen in die Schicht eingebaut werden, was zu einer Verschiebung der Spannungswerte in Richtung Druckspannung führt [102].

Tabelle 5.6: Übersicht über die verwendeten Prozessparameter bei der Abscheidung von Siliziumoxid und Siliziumnitrid mittels PECVD

Parameter	Einheit	LDR-SiO	HDR-SiO	SiN
Abscheiderate	nm/min	300	1000	750
Prozessdruck	Pa	410	360	630
Prozesstemperatur	°C	350	400	400
HF-Leistung	W	75	400	250-1050
SiH ₄ -Fluss	Pa · cm ³ /s	0,076	0,22	0,51
N ₂ O-Fluss	Pa · cm ³ /s	3,38	3,38	0
N ₂ -Fluss	Pa · cm ³ /s	0	0	6,75
NH ₃ -Fluss	Pa · cm ³ /s	0	0	0,20

Außerdem ist zu sehen, dass mit zunehmender Schichtdicke die Druckspannung abnimmt. Dafür werden in der Literatur zwei mögliche Gründe angeführt. Erstens nimmt die H- und OH-Konzentration in dem bereits abgeschiedenen Teil der Schicht während der weiteren Prozessdauer aufgrund der Temperatureinwirkung ab. Das führt zu einer Verringerung der Druckspannung. Zweitens wird Feuchtigkeit auf der reaktiven Oberfläche der abgeschiedenen Schicht adsorbiert. Dies führt zu höheren Druckspannungen in einem Bereich an der Schichtoberfläche, der unabhängig von der Schichtdicke ist. Für die aus den Verwölbungsmessungen berechnete Spannung gilt die Annahme, dass sie gleichmäßig über die Schichtdicke verteilt ist. Durch diese Mittelwertbildung hat die erhöhte Druckspan-

nung an der Oberfläche für dünne Schichten einen wesentlich höheren Einfluss als für dicke Schichten [102]. Ohne nachfolgende Temperaturbehandlung und ohne Berücksichtigung möglicher Relaxationsmechanismen zeigt sich das LDR-SiO im Schichtdickenbereich ab 1500 nm aufwärts als geeignet für die Verwendung in der Dünnschichtkappe, da nur geringe Druck- oder Zugspannungen vorhanden sind.

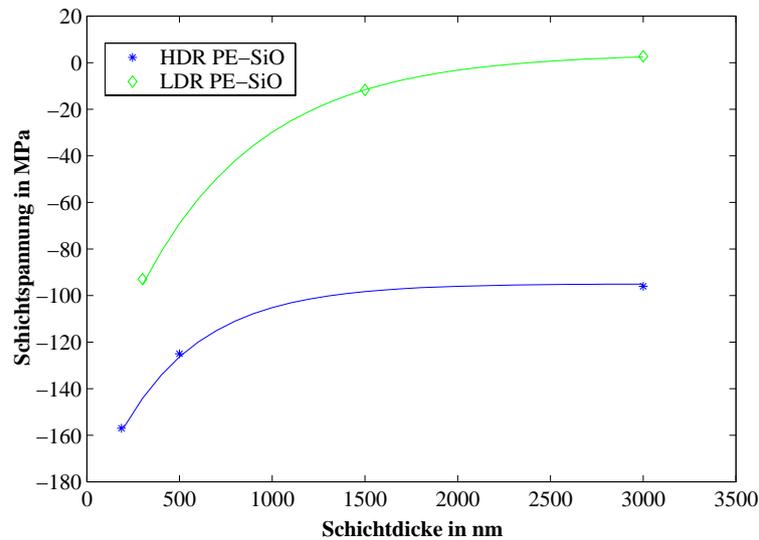


Abbildung 5.2: Schichtspannung von PE-SiO nach der Abscheidung in Abhängigkeit der Abscheiderate und der Schichtdicke

Die Abscheidung des PE-SiN erfolgte in der gleichen *Dual-Frequency*-Prozesskammer in der auch das Siliziumoxid abgeschieden wurde. Durch die Einkopplung der Plasmaleistung mittels einer hohen (13,56 MHz) und einer niedrigen Frequenz (100-450 kHz) können die Plasmadichte und die Ionenenergie getrennt voneinander eingestellt werden. Dadurch kann die Eigenspannung in der abgeschiedenen Schicht in einem großen Bereich von Druckspannung bis Zugspannung variiert werden [103]. Ursache dafür ist auch in diesem Fall der prozessabhängige Einbau von Wasserstoff und OH-Gruppen. Aufgrund des erhöhten Ionenbombardements bei größeren LF-Plasmaleistungen verschiebt sich die Eigenspannung in Richtung Druckspannung [104]. Dazu wurden am Zentrum für Mikrotechnologien Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 5.3 für 500 nm und 2000 nm Schichtdicke dargestellt sind. Mit steigender Plasmaleistung von 200 W bis 1100 W verschiebt sich die Eigenspannung des PE-SiN von 300 MPa zu -500 MPa. Durch die Verwendung des PE-SiN im Schichtstapel der Dünnschichtkappe kann somit, neben der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, die resultierende Gesamtspannung des Schichtstapels völlig unabhängig von den verwendeten Schichtdicken der anderen Materialien eingestellt werden.

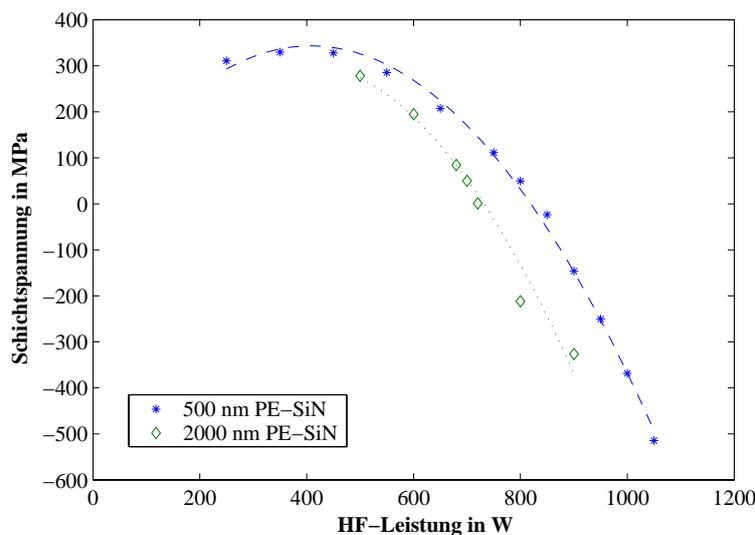


Abbildung 5.3: Schichtspannung von PE-SiN in Abhängigkeit der Plasmaleistung und der Schichtdicke

Thermomechanisches Verhalten

Da die Schichten der Dünnschichtkappe während nachfolgender Prozesse Temperaturen von bis zu 400 °C ausgesetzt sind und darüber hinaus auch in der Anwendung im Temperaturbereich von -40 bis 150 °C belastet werden können, ist es notwendig das thermomechanische Verhalten zu betrachten. Dabei sind weniger die bekannten und berechenbaren thermischen Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Interesse, sondern vielmehr reversible und irreversible Änderungen der intrinsischen Spannungen. Da die Temperatur im Spannungsmessgerät (S. 99) konstruktionsbedingt nur bis zur Kühlmitteltemperatur abgesenkt werden kann, wurde ausschließlich der positive Temperaturbereich, von Raumtemperatur ausgehend, untersucht.

Für diese Messungen wurden die Proben in Stickstoffatmosphäre mehrmals entsprechend des Temperaturzyklus A (Abb. 5.4) auf 400 °C erhitzt und wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. In Abbildung 5.5 ist exemplarisch die temperaturabhängige Spannungsänderung einer Probe bei drei thermischen Zyklen dargestellt. Zwischen den Messungen wurden die Wafer jeweils einen Monat und nach der dritten Temperung über einen Zeitraum von 12 Monaten bei konstanten Bedingungen gelagert (23 °C, 40 % Luftfeuchtigkeit). Die deutliche Hysterese, d.h. die irreversible Änderung der Eigenspannung in der Schicht von 5 MPa auf 60 MPa nach der Temperung, wird durch die Austreibung von H und H₂O hervorgerufen. An der Oberfläche adsorbierte und durch Mikroporen in die Schicht diffundierte Feuchtigkeit entweicht und es werden Silanol-Bindungen (SiOH) aufgebrochen. Dabei bildet sich SiO₂ und H₂O wird freigegeben [102].

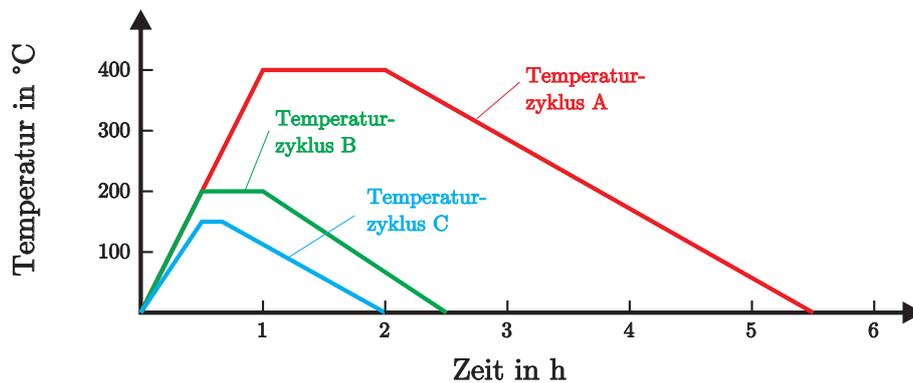


Abbildung 5.4: Darstellung der für die Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens der Schichten verwendeten Temperaturzyklen

Während der einmonatigen Lagerung reduziert sich die Spannung um etwa 20 MPa zurück auf 40 MPa. Durch die zweite Temperung erhöht sich die Zugspannung abermals und verringert sich wieder während der zweiten Lagerung. Diese Änderung der Spannung während der Lagerung bei Raumtemperatur ist durch die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft zu erklären. Das Wasser adsorbiert an der Oberfläche, diffundiert durch Mikroporen in das Innere der Schicht und lagert sich dort an Fehlstellen an [105]. Die Spannungsänderung durch die Temperaturbehandlung ist also reversibel, da der Wasserstoff in Form von Feuchtigkeit aus der Umgebung wieder in die Schicht gelangt.

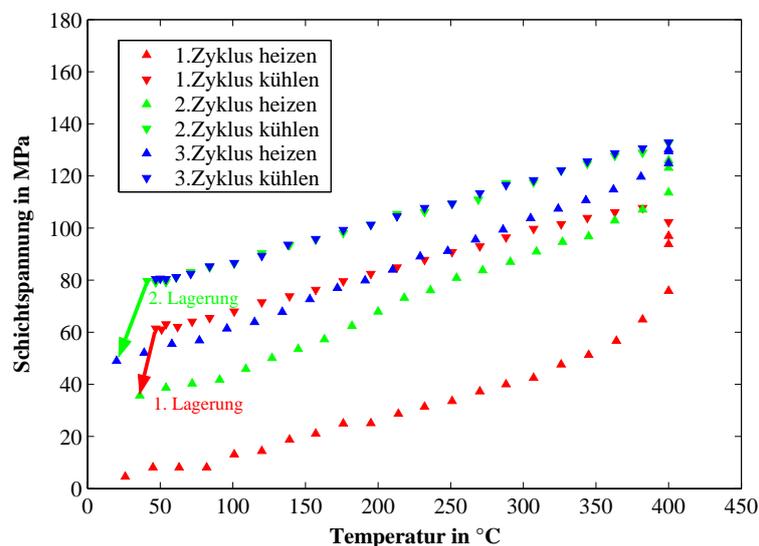


Abbildung 5.5: Verlauf der Spannung bei der Probe 46/02/03 (3000 nm LDR PE-SiO) in Abhängigkeit von der Temperatur bei drei aufeinander folgenden Aufheiz- und Abkühlzyklen entsprechend des Temperaturzyklus A mit jeweils einmonatiger Lagerung zwischen den Messungen

Die Spannungsänderung durch die Feuchtigkeitsaufnahme wird durch die Lagerzeit, die Schichtdicke und die Abscheidetemperatur beeinflusst. Haque untersuchte diese Abhängigkeiten [102] und kam zu dem Schluss, dass dünnere und bei niedrigeren Prozesstemperaturen hergestellte Schichten während der Lagerung zu einer stärkeren Veränderung der Spannung in Richtung Druck führen, wobei sich nach ca. 60 Tagen ein nahezu stabiler Wert einstellt. Der Einfluss der Schichtdicke zeigte sich auch bei den durchgeführten Messungen. In Tabelle 5.7 sind die ermittelten Messwerte aufgelistet. Die Änderung der Spannung nach der Temperung ist für dünne Schichten deutlich höher. Da die Feuchtigkeitsaufnahme von der Oberfläche ausgeht, nimmt mit zunehmender Schichtdicke die Wasserstoffkonzentration und damit auch der Einfluss auf die mittlere Spannung der Schicht ab.

Tabelle 5.7: Veränderung der Schichtspannung in LDR-SiO unterschiedlicher Dicke nach Temperaturbehandlungen und Lagerungen bei Raumtemperatur

Schicht- dicke in nm	Schichtspannung in MPa						
	<i>as deposited</i>	1.Temp.- zyklus	20 Tage 21 °C	2.Temp.- zyklus	24 Tage 21 °C	3.Temp.- zyklus	411 Tage 21 °C
350	-92,5	85,8	-55,0	122,6	112,6	148,3	-245,4
1500	-11,6	67,3	23,9	89,6	22,6	86,7	-15,5
3000	2,5	60,8	35,7	78,8	49,0	78,8	27,2

Die angegebenen Werte sind Mittelwerte, der relative Messfehler beträgt $\pm 5\%$

Zur Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens des PE-SiN wurden 2000 nm dicke Schichten mit 700 W Plasmaleistung abgeschieden und dem gleichen Temperaturzyklus ausgesetzt wie die Proben mit PE-SiO. In Abbildung 5.6 sind die Messergebnisse exemplarisch für eine Probe dargestellt. Bei der ersten Temperung ist wiederum eine Hysterese zu beobachten, im Unterschied zum Siliziumoxid tritt diese jedoch erst bei Temperaturen oberhalb der Abscheidetemperatur auf. Nach einer einmonatigen Lagerung und nachfolgenden Messungen ist keine Veränderung der Eigenspannung bei Raumtemperatur zu erkennen. Die Gründe für die Hysterese sind wie beim Siliziumoxid die Abgabe von Wasserstoff und die Ausheilung von Defekten. Da das Siliziumnitrid aber Feuchtigkeit nicht wieder aufnimmt, bleibt die Eigenspannung in der Schicht bei unveränderter Temperatur konstant. Für eine weitere Austreibung von Wasserstoff oder Ausheilung von Defekten ist eine Steigerung der *Annealing*-Temperatur notwendig. Eine mechanische Relaxation ist ebenso wenig wie bei PE-SiO zu beobachten [106, 104].

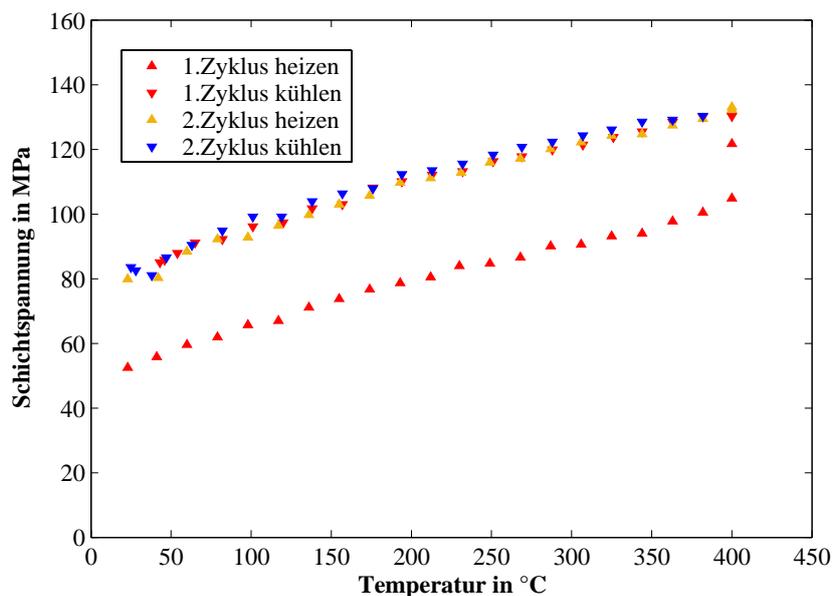


Abbildung 5.6: Verlauf der Spannung bei der Probe 46/11/03 (2000 nm PE-SiN) in Abhängigkeit von der Temperatur bei zwei aufeinander folgenden Temperaturzyklen A mit einmonatiger Lagerung zwischen den Messungen

Dies bedeutet, dass nach einer gezielten Temperung der Nitridschicht mit einer Temperatur die oberhalb der späteren maximalen Betriebstemperatur liegt, die intrinsische Spannung konstant bleibt. Lediglich die thermische Spannung aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien, die mit der Gleichung 5.5 berechnet bzw. in Abbildung 5.6 an der Kurve für den zweiten Temperaturzyklus abgelesen werden kann (hier 0,14 MPa/K), führt bei einer Änderung der Umgebungstemperatur zu einer reversiblen Spannungsänderung. Damit bestätigt sich die gute Eignung des verwendeten PE-SiN hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften und seiner Barriereigenschaften gegenüber Feuchtigkeit.

5.2.1.2 Spannungsrelaxation und thermomechanisches Verhalten der gesputterten Aluminiumschicht

Das Verhalten von gesputtertem Aluminium im Bezug auf die Schichtspannungen unterscheidet sich gegenüber dem von PECVD-Schichten. Dies begründet sich zum einen durch die unterschiedlichen Abscheideprozesse (es wird kein H eingebaut) und zum anderen durch die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Während Siliziumoxid und Siliziumnitrid elastische Materialien sind, zeigt Aluminium plastisches Verhalten. Das heißt, bei Überschreiten einer materialabhängigen Spannung bzw. Dehnung, der so genannten Streckgrenze, entstehen irreversible plastische Verformungen im Material. Außerdem ist

Aluminium viskoelastisch, d.h. bei dauerhafter Belastung des Materials erfolgt eine zeitabhängige Änderung der Spannung (Relaxation).

Zum viskoelastischen Verhalten von Aluminium wurden im Rahmen der AIM-Technologieentwicklung am ZfM Untersuchungen an gesputterten Aluminiumschichten durchgeführt [107]. Abbildung 5.7 zeigt die Änderung der Eigenspannung in einer 500 nm Al-Schicht über einen Zeitraum von 900 Tagen nach einer Temperaturbehandlung von 400 °C (1 h Heizen; 0,5 h Halten; 3,5 h Abkühlen). Das Al wurde mit einer DC-Leistung von 3 kW bei 0,7 Pa Prozessdruck auf einem (100)-Siliziumwafer abgeschieden. Nach 10 Tagen ist die Schicht bereits um über 50 % relaxiert. Ein stabiler Wert stellt sich nach ca. 100 Tagen ein. Dieses Verhalten ist in guter Übereinstimmung zu Daten aus der Literatur [108].

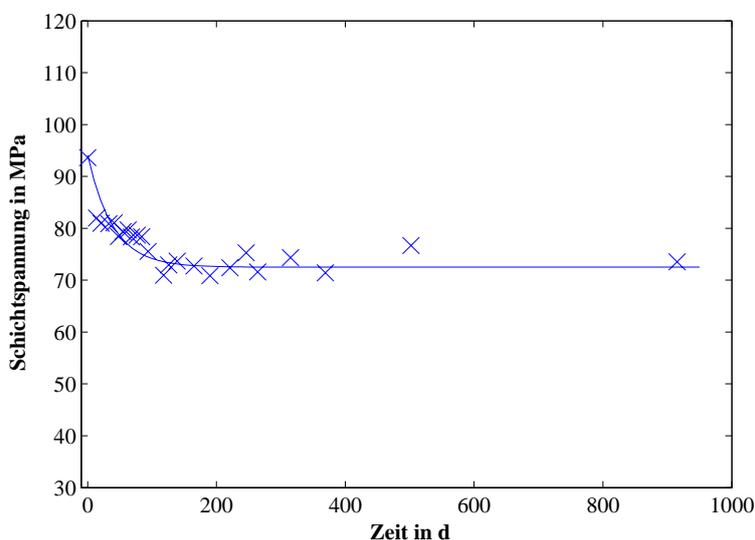


Abbildung 5.7: Verlauf der Schichtspannung einer Probe mit 500 nm Aluminium während einer Lagerung über einen Zeitraum von 900 Tagen bei Raumtemperatur

Das thermomechanische Verhalten des Aluminiums wurde an 1000 nm und 2000 nm dicken Schichten untersucht. Die Abscheideparameter betragen ebenfalls 3 kW DC-Leistung und 0,7 Pa Prozessdruck. In Abbildung 5.8 sind die gemessenen Spannungswerte für eine 1000 nm dicke Al-Schicht exemplarisch dargestellt. Zur Probe mit 2000 nm gibt es nur geringfügige Abweichungen, die eher auf Messungenauigkeiten, als auf ein schichtdickenabhängiges Verhalten zurückzuführen sind, deshalb wird auf eine Darstellung verzichtet. Die Eigenspannung bei Raumtemperatur betrug nach der Abscheidung 54 MPa. Bei der darauf folgenden Lagerung über 120 Tage verringerte sich die Spannung auf 31 MPa.

Die Proben wurden zwei Temperaturzyklen bis 400 °C ausgesetzt. Bis zu einer Temperatur von 100 °C zeigt das Aluminium elastisches Verhalten. Die Spannung ändert sich linear

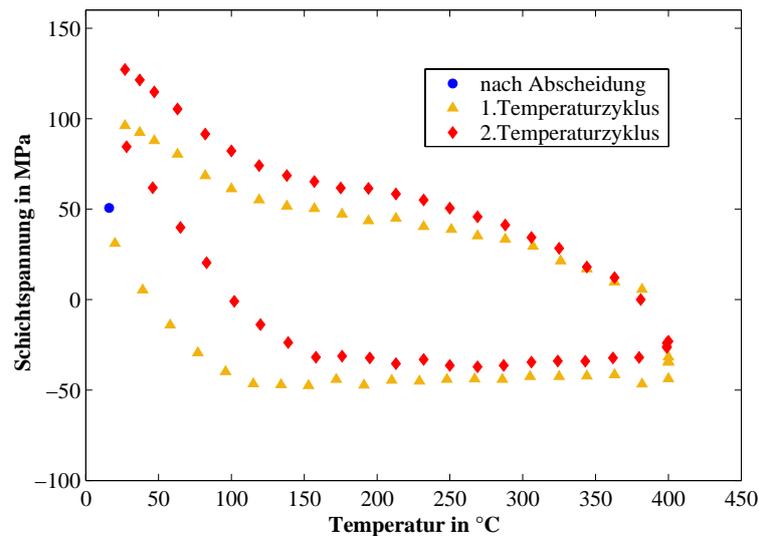


Abbildung 5.8: Schichtspannung in Abhängigkeit der Temperatur einer Probe mit 1000 nm Al bei zwei Temperaturzyklen A (s. Abb. 5.4)

mit der Temperatur aufgrund des unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten im Vergleich zu Silizium, so wie es bei den dielektrischen Materialien zu beobachten ist. Oberhalb von 100 °C kommt es zu plastischen Veränderungen in der Schicht und die Spannung bleibt annähernd konstant bei -50 MPa. Diese Relaxation der Druckspannung wird vor allem auf thermisch aktiviertes Korngrenzenwachstum und die Ausheilung von Strukturdefekten zurückgeführt [108]. Während des Abkühlens bleiben plastische Veränderungen in der Schicht, auch wenn sie bis 150 °C teilweise wieder abgebaut werden, und die verbleibende Schichtspannung erhöht sich auf 96 MPa. Der zweite Temperaturzyklus verläuft qualitativ wie der erste Zyklus, wobei sich eine weitere Erhöhung der verbleibenden Spannung auf 122 MPa ergibt.

5.2.1.3 Thermomechanisches Verhalten des Schichtstapels

Um den Einfluss der Temperatur auf die Schichtsysteme sowie deren Langzeitverhalten zu untersuchen, wurden Proben mit unterschiedlichen Schichtkombinationen hergestellt. In Tabelle 5.8 sind die Dicken der Einzelschichten von zwei Proben mit PE-SiO und Al sowie von zwei Proben mit einer zusätzlichen PE-SiN-Schicht angegeben. Die Dicken der dielektrischen Schichten wurden ellipsometrisch ermittelt (Abschn. 5.1.2), die Dicke des Aluminiums wurde mittels Schichtwiderstandsmessung bestimmt.

Die Proben wurden nach der Abscheidung der PECVD-Schichten ein erstes Mal dem Temperaturzyklus A ausgesetzt. Nach dem Sputtern des Aluminiums wurde dieser Temperaturzyklus zwei weitere Male wiederholt. Darauf folgte eine 300-tägige Langzeitlage-

Tabelle 5.8: Zusammensetzung der für die Spannungsmessungen verwendeten Schichtsysteme

Proben- nummer	Einzelschichtdicken in nm				Gesamtdicke in nm
	LDR-SiO	HDR-SiO	SiN	Al	
46/08/01	1510	2960	-	1010	5480
46/08/02	1490	4980	-	1950	8420
46/11/01	1430	2920	1990	1980	8320
46/11/02	1440	4470	2000	1930	9840

zung bei 23 °C und 40 % Luftfeuchtigkeit um eine eventuelle Relaxation zu beobachten. Abschließend wurden die Proben nach Temperaturzyklus C getempert, um die thermische Belastung entsprechend den Anforderungen an MEMS nachzuempfinden. Während und nach jedem Temperaturzyklus wurde die Schichtspannung gemessen. In Abbildung 5.9 ist die resultierende Eigenspannung des Schichtstapels von Probe 46/08/01 und in Abbildung 5.10 die des Schichtstapels von Probe 46/11/01 in Abhängigkeit der Substrattemperatur dargestellt. Die Spannungsverläufe der Proben 46/08/02 und 46/11/02 sind mit den jeweils Abgebildeten prinzipiell identisch, weshalb auf eine Darstellung verzichtet wird.

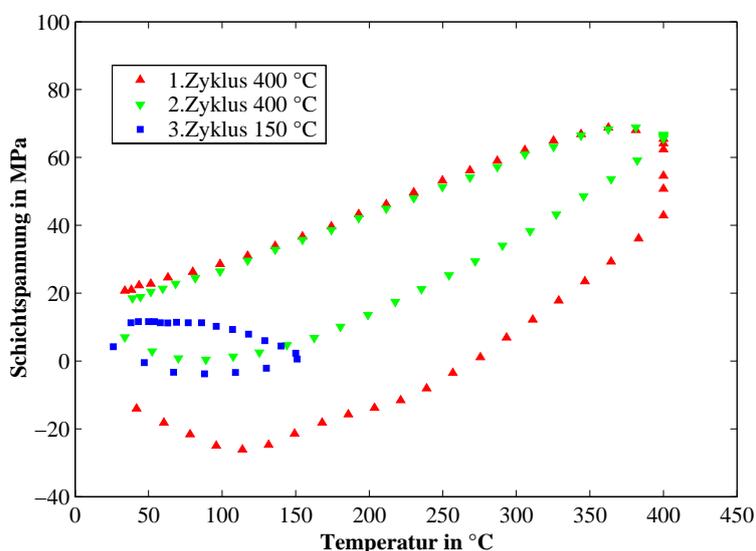


Abbildung 5.9: Resultierende Eigenspannung des Schichtstapels der Probe 46/08/01 in Abhängigkeit der Temperatur während der Temperaturzyklen A und C

Während der ersten Temperung der Probe 46/08/01 – ohne PE-SiN – ist die Überlagerung der in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Spannungsverläufe von PE-SiO und

Al deutlich zu erkennen. Bis knapp über 100 °C sinkt die Spannung linear entsprechend der resultierenden thermoelastischen Geraden beider Materialien. Oberhalb von 100 °C beginnen, wie bereits beschrieben, die plastischen Veränderungen im Gefüge des Al und die resultierende Gesamtspannung steigt analog zu der PE-SiO-Einzelschicht (Abb.5.5). Nach dem Erreichen der Maximaltemperatur von 400 °C wird diese konstant gehalten, wobei die Spannung weiter ansteigt. Dieser Anstieg kann auf das Kriechen von Al, begünstigt durch die hohe Temperatur, zurückgeführt werden. Das Austreiben von Feuchtigkeit aus dem PE-SiO kommt als Ursache nicht in Betracht, da die Temperung des Oxids, die Abscheidung des Aluminiums und die erste Temperung des Schichtstapels unmittelbar nacheinander erfolgten, und somit keine Feuchtigkeitsaufnahme stattfinden konnte. Nach dem Abkühlen verbleibt, wie bei den Einzelschichten, eine irreversible Spannungsänderung im Schichtstapel. Während des zweiten Temperaturzyklus ist die für Aluminium typische Hysterese zu beobachten, ohne dass eine weitere irreversible Änderung der Spannung erfolgt. Zu erkennen ist außerdem eine geringe Relaxation der Spannung während der Lagerung zwischen den Temperaturzyklen. Dabei ist der Betrag dieser Spannungsänderung nach einer einwöchigen Pause zwischen erster und zweiter Temperung annähernd gleich dem Betrag nach einer Langzeitlagerung. Dieses Verhalten stimmt gut mit dem untersuchten Relaxationsverhalten von Aluminium (Abb. 5.7) überein. Da sich nach der Langzeitlagerung die Eigenspannung des Schichtstapels nicht deutlich in Richtung Druckspannung verändert hat, kann daraus geschlossen werden, dass keine Feuchtigkeitsaufnahme des Siliziumoxids stattgefunden hat. Diese Tatsache bestätigt die Eigenschaft des Aluminiums als Feuchtigkeitsbarriere.

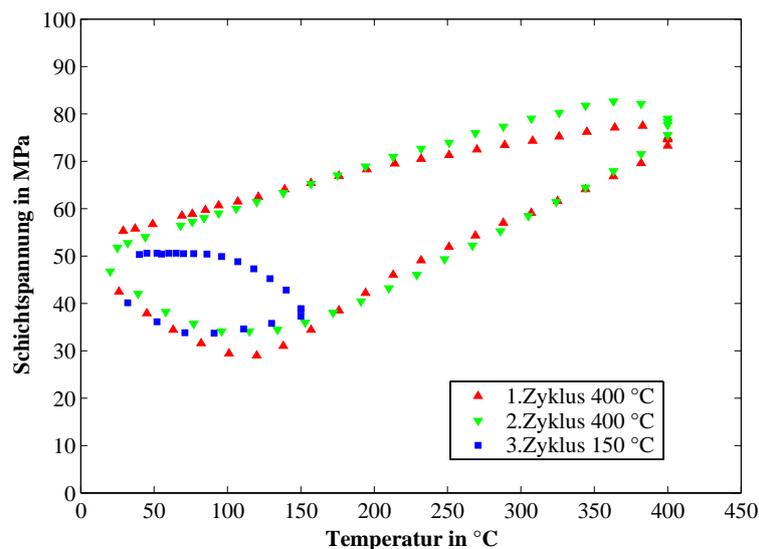


Abbildung 5.10: Resultierende Eigenspannung des Schichtstapels der Probe 46/11/01 in Abhängigkeit der Temperatur während der Temperaturzyklen A und C

Während der ersten beiden Temperaturzyklen der Probe mit PE-SiN im Schichtstapel (Abb. 5.10) zeigen die Spannungen in Abhängigkeit von der Temperatur qualitativ die gleichen Verläufe wie während des zweiten Zyklus der Probe ohne PE-SiN. Es erfolgt weder eine deutliche Spannungsänderung während des Haltens der Maximaltemperatur, noch eine irreversible Spannungsänderung. Auch die Relaxation des Aluminiums hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die resultierende Gesamtspannung des Materialstapels. Die geringe Spannungsänderung dieser Schichtkombination, sowohl in Abhängigkeit der Temperatur, als auch über die Zeit, ist vorteilhaft für die Verwendung als Dünnschichtkappe.

In Tabelle 5.9 sind die resultierenden Schichtspannungen der vier untersuchten Proben vor und nach der Aluminiumabscheidung, sowie nach den beiden Temperaturzyklen A, der Lagerung und dem Temperaturzyklus C, zusammengefasst. Zwischen den beiden Proben ohne PE-SiN und zwischen den Proben mit PE-SiN ist jeweils nur ein geringer quantitativer Unterschied der Spannungswerte zu erkennen. Wie zu erwarten nehmen die Spannungswerte für größere Schichtdicken ab. Positiv hervorzuheben ist die geringe Spannungsänderung über einen 10-monatigen Zeitraum. Für beide Schichtstapelvarianten kann davon ausgegangen werden, dass das PE-SiO keine Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen kann.

Tabelle 5.9: Zusammenstellung der resultierenden Eigenspannungen der Schichtsysteme aus Tabelle 5.8 nach den jeweiligen Prozessschritten

Proben- nummer	Schichtspannung in MPa					
	PECVD getempert	mit Al	1.Temp.- zyklus A	2.Temp.- zyklus A	303 Tage 23 °C	Temp.- zyklus C
46/08/01	-26,3	-3,5	20,4	18,0	6,5	11,3
46/08/02	-22,1	-6,1	14,5	9,3	1,0	6,4
46/11/01	37,3	49,3	55,3	51,7	43,1	50,3
46/11/02	33,6	43,1	47,3	43,9	36,2	42,2

5.2.1.4 Schichtspannungen im galvanisch abgeschiedenen Nickel

Die Versuche bezüglich der Schichtspannungen im Nickel wurden innerhalb einer Diplomarbeit [86] durchgeführt. Der Aufbau der Startschicht bestand aus 20 nm Ti als Haftschicht und 100 nm Cu oder alternativ dazu aus 10 nm Ti, 20 nm TiN als Diffusionsbarriere und 100 nm Cu. Dabei konnten jedoch keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich Schichthaftung und Eigenspannungen beobachtet werden. Untersucht wurde der Einfluss des

Badzusatzes BFL der Firma *Max Schlötter GmbH & Co. KG* auf die Spannungen in den mit dem Elektrolyten „Norma“ (siehe Tabelle 5.5 auf S. 99) abgeschiedenen Nickelschichten. Laut Sicherheitsdatenblatt [109] besteht der Zusatz aus einer wässrigen Lösung organischer Sulfonamide.

In Abbildung 5.11 sind die Spannungsmessungen an den Nickelschichten mit unterschiedlicher Konzentration des Badzusatzes BFL im Elektrolyten (c_{BFL}) dokumentiert. Der Einfluss des Badzusatzes konnte deutlich nachgewiesen werden. Die hohen Zugspannungen für Schichten aus zusatzfreien Bädern, die in Abhängigkeit der Schichtdicke zwischen 530 MPa ($0,48 \mu\text{m}$) und 780 MPa ($2,0 \mu\text{m}$) liegen, können deutlich reduziert werden. Mit einer Konzentration von $c_{BFL} = 0,75 \text{ ml/l}$ liegen die Spannungen im Bereich zwischen 60 MPa und 70 MPa, mit einem Gehalt von $5,0 \text{ ml/l}$ kann die verbleibende Spannung in den Bereich zwischen -50 MPa bis -70 MPa Druckspannung verschoben werden. Außerdem wird die Abhängigkeit der Eigenspannung von der Schichtdicke im technologisch interessanten Bereich von $0,5 \mu\text{m}$ aufwärts nahezu beseitigt.

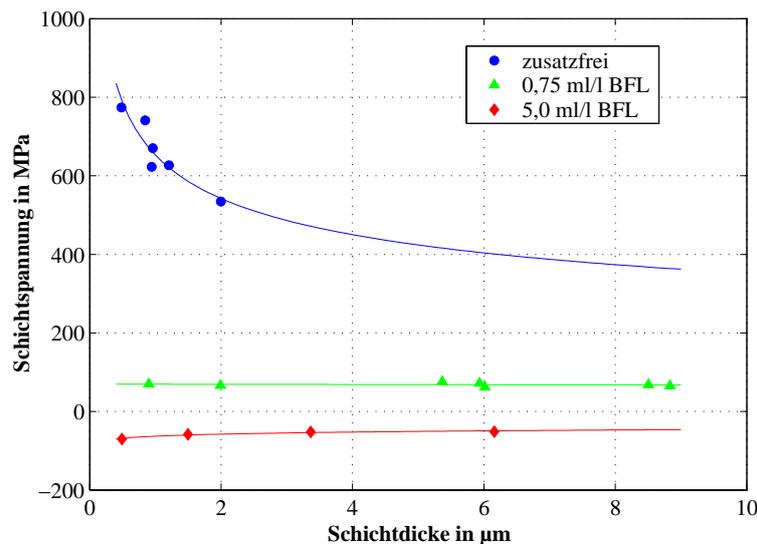


Abbildung 5.11: Einfluss des Nickelbadzusatzes BFL auf die verbleibende Schichtspannung nach der Abscheidung in Abhängigkeit der Schichtdicke; dargestellt sind Schichten aus einem zusatzfreien Bad, einem Bad mit $c_{BFL} = 0,75 \text{ ml/l}$ und einem Bad mit $c_{BFL} = 5,0 \text{ ml/l}$

Ursache für beide Effekte sind die in die Schicht sowohl auf interstitiellen als auch substitutionellen Positionen eingebauten Fremdatome, die Einfluss auf die Schichteigenschaften, wie z. B. die inneren Spannungen, ausüben. Üblicherweise besitzen galvanische Schichten eine dendritische (verzweigte) Struktur. Durch den Zusatz organischer Additive wie BFL – so genannte Glanzbildner – wird ein lamellares (geschichtetes) Wachstum und ein feinkörnigeres Gefüge erzielt [110]. Eine strukturelle Fehlanpassung zwischen Startschicht und dem aufwachsenden Material führt zu hohen Spannungen in den ersten Lagen der galvanischen

schen Schicht, da diese von der Gitterstruktur der Startschicht geprägt sind. Daraus resultiert die große Dickenabhängigkeit der Eigenspannungen in den zusatzfrei abgeschiedenen Nickelschichten. Die feinkörnigere Struktur der mit BFL-Zusatz hergestellten Schichten besitzt dagegen eine geringere strukturelle Fehlanpassung zur gesputterten Kupferstartschicht und zeigt deshalb kaum eine Schichtdickenabhängigkeit der Eigenspannungen.

Um einerseits die Zuverlässigkeit der Dünnschichtkappen im typischen Arbeitsbereich von Mikrosystemen im Temperaturintervall von -40 °C bis 125 °C sicherzustellen, und da andererseits die Haftfestigkeit der Startschicht durch eine Temperaturbehandlung erhöht werden kann (Abschn. 5.2.3), wurden die Eigenspannungen des Schichtsystems Ti/Cu/Ni über einen Temperaturbereich von 20 °C bis 200 °C gemessen. Abbildung 5.12 zeigt die Spannungswerte eines $1,0\text{ }\mu\text{m}$ dicken Schichtsystems mit einer BFL-Konzentration von $c_{BFL} = 0,75\text{ ml/l}$ über zwei Temperaturzyklen.

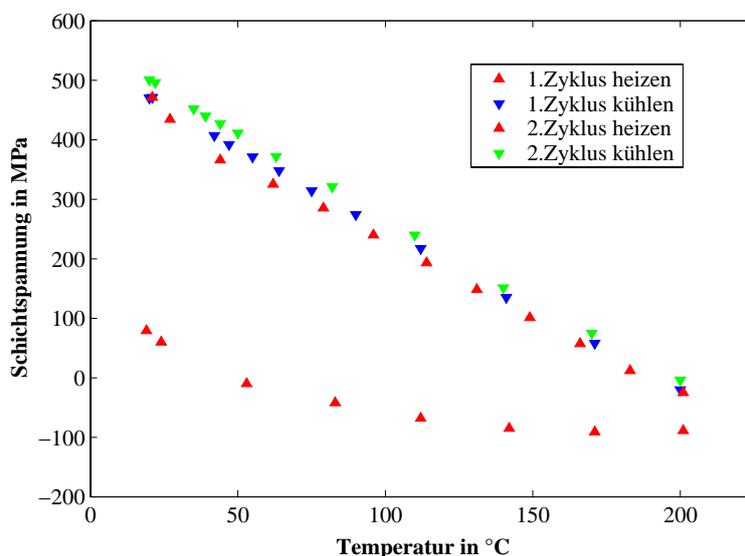


Abbildung 5.12: Schichtspannung in Abhängigkeit der Temperatur einer Probe mit $0,9\text{ }\mu\text{m}$ Ni, $0,1\text{ }\mu\text{m}$ Cu und $0,01\text{ }\mu\text{m}$ Ti über zwei Temperaturzyklen B (Abb. 5.4)

Während der ersten Erwärmung sinkt die Spannung linear bis zu einer Temperatur von ca. 50 °C . Diese Änderung bis leicht über die Abscheidetemperatur von 40 °C resultiert aus der Differenz zwischen den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Schichten und des Substrates. Oberhalb dieser Temperatur kommt es wie bei Al zu plastischen, thermisch induzierten Gefügeänderungen. Während der Abkühlung zeigen die Spannungsänderungen ein lineares elastisches Verhalten entsprechend der thermoelastischen Geraden.

Im Verlauf des zweiten Temperaturzyklus sind keine weiteren plastischen Veränderungen zu beobachten. Der Schichtstapel hat nach einem ersten Temperprozess die thermomechanische Stabilität erreicht und die Spannungen ändern sich nur noch aufgrund der Differenz

zwischen den thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Steigung der daraus resultierenden thermoelastischen Geraden variiert in Abhängigkeit der Schichtdicke und der BFL-Konzentration zwischen 2,4 MPa/K und 3,2 MPa/K. In Tabelle 5.10 sind die Spannungen von unterschiedlichen Schichtsystemen mit galvanischem Nickel nach der Abscheidung und nach der ersten Temperung zusammengestellt. Der niedrigste Wert von 306 MPa für die nach einer Temperung verbleibende Eigenspannung konnte mit einer BFL-Konzentration von $c_{BFL} = 5$ ml/l und einer Dicke des Schichtsystems von 3,4 μm realisiert werden.

Tabelle 5.10: Eigenspannungen in den Schichtstapeln nach der galvanischen Abscheidung des Nickels und nach der Temperung B bis 200 °C in Abhängigkeit der Schichtdicke des Nickels und der Konzentration des BFL im Elektrolyten

c_{BFL} in ml/l	Nickel- dicke in μm	Schichtstapelspannung	
		<i>as deposited</i>	getempert
		in MPa	
0,75	1,0	79	470
	3,7	71	405
	6,1	66	370
5	3,4	-48	306
0	0,9	723	1018

Durch eine Steigerung der BFL-Konzentration im Elektrolyten könnte eine weitere Verringerung der bei Raumtemperatur wirkenden Schichtspannung erzielt werden. Die Steigung der thermoelastischen Geraden bliebe jedoch gleich oder würde nur geringfügig erhöht. Die Änderung der Eigenspannung in Abhängigkeit der Temperatur und damit die Rückwirkung der Dünnschichtkappe auf das Mikrosystem blieben sehr groß.

5.2.2 Bestimmung des E- Moduls der Kappenmaterialien

Die Kenntnis der E-Moduln der verwendeten Schichtmaterialien ist notwendig für die Dimensionierung der Dünnschichtkappe. Da sich die Materialeigenschaften dünner abgeschiedener Materialschichten von denen der Bulk-Materialien unterscheiden können, wurden die E-Moduln der Membran- und Verschlusschichten in Zusammenarbeit mit der Professur „Physik fester Körper“ bestimmt. Dafür wurde das in Abschnitt 5.1.2 beschriebene Nanoindentationsverfahren verwendet.

Für die Messungen wurden Einzelschichten auf (100)-Siliziumwafern abgeschieden und entsprechend der im Prozessablauf auftretenden Temperaturen getempert. Die Schichtdicken und die Messergebnisse für die untersuchten Materialien können der Tabelle 5.11 entnommen werden. Neben den Messergebnissen sind Werte aus der Literatur für den E-Modul vergleichbarer Schichten und die Bruchfestigkeit der verwendeten Materialien angegeben. Die Werte für die Bruchfestigkeit dienen nur zur Orientierung, da ein Bruch auch bei wesentlich geringeren Spannungen auftreten kann. Zum einen beeinflusst der Abscheidungsprozess die Materialstruktur [110] und damit unmittelbar die Festigkeit einer Schicht. Zum anderen haben die Geometrie (Kanten, Ecken) sowie die Oberflächenbeschaffenheit (Kratzer, Kerben) von Mikrostrukturen großen Einfluss auf die Rissbildung und damit auf die Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung der Bruchgrenze [11].

Tabelle 5.11: E-Modul und Bruchfestigkeit der verwendeten Materialien

Material	Annealing- temperatur in °C	Schicht- dicke in µm	E-Modul		Bruch- festigkeit in GPa
			Messwert in GPa	Literatur in GPa	
PE-SiO	400	3	45–60	75 [111]	8,4 [2]
PE-SiN	400	2	120–130	145 [112]	14 [2]
Ni	200	6	151	140 [113]	0,14–0,2 [114]
Al	400	–	–	47–74 [115]	0,04–0,05 [114]

Für das gesputterte Aluminium konnte der E-Modul nicht zuverlässig ermittelt werden. Aufgrund plastischer Verformung tritt bei Aluminium, wie bei den meisten Metallen, der so genannte *Pile-up*-Effekt auf. Dabei kommt es zu Aufwölbungen des verdrängten Materials oberhalb der ursprünglichen Oberfläche, wodurch sich die wirkende Kontaktfläche um bis zu 50 % vergrößert [116]. Da die Änderung der Kontaktfläche nicht ermittelt werden kann, kommt es zu großen Messunsicherheiten. Für die Dimensionierung der Dünnschichtkappe wurde aus diesem Grund der E-Modul für Aluminium aus der Literatur übernommen.

5.2.3 Haftfestigkeit der Kappenmaterialien

Die Untersuchungen zur Schichthaftung wurden mittels Tapetest (s. Anhang A) an ganzflächig abgeschiedenen Schichten und Schichtsystemen im Rahmen einer Diplomarbeit [86] durchgeführt. Dabei wurden die Einzelschichten und die Schichtverbünde nach deren Abscheidung und nach Temperaturbelastungen bis 400 °C – bei Nickel 200 °C – getestet. Für

PE-SiO, PE-SiN und Aluminium konnten in keinem Fall Schichtabhebungen beobachtet werden. Beim Brechen von freigelegten Dünnschichtkappen zu Analysezwecken, traten selbst bei den schmalsten Rahmenbreiten von 50 μm (s. Anhang C) keine Haftungsprobleme auf.

Für die Technologievariante B wurde der Schichtstapel bestehend aus Titan, Kupfer und Nickel auf thermischem SiO₂ untersucht. Titanitrid wurde zusätzlich als Diffusionsbarriere verwendet, ein Einfluss auf die Haftfestigkeit konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Nach der Abscheidung des Nickels wurde schichtdickenunabhängig ein ganzflächiger Abriss der Kupferschicht vom Titan beobachtet. Da die Abscheidung von Titan und Kupfer in zwei unterschiedlichen Anlagen mit Unterbrechung des Vakuums erfolgt, wächst eine dünne Titanoxidschicht auf der Oberfläche. Diese verringert aufgrund ihrer geringeren Reaktivität – und den damit einhergehenden geringeren Bindungskräften zu benachbarten Schichten – die Haftung des Kupfers [117].

Um die Haftfestigkeit des Schichtsystems zu steigern wurden die Proben 30 Minuten in Stickstoffatmosphäre getempert. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 5.12 zusammengefasst. Die Tests zeigen, dass bis zu einer Temperatur von 175 °C keine deutliche Verbesserung der Haftung festzustellen ist. Die Schichten lösen sich ganzflächig bei Verwendung des schwächsten Klebebandes mit 5 N Klebekraft. Nach einer Temperung bei 200 °C ist jedoch mit dem stärksten zur Verfügung stehenden Klebeband (15 N) keinerlei Abriss zu erkennen. Diese sehr gute Haftwirkung kann auf die Ausbildung eines Diffusionsüberganges zwischen Haft- und Startschichtmetallisierung zurückgeführt werden [110]. Problematisch ist dabei die in Abschnitt 5.2.1.4 dargestellte Erhöhung der mechanischen Eigenspannung in der Nickelschicht.

Tabelle 5.12: Einfluss von Tempertaurobehandlungen auf die Haftfestigkeit des Schichtsystems Ti/Cu/Ni, die Ermittlung der Haftfestigkeit erfolgte mittels Tapetest (Anhang A)

Probe	Temperung in °C	Dauer in min	Klebekraft in N	Note
1	110	30	5	0
2	150	30	5	0
3	175	30	5	0
4	200	30	15	5

5.2.4 Zusammenfassung

Die Materialstapel aus PE-SiO/Al sowie aus PE-SiO/PE-SiN/Al haben sich aufgrund ihrer guten Haftung auf dem Untergrund und ihres guten thermomechanischen Verhaltens, insbesondere in Bezug auf die Eigenspannungen der Schichtstapel, als geeignet für die Verwendung als Konstruktionsmaterial für die Dünnschichtverkappung von Mikrostrukturen erwiesen. Dabei ist hervorzuheben, dass die Kombination mit PE-SiN aufgrund des deutlich höheren E-Moduls und der Eigenschaft als Feuchtigkeitsbarriere die bessere Alternative ist. Außerdem kann durch Veränderung der Prozessparameter bei der PE-SiN-Abscheidung die resultierende Eigenspannung des Schichtstapels in einem großen Bereich eingestellt werden.

Im Gegensatz dazu erwies sich das galvanisch abgeschiedene Nickel, trotz der prozesstechnischen Vorteile und seines hohen E-Moduls, für die in dieser Arbeit untersuchte Technologie als nicht geeignet. Die Eigenspannung der Nickelschicht kann zwar durch den Zusatz von BFL entsprechend den Anforderungen eingestellt werden. Jedoch nach der für eine ausreichende Haftung notwendigen Temperung bei 200 °C stellen sich aufgrund von thermisch induzierten Gefügeänderungen hohe Zugspannungen ein, die zur Delamination des Nickels und zu Rissen in der Dünnschichtkappe führen. Aus diesen Gründen wurde die Verwendung des Nickels als Membranschicht nicht weiter verfolgt. In diesem Kapitel werden deshalb, in Bezug auf die Membran- und Verschlusschicht, ausschließlich die für die Technologievariante A notwendigen Prozessschritte betrachtet.

5.3 Opferschichttechnik mittels CF - Polymer

Die Opferschichttechnik ist für viele Mikrotechnologien zur Herstellung von mikromechanischen Strukturen ein Schlüsselprozess. Das Prinzip besteht darin, eine temporäre Stützschiicht – die so genannte Opferschicht – zu realisieren, auf der nachfolgend eine Strukturschicht aufgebracht wird. Durch das Entfernen der Stützschiicht entsteht ein Hohlraum unter der Strukturschicht, so dass bei geeigneter Anordnung frei bewegliche Strukturen entstehen. Alle bekannten Technologien zur Erzeugung von Dünnschichtkappen stützen sich ebenfalls auf das Opferschichtprinzip, um den notwendigen Abstand zwischen Kappe und beweglicher Struktur zu realisieren.

Drei Prozessschritte sind notwendig, um diese Methode für die Dünnschichtverkappung anzuwenden. Zunächst muss die Opferschicht direkt auf die Mikrostrukturen abgeschieden werden. Dabei werden alle Öffnungen verschlossen, wobei die Höhe der Opferschicht den späteren Abstand zwischen Kappe und Mikrostruktur bestimmt. Im nächsten Schritt wird

die Opferschicht anisotrop strukturiert um die Bereiche zu definieren, an denen die Kappe mit dem Substrat verbunden wird. Der dritte Schritt ist die isotrope Opferschichtätzung, mit der das Material wieder entfernt wird. Die Verwendung von CF-Polymer als Opferschicht ermöglicht die trockenchemische Durchführung aller drei Technologieschritte. Insbesondere die höchst selektive Opferschichtätzung mittels Sauerstoff ermöglicht die Anwendung in Technologien wie AIM, die aufgrund ihrer Materialkombinationen viele Ätzmedien ausschließen. Die Verwendung des CF-Polymers als Opferschicht ist folglich der Schlüsselprozess der vorgestellten Verkappungstechnologie.

Plasmapolymerisierte CF-Schichten wurden bereits in der Mikroelektronik als *low-k* Dielektrikum [118, 83] und bei der Fertigung von MEMS als passivierende Schicht für das selektive Ätzen von Silizium [119, 107] angewendet. Die thermische Stabilität und die Haftung der CF-Schicht sind dabei wichtige Einflussgrößen und wurden bereits untersucht und optimiert. Die Dicke der verwendeten Schichten bewegt sich für diese Anwendungen jedoch nur zwischen wenigen 10 nm und einigen 100 nm. Als Opferschicht für die Dünnschichtverkappung sind Schichtdicken von mehreren Mikrometern notwendig, je nach Breite bzw. Durchmesser der Öffnungen in den Mikrostrukturen. Anstatt elektrischer Eigenschaften [83], Ätzresistenz und konformer Abscheidecharakteristik in tiefen Gräben [107] spielen in diesem Fall hohe Abscheide- und Ätzraten eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund wurden die Abscheide- und Ätzprozesse des CF-Polymers diesbezüglich analysiert und gegebenenfalls optimiert.

5.3.1 PECVD von Fluorkohlenstoff-Polymeren

Die Abscheidung von CF-Polymeren mittels PECVD basiert auf der Plasmapolymerisation von fluor- und kohlenstoffhaltigen Monomeren. Dabei werden die im Plasma erzeugten aktiven Spezies wie Elektronen, Ionen, Radikale und reaktive Atome ausgenutzt, um hochvernetzte Polymere zu bilden. Die Monomermoleküle werden durch nichtelastische Elektronenstöße energetisch angeregt, ionisiert und/oder in Radikale umgewandelt [120]. Die so plasmaaktivierten Monomere können sowohl in der Gasphase – Glimmpolymerisation – als auch auf der Oberfläche – plasmaaktivierte Polymerisation – reagieren [121].

Nach dem Modell von Cunge [122] tragen beide Mechanismen gemeinsam zum Schichtwachstum bei. Bei der Glimmpolymerisation entstehen aus unterschiedlichen Dissoziationsprodukten polymerbildende Zwischenverbindungen – ungesättigte Oligomere –, die sich zu größeren Agglomeraten vereinigen und auf der Oberfläche abscheiden können. Bei der plasmainduzierten Polymerisation reagieren angeregte Monomere und die bei der Glimmpolymerisation entstandenen Oligomere direkt auf der Substratoberfläche. Durch

den Beschuss mit hochenergetischen Teilchen und durch UV-Strahlung wird eine hohe Vernetzung des Polymers erzielt. Die hohe Vernetzung von Plasmapolymere resultiert in einer hohen thermischen Stabilität im Vergleich zu konventionell hergestellten Polymeren [123].

Neben diesen schichtbildenden Prozessen existieren aber auch Abbauprozesse, die sich aus dem Beschuss mit geladenen Teilchen sowie chemischen Reaktionen ergeben. Welcher dieser beiden Prozesse überwiegt, hängt von der Zusammensetzung des Plasmas aus den unterschiedlichen aktiven Teilchen ab. Bei den hier zu betrachtenden CF-Plasmen existieren drei Arten von aktiven Spezies: geladene Teilchen, Fluoratome und CF_x -Radikale [124]. Die CF_x -Radikale sind für die Polymerbildung verantwortlich, während die sehr reaktiven Fluoratome mit Radikalen oder der Oberfläche reagieren und flüchtige Ätzprodukte bilden. Der Beschuss mit geladenen Teilchen hat dagegen Einfluss auf beide Mechanismen. Mit steigender Konzentration geladener Teilchen nehmen sowohl die Polymerisations- als auch die Ätzrate zu [120].

Nach Coburn [125] ist das Verhältnis F:C bestimmend, ob die Polymerisation oder der Ätzprozess auf der Substratoberfläche überwiegen (andere Autoren verwenden das Verhältnis F:CF_x [124, 126]). Abbildung 5.13 zeigt den Einfluss des F:C-Verhältnisses im Plasma sowie der Bias-Spannung auf die Reaktionsverläufe. Ab einem Verhältnis von kleiner als drei beginnt die Polymerisation zu dominieren, dabei steigt die Abscheiderate mit abnehmendem Verhältnis F:C [127]. Zugegebener Sauerstoff reagiert mit Fluorkohlenstoffradikalen und setzt Fluor frei, wodurch sich die Reaktion in Richtung Ätzung verschiebt. Im Gegensatz dazu verringert eine Beimischung von Wasserstoff die Konzentration von Fluor, da beide zu Fluorwasserstoff reagieren. Die Reaktion verschiebt sich in Richtung Polymerisation [127].

Die Eigenschaften der abgeschiedenen Polymerschicht sind vom Verhältnis Kohlenstoff zu Fluor und vom Grad der Vernetzung abhängig. Beide Faktoren werden wiederum durch die Prozessparameter (Reaktorgeometrie, eingekoppelte Leistung, Prozessdruck, Gasflüsse und Substrattemperatur) beeinflusst. Demzufolge können die Eigenschaften der Polymerschicht wie thermische Stabilität, Schichthaftung oder innere Spannungen durch die Prozessparameter direkt gesteuert werden [120].

5.3.2 Abscheideprozess und Eigenschaften der verwendeten CF-Schicht

Für die Abscheidung des CF-Polymers stand die industrielle PECVD-Anlage „Precision 5000 DxZ“ von *Applied Materials* (Abschnitt 5.1.1) zur Verfügung. Der Abschei-

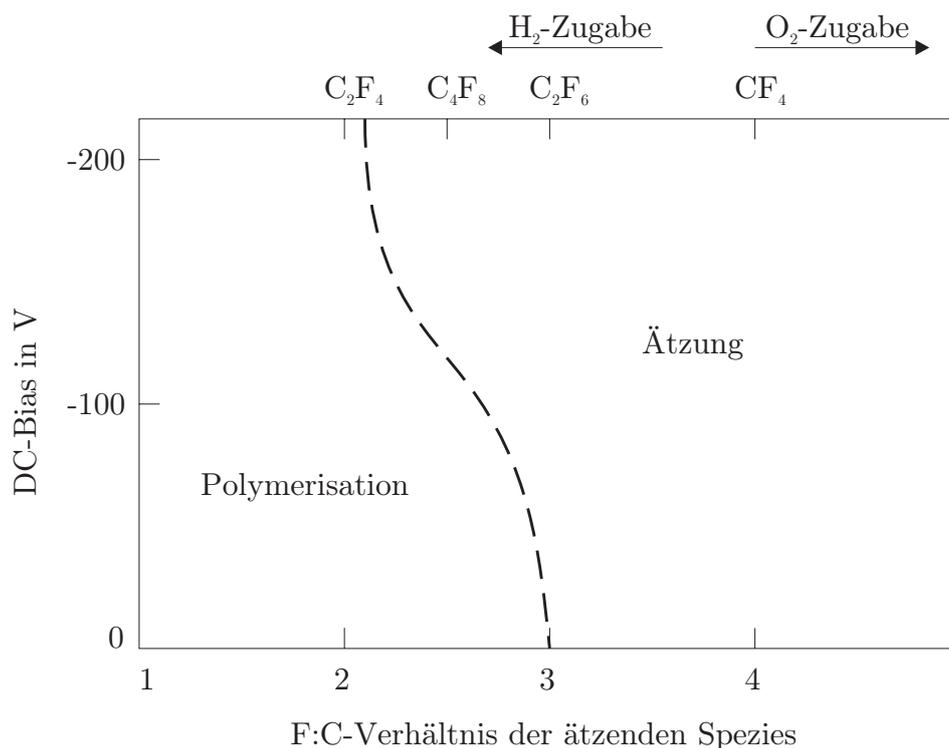


Abbildung 5.13: Einfluss des F:C-Verhältnisses im Reaktionsgasgemisch und der Bias-Spannung auf die Reaktionsverläufe auf der Substratoberfläche (nach Coburn [125])

deprozess wurde von M. Uhlig am ZfM mit der Zielstellung der Integration des CF-Polymers als *low-k* Material in Leitbahnsysteme von mikroelektronischen Schaltkreisen entwickelt [83, 128, 129]. Der prinzipielle Einfluss der Prozessparameter auf die Abscheiderate und die elektrischen Eigenschaften der CF-Schicht wurde dafür an einer Trioden-Plasmaätzkammer der Firma *Tegal* (1514e) untersucht.

Die Abscheiderate konnte bei diesen Versuchen zwischen 200 nm/min und 1000 nm/min variiert werden, wobei die Abscheiderate mit höherem Gasfluss, höherem Druck und höherer RF Plasmaleistung steigt. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden von Uhlig in [128] vorgestellt. Die Übertragung des Abscheideprozesses auf die Industrieanlage P5000 resultierte in Abscheideraten zwischen 50 nm/min und 500 nm/min. Ein guter Kompromiss zwischen kurzer Prozesszeit sowie Homogenität und Reproduzierbarkeit der CF-Schicht wurde bei einer Abscheiderate von 210 nm/min gefunden. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 5.13 angegeben.

Die Haftfestigkeit des CF-Polymers wurde mittels Tapetest [129] untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Haftung auf Si, PE-SiO und PE-SiN nicht den technologischen Anforderungen für eine zuverlässige Prozessierung genügen. Zur Verbesserung der Haftfestigkeit wurde deshalb eine zusätzliche Haftsicht eingeführt. Diese wird in situ vor

und nach der CF-Abscheidung aufgebracht. Es handelt sich dabei um eine kohlenstoffreiche amorphe CH-Schicht mit einer Dicke von 10 nm [83]. Die Prozessparameter sind ebenfalls in Tabelle 5.13 aufgelistet. Mit dieser Haftschrift konnten bei der Durchführung des Tapetests auf Si, PE-SiO und PE-SiN auch für dicke Schichten über 5 µm keinerlei Schichtabhebungen des CF-Polymers beobachtet werden. Auf Aluminium (wie auch auf Kupfer) ist die Schichthaftung dagegen ohne Haftschrift gut und wird bei Verwendung der CH-Schicht stark reduziert.

Tabelle 5.13: Prozessparameter für die CH/CF-Abscheidung auf der PECVD-Anlage P5000

Parameter	in	CH-Haftschrift	CF-Opferschicht
Prozessdruck	Pa	40	400
Temperatur	°C	274	274
HF-Plasmaleistung	W	160	250
NF-Plasmaleistung	W	–	120
Gasfluss C ₄ F ₈	Pa · cm ³ /s	–	0,079
Gasfluss CH ₄	Pa · cm ³ /s	0,051	0,012

Die thermische Stabilität, die bei organischen Materialien für Temperaturen oberhalb von 300 °C oftmals kritisch ist, konnte für das CF-Polymer anhand von Temperaturbelastungen bis 400 °C nachgewiesen werden [128]. Eigene Untersuchungen ergaben keinerlei negative Beeinflussung des Schichtstapels CH–CF–CH durch Temperaturen bis 400 °C.

5.3.3 Abscheidung von CF - Polymer zur Planarisierung von Mikrostrukturen

Die Funktion der Opferschicht innerhalb der Packagingtechnologie besteht im Schutz der Mikrostruktur durch eine geschlossene Schicht. Dafür müssen sämtliche in der Mikrostruktur vorhandenen Öffnungen geschlossen werden. Wichtig dabei ist, das Verhältnis C_v von Opferschichtdicke d_{OS} zu Grabenbreite w_G

$$C_v = \frac{d_{OS}}{w_G} \quad (5.7)$$

zu minimieren (Abb. 5.14), um die notwendige Schichtdicke und damit die Prozesszeit zu reduzieren.

Der Verschluss von Öffnungen durch den Auftrag von Material kann durch die vollständige Füllung der Gräben erreicht werden, so wie in Abbildung 5.14a dargestellt. Es ist

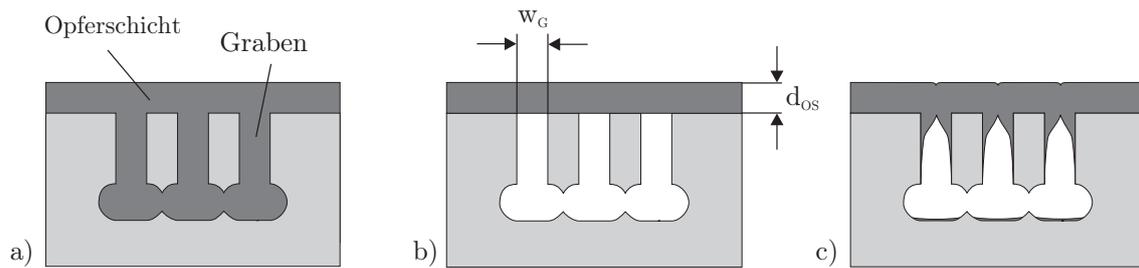


Abbildung 5.14: Prinzipielle Möglichkeiten der Planarisierung von Mikrostrukturgräben a) vollständige Verfüllung der Gräben b) Bedeckung der Grabenöffnungen ohne Materialabscheidung in den Gräben c) Verschluss von Gräben durch PECVD mit nichtkonformer Kantenbedeckung

aber auch prinzipiell ausreichend, einen geschlossenen Film oberhalb des Grabens zu realisieren und dabei kein oder nur wenig Material im Graben abzuscheiden (Abb. 5.14b). Die Abbildungen 5.15 und 5.16 zeigen, beispielhaft für beide Varianten, REM-Aufnahmen von verschlossenen Gräben. Die gefüllten Gräben wurden durch das Aufschleudern von Fotolack (TI35) erzeugt. Es können aber auch Abscheideverfahren mit konformer Kantenbedeckung, d.h. mit gleichmäßiger Schichtdicke an senkrechten Wänden und am Grabenboden wie bei der LPCVD [130] oder der thermischen Oxidation verwendet werden, falls die damit verbundenen hohen Prozesstemperaturen prozesskompatibel sind.

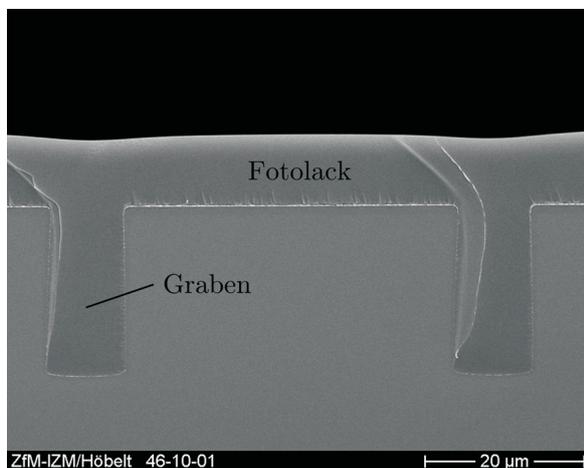


Abbildung 5.15: REM-Aufnahme des Verschlusses von Ätzgräben durch vollständige Befüllung der Öffnungen mit Fotolack

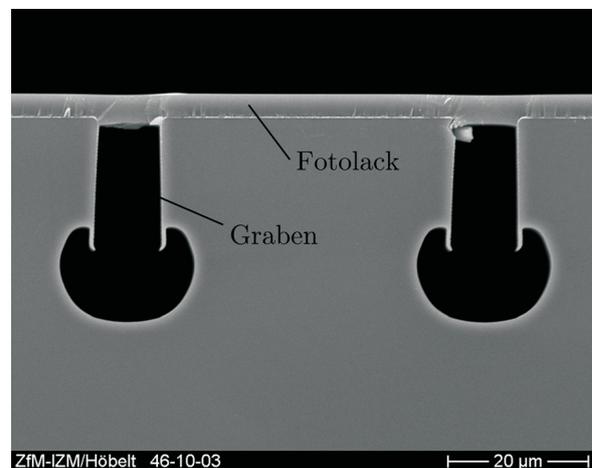


Abbildung 5.16: Verschluss von Ätzgräben, bei dem das Eindringen des Lackes in die Gräben durch eine Antihafschicht an den vertikalen Wänden verhindert wird

Die Verschlusschicht in Abbildung 5.16 besteht ebenfalls aus aufgeschleudertem Fotolack. Die Befüllung der Gräben wurde dadurch verhindert, dass die Strukturen mit einer dünnen Lage CF-Polymer beschichtet wurden, das in diesem Fall als Antihafschicht fungiert. Vor

dem Aufschleudern des Lackes wurde das Polymer auf allen lateralen Flächen durch einen stark anisotropen Ätzprozess wieder entfernt.

Charakteristisch für die PECVD ist eine nichtkonforme Kantenbedeckung, die in einer Verschlussgeometrie resultiert, wie sie in den Abbildungen 5.14c und 5.17 gezeigt ist. Nach [84] ist die Kantenbedeckung bei CVD-Verfahren von der Oberflächenmigration und der mittleren freien Weglänge der Reaktanden λ , sowie dem Aspektverhältnis der Grabenöffnung abhängig. Eine hohe Oberflächenbeweglichkeit der Teilchen führt zu einer konformen Kantenbedeckung, da sich die an der Oberfläche adsorbierten Reaktionspartner schnell ausbreiten können, bevor sie miteinander reagieren. Durch die damit verbundene gleichmäßige Konzentration an der Oberfläche bildet sich eine von der Topografie unabhängige Schicht (Abb. 5.18a). Eine ausreichende Oberflächenmigration wird jedoch erst ab Temperaturen weit oberhalb von 400 °C erreicht und ist deshalb bei der PECVD nicht gegeben.

Ohne signifikante Oberflächenmigration ist die Kantenbedeckung vom Einfallswinkel Θ der Gasmoleküle abhängig. Dieser beträgt für die Oberfläche des Substrates 180°. Für eine mittlere freie Weglänge weit oberhalb der Dimensionen des Grabens reduziert sich der Einfallswinkel an der Stufenoberkante auf 90°, was sich in einer Halbierung der Schichtdicke äußert (Abb. 5.18b). An den senkrechten Wänden hängt Θ von dem Verhältnis zwischen Grabenöffnung w_G und der Entfernung von der Grabenoberkante z ab und kann berechnet werden mit [84]:

$$\Theta = \arctan \frac{w_G}{z}. \quad (5.8)$$

Bei fehlender Oberflächenmigration und einer mittleren freien Weglänge die kurz im Verhältnis zu den Grabendimensionen ist, ergibt sich eine Geometrie, wie sie in Abbildung 5.18c dargestellt ist. Der Einfallswinkel an der Grabenoberkante erreicht in diesem Fall 270° und führt zu einer erhöhten Abscheidung. Da in diesem Fall C_v minimiert wird, ist eine möglichst kurze freie Weglänge, d.h. ein möglichst hoher Prozessdruck während der CF-Abscheidung anzustreben.

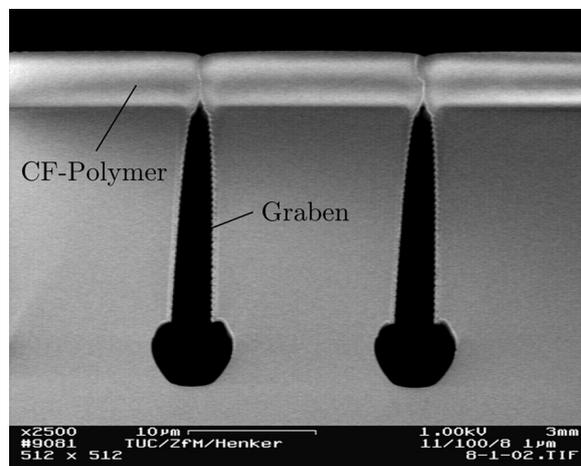


Abbildung 5.17: Verschluss von Ätzgräben im Silizium durch die PECVD-Abscheidung von CF-Polymer mit nichtkonformer Kantenbedeckung

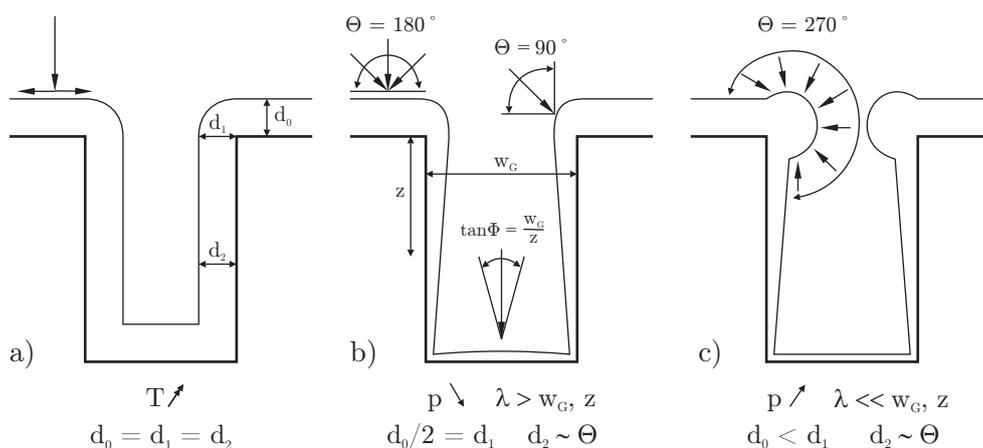


Abbildung 5.18: Kantenbedeckung von CVD-Schichten (nach [84])

Die REM-Aufnahme in Abbildung 5.19 zeigt die Kantenbedeckung einer CF-Schicht, die mit dem in Tabelle 5.13 angegebenen Prozess abgeschieden wurde. Sowohl das quantitative Verhältnis von Schichtdicke an der Oberfläche zu Schichtdicke an der Grabenoberkante $d_0/d_1 \approx 2$, als auch der qualitative Verlauf der Schicht entsprechen einer großen mittleren freien Weglänge der Moleküle (Abb. 5.18). Demzufolge sollte der Prozessdruck erhöht werden um eine verstärkte Abscheidung an der Oberkante des Grabens zu erzielen.

Die mittlere freie Weglänge eines Moleküls beträgt nach [16] bei 600 K überschlägig

$$\lambda \approx \frac{1,33 \cdot 10^4}{p(\text{Pa})} \text{m}. \quad (5.9)$$

Für den Prozessdruck von 400 Pa, der bei der Abscheidung des CF-Polymers standardmäßig verwendet wird, ergibt sich ein λ von ca. 30 μm . Die Dimensionen der Gräben liegen typischerweise zwischen 3 μm bis 6 μm für die Grabenbreite bzw. 20 μm bis 60 μm für die Grabentiefe. Der Prozessdruck müsste um mehr als den Faktor 10 erhöht werden, um ein verstärktes Wachstum an der Grabenkante zu erzielen. Eine Möglichkeit, bei solch hohen Drücken Schichten abzuscheiden, böte die AP-PECVD (*Atmospheric Pressure PECVD*), welche bei Atmosphärendruck arbeitet. Die Abscheidung von CF-Polymer konnte mit die-

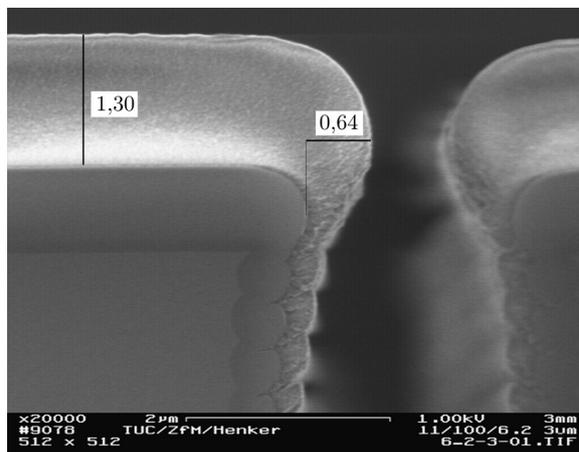


Abbildung 5.19: REM-Aufnahme der Kantenbedeckung des CF-Polymers (Maße in μm)

ser Technik bereits demonstriert werden [131]. Mit der zur Verfügung stehenden PECVD-Anlage sind solche Drücke jedoch nicht realisierbar.

Um die Verschlusscharakteristik C_v für diesen Abscheidprozess zu ermitteln, wurden Teststrukturen mit Grabenbreiten zwischen $1,2\ \mu\text{m}$ und $4,8\ \mu\text{m}$ mit dem CF-Polymer beschichtet. Abbildung 5.20 zeigt beispielhaft REM-Aufnahmen dieser Teststrukturen, die bei $400\ \text{Pa}$ Prozessdruck mit einer $4,2\ \mu\text{m}$ dicken CF-Schicht verschlossen wurden. Der $3,4\ \mu\text{m}$ breite Graben konnte mit dieser Schichtdicke sicher verschlossen werden, was einem Verhältnis von $C_v \approx 1,2$ entspricht. Dieses Verhältnis konnte auch für alle anderen verwendeten Grabenbreiten ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.14 zusammengefasst.

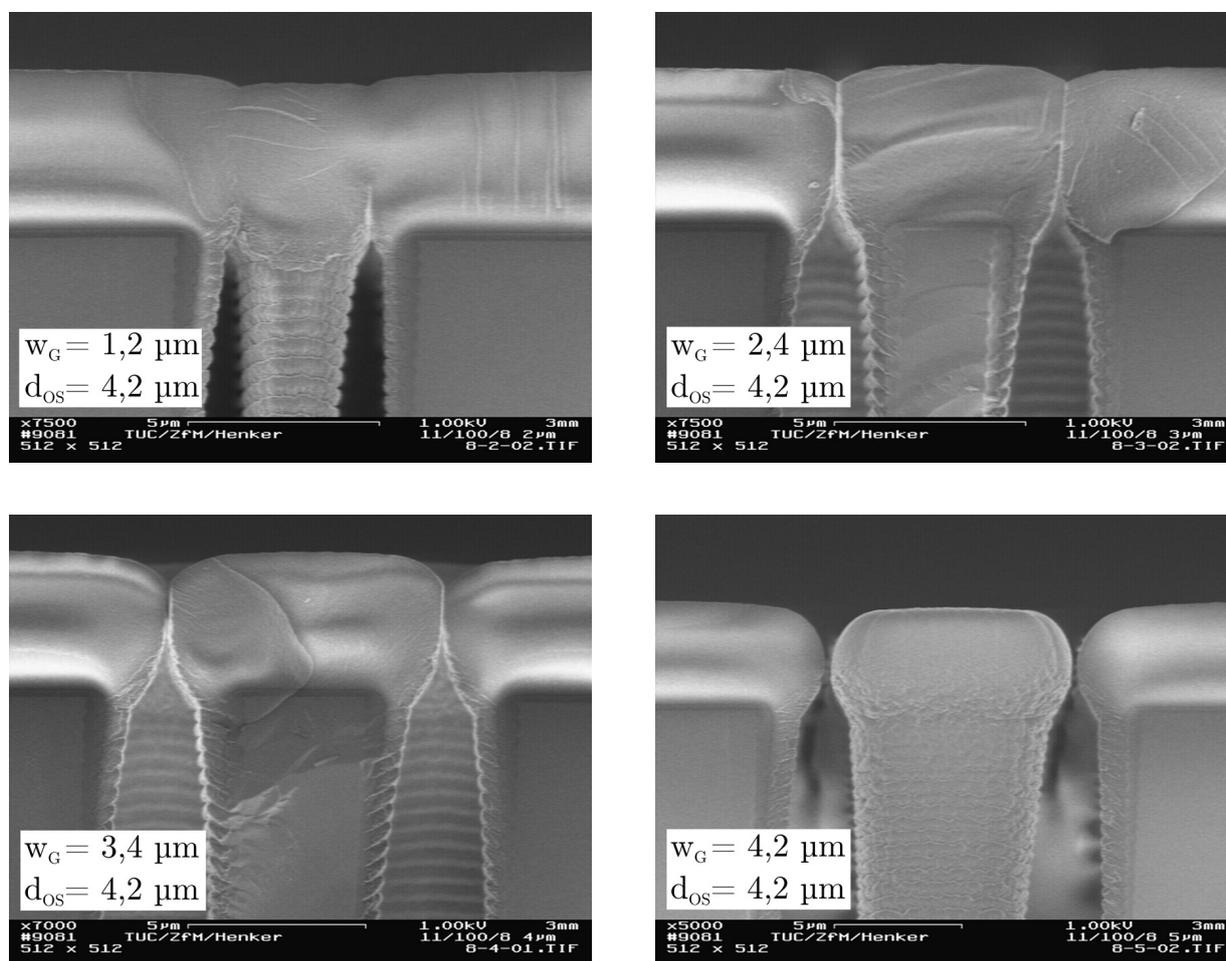


Abbildung 5.20: REM-Aufnahmen des Grabenverschlusses mit einer Opferschichtdicke von $d_{OS}=4,2\ \mu\text{m}$ bei unterschiedlichen Grabenbreiten w_G

Tabelle 5.15 vergleicht die Abscheiderate r_d und die ermittelte Verschlusscharakteristik (C_v) des CF-Abscheidprozesses mit denen anderer trockener Abscheidprozesse für Opferschichtmaterialien. Um die Vergleichbarkeit zu erleichtern wird die Verschlussgeschwin-

Tabelle 5.14: Verwendete Schichtdicke des CF-Polymers um eine Grabenöffnung von gegebener Breite zu verschließen

Grabenbreite in μm	1,2	2,4	3,4	4,8
Schichtdicke in μm	1,4	2,9	4,2	5,8
C_v	1,17	1,19	1,24	1,21

digkeit v_v angegeben, die sich aus dem Quotienten

$$v_v = r_d / C_v \quad (5.10)$$

ergibt.

Tabelle 5.15: Vergleich der für den Grabenverschluss notwendigen Abscheideparameter für unterschiedliche Prozesse und Materialien

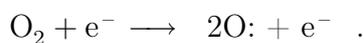
Prozess / Material	r_d in nm/min	C_v	v_v in nm/min
PECVD / CF-Polymer	210	1,2	175
LPCVD / Ge *	4,1	0,5	8,2
PECVD / Ge *	40	1,2	33,3
PECVD / SiO ₂ *	225	1,25	180
PECVD / Si ₃ N ₄ *	22	1,0	22

* nach C. Rusu [130]

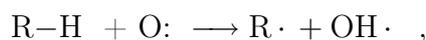
5.3.4 Ätzung von CF - Polymeren mittels Plasmaprozessen

CF-Polymere können mit fluor- und sauerstoffhaltigen Plasmaätzprozessen in unterschiedlichen Plasmaätzsystemen abgetragen werden [132]. Die Ätzrate, die Anisotropie und die Homogenität der Ätzrate über den Wafer sind dabei vom Prozessdruck, von der Frequenz und der Höhe der eingekoppelten elektrischen Leistung sowie vom Prozessgas abhängig. Die allgemeinen Grundlagen zu Plasmaätzprozessen und den unterschiedlichen Reaktortypen sollen an dieser Stelle nicht behandelt werden, dazu sei auf die entsprechende Literatur verwiesen [133, 134].

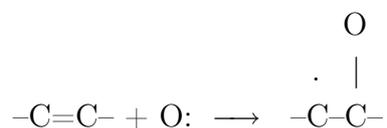
Die höchsten Ätzzraten werden mit sauerstoffhaltigen Prozessen bei hohen Temperaturen erzielt. Die reaktive Spezies bilden dabei atomare Sauerstoffradikale, die durch Stoßionisation gebildet werden [133]:



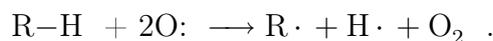
Die Reaktionen der Sauerstoffradikale mit dem Polymer basieren auf unterschiedlichen Mechanismen [132], wie z. B. der Wasserstoffabstraktion



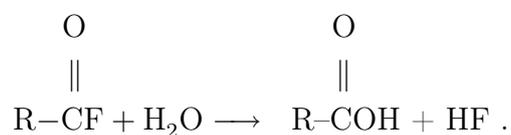
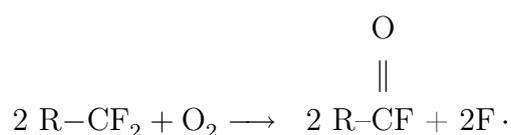
der Anlagerung an ungesättigte Moleküle



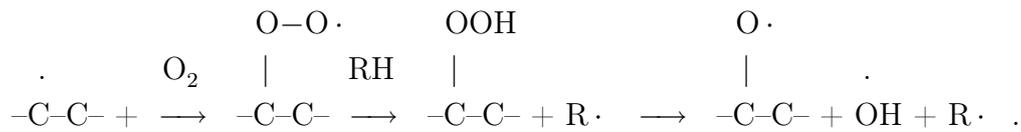
oder der Absorption der bei der Dissoziation von O_2 entstehenden Energie:



Polymerradikale $\text{R}\cdot$ sind wiederum gegenüber molekularem Sauerstoff O_2 sehr reaktiv, so dass ein oxydativer Abbau zustande kommt [134]. Der Sauerstoff kann aber auch eingebunden werden und zur Abspaltung von Fluorradikalen führen [123]:



Für den Abtrag des Polymers ist die Spaltung der C-C-Bindungen erforderlich, um flüchtige niedermolekulare Moleküle wie CO und CO_2 zu erhalten. Die Wasserstoffabstraktion führt nicht zu einer Schwächung der Kohlenstoffbindungen. Dazu ist der Einbau von Sauerstoff in ungesättigte Moleküle notwendig, der zur Bildung von gesättigten Radikalen führt und in einer Schwächung der C-C-Bindungen resultiert [132]. Ein möglicher Prozessablauf einer Autooxidationsreaktion nach [135] wäre:



Die Abtragsreaktion im Plasma ist stark temperaturabhängig [134]. Der Zusatz von fluorhaltigen Ätzgasen, der bei einigen Polymeren zur Steigerung der Ätzrate verwendet wird, ist für CF-Polymere nicht zweckmäßig, da bei der Abbaureaktion ohnehin Fluor als Reaktionszwischenprodukt freigesetzt wird. Außerdem würde die Ätzselektivität bezüglich der Maske herabgesetzt.

Neben dem chemischen Abtrag des Polymers durch reaktive Teilchen ist auch ein Ätzen durch Ionenbeschuss möglich. Dies kann mit Inertgasionen durch Zusatz von z. B. Argon rein physikalisch (Sputterätzen) [134, 120] oder mittels Ionen des reaktiven Gases kombiniert chemisch und physikalisch (*Reactive Ion Etching*, RIE) [134, 128] erfolgen. Durch Änderung der Beschleunigungsspannung (Bias-Spannung) kann sowohl die Ätzrate, als auch der Grad der Anisotropie des Ätzprozesses beeinflusst werden.

5.3.5 Anisotrope Strukturierung des CF - Polymers

Durch die Strukturierung des ganzflächig abgeschiedenen CF-Polymers wird die laterale Ausdehnung der Dünnschichtkappe definiert. Dabei bestimmt die Ätzböschung ganz wesentlich die spätere Geometrie der vertikalen Wände der Kappe. Abbildung 5.21 zeigt die durch unterschiedliche Ätzprozesse erzielbaren Profile.

Eine isotrope Ätzung, bei der die laterale Unterätzung der Maske l_u annähernd der Ätztiefe $h_{\text{ätz}}$ entspricht, ist aufgrund der hohen Schichtdicke des Polymers und der damit verbundenen starken Unterätzung der Maske nicht geeignet. Das Aspektverhältnis einer Öffnung, die mit einem solchen Prozess strukturiert werden könnte, wäre auf 1:2 begrenzt. Insbesondere die auf dem aktiven Gebiet der Mikrostruktur regelmäßig angeordneten Stützsäulen würden die für die Dünnschichtkappe notwendige Fläche deutlich erhöhen. Außerdem ergäben sich hohe Toleranzen der lateralen Maße aufgrund der Inhomogenität der Ätzrate zwischen Wafermitte und Waferrand.

Aus den genannten Gründen wird ein anisotroper Ätzprozess ohne wesentliche Unterätzung der Maske angestrebt. Für die spätere Abscheidung der Membranschicht mittels PECVD ist dabei ein Böschungswinkel $\alpha_B < 90^\circ$ anzustreben, da durch die abschattende Wirkung der Böschung die Konformität der Schichtdicke mit zunehmendem Winkel abnimmt (s. Abb. 5.21).

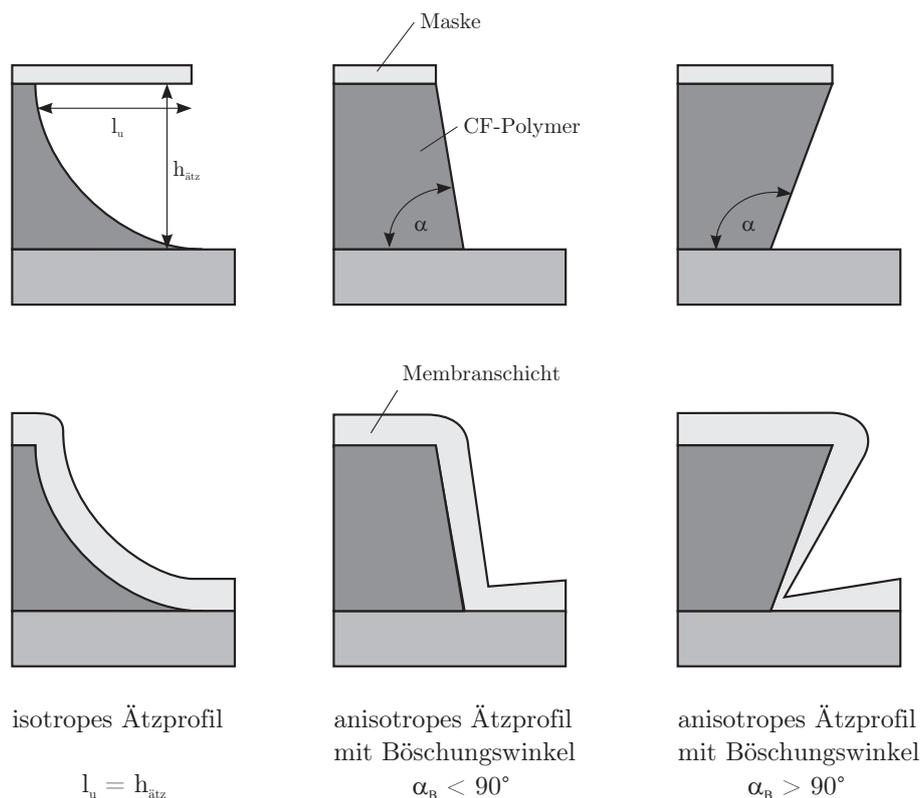


Abbildung 5.21: Mögliche Ätzprofile der Opferschichtstrukturierung und deren Einfluss auf die Geometrie der Dünnschichtkappe

Für ionenunterstützte chemische Plasmaätzprozesse kann der Grad der Anisotropie γ

$$\gamma = 1 - l_u/h_{\text{ätz}} \quad (5.11)$$

durch Erhöhung des Verhältnisses E/p gesteigert werden. Dabei ist E das elektrische Feld das den Transport der Ionen zur Substratoberfläche kontrolliert und p der Prozessgasdruck [136]. Für die gewünschte Strukturierung des Polymers sollte demzufolge ein Prozess mit niedrigem Druck und hoher Bias-Spannung verwendet werden. Die gewählte RIE-Anlage „Oxford Plasmalab System 100 ICP“ (s. Abschnitt 5.1.1) verfügt über eine induktiv gekoppelte Plasmaquelle (*Inductively Coupled Plasma*, ICP) [137] bei der die Glimmentladung über ein elektromagnetisches Feld erzeugt wird (ICP-Leistung). Das elektrische Feld, mit der die Ionen in Richtung des Substrates beschleunigt werden, kann unabhängig davon an die Substratelektrode angelegt werden (Bias-Leistung). Dadurch ist eine getrennte Optimierung von Ionendichte und Ionenenergie möglich [107]. Eine hohe Ionendichte ermöglicht eine hohe Ätzrate und eine hohe Ionenenergie wirkt sich, ebenso wie der im Vergleich zu kapazitiv gekoppelten Plasmen niedrigere Prozessdruck, positiv auf die Anisotropie aus.

Die Verwendung von Fotolack als Maske für die Opferschichtstrukturierung ist aufgrund der sehr geringen Selektivität zum CF-Polymer nicht ausreichend. Die Ätzung erfolgt deshalb über eine Hartmaske aus PE-SiO. Da die nachfolgend abzuscheidende Membranschicht auch aus PE-SiO besteht, kann das Maskenoxid auf dem Polymer verbleiben. Die Strukturierung der Hartmaske erfolgt über Fotolack (s. Tab. 5.16), der während der Ätzung des CF-Polymers in situ entfernt wird.

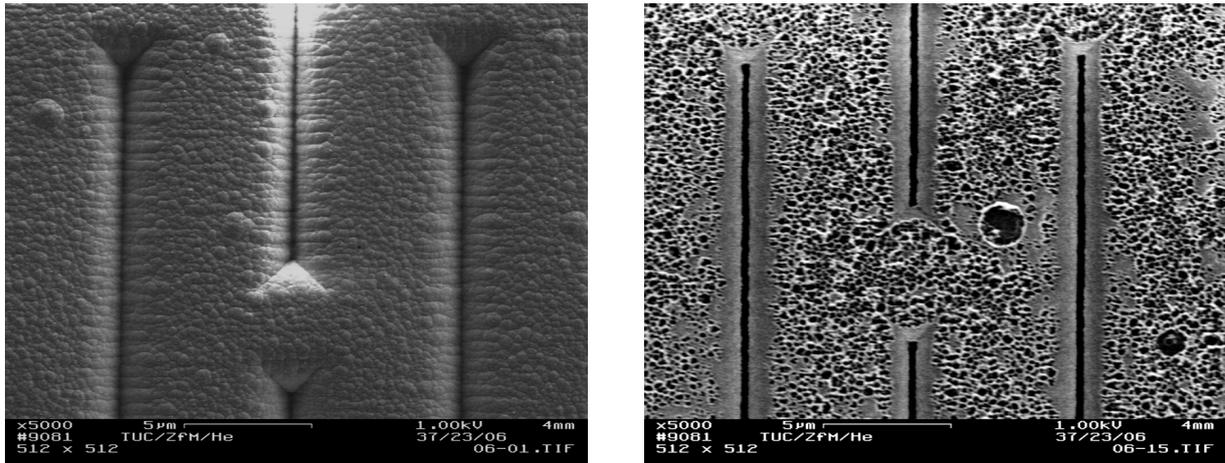
Als Ausgangspunkt für die Entwicklung des Ätzprozesses wurden die von Uhlig [128] verwendeten Parameter gewählt. Sie sind in Tabelle 5.16 angegeben. Um eine möglichst hohe Selektivität zwischen Hartmaske und CF-Polymer zu gewährleisten, wird auf fluorhaltige Ätzgase verzichtet und ausschließlich Sauerstoff verwendet. Da die Reaktionsprodukte des CF-Polymers fluorhaltig sind, wird die PE-SiO-Maske dennoch geätzt. In Abbildung 5.24 sind REM-Aufnahmen der CF-Schicht nach erfolgter Strukturierung über eine 300 nm dicke Oxidmaske gezeigt. Wegen der eingeschränkten Selektivität des Ätzprozesses gegenüber dem PE-SiO wurde die Maske in der Wafermitte perforiert und das CF-Polymer angegriffen, während die Maske am Waferrand aufgrund der Inhomogenität des Prozesses der Ätzung standhalten konnte. Außerdem ist die Polymerätzrate von $< 8 \text{ nm/s}$ relativ gering und führt zu langen Prozesszeiten.

Tabelle 5.16: Parameter des verwendeten Oxidätzprozesses und Startparameter für die Optimierung des Polymerätzprozesses nach [128]

Prozessparameter	Oxidätzprozess	Polymerätzprozess
Prozessdruck	0,43 Pa	0,63 Pa
Elektrodotemperatur	10 °C	0 °C
ICP-Leistung	1800 W	500 W
Bias-Leistung	120 W	80 W
Ätzgasfluss	0,025 Pa · cm ³ /s CHF ₃ 0,030 Pa · cm ³ /s CF ₄	0,051 Pa · cm ³ /s O ₂

Basierend auf den Anforderungen für die Prozessintegration und den Ergebnissen des Ätzprozesses in Tabelle 5.16 ergaben sich die vier folgenden Zielgrößen für die Prozessentwicklung:

- Hohe Ätzrate des CF-Polymers
- Hohe Ätz-Selektivität zwischen Oxidmaske und CF-Polymer



Waferrand

Wafermitte

Abbildung 5.24: REM-Aufnahmen des von der Oxidmaske abgedeckten CF-Polymers nach der Strukturierung über eine 300 nm dicke Oxidmaske, links: das CF-Polymer am Waferrand ist nicht beschädigt, rechts: die Oxidmaske in der Wafermitte war aufgrund der höheren Ätzrate nicht ausreichend dick und das CF-Polymer wurde beschädigt

- Gute Homogenität des Ätzabtrages
- Ätzprofil mit einem Böschungswinkeln von $\alpha_B < 90^\circ$.

Die Ätzrate der zu ätzenden Schicht $r_{\text{ätz}}$ ergibt sich aus dem Materialabtrag $d_{\text{ätz}}$ pro Zeiteinheit $t_{\text{ätz}}$:

$$r_{\text{ätz}} = \frac{d_{\text{ätz}}}{t_{\text{ätz}}}. \quad (5.12)$$

Die Ätzselektivität $S_{\text{ätz}}$ bildet sich aus dem Quotienten der Ätzrate des zu strukturierenden Materials $r_{\text{ätz}}$ und der Ätzrate des Maskenmaterials r_{Maske} [134]:

$$S_{\text{ätz}} = \frac{r_{\text{ätz}}}{r_{\text{Maske}}}. \quad (5.13)$$

Für die Quantifizierung der Homogenität des Ätzabtrages $H_{\text{ätz}}$ werden unterschiedliche Gleichungen verwendet. Die Angaben in dieser Arbeit basieren auf der folgenden Gleichung:

$$H_{\text{ätz}} = 1 - \left(\frac{r_{\text{ätz,max}} - r_{\text{ätz,min}}}{r_{\text{ätz,max}} + r_{\text{ätz,min}}} \right). \quad (5.14)$$

Dabei entspricht $r_{\text{ätz,max}}$ der maximalen und $r_{\text{ätz,min}}$ der minimalen Ätzrate auf einem Wafer. Die mit dieser Gleichung erhaltenen Ergebnisse für $H_{\text{ätz}}$ sind dimensionslos und liegen zwischen 0 und 1, wobei 1 die bestmögliche Homogenität darstellt. Die Angabe des Böschungswinkels wurde bereits in Abbildung 5.21 definiert.

Für die Entwicklung und Optimierung des Strukturierungsprozesses wurden die Prozessparameter Prozessdruck, ICP-Leistung und Bias-Leistung variiert, und der Einfluss auf die festgelegten Zielgrößen sowie die Wechselwirkung zwischen den Prozessparametern untersucht. Die qualitativen Einflüsse dieser Parameter auf die Zielgrößen sind in Tabelle 5.17 zusammengefasst. Der Fluss des Sauerstoffs als einziges Ätzgas wurde nicht variiert, sondern der maximal mögliche Fluss von $0,051 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ verwendet. Ebenso wurde bei allen Versuchen die Elektrodentemperatur auf 0°C geregelt, um eine möglichst hohe Anisotropie mit Böschungswinkeln von $\leq 90^\circ$ zu erreichen.

Tabelle 5.17: Überblick über den Einfluss der Prozessparameter auf die festgelegten Zielgrößen der Ätzprozessoptimierung

	$r_{\text{ätz}}$	$S_{\text{ätz}}$	$H_{\text{ätz}}$	α_B
Erhöhung Druck	\leftrightarrow	\downarrow	\nearrow	\downarrow
Erhöhung ICP-Leistung	\uparrow	\nearrow	\nearrow	\leftrightarrow
Erhöhung Bias-Leistung	\uparrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow

\uparrow = Verbesserung, \downarrow = Verschlechterung, \leftrightarrow = kein Einfluss

Ausgehend von den Werten in Tabelle 5.16 wurden die Prozessparameter unter Berücksichtigung stabiler Prozessbedingungen und einer guten Reproduzierbarkeit der Ätzresultate innerhalb der folgenden Wertebereiche variiert:

ICP-Leistung: 500...2600 W

Bias-Leistung: 80...160 W

Prozessdruck: 0,37...0,63 Pa

Für die Bewertung der Zielgrößen wurden die Proben mit einer Prozesszeit von 210 s strukturiert, so dass bei allen verwendeten Parameterkombinationen das CF-Polymer nicht vollständig entfernt wurde. Mittels Rasterelektronenmikroskopie konnte so die verbleibende Schichtdicke gemessen und die Ätzrate bestimmt werden. Dazu wurden die Proben gebrochen und vom Waferrand sowie von der Wafermitte jeweils fünf Messpunkte aufge-

nommen. Abbildung 5.26 zeigt die REM-Aufnahme einer solchen Probe. Um den Einfluss des Oxidätzprozesses nicht zu vernachlässigen, wurde an einzelnen Proben vor der Polymerstrukturierung der Abtrag des CF-Polymers ermittelt. In Abbildung 5.25 ist die REM-Aufnahme einer Probe nach der Maskenstrukturierung zu sehen. Der Abtrag des CF-Polymers wurde bei der Bestimmung der Ätzraten berücksichtigt.

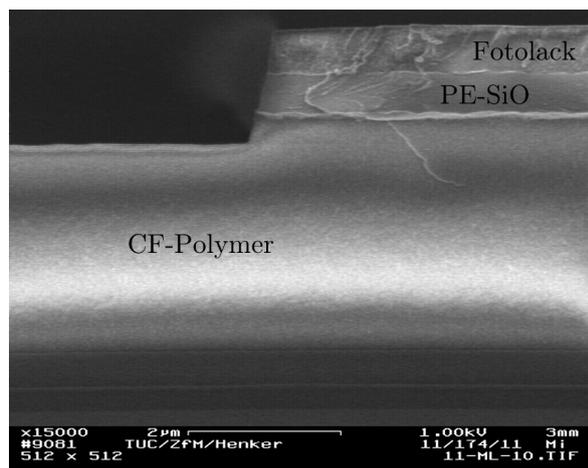


Abbildung 5.25: REM-Aufnahme einer Teststruktur nach der Maskenstrukturierung mit dem in Tabelle 5.16 angegebenen Ätzprozess

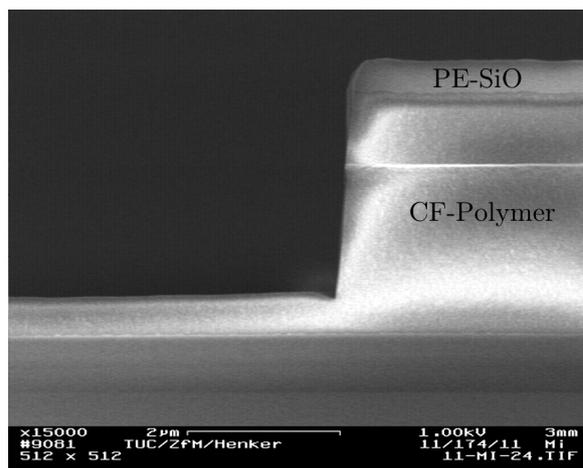


Abbildung 5.26: REM-Aufnahme einer Teststruktur nach der Polymer-Strukturierung mit 1800 W ICP-Leistung, 160 W Bias-Leistung und 0,43 Pa Prozessdruck

Ergebnisse der Parametervariation

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Prozessdruck im betrachteten Bereich keinen signifikanten Einfluss auf die Ätzrate des CF-Polymers ausübt. Abbildung 5.27 zeigt die Abhängigkeit zwischen Ätzrate und Prozessdruck für drei unterschiedliche Parameterkombinationen. In diesem Diagramm, wie auch in den Abbildungen 5.28 und 5.29, konnte für 0,37 Pa nur ein Messwert dargestellt werden. Der Grund dafür ist die hohe Instabilität des Plasmas bei diesem niedrigen Druck. Die Prozesse waren unter diesen Umständen nicht reproduzierbar. Die Versuchsergebnisse für 80 W Bias-Leistung, 1800 W ICP-Leistung und 0,37 Pa werden zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten in den Diagrammen dargestellt. Aufgrund der Plausibilität der Ergebnisse, und da eine Existenz von lokalen Extremwerten unwahrscheinlich ist, wurde auf Versuche bei einem anderen Prozessdruck, als Ersatz für die entfallenen Messwerte, verzichtet.

Wie aus der Abbildung 5.28 ersichtlich ist, hat der Prozessdruck einen großen Einfluss auf die Selektivität des Ätzprozesses gegenüber der Maske aus Siliziumoxid. Mit Erhöhung des Druckes verringert sich die mittlere freie Weglänge der Teilchen und die Stosswahrscheinlichkeit steigt. Aufgrund der damit verbundenen höheren Dichte von Ionen und

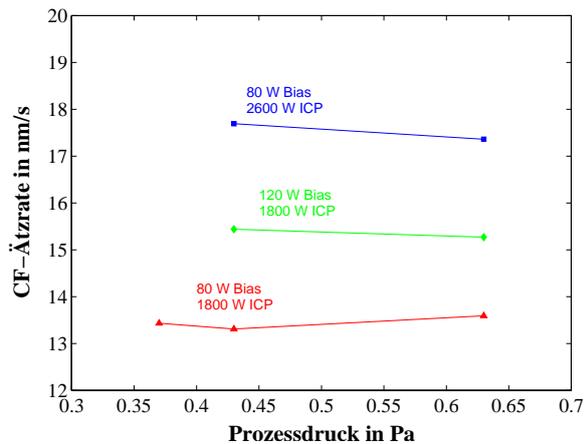


Abbildung 5.27: Einfluss des Prozessdruckes auf die Ättrate des CF-Polymer

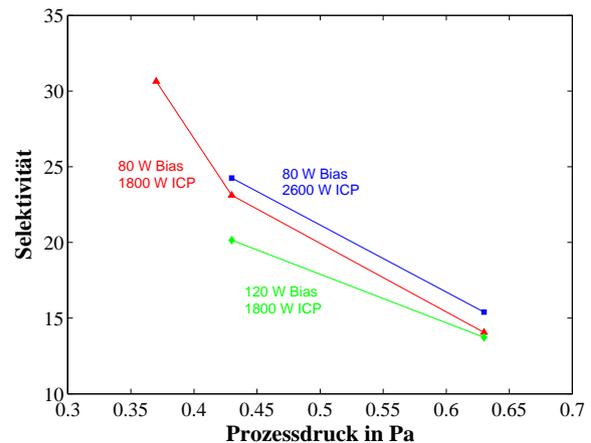


Abbildung 5.28: Einfluss des Prozessdruckes auf die Selektivität zur Hartmaske

Fluorradikalen steigt die Ättrate des PE-SiO und die Selektivität wird reduziert. Von 3,7 Pa bis 0,63 Pa wird die Selektivität *Sätz* von 30 auf knapp 15 halbiert. Der Einfluss des Prozessdruckes auf die Homogenität des Polymerabtrages kann Abbildung 5.29 entnommen werden. Für niedrige Bias-Leistungen ist eine geringe Zunahme der Homogenität bei steigendem Druck zu erkennen. Dieser Einfluss ist jedoch bei höheren Bias-Leistungen ab 120 W nicht mehr vorhanden.

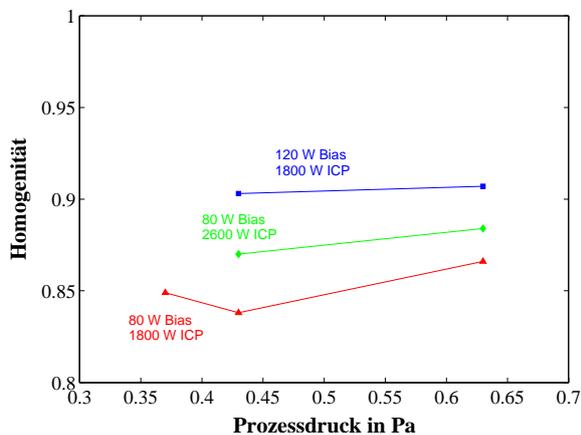


Abbildung 5.29: Einfluss des Prozessdruckes auf die Homogenität des Polymerabtrages

Die Abhängigkeit der Polymerätzrate von der ICP- und der Bias-Leistung zeigt Abbildung 5.30. Mit steigender Leistung erhöht sich auch die Ättrate, so dass bei 2600 W ICP-Leistung und 160 W Bias-Leistung eine maximale Ättrate von 20 nm/s erreicht werden kann. Auch der Ätzabtrag des Maskenoxides steigt sowohl bei höherer ICP-, als auch bei höherer Bias-Leistung. Dabei ist der Anstieg der Oxidätzrate aufgrund der Bias-Leistung prozentual höher als der Anstieg der Polymerätzrate, was zu einer Reduzierung der Selektivität führt. Abbildung 5.31 veranschaulicht diesen Zusammenhang: Der prozentuale Anstieg der Polymer- und der Oxidätzrate ist bei einer Erhöhung der ICP-Leistung annähernd gleich. Die Selektivität steigt nur in geringem Maße an, was durch den Vergleich der beiden Versuchsreihen in Abbildung 5.31 für 1800 W und 2600 W nachvollzogen werden kann.

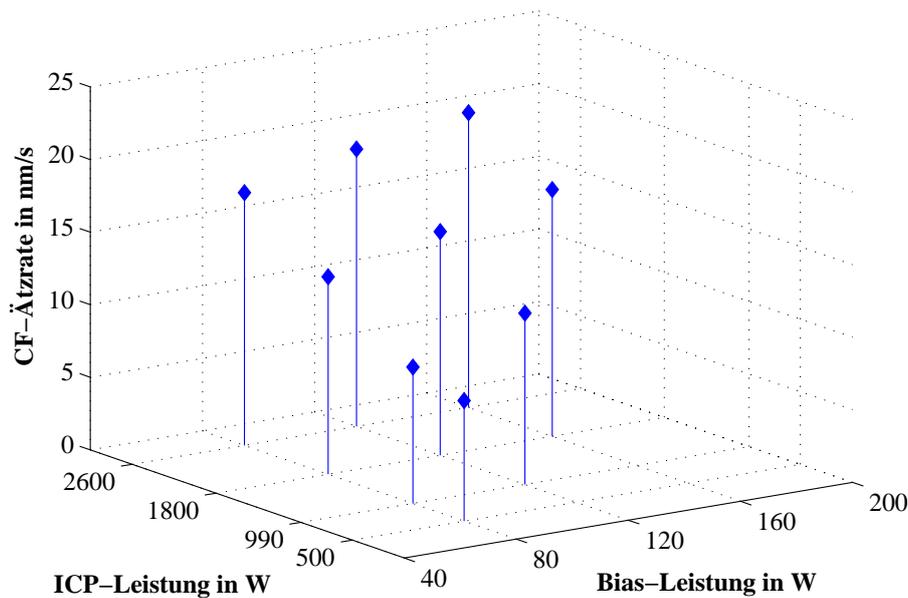


Abbildung 5.30: Abhängigkeit der CF-Polymer-Ätzrate von der Bias- und der ICP-Leistung bei 0,43 Pa Prozessdruck

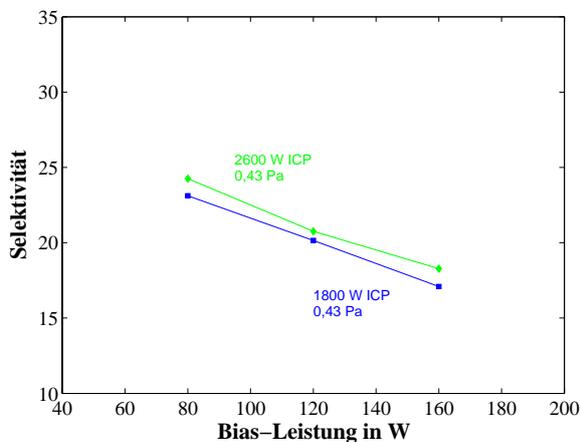


Abbildung 5.31: Einfluss der Bias- und der ICP-Leistung auf die Selektivität gegenüber der Hartmaske

Beide Plasmaleistungen haben auch Einfluss auf die Homogenität des Polymerabtrages. In Abbildung 5.32 ist die Abhängigkeit von der ICP-Leistung dargestellt. Bei den Prozessen mit niedriger Bias-Leistung ist mit steigender ICP-Leistung auch ein Anstieg der Homogenität verbunden. Bei einer Erhöhung der Bias-Leistung auf 120 W verschwindet jedoch der Einfluss der ICP-Leistung auf die Homogenität. Sie beträgt dann konstant für alle Werte $H_{\text{ätz}} \approx 0,9$. Abbildung 5.33 verdeutlicht den Einfluss der Bias-Leistung bei konstanter ICP-Leistung. Bei einem Anstieg von 80 W auf 120 W steigt die Homogenität ebenfalls an. Bei einer weiteren Erhöhung der Leistung auf 160 W ist jedoch unabhängig von der verwendeten ICP-Leistung keine weitere Verbesserung zu erkennen. Dies legt den Schluss nahe, dass die Homogenität von 0,9 für diesen Ätzprozess bei einem Prozessdruck von 0,43 Pa das Maximum darstellt. Um das Polymer sicher auf dem gesamten Wafer zu entfernen, ist demnach eine Überätzzeit von 20% bezüglich der Wafermitte notwendig.

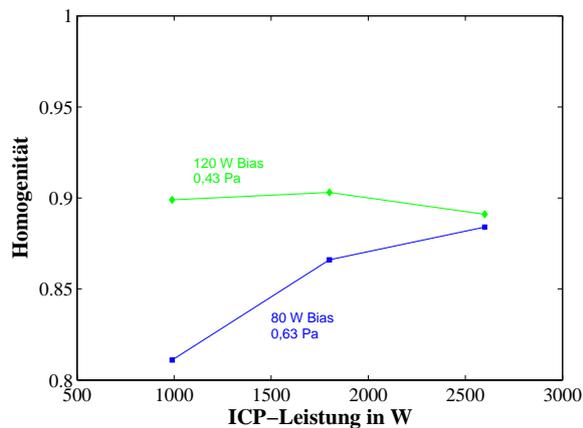


Abbildung 5.32: Abhängigkeit der Homogenität des Polymer-Abtrags von der ICP-Leistung

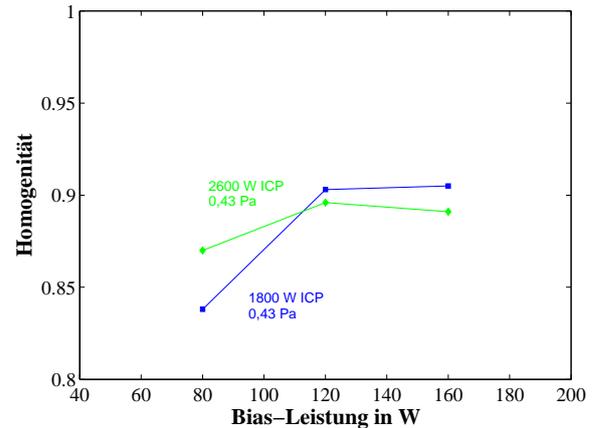


Abbildung 5.33: Abhängigkeit der Homogenität des Polymer-Abtrags von der Bias-Leistung

Noch nicht betrachtet wurde bisher der Einfluss der Prozessparameter auf den Böschungswinkel. Die Vermessung der Proben ergab, dass die Bias-Leistung und die ICP-Leistung in den untersuchten Wertebereichen keinen messbaren Einfluss haben. Die Bias-Leistung von 80 W ist offenbar ausreichend um eine sehr gute Anisotropie zu erzielen. Der Prozessdruck hat dagegen einen starken Einfluss auf das Ätzprofil. Bei einem Druck von 0,63 Pa lagen die Winkel zwischen 91° und 94° . Für Drücke von 0,37 Pa und 0,43 Pa konnten Böschungswinkel zwischen 88° und 90° erzielt werden. Aus den Ergebnissen der Parametervariation konnte der in Tabelle 5.18 angegebene Ätzprozess als Optimum bezüglich der gestellten Anforderungen ermittelt werden. Abbildung 5.34 zeigt die REM-Aufnahme einer mittels dieses Prozesses strukturierten Polymerschicht.

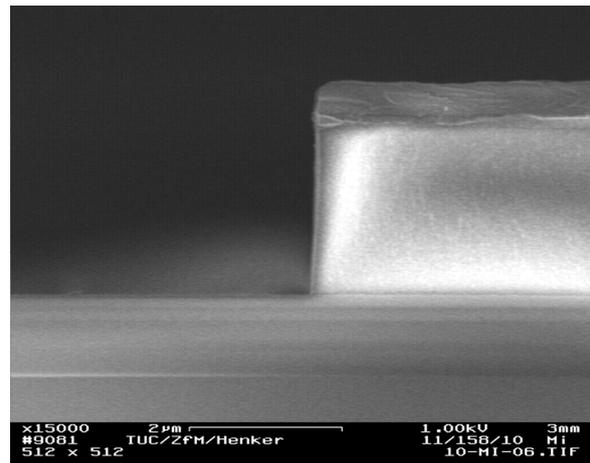


Abbildung 5.34: Mittels des optimierten Ätzprozesses (Tabelle 5.18) strukturierte $2,3\ \mu\text{m}$ dicke Polymerschicht

5.3.6 Isotrope Entfernung des CF - Polymers

Der Prozess der Opferschichtentfernung erfordert eine isotrope Ätzung um das CF-Polymer unter der Membranschicht zu beseitigen. Der Transport des Ätzgases zum Polymer und der Abtransport der Reaktionsprodukte erfolgt durch Ätzzugangsöffnungen

Tabelle 5.18: Optimierte Prozessparameter für die anisotrope Strukturierung des CF-Polymers

Prozessdruck	0,43 Pa
ICP-Leistung	1800 W
Bias-Leistung	120 W
Elektrodentemperatur	0 °C
Ätzgasfluss O ₂	0,051 Pa · cm ³ /s

(siehe Abschn. 3.2). Da sich während des Verschlussprozesses durch die Ätzzugangsöffnungen Material im Inneren der Kavität abscheidet (s. Abb. 5.35), wird die in Abbildung 3.2 b) auf Seite 64 gezeigte Anordnung der Ätzöffnungen außerhalb der aktiven Strukturen angestrebt. Aus den daraus resultierenden großen Abständen zwischen den Ätzzugangsöffnungen ergibt sich die Forderung nach einer großen lateralen Ätzrate des Ätzprozesses.

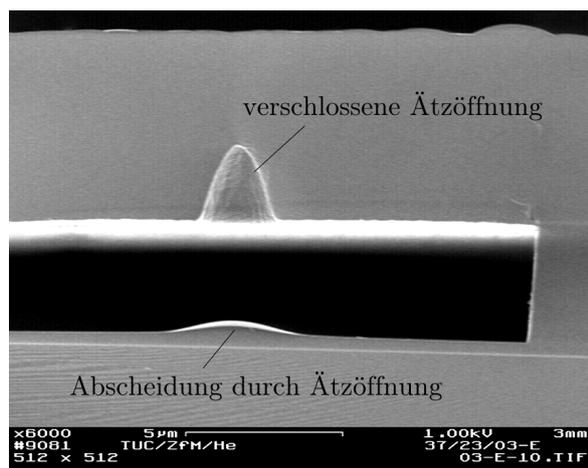


Abbildung 5.35: REM-Aufnahme einer Ätzzugangsöffnung nach deren Verschluss; Während dem Verschlussprozess wird durch die Öffnungen auch im Inneren der Kavität Material abgeschieden

variiert, da ein Test mit 1000 W keine signifikante Änderung der Ätzrate zeigte.

Um nachzuweisen, dass mit dem verwendeten Ätzprozess auf Basis von reinem Sauerstoff das CF-Polymer rückstandsfrei entfernt werden kann, wurden EDX-Messungen an einer Probe vor der Polymerabscheidung (Referenz), nach der Polymerabscheidung und nach der Polymerentfernung durchgeführt. Die Messergebnisse und REM-Aufnahmen der Probe sind in Abbildung 5.36 zusammengefasst. Nach der Polymerabscheidung von 2 µm sind nur Fluor und Kohlenstoff nachweisbar (Abb. 5.36 oben). Nach einer 10-minütigen

Aufgrund der technologischen Eignung und der Möglichkeit der kostengünstigen *Batch*-Prozessierung wurde die Anlage „300“ von der *TePla AG* (s. Abschn. 5.1.1) verwendet, die einen Rohrreaktor mit Mikrowellengenerator besitzt. Durch den relativ hohen Prozessdruck von 200 Pa und dem prinzipiell niederenergetischen Ätzangriff in einem Rohrreaktor [133] ist die Ätzcharakteristik stark isotrop (s. Abb. 5.37). Mit der Mikrowellenquelle können hohe Plasmadichten und damit auch eine hohe Dichte an reaktiven Spezies generiert werden. Dadurch ist es möglich auch ohne den Beschuss mit energiereichen Teilchen hohe Ätzraten zu erzielen. Die Prozessparameter (s. Tab. 5.19) wurden nicht

Behandlung der Probe mit dem Sauerstoffätzprozess entspricht das gemessene Spektrum dem der Referenzmessung vor der Polymerabscheidung (Abb. 5.36 unten).

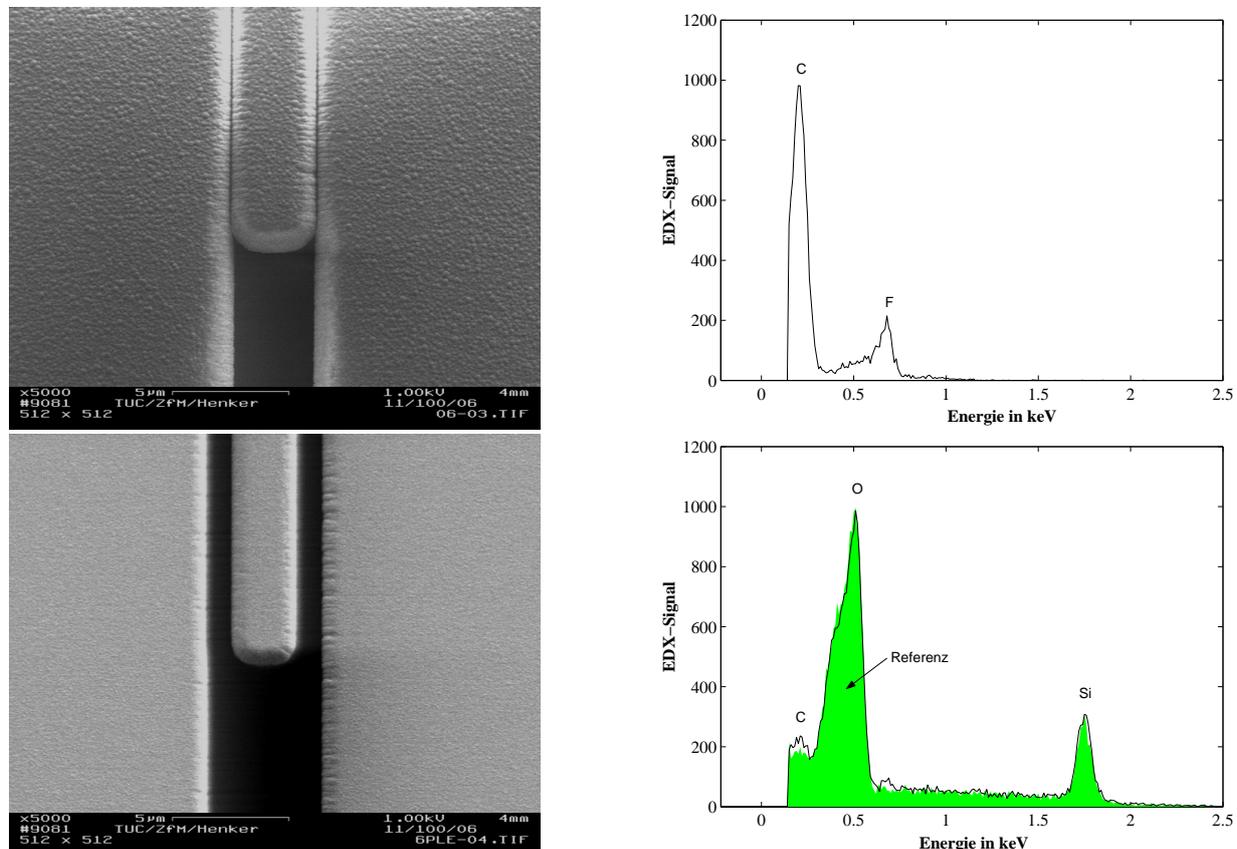


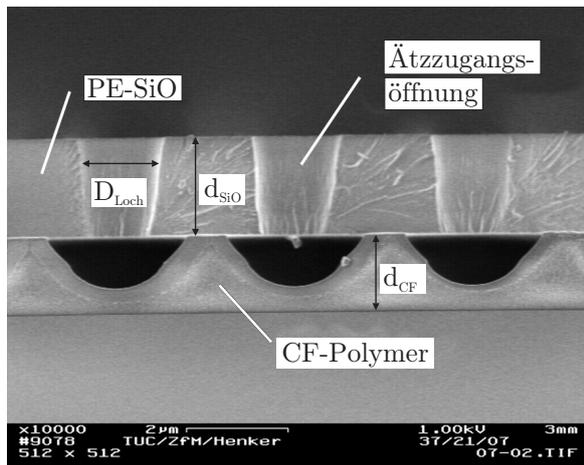
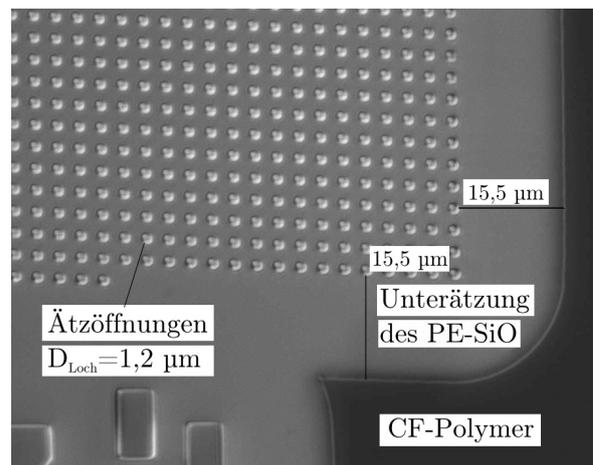
Abbildung 5.36: Rückstandsfreie Entfernung des CF-Polymers mit dem Sauerstoffprozess; REM-Aufnahmen der untersuchten Probe und EDX-Messergebnisse, oben: Nach der Abscheidung des CF-Polymers können ausschließlich Fluor und Kohlenstoff nachgewiesen werden, unten: nach der Polymerentfernung mit dem Sauerstoffprozess (Tabelle 5.19) sind nur das Silizium und der Sauerstoff des unter dem Polymer befindlichen SiO_2 nachzuweisen. Eine geringe Menge an Kohlenstoff wird auch bei einer Referenzmessung (gefüllte Fläche) vor der Polymerabscheidung detektiert

Da für den Verschlussprozess die Ätzzugangsöffnungen möglichst klein sein sollten, wurde der Einfluss des Aspektverhältnisses der Löcher – das sich aus dem Quotienten der Membranschichtdicke d_{SiO} und des Lochdurchmessers D_{Loch} ergibt – auf die laterale Ätzrate untersucht. Außerdem wurde die Abhängigkeit der Ätzrate von der Schichtdicke des Polymers d_{CF} ermittelt. In Abbildung 5.37 sind die drei geometrischen Größen an einer Teststruktur veranschaulicht.

Tabelle 5.19: Prozessparameter für die Isotrope Entfernung des CF-Polymers

Prozessdruck	200 Pa
Mikrowellenleistung	800 W
Ätzgasfluss O ₂	0,76 Pa · cm ³ /s

Für die Versuche wurden Proben mit Öffnungen zwischen 1 µm und 5 µm präpariert und 60 s, 120 s bzw. 300 s geätzt. Die Polymerdicke wurde zwischen 2 µm und 5 µm sowie die Oxiddicke zwischen 1 µm und 2 µm variiert. Aufgrund der Tatsache, dass Siliziumoxid im sichtbaren Wellenlängenbereich transparent ist, konnte die Länge der Unterätzung im Lichtmikroskop vermessen werden. Abbildung 5.38 zeigt exemplarisch die lichtmikroskopische Aufnahme einer Versuchsprobe nach der Opferschichtätzung.

**Abbildung 5.37:** Ätzprofil des isotropen Freilegungsprozesses (siehe Tabelle 5.19)**Abbildung 5.38:** Lichtmikroskopische Aufnahme der Versuchsprobe 37-21-03 zur Bestimmung der lateralen Ätzrate für 1 µm PE-SiO, 5 µm CF-Polymer bei 300 s Ätzzeit

In Abbildung 5.39 sind die Messergebnisse für die Unterätzung der Siliziumoxidmembran über der Ätzzeit für die verwendeten Schichtkombinationen aufgetragen. Zum einen weist die Ätzrate eine starke Abhängigkeit von der verwendeten Schichtkombination auf, zum anderen ist in dem Diagramm eine Verzögerungszeit von ca. 50 s zu Beginn der Ätzung zu erkennen. Versuche mit Proben, die mehrmals in Folge prozessiert wurden, zeigten bei jeder Ätzung diese Verzögerung. Die Ursache liegt in der zu Beginn des Prozesses nicht ausreichenden Substrattemperatur begründet. Da bei dem verwendeten Prozess kein starker Ionenbeschuss erfolgt, muss die notwendige Aktivierungsenergie durch thermische Energie bereitgestellt werden. Während des Prozesses steigt die Temperatur des Substrates

aufgrund des Energieeintrags des Plasmas, so dass nach 50 s die Energie für die chemische Zersetzung des Polymers ausreicht. Da die Wafer in diesem Rohrreaktor nicht direkt geheizt werden können, muss die zusätzliche Prozesszeit in Kauf genommen werden.

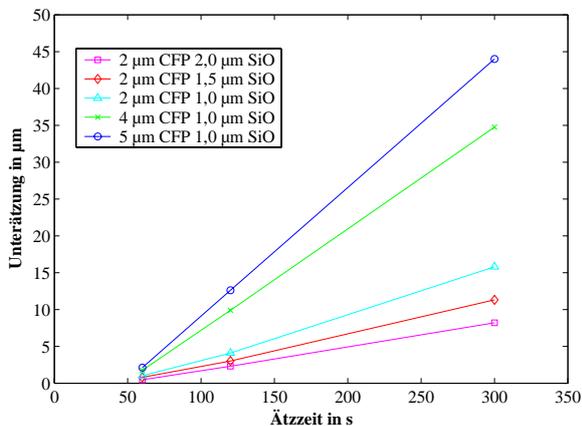


Abbildung 5.39: Unterätzung der PE-SiO-Membranschicht in Abhängigkeit der Ätzdauer für verschiedene Schichtkombinationen bei einem Lochdurchmesser von 2 µm

und Ätzrate, sowie zwischen Polymerdickte und Ätzrate in zwei Diagrammen gegenübergestellt. Mit zunehmender Polymerdickte und abnehmender Oxiddicke steigt die Ätzrate von 28 nm/s für 2 µm CF-Polymer und 2 µm PE-SiO um den Faktor 6 auf 165 nm/s für 5 µm CF-Polymer und 1 µm PE-SiO an.

Begründet werden kann dieses Verhalten mit der thermischen Beeinflussung des Polymers während der PE-SiO Abscheidung. Es ist bekannt, dass sich die chemische Zusammensetzung von Fluor-Kohlenstoff-Schichten durch thermisches *Annealing* ab 350°C verändern kann [138, 139]. Dabei werden vor allem Fluor und Wasserstoff freigesetzt, wodurch sich weitere C-C- und C=C-Bindungen ausbilden können. Durch diese höhere Vernetzung des Polymers steigt seine Temperaturstabilität [140] und damit die Ätzresistenz. Mit zunehmender Schichtdicke des PE-SiO steigen die Dauer der Temperaturbelastung

Um den Einfluss des Aspektverhältnisses der Ätzöffnungen auf die Ätzrate zu bestimmen wurden der Lochdurchmesser und die Tiefe der Löcher, d.h. die Dicke der Oxidmembran, variiert. In Abbildung 5.40 sind die Ätzraten von zwei Proben mit 1 µm bzw. 2 µm Oxiddicke für alle Lochdurchmesser dargestellt. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass das Aspektverhältnis der Löcher nur einen sehr geringen Einfluss auf die Ätzrate hat. Die Probe mit der dünneren Oxidschicht weist, unabhängig vom Lochdurchmesser, eine fast doppelt so hohe Ätzrate auf wie die Vergleichsprobe. In Abbildung 5.41 ist der Zusammenhang zwischen Oxiddicke

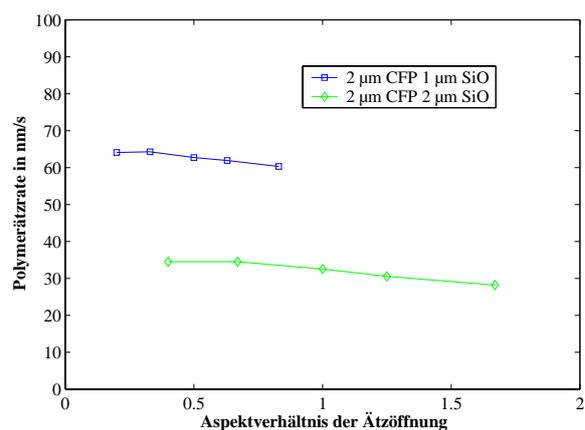


Abbildung 5.40: Abhängigkeit der Polymerätzrate vom Aspektverhältnis der Ätzöffnungen

und damit auch die Vernetzung des Polymers. Mit zunehmender Polymerdicke wird dagegen der Diffusionsweg länger und die Fluorkonzentration bleibt somit höher bei gleicher Prozesszeit.

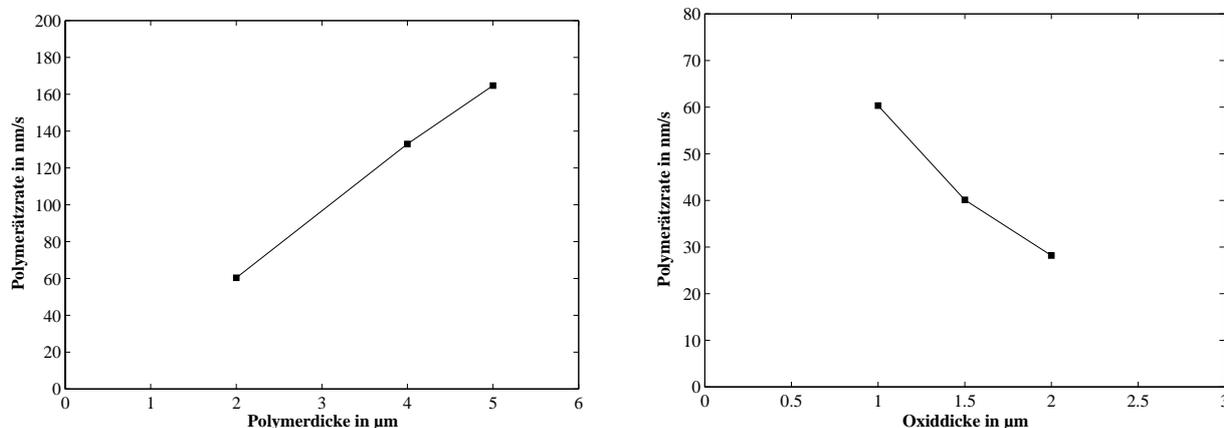


Abbildung 5.41: Einfluss der Schichtdicken auf die Polymerätzrate für einen Ätzöffnungsdurchmesser von $1,2\ \mu\text{m}$, links: Einfluss der Polymerdicke bei einer Oxiddicke von $1,0\ \mu\text{m}$; rechts: Einfluss der Oxiddicke bei konstanter Polymerdicke von $2\ \mu\text{m}$

5.3.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Das untersuchte Fluor-Kohlenstoff-Polymer eignet sich aufgrund der trockenchemischen Prozessierbarkeit sehr gut als Opferschichtmaterial für die Dünnschichtverkappung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis. Mit der plasmaunterstützten chemischen Dampfphasenabscheidung steht ein Abscheideverfahren zur Verfügung, das bei niedrigen Prozesstemperaturen einen mechanisch schonenden Auftrag der Opferschicht gewährleistet. Der Verschluss von Gräben wird unabhängig von der Grabentiefe realisiert, wobei die erforderliche Dicke der Opferschicht von der maximalen Grabenbreite einer Mikrostruktur abhängt.

Das CF-Polymer ist temperaturstabil bis über $400\ ^\circ\text{C}$, so dass Schichten mittels PVD oder PECVD als Membranschicht abgeschieden werden können. Die Strukturierung und die Entfernung des CF-Polymers werden mit sauerstoffbasierten Trockenätzprozessen durchgeführt. Dabei kann durch geeignete Wahl der Prozessparameter sowohl ein hochgradig anisotropes, als auch ein isotropes Ätzprofil realisiert werden. Insbesondere die trockenchemische Entfernung des CF-Polymers von den Mikrostrukturen mit vergleichsweise hohen Ätzraten von bis zu $160\ \text{nm/s}$ prädestiniert es zur Verwendung als Opferschichtmaterial.

5.4 Realisierung der Membranschicht mittels $\text{SiO}_x:\text{H}_y$

In diesem Abschnitt werden die Prozesse zur Erzeugung der Membranschicht anhand der Technologievariante A dargestellt. Die erfolgreiche Erzeugung der Membranschicht nach Technologievariante B konnte bereits unter Verwendung von Nickel in der Diplomarbeit [86] gezeigt werden. Da Nickel als Material für die Dünnschichtkappe aufgrund der hohen mechanischen Eigenspannungen (bei Verwendung von Silizium als Substratmaterial) weniger geeignet ist als z. B. Siliziumoxid (s. Abschn. 5.2.4) und da der Prozessablauf bereits in [86] detailliert beschrieben ist, wird an dieser Stelle darauf verzichtet.

Die Erzeugung der Membranschicht mittels PECVD beruht auf zwei Schritten. Im ersten Schritt muss eine möglichst konforme und mechanisch stabile Schicht über das strukturierte CF-Polymer abgeschieden werden. Der zweite Schritt besteht aus der Erzeugung von Ätzzugangsöffnungen, durch die das CF-Polymer entfernt wird. Die Temperatur des Substrates darf während der Abscheidung 400°C nicht wesentlich überschreiten, um das CF-Polymer nicht thermisch zu zersetzen. Außerdem ist eine hohe chemische Resistenz des Membranmaterials gegenüber den Ätzgasen und Reaktionsprodukten der Opferschichtätzung gefordert. Aus diesem Grund wurde mittels PECVD abgeschiedenes $\text{SiO}_x:\text{H}_y$ (PE-SiO) als Membranmaterial gewählt.

5.4.1 Abscheidung der Membranschicht

Um die Prozesskompatibilität der Oxidabscheidung mittels PECVD auf dem CF-Polymer zu testen, wurden 4-Zoll-Wafer mit einer ganzflächigen Polymerschicht verwendet. Die Schichtdicke des Polymers wurde zwischen $2\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$ und die des Oxids zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$ variiert. Für die Tests kamen ein Standardprozess (HDR) für PE-SiO bei 400°C Abscheidetemperatur und ein Niedrigrateprozess (LDR) bei 350°C Abscheidetemperatur zum Einsatz (s. Tab. 5.6).

Der Abscheideprozess bei 400°C resultierte für alle Schichtdicken in leichten bis starken Abhebungen des PE-SiO. In Abbildung 5.42 ist das Foto eines Wafers mit $5\ \mu\text{m}$ CF-Polymer nach der Abscheidung einer $2\ \mu\text{m}$ dicken SiO-Schicht bei 400°C zu sehen. Obwohl das verwendete CF-Polymer bis oberhalb von 400°C stabil ist, d.h. nicht thermisch degradiert, können bereits ab 350°C herstellungsbedingt in der Schicht vorhandene freie Radikale und instabile Fragmente wie z. B. F, H, HF, CF_x und CH_x thermisch ausgasen [139]. Mit zunehmender Polymerdicke steigt die Menge der freien Radikale und Fragmente. Mit wachsender Oxiddicke verlängert sich die Dauer der Temperatureinwirkung. Aus diesen Gründen nimmt mit den Schichtdicken auch das Ausmaß der Abhebungen zu.

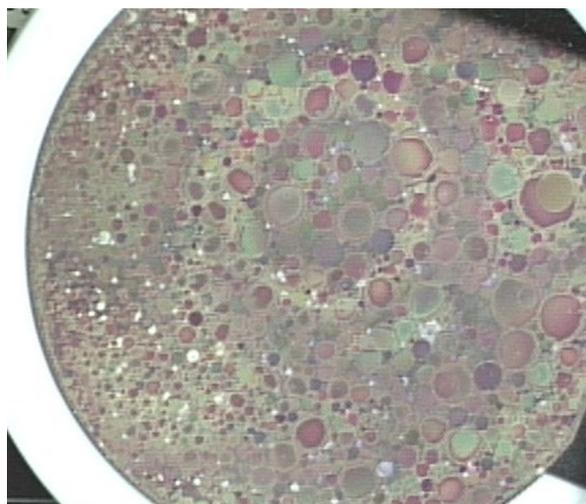


Abbildung 5.42: Schichtabhebungen auf einem Wafer mit 5 μm CF-Polymer und 2 μm PE-SiO; das PE-SiO wurde bei 400 $^{\circ}\text{C}$ abgeschieden

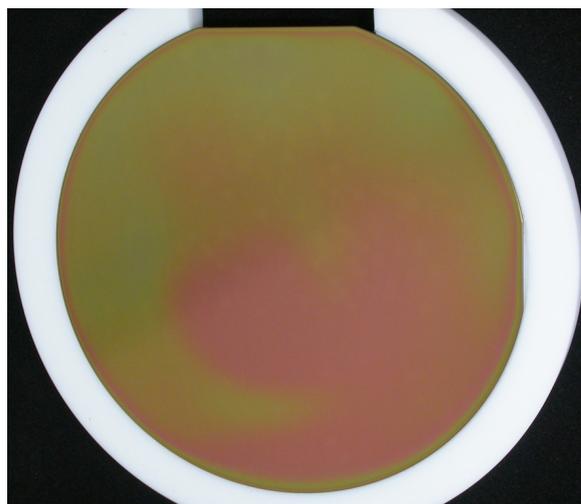


Abbildung 5.43: Defektfreier Wafer mit 5 μm CF-Polymer und 2 μm PE-SiO; das PE-SiO wurde bei 350 $^{\circ}\text{C}$ abgeschieden

Durch eine gezielt eingesetzte Temperung der CF-Schicht vor der Oxidabscheidung können die flüchtigen Bestandteile der Schicht annähernd vollständig ausgetrieben werden. Dies führt jedoch zu einer höheren Vernetzung des Polymers und damit zu längeren Prozesszeiten bei der Opferschichtentfernung (Abschn. 5.3.6). Sinnvoller ist es in diesem Fall, die Abscheidetemperatur für das PE-SiO zu reduzieren. Bei Verwendung eines Prozesses mit reduzierter Abscheidetemperatur sind für alle getesteten Schichtdicken keinerlei Haftungsprobleme zu erkennen. Abbildung 5.43 zeigt die Aufnahme eines Wafers mit ebenfalls 5 μm CF-Polymer und 2 μm PE-SiO, das bei 350 $^{\circ}\text{C}$ abgeschieden wurde. In Tabelle 5.20 sind die Ergebnisse dieser Versuche zusammengefasst.

Tabelle 5.20: Ergebnisse der PE-SiO Abscheidung auf das CF-Polymer für verschiedene Schichtdickenkombinationen bei HDR- und LDR-SiO

Schichtstapel		Abscheidetemperatur	
CF-Polymer	PE-SiO	400 $^{\circ}\text{C}$	350 $^{\circ}\text{C}$
2 μm	1 μm	leichte Abhebungen	keine Abhebungen
2 μm	2 μm	starke Abhebungen	keine Abhebungen
5 μm	1 μm	starke Abhebungen	keine Abhebungen
5 μm	2 μm	sehr starke Abhebungen	keine Abhebungen

Neben der Kompatibilität des Oxidabscheideprozesses mit der CF-Opferschicht ist eine ausreichende Konformität der Schichtdicke wichtig um die mechanische Stabilität der Dünnschichtkappe nach der Opferschichtätzung zu gewährleisten. Wie im Abschnitt 5.3.3 bereits dargestellt, ist die Schichtdicke an vertikalen Wänden bei PECVD-Prozessen vom Einfallswinkel der Gasmoleküle Θ und damit von der Breite w_G und der Tiefe z des zu beschichtenden Grabens abhängig.

Um die mit der PECVD erzielbaren Geometrien der Oxidmembran und deren mechanische Stabilität zu bewerten, bzw. die notwendige Mindestschichtdicke zu bestimmen, wurden Teststrukturen gefertigt. Dazu wurde eine strukturierte Polymerschicht mit PE-SiO beschichtet. Die Schichtdicken lagen zwischen 500 nm und 2000 nm. Nachfolgend wurde die Opferschicht entfernt, um die selbsttragende Oxidmembran zu erhalten und damit die mechanische Stabilität zu testen. Abbildung 5.44 zeigt den Querschnitt einer Teststruktur mit einer freistehenden vertikalen Wand. Die Grabenbreite w_G im Sinne der Darstellung 5.18 auf Seite 129 ist in diesem Fall sehr groß im Vergleich zur Stufenhöhe. Daraus resultiert eine hohe Konformität der PE-SiO-Schicht. Bei der abgebildeten Teststruktur verringert sich die Schichtdicke von $1,5\ \mu\text{m}$ an der Oberseite der Opferschicht auf $1,22\ \mu\text{m}$ am Fußpunkt der Seitenwand, d.h. um lediglich 20 %.

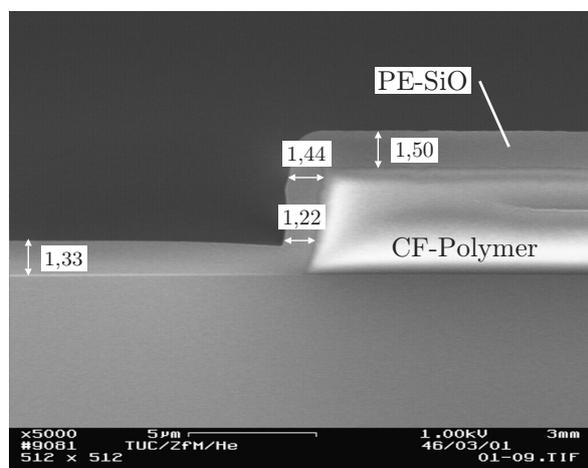


Abbildung 5.44: REM-Aufnahme einer Teststruktur mit freistehender, vertikaler Kante nach der Abscheidung einer $1,5\ \mu\text{m}$ dicken PE-SiO-Membran

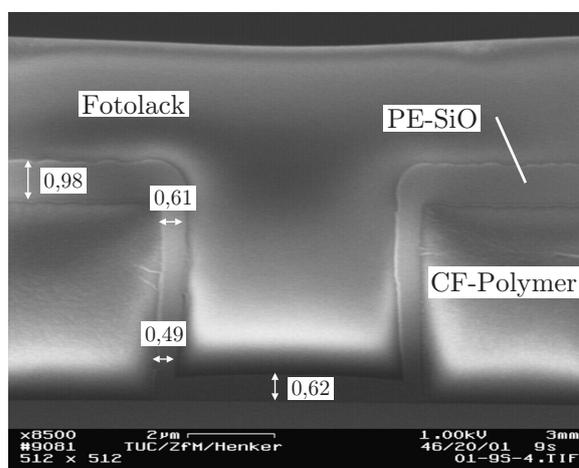


Abbildung 5.45: REM-Aufnahme einer Teststruktur mit einem Aspektverhältnis des zu beschichtenden Grabens von ca. 0,8 nach der Abscheidung einer $1,0\ \mu\text{m}$ dicken PE-SiO-Membran

In Abbildung 5.45 ist die REM-Aufnahme einer Stützstelle zur Verringerung der freitragenden Fläche zu sehen. Da die Stützstellen über die gesamte Fläche der Dünnschichtkappe verteilt sind (s. Abb. 5.47) und sie sich innerhalb des Gebietes der Mikrostruktur befinden, sind deren lateralen Abmessungen minimiert. Die Gräben in der Opferschicht,

welche die lateralen Abmessungen der Stützstellen definieren, haben deshalb eine geringe Breite, was sich in Verhältnissen w_G/z von bis zu 1,0 äußert. Abbildung 5.45 zeigt eine Grabenstruktur mit einem solchen Aspektverhältnis und einer Oxidschichtdicke von $1,0\ \mu\text{m}$. Die Dicke der vertikalen Oxidschicht reduziert sich an der Oberkante des Grabens auf 62 % und am Fußpunkt des Grabens auf 50 % der Schichtdicke auf der Oberseite.

Kritisch für die Stabilität der Membranschicht ist dabei weniger das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Oxidschichtdicke, als vielmehr die Schichtdickenschwankung entlang der vertikalen Seitenwände. Die Abnahme der Membrandicke von der Oberkante zum Fußpunkt der Seitenwände lag bei allen untersuchten Teststrukturen zwischen 15 % (Abb. 5.44) und 20 % (Abb. 5.45).

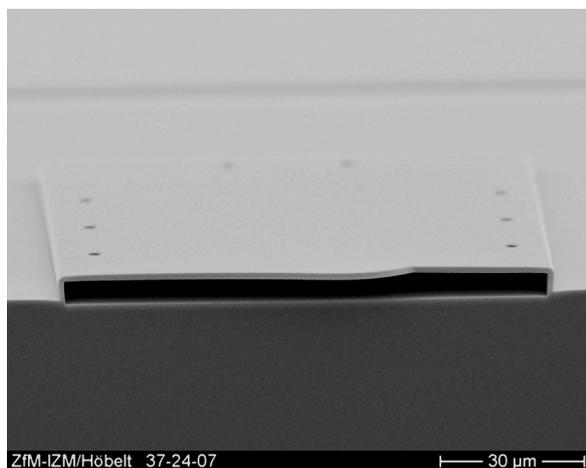


Abbildung 5.46: REM-Aufnahme einer selbsttragenden $1,5\ \mu\text{m}$ dicken Oxidmembran nach Entfernung der Opferschicht

Die Stabilität der Oxidmembranen wurde durch die Entfernung der Opferschicht getestet. Abbildung 5.46 zeigt den Querschnitt durch eine $100 \times 200\ \mu\text{m}^2$ große freitragende Teststruktur ohne Stützstellen. In Abbildung 5.47 ist die lichtmikroskopische Aufnahme einer $1500 \times 1500\ \mu\text{m}^2$ großen freigelegten Teststruktur mit 488 Stützstellen zu sehen. In beiden Fällen wurde eine Oxiddicke von $1,5\ \mu\text{m}$ verwendet. Dabei konnten keinerlei Defekte festgestellt werden. Bei einer Oxidschichtdicke von unter $1,0\ \mu\text{m}$ kam es dagegen vereinzelt zu Rissen und Schichtabhebungen wie es in Abbildung 5.48 zu sehen ist.

5.4.2 Strukturierung der Ätzöffnungen

Das Ziel dieses Strukturierungsschrittes ist die Erzeugung von Öffnungen, durch die der Transport des Ätzgases und der Reaktionsprodukte bei der nachfolgenden Opferschichtätzung erfolgen kann. Der Durchmesser dieser Öffnungen sollte auf ein Minimum reduziert werden, um während des Verschlussprozesses ein schnelles Zuwachsen der Öffnungen zu gewährleisten und um die Abscheidung von Material im Inneren der Dünnschichtkappe zu verhindern. Der Einfluss des Durchmessers der Ätzzugangsöffnungen auf die Opferschichtätzung wurde bereits in Abschnitt 5.3.6 dargelegt. Bis zu einem Aspektverhältnis der Öffnungen von 5:3 ist kein nennenswerter Einfluss auf die Ätzrate der Opferschichtät-

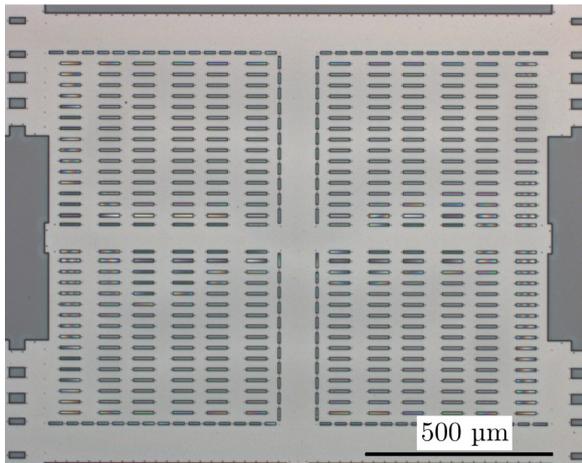


Abbildung 5.47: Lichtmikroskopische Aufnahme einer 1,5 µm dicken Oxidmembran mit Stützstellen nach der Opferschichtätzung

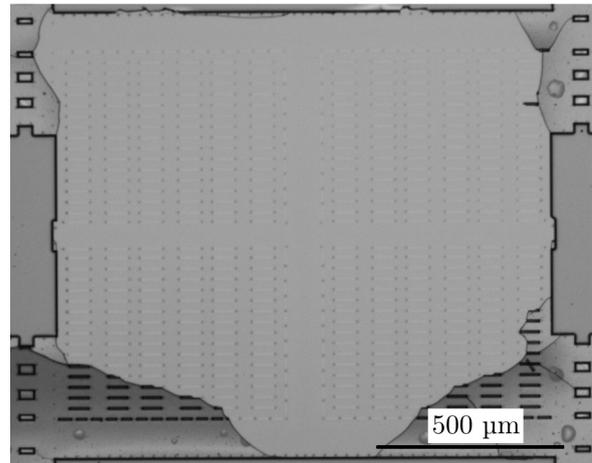


Abbildung 5.48: Lichtmikroskopische Aufnahme einer 1,0 µm dicken Oxidmembran nach der Opferschichtätzung

zung vorhanden. Das bedeutet für eine Membranschicht mit einer Dicke von 1500 nm, dass Öffnungen mit einem Radius von 450 nm ausreichend wären.

Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Zuverlässigkeit, mit der die Öffnungen realisiert werden. Die Strukturierung der aus PE-SiO bestehenden Membranschicht erfolgte mittels eines Plasmaätzprozesses über eine Lackmaske. Dafür wurde, wie für die Strukturierung der Polymerschicht, die RIE-Anlage „Oxford Plasmalab System 100 ICP“ verwendet. Um eine möglichst hohe Selektivität zwischen Lackmaske und Siliziumoxid zu erreichen, wurde mit 40 W eine relativ niedrige Bias-Leistung gewählt. Die Prozesstemperatur wurde auf 0°C reduziert, als Prozessgas eine Kombination aus 0,03 Pa · cm³/s CF₄ und 0,025 Pa · cm³/s CHF₃ eingeleitet und der Kammerdruck mit 0,4 Pa möglichst gering gehalten. Als ICP-Leistung wurde mit 1300 W ein mittlerer Wert verwendet.

Aufgrund des Ionenbeschusses und der Fluorchemie des Ätzprozesses bleibt die Selektivität zur Maske gering. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Dicke des Fotolackes zu gewährleisten. Die vorhandenen Stufen am Rand der Dünnschichtkappen führen jedoch zu einer nichtkonformen Bedeckung der Strukturen mit Fotolack. Abbildung 5.49 zeigt eine solche, mit Fotolack bedeckte, Stufe. Bei einer Dicke der Opferschicht von 5 µm und einer Dicke des Fotolackes von 4,2 µm auf der ebenen Substratoberfläche, beträgt die Schichtdicke des Fotolackes auf der Dünnschichtkappe nur zwischen ca. 36 % und maximal 75 % der Nennschichtdicke.

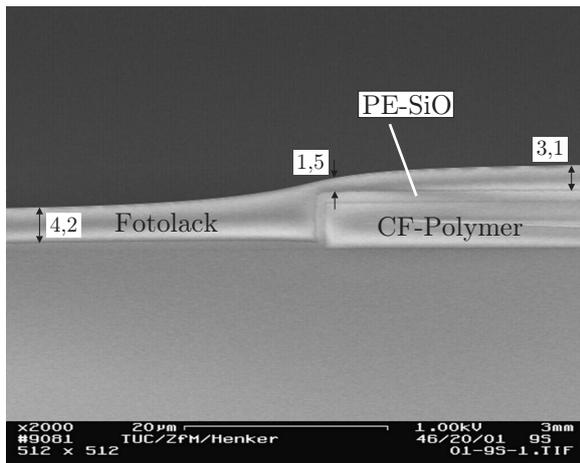


Abbildung 5.49: REM-Aufnahme einer mit Fotolack beschichteten Oxidmembran

Eine zu geringe Bedeckung der Kanten mit Fotolack führt zu Beschädigungen der Membranschicht während des Ätzprozesses, wie es die REM-Aufnahme in Abbildung 5.50 zeigt. Untersuchungen an Teststrukturen ergaben für eine 1,5 µm dicke Membranschicht eine notwendige Mindestlackdicke von 1,2 µm. Bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Opferschicht- und Membranschichtdicken konnte dies bei einer Nenndicke des Fotolackes von 4-5 µm über dem gesamten Wafer gewährleistet werden.

Bei der Belichtung des Fotolackes mittels Projektionslithografie treten zwei weitere Probleme auf. Zum einen ist die Tiefenschärfe bei diesem Verfahren relativ gering, zum anderen ist die notwendige Belichtungszeit von der Schichtdicke des Fotolackes abhängig. Die Inhomogenität der Lackdicke führt demzufolge zu unterschiedlichen Lochdurchmessern bzw. im Extremfall zu nicht durchbelichteten Strukturen. Die REM-Aufnahmen in Abbildung 5.51 zeigen exemplarisch zwei identisch prozessierte Ätzöffnungen. Die Ätzöffnung am Rand der Dünnschichtkappe (Abb. 5.51a) ist aufgrund der geringeren Lackdicke von 1,6 µm (nach der Ätzung) korrekt strukturiert. Die Ätzöffnung in Abbildung 5.51b befindet sich dagegen in der Mitte der Dünnschichtkappe mit einer Lackdicke von 2,5 µm. Die in beiden Fällen verwendete Belichtungszeit von 6 s war für die dicke Lackschicht nicht ausreichend.

Anhand von Belichtungsreihen mit Lackdicken zwischen 4 µm und 5 µm sowie Opferschichtdicken zwischen 4 µm und 6 µm konnten als zuverlässige Belichtungszeit 9 s ermittelt werden. Bei einem Maskenmaß von 1,0 µm liegen die tatsächlichen Durchmesser der

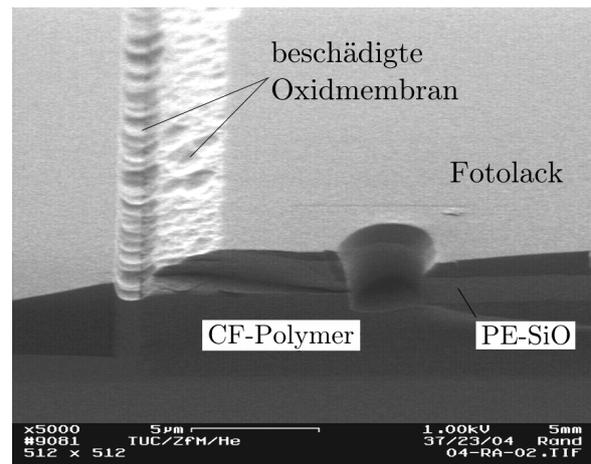


Abbildung 5.50: REM-Aufnahme einer Oxidmembran nach deren Strukturierung; aufgrund der zu dünnen Lackschicht an der Kante wurde die Membranschicht angegriffen

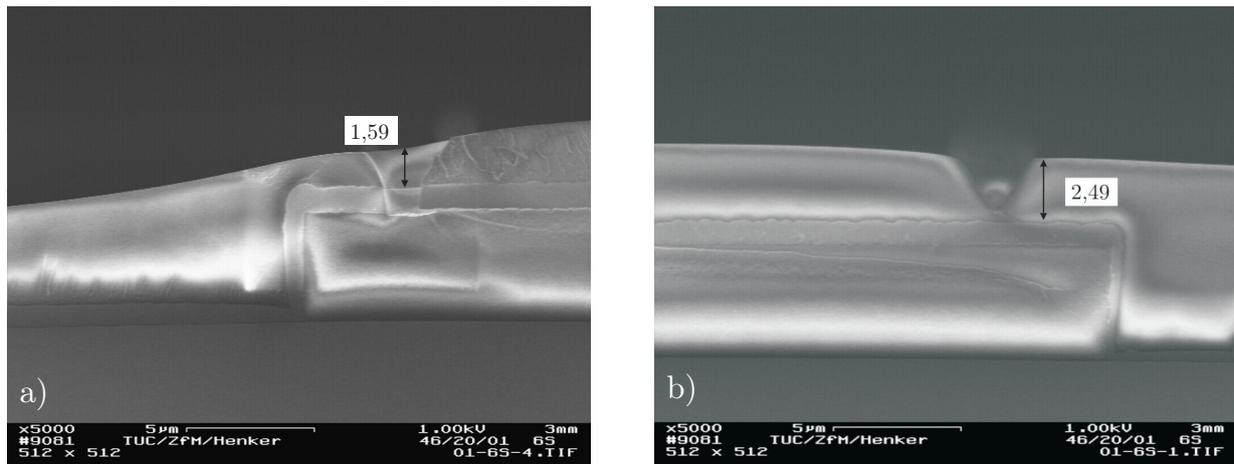


Abbildung 5.51: REM-Aufnahmen von Ätzöffnungen nach deren Strukturierung mittels RIE
 a) Ätzöffnung am Rand der Dünnschichtkappe, die Öffnung ist korrekt strukturiert aufgrund der niedrigeren Lackdicke
 b) Ätzöffnung in der Mitte der Dünnschichtkappe, die Belichtungszeit von 6 s war nicht ausreichend für eine Lackdicke von 2,5 μm

Ätzöffnungen über dem gesamten Wafer zwischen 1,0 μm und 2,0 μm . Diese Öffnungen konnten mit allen verwendeten Schichtkombinationen zuverlässig verschlossen werden.

5.4.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Das in der Mikrotechnik weit verbreitete mittels PECVD abgeschiedene Siliziumoxid eignet sich sowohl aus technologischer, wie auch aus konstruktiver Sicht zur Verwendung als Membranschicht für die Dünnschichtverkappung von Mikrostrukturen. Der PECVD Prozess bei 350 °C Elektrodentemperatur führt zu einer zuverlässigen Beschichtung mit ausreichend homogener Kantenbedeckung. Das Material zeigt eine sehr gute Haftung auf dem Untergrund und ist resistent gegenüber dem Ätzprozess zur Opferschichtentfernung.

Die Strukturierung der Membranschicht zur Erzeugung der Ätzzugangsöffnungen erfolgt mit einem Plasmaätzprozess über eine Fotolackmaske. Die dafür notwendige Bedeckung von Stufen mit Fotolack kann durch die Dicke der Lackschicht beeinflusst werden. Eine weitere, im Rahmen dieser Arbeit nicht untersuchte Möglichkeit zur homogenen Bedeckung der Strukturen mit Lack wäre die Sprühbelackung.

Um eine ausreichende Stabilität nach der Opferschichtentfernung zu gewährleisten, ist eine Schichtdicke von 1500 nm bis 2000 nm notwendig. Bei Schichtdicken bis 1000 nm wurden häufig Risse in der Membranschicht beobachtet. Schichten mit einer Dicke größer als 2000 nm sind möglich aber nicht zweckmäßig, da der Strukturierungsprozess der Ätzzugangsöffnungen aufwendiger wird.

5.5 Verschluss der Dünnschichtkappe

Der Verschluss der Ätzöffnungen ist der abschließende Schritt zur Erzeugung einer Dünnschichtkappe. Neben dem Zuwachsen der Löcher in der Oxidmembran muss die gesamte Dünnschichtkappe hermetisch verschlossen werden. Absolute Gasdichtheit ist nicht immer erforderlich, aber das Eindringen von Feuchtigkeit muss für fast alle Anwendungen verhindert werden. Außerdem ist eine ausreichende mechanische Stabilität der Kappe notwendig, um äußeren Kräften standzuhalten. Diese Kräfte können zum einen aus einem Druckunterschied zwischen Kavität und Umgebung der Kappe resultieren, sie können aber auch beim Vereinzeln auftreten oder bei der Hausung mittels Spritzguss auf die Dünnschichtkappe einwirken.

Im Folgenden wird die technologische Eignung der bereits in den Abschnitten 3.4 und 5.2.1 behandelten Verschlusschichtkombinationen untersucht. Dazu werden die verwendeten technologischen Prozesse beschrieben, sowie die Dichtheit der Verschlusschichten und die mechanische Stabilität der Dünnschichtkappen mittels interferometrischer Messung der Durchbiegung geprüft. Die gemessene Durchbiegung der Dünnschichtkappen wird mit den theoretisch ermittelten Werten verglichen und damit die erstellten Modelle evaluiert.

5.5.1 Verschluss der Ätzöffnungen durch Schichtabscheidung aus der Dampfphase

Für den Verschluss von Kavitäten in Mikrosystemen wurden bereits diverse Technologien untersucht und angewendet. Die wichtigsten Verfahren sind die chemische Dampfphasenabscheidung (CVD) [141, 75], die physikalische Dampfphasenabscheidung (PVD) [142, 143] und das Aufschmelzen von abgeschiedenen Schichten [144].

Gegen das Aufschmelzen einer Schicht spricht die für viele Materialien benötigte hohe Temperatur. Möglich wäre die Verwendung eines Lotes, das bei einer Temperatur von unter 450 °C schmilzt. Allerdings bereitet das flächendeckende Aufbringen solcher Materialien auf die Mikrostrukturen Schwierigkeiten. Vor allem die resultierenden Schichtspannungen wären aufgrund der hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Metallen sehr groß. Denkbar wäre die Verwendung einer zusätzlichen großen Belüftungsöffnung abseits der Mikrostrukturen, wie es in [144] vorgeschlagen wird. Die Ätzzugangsöffnungen könnten durch einen CVD- oder PVD-Prozess und die Belüftungsöffnung durch das Aufschmelzen des Lotes verschlossen werden. Das Lot kann dazu selektiv über der Belüftungsöffnung aufgebracht werden, ohne zusätzliche mechanischen Spannungen in die Dünnschichtkappe einzubringen. Ein Vorteil dieser Verfahrensweise ist die unabhängig vom Prozess einstell-

bare Atmosphäre in der Kavität. Das selektive, zerstörungsfreie Aufbringen des Materials auf die Belüftungsöffnungen bei niedrigen Kosten bleibt jedoch schwierig.

Aus diesem Grund wurde für den Verschluss der Dünnschichtkappe die Abscheidung aus der Dampfphase verwendet. Dazu kommen sowohl PVD- als auch PECVD-Prozesse zum Einsatz. Der Verschluss der Ätzöffnungen erfolgt zunächst durch die Abscheidung von Siliziumoxid. Zum einen ist die PECVD aufgrund des höheren Prozessdruckes besser geeignet als die PVD, da durch die kürzere freie Weglänge der Teilchen weniger Material innerhalb der Kavität abgeschieden wird. Zum anderen entsteht ein homogener Schichtverbund aus Membran- und Verschlusschicht, da beide Schichten aus dem gleichen Material bestehen. Abbildung 5.52 zeigt eine mit $7\ \mu\text{m}$ PE-SiO verschlossene Ätzöffnung. Der Durchmesser der Öffnung betrug vor dem Verschlussprozess $3,2\ \mu\text{m}$. Durch die stark nichtkonforme Kantenbedeckung des verwendeten Prozesses (s. Tab. 5.6 auf S. 106), entsteht der abgebildete kegelförmige Einschluss. Diese Abscheidecharakteristik bezüglich der Kantenbedeckung kann innerhalb der Parametergrenzen der verwendeten Anlage nicht signifikant beeinflusst werden. Für einen sicheren Verschluss der Öffnungen muss deshalb die Schicht dicker als der Durchmesser der Öffnungen sein.

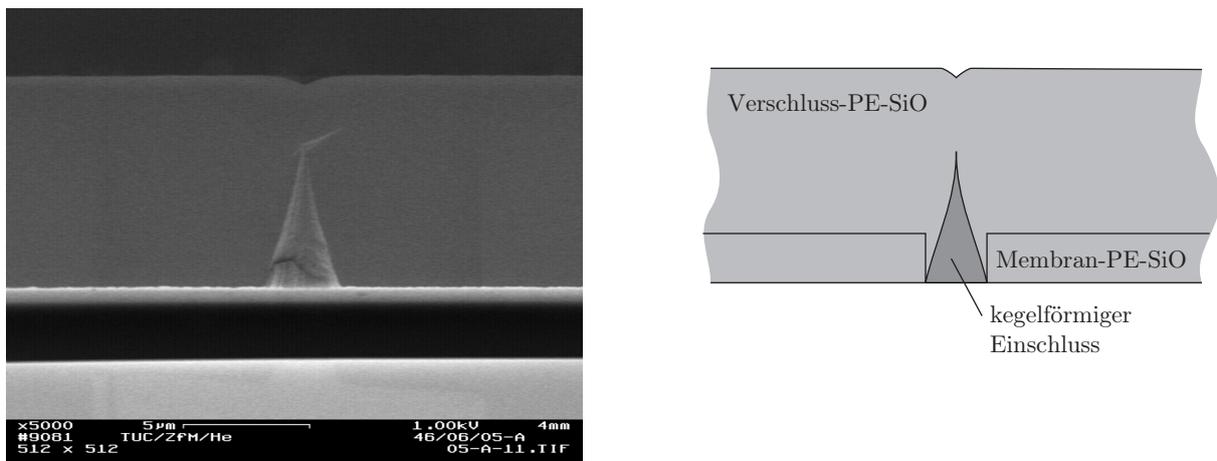


Abbildung 5.52: Verschluss einer Ätzöffnung durch $7\ \mu\text{m}$ PE-SiO, links: REM-Aufnahme, rechts: Grafische Veranschaulichung der Einzelschichten

Da das PE-SiO eine schlechte Feuchtigkeitsbarriere ist, muss eine weitere, feuchtigkeitsundurchlässige Schicht abgeschieden werden. Dazu wird mindestens $2\ \mu\text{m}$ Aluminium auf die Dünnschichtkappe gesputtert. Abbildung 5.53 zeigt die Detailaufnahme einer Dünnschichtkappe mit dieser Materialkombination. Die Ätzöffnungen in der Membranschicht sind vor der Al-Abscheidung verschlossen, so dass kein Material in den Öffnungen oder der Kavität abgeschieden wird.

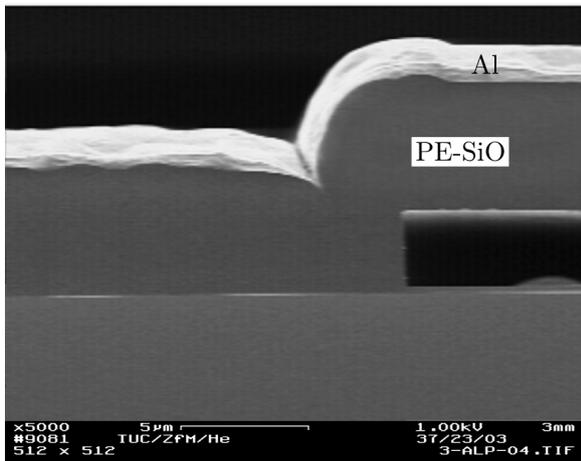


Abbildung 5.53: REM-Aufnahme einer Dünnschichtkappe aus der Materialkombination PE-SiO/Al

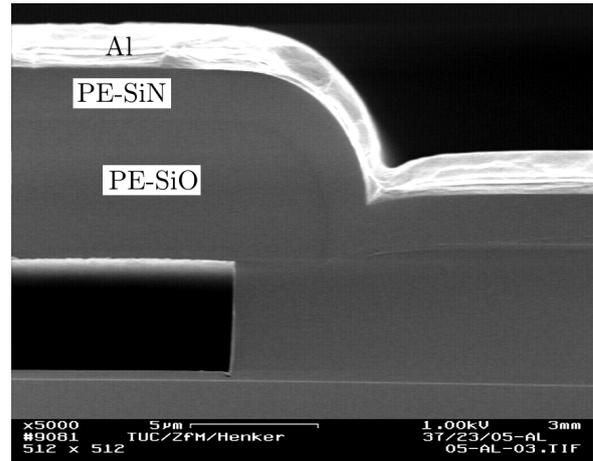


Abbildung 5.54: REM-Aufnahme einer Dünnschichtkappe aus der Materialkombination PE-SiO/PE-SiN/Al

Um die mechanische Stabilität der Membranschicht bei gleicher Schichtdicke zu erhöhen, kann ein Teil des PE-SiO durch eine PE-SiN-Schicht ersetzt werden (Abb. 5.54). Durch den höheren E-Modul des PE-SiN im Vergleich zu PE-SiO kann die Durchbiegung der Dünnschichtkappe bei gleicher Last deutlich reduziert werden. Außerdem ist Siliziumnitrid, wie bereits im Abschnitt 3.4.1 angesprochen, eine gute Feuchtigkeitsbarriere und verbessert damit die Hermetizität des Dünnschichtpackages. Abbildung 5.55 zeigt die REM-Aufnahme einer mit dieser Schichtkombination verkappten Mikrostruktur.

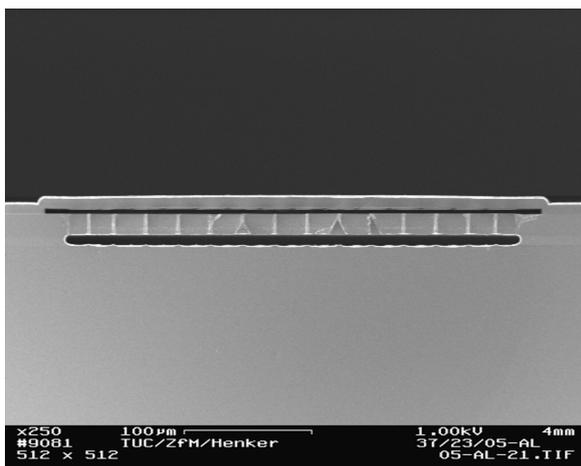


Abbildung 5.55: REM-Aufnahme einer Silizium-Mikrostruktur mit Dünnschichtkappe, die aus der Materialkombination PE-SiO/PE-SiN/Al besteht und eine Fläche von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ überspannt

Da die Abscheidecharakteristik in dem durch die verwendete Anlage gegebenen Parameterraum nicht beeinflusst werden kann, wurden die Prozessparameter hinsichtlich der resultierenden Eigenspannung des jeweiligen Schichtstapels optimiert. Die dazu durchgeführten Untersuchungen sind in Abschnitt 5.2.1 ausführlich dargelegt.

Ein weiterer Effekt, der durch die nichtkonforme Abscheidung der Verschlusschichten entsteht, ist die Einkerbung am Fußpunkt von Stufen (s. Abb. 5.56). An dieser Einkerbung treffen die vertikal und lateral wachsenden Teilschichten zusammen, so dass eine Grenzfläche zwischen diesen Bereichen entsteht. Der Winkel zur Waferebene hängt di-

rekt vom Verhältnis der lateralen zur vertikalen Abscheiderate ab. Durch die abschattende Wirkung der Stufe sowie die geringe Oberflächenbeweglichkeit der Teilchen bei der PECVD [84] wächst die Schicht nicht defektfrei zusammen. Daraus ergibt sich die Frage, ob dieser Effekt die mechanische Festigkeit der Dünnschichtkappe negativ beeinflusst.

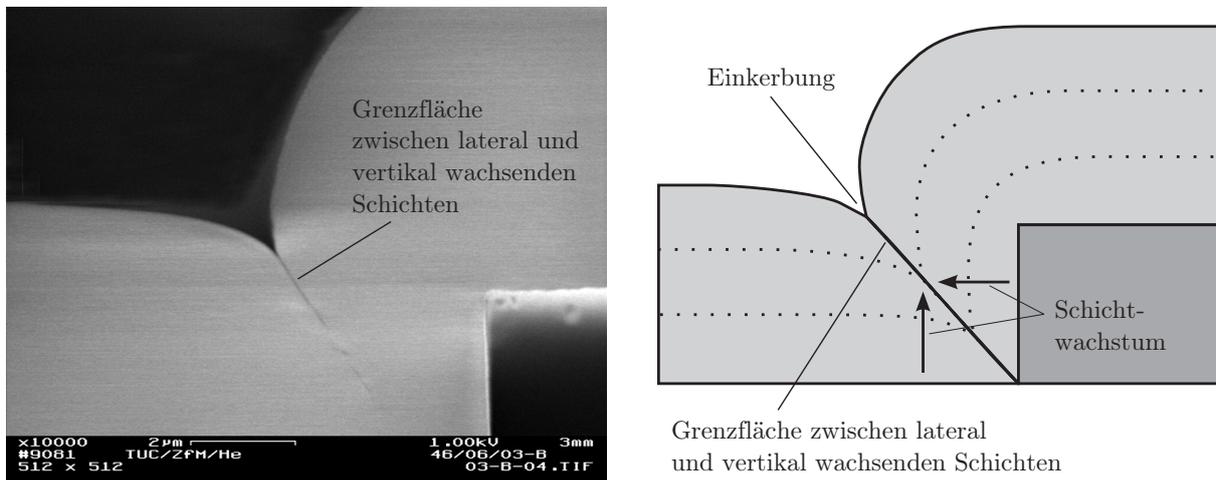


Abbildung 5.56: Einkerbung der PE-SiO Schicht durch die nichtkonforme Abscheidung an Stufen, links: REM-Aufnahme einer 6,5 µm dicken Dünnschichtkappe, rechts: Prinzipskizze

Um zu prüfen, ob die Dünnschichtkappe an dieser Grenzfläche eine verminderte Festigkeit besitzt, wurden Teststrukturen mit 8,5 µm PE-SiO untersucht. Die freitragende Fläche der Teststrukturen wurde zwischen $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ und $400 \times 1200 \mu\text{m}^2$ variiert (s. Anhang C). Nach dem Brechen der Proben mittels Ritzdiamanten konnten bei der anschließenden Inspektion im REM vereinzelt Risse festgestellt werden. Abbildung 5.57 zeigt den Querschnitt durch eine Teststruktur mit einem Riss an der Einspannung der Kappe. Wie in der Abbildung zu sehen ist, verläuft der Bruch nicht entlang der Grenzfläche zwischen lateraler und vertikal gewachsener Schicht. Stattdessen bildet sich der Riss an einem Spannungsmaximum aus.

In Abbildung 5.58 ist das Ergebnis einer Simulation der 1. Hauptspannung in einer $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe unter 100 kPa Flächenlast zu sehen. Das Modell wurde für eine 8,5 µm dicke SiO-Schicht mit einer Eigenspannung von 10 MPa erstellt. Wie zu erwarten treten an den beiden konkaven Kanten die Spannungsmaxima auf, die zum Bruch der Dünnschichtkappe führen können. Für die innere Kante ergibt sich in der Simulation die für einen Bruch unkritische Druckspannung. Durch die Belastung beim Brechen der Probe kann es jedoch zum Ausbeulen der Dünnschichtkappe kommen, wodurch sich an dieser Kante eine Zugspannung ergibt.

Da bei allen untersuchten Proben kein Defekt an der Verbindungsfläche der lateralen und vertikalen wachsenden Schichten beobachtet werden konnte, wird davon ausgegangen, dass

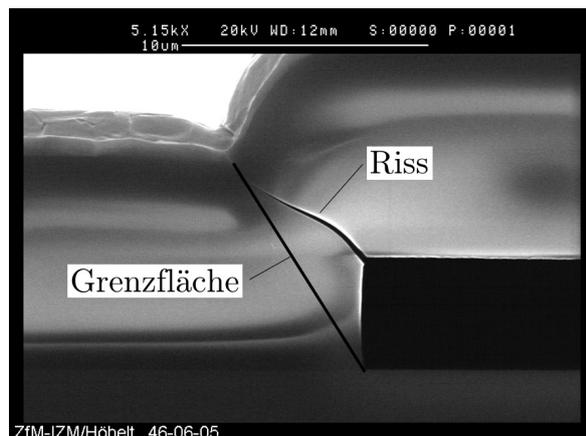


Abbildung 5.57: REM-Aufnahme einer gerissenen Teststruktur, der Riss verläuft zwischen den beiden Spannungmaxima quer durch die Schicht, statt entlang der markierten Grenzfläche

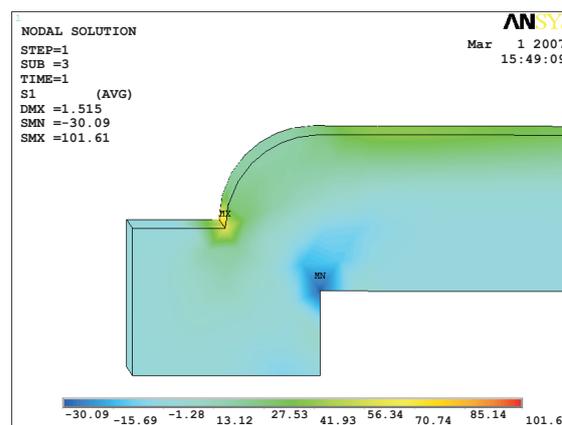


Abbildung 5.58: Simulation der 1. Hauptspannung in einer $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe aus $8,5 \mu\text{m}$ spannungsarmen (10 MPa) PE-SiO unter 100 kPa Flächenlast

die Kantenbedeckung des PECVD-Prozess ausreichend ist, um mechanisch belastbare Dünnschichtkappen abzuschneiden. Für die Dimensionierung der Dünnschichtkappe können demzufolge die Materialkonstanten der homogen gewachsenen Schicht verwendet werden.

5.5.2 Prüfung des dichten Verschlusses der Ätzöffnungen

Wie bereits mehrfach erwähnt ist ein hermetischer Verschluss der Dünnschichtkappe erforderlich, um die gehausten Mikrostrukturen vor Feuchtigkeit zu schützen, oder einen definierten Unterdruck in der Kavität einzuschließen. Eine Charakterisierung der Verschlusschichten hinsichtlich dieser Eigenschaft ist notwendig um die Eignung der verwendeten Materialien und Prozesse sicherzustellen.

Eine einfache Möglichkeit der Druckbestimmung besteht in der Messung der Durchbiegung einer Membran in Folge der Druckdifferenz zwischen einer von der Membran abgedeckten Kavität und der Umwelt. Die Verwölbung kann z. B. mittels Interferometrie bestimmt werden, so dass diese Methode relativ unkompliziert angewendet werden kann. Der Nachteil liegt in der Ungenauigkeit der Messung. Zum einen ist eine genaue Kenntnis der Membrangeometrie notwendig, um ausgehend von der Durchbiegung die Druckdifferenz berechnen zu können. Der Einfluss der Geometrie auf die Steifigkeit der Platte wurde in Abschnitt 4.2 diskutiert.

Zum anderen kann der Absolutdruck in der Kavität betragsmäßig sehr klein im Vergleich zur Druckdifferenz sein. In der vorliegenden Anwendung beträgt der Prozessdruck wäh-

rend der Verschlusschichtabscheidung des PE-SiO 410 Pa. In dieser Größenordnung liegt der Absolutdruck in der Kavität bei dichtem Verschluss, im Vergleich zu ca. 101 kPa Atmosphärendruck, der die Dünnschichtkappe umgibt. Eine Verdopplung des Druckes in der Kavität aufgrund von Gaspermeation durch die Dünnschichtkappe entspräche einer Änderung der Plattenbiegung um 0,5 %. Diese Änderung ist bei einer maximalen Durchbiegung der Dünnschichtkappe von $5\ \mu\text{m}$ mit dem verwendeten Messverfahren nicht aufzulösen. Außerdem können geringe Änderungen in der Durchbiegung der Platte auch auf eine Änderung der Eigenspannungen in den Schichten aufgrund von Relaxation zurückgeführt werden.

Aus diesen Gründen kann die Messung der Durchbiegung der Platte zur Bestimmung der Permeabilität der Schichten und damit der Qualität des Verschlusses nicht verwendet werden. Ein anderes Verfahren zur Bestimmung des Druckes nutzt den Einfluss der viskosen Dämpfung auf die Güte eines mechanischen Schwingers [145]. Der Druck in der Kavität kann dabei mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden. Für die Anwendung dieses Verfahrens wurden Mikrostrukturen hergestellt und mittels der Dünnschichtkappen verschlossen. In Kapitel 6 wird dieses Verfahren erläutert, die hergestellten Mikrostrukturen beschrieben und die Ergebnisse präsentiert. Für die Beurteilung der Verschlusschichten bezüglich des Verschlusses der Ätzöffnungen, wurde aufgrund der Einfachheit die Methode der Membranverwölbungsmessung verwendet.

Für die Messung der Durchbiegung stand ein Mirau-Interferometer (s. Abschnitt 5.1.2) zur Verfügung. Die Objekte wurden mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 515\ \text{nm}$ beleuchtet, wodurch der Höhenunterschied der betrachteten Oberfläche zwischen zwei Interferenzmaxima (helle Streifen) bzw. Interferenzminima (dunkle Streifen) $\lambda/2 = 257\ \text{nm}$ entspricht. Durch das Auszählen der Interferenzstreifen kann die Durchbiegung der Dünnschichtkappe ermittelt werden. Bei einer Bewegung des Objektes durch die Fokusebene verschieben sich die Streifen auf der Oberfläche, da der Abstand der Interferenzen zur Lichtquelle konstant bleibt. Bei der Bewegung des Objektes beispielsweise in Richtung des Objektives, verschieben sich die Interferenzstreifen auf dem Objekt nach unten. Dadurch ist es möglich, die Richtung der Plattenbiegung zu bestimmen.

Für die Untersuchung des dichten Verschlusses der Dünnschichtkappen wurden Strukturen mit einer quadratischen Plattenfläche von $400 \times 400\ \mu\text{m}^2$ gefertigt. Die Schichtdicke und die Zusammensetzung der Verschlusschicht wurden variiert. Die verwendeten Schichtkombinationen können der Tabelle 5.21 entnommen werden. Für jede Schichtdickenkombination wurden fünf Strukturen auf einem Wafer vermessen.

Abbildung 5.59 zeigt die Bilder von Dünnschichtkappen, die ausschließlich mit PE-SiO verschlossen wurden. Die Bilder 5.59a) und 5.59b) zeigen die identische Struktur nach ei-

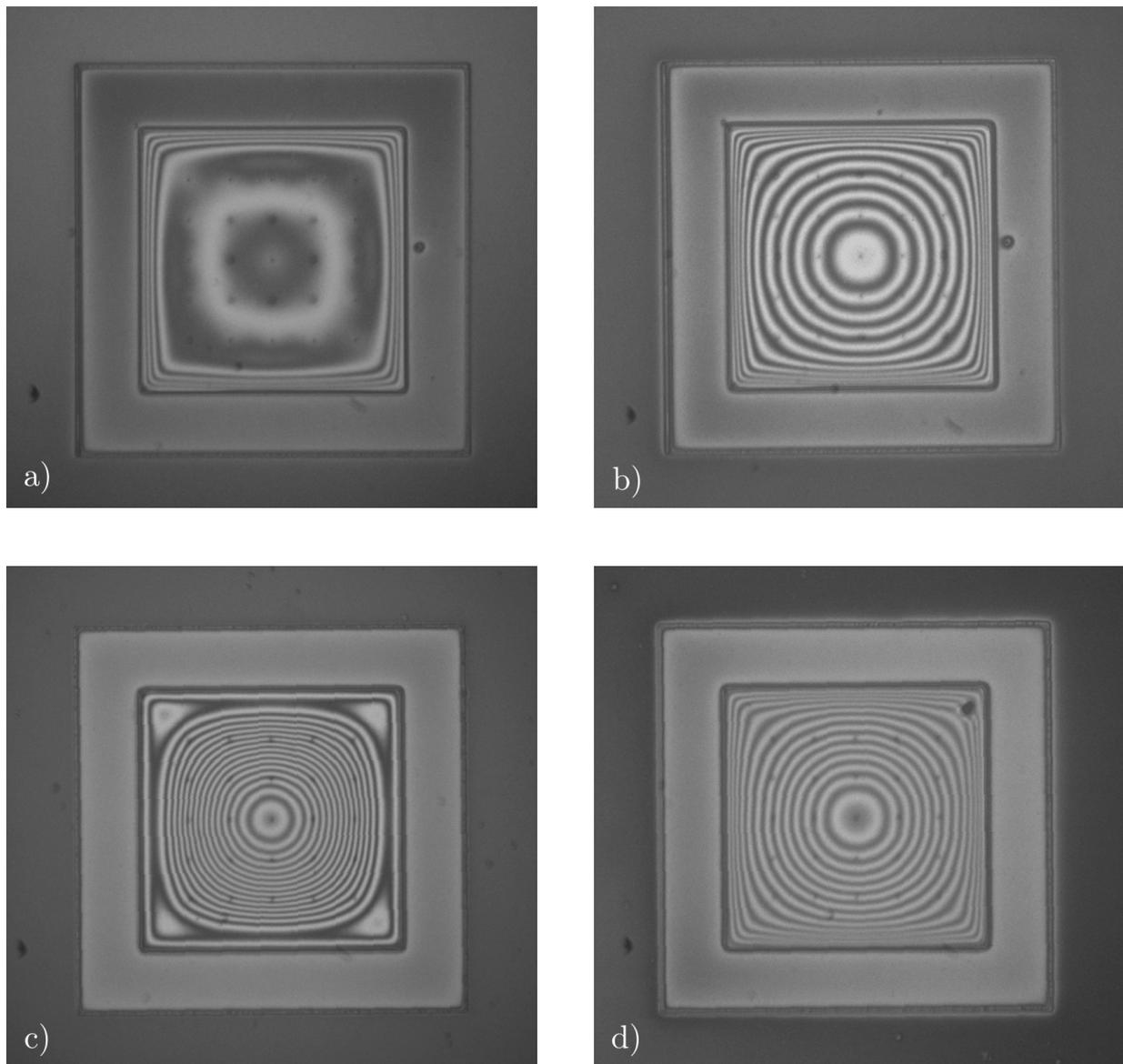


Abbildung 5.59: Interferometrische Aufnahmen der Durchbiegung von Dünnschichtkappen mit einer quadratischen Plattenfläche von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ nach der Abscheidung der Verschlusschicht; a) Abscheidung von $4,8 \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. 260 nm und korrespondiert mit dem numerisch ermittelten Wert für eine Schicht mit -20 MPa Eigenspannung ohne zusätzliche Last und ist demzufolge nicht verschlossen; b) Abscheidung von insgesamt $7,0 \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. $1,5 \mu\text{m}$ und korrespondiert mit dem numerisch ermittelten Wert für eine Schicht mit -20 MPa Eigenspannung und einer Drucklast von 100 kPa , die Dünnschichtkappe ist verschlossen c) Abscheidung von $4,8 \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. $4,1 \mu\text{m}$, die Kappe ist verschlossen; d) Abscheidung von $6,0 \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. $2,3 \mu\text{m}$, die Kappe ist verschlossen

ner Abscheidung von $4,8\ \mu\text{m}$ bzw. $7,0\ \mu\text{m}$ Siliziumoxid. Die Gesamtdicke der Dünnschichtkappe beträgt demnach $6,3\ \mu\text{m}$ bzw. $8,5\ \mu\text{m}$. Nach der ersten Abscheidung beträgt die Durchbiegung ca. $260\ \text{nm}$, da lediglich zwei Interferenzminima zu sehen sind. Die drei äußeren dünnen Interferenzstreifen stellen keine Verbiegung der Platte dar, sondern resultieren aus dem Profil der Dünnschichtkappe, das am Rand leicht abfällt. Die gemessene Durchbiegung stimmt gut mit dem numerisch berechneten Wert von $222\ \text{nm}$ für $-20\ \text{MPa}$ Eigenspannung überein. Die Dünnschichtkappe ist demzufolge nicht verschlossen und die Durchbiegung resultiert ausschließlich aus der Eigenspannung in der Siliziumoxidschicht.

Zum Vergleich ist in Abbildung 5.59c) eine Struktur mit identischer Schichtkombination und einer Durchbiegung von $4,0\ \mu\text{m}$ zu sehen. Die simulierte Durchbiegung für $-20\ \text{MPa}$ Eigenspannung und $100\ \text{kPa}$ Druckdifferenz beträgt $4,24\ \mu\text{m}$. Diese Dünnschichtkappe ist also im Vergleich zu der in Abbildung 5.59a) nach einer Abscheidung von $4,8\ \mu\text{m}$ PE-SiO verschlossen. Die Ursache dafür sind Inhomogenitäten in der Lackdicke bei der Strukturierung der Ätzzugangsöffnungen. Durch die unterschiedliche Lackdicke kommt es zur Überbelichtung von Öffnungen, wodurch diese vergrößert abgebildet werden. Der Verschluss dieser Öffnungen erfordert dann die Abscheidung einer dickeren Verschlusschicht.

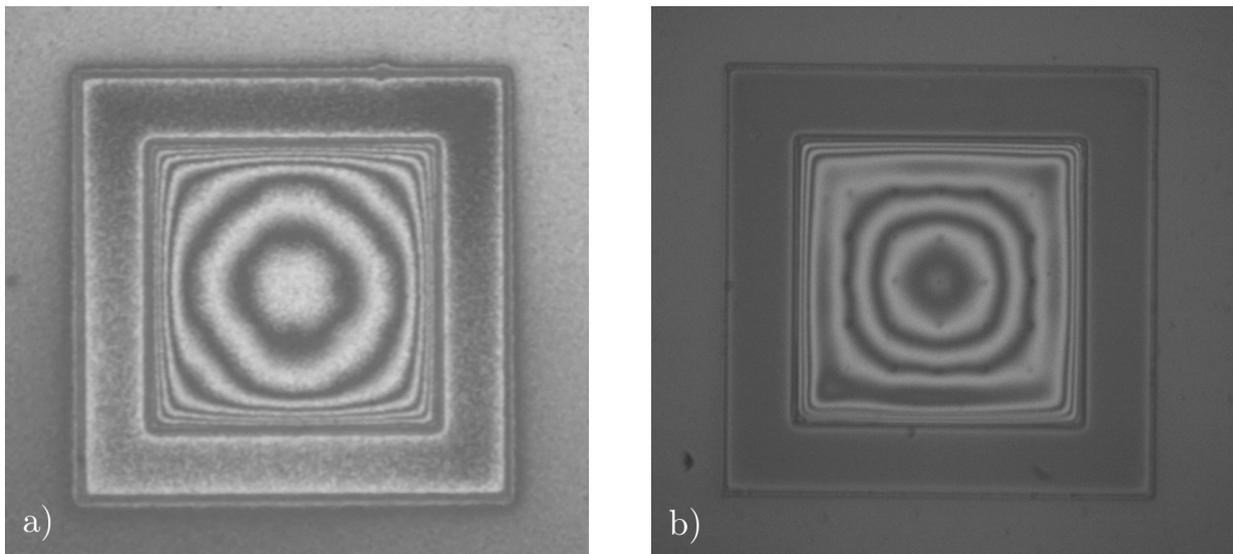


Abbildung 5.60: Interferometrische Aufnahmen der Durchbiegung von Dünnschichtkappen mit einer quadratischen Plattenfläche von $400 \times 400\ \mu\text{m}^2$ nach der Abscheidung von a) $7,0\ \mu\text{m}$ PE-SiO und $2\ \mu\text{m}$ Al, die Durchbiegung beträgt ca. $640\ \text{nm}$, bzw. b) $4,0\ \mu\text{m}$ PE-SiO und $2\ \mu\text{m}$ PE-SiN; die Durchbiegung beträgt ca. $900\ \text{nm}$

Abbildung 5.60a) zeigt die interferometrische Aufnahme einer Dünnschichtkappe mit einer kombinierten Verschlusschicht aus $7,0\ \mu\text{m}$ PE-SiO und $2,0\ \mu\text{m}$ Al. Auch in diesem Fall stimmt die gemessene Durchbiegung von ca. $770\ \text{nm}$ gut mit dem berechneten Wert von $694\ \text{nm}$ überein. Die Abbildung 5.60b) zeigt ebenfalls eine Dünnschichtkappe mit kombi-

nierter Verschlusschicht. In diesem Fall besteht sie aus $4,0\ \mu\text{m}$ PE-SiO und $2,0\ \mu\text{m}$ PE-SiN. Die 3,5 Interferenzstreifen entsprechen einer Durchbiegung von $900\ \text{nm}$ bei einem berechneten Wert von $1059\ \text{nm}$. In Tabelle 5.21 sind die gemessenen und berechneten Werte für alle untersuchten Schichtkombinationen zusammengefasst.

Tabelle 5.21: Übersicht über die Ergebnisse der interferometrisch gemessenen Schichtkombinationen

Probe	Membranschicht	Verschlusschicht			Plattendurchbiegung	
	in nm	in nm			in nm	
	PE-SiO	PE-SiO	PE-SiN	Al	FEM	Messung
46-06-03	1500	2800	-	-	7847	-
46-06-03	1500	4800	-	-	4240	4100 ± 128
46-06-04	1500	6000	-	-	2452	2310 ± 128
46-06-05	1500	7000	-	-	1554	1540 ± 128
46-06-05	1500	7000	-	2000	694	640 ± 128
37-23-05	1500	4000	2000	-	1059	900 ± 128
37-23-05	1500	4000	2000	2000	769	770 ± 128

5.5.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Der dichte Verschluss der Dünnschichtkappen durch die Abscheidung von Siliziumoxid mittels PECVD konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Bereits ab einer Schichtdicke von $2,8\ \mu\text{m}$ PE-SiO wurde der Prozessdruck während der PECVD in der Kavität eingeschlossen. Die Durchbiegung der Kappen infolge der Druckdifferenz zwischen Kavität und Umwelt wurde mit einem Mirau-Interferometer gemessen und mit theoretisch ermittelten Werten verglichen. Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen den gemessenen Durchbiegungen der Dünnschichtkappen und den Ergebnissen der Simulationen, kann ein dichter Verschluss der Strukturen angenommen werden.

Da PE-SiO eine schlechte Feuchtigkeitsbarriere ist, sollte eine zusätzliche Schicht verwendet werden. Aus diesem Grund wurde entweder eine Schicht Aluminium oder ein Schichtstapel aus Siliziumnitrid und Aluminium auf das Siliziumoxid aufgebracht. Das SiN wurde ebenfalls mit PECVD und das Al mittels Sputtern abgeschieden. Alle verwendeten Schichtsysteme führten zu dichten, mechanisch stabilen Verkappungen.

Die Dichtigkeit der Ätzöffnungen nach der Abscheidung der Verschlusschichten ist jedoch noch kein Nachweis der Hermetizität der Verkappung. Durch eine geringe Permeabilität der verwendeten Materialien kann es zu einem Eindringen von Gasen in die Kavität über einen längeren Zeitraum kommen. Der daraus resultierende Druckanstieg in der Kavität ist mit der in diesem Abschnitt verwendeten Methode (Messung der Kappendurchbiegung) nicht messbar. Für diesen Zweck wurden Gütemessungen an Resonatoren durchgeführt. Die dazu gemachten Untersuchungen werden im folgenden Kapitel behandelt.

Kapitel 6

Herstellung eines Beschleunigungssensors mit Dünnschichtkappe

Um die Anwendung der Dünnschichtverkappung auf reale Strukturen zu demonstrieren, wurde ein Beschleunigungssensor in AIM-Technologie hergestellt und mit der neu entwickelten Dünnschichttechnologie verschlossen. Neben dem Nachweis der erfolgreichen Integration der Verkappungsprozesse in die Gesamttechnologie soll ein System bereitgestellt werden, an dem weiterführende Untersuchungen bezüglich der Zuverlässigkeit und möglicher Rückwirkungen der Dünnschichtkappe auf die Mikrostruktur erfolgen können.

Die Charakterisierung des Systems im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich auf den Funktionsnachweis nach der Chipvereinzelnung und die Untersuchung der Dichtigkeit der Dünnschichtkappe. Anwendung findet dabei die 2f-Methode [146], mit der ein kapazitiv arbeitendes Schwingungssystem mit geringem messtechnischen Aufwand analysiert werden kann. Die Dichtigkeit der Kappe wird durch die Messung der Schwingungsdämpfung ermittelt. Diese hängt bei den hergestellten Strukturen wesentlich vom Druck in der verschlossenen Kavität ab und ist deshalb ein Maß dafür, wie weit sich der während des Verschlussprozesses eingeschlossene Druck dem Umgebungsdruck angenähert hat.

6.1 Entwurf des Beschleunigungssensors

Die hergestellten Sensoren basieren auf dem 2. Newtonschen Axiom, welches besagt, dass eine Kraft F gleich der Änderung des Impulses p nach der Zeit t ist [147]

$$F = \frac{dp}{dt}. \quad (6.1)$$

Da der Impuls dem Produkt aus der Masse m und der Geschwindigkeit v entspricht

$$p = mv, \quad (6.2)$$

ergibt sich für die meisten technischen Systeme mit konstanter Masse die Gleichung

$$F_a = m \frac{dv}{dt} = ma. \quad (6.3)$$

Folglich übt eine Masse unter Wirkung einer Beschleunigung a eine Kraft F_a aus. Wird die Masse an einer Feder mit der Federsteifigkeit c befestigt, bewirkt die beschleunigte Masse eine Auslenkung x der Feder, was eine Federkraft F_f zur Folge hat:

$$F_a = F_f = -cx. \quad (6.4)$$

Die Auslenkung des Feder-Masse-Systems ist demnach ein Maß für die wirkende Beschleunigung.

6.1.1 Das Feder - Masse - Dämpfer - System

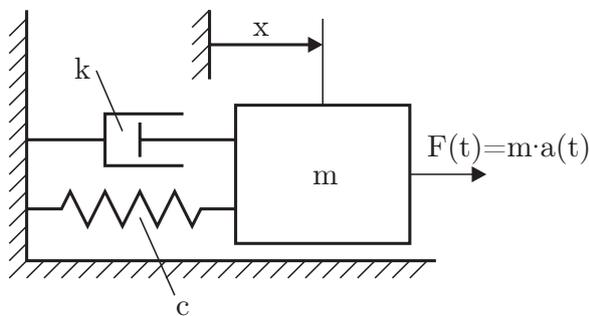


Abbildung 6.1: Prinzipskizze eines kraft-erregten Feder-Masse-Dämpfer-Systems

Unter Berücksichtigung der Dämpfung kann der beschriebene Beschleunigungssensor als ein kraft-erregtes Feder-Masse-Dämpfer-System betrachtet werden. Abbildung 6.1 zeigt eine Prinzipskizze des Systems 2. Ordnung. Das dynamische Verhalten eines solchen Systems wird durch die Bewegungsdifferentialgleichung beschrieben [147]:

$$ma + kv + cx = F(t). \quad (6.5)$$

Unter der Annahme, der gedämpfte Schwinger werde durch eine harmonisch veränderliche Kraft mit der Amplitude \hat{F} erregt

$$F(t) = \hat{F} \sin(\omega t) = c \hat{x}_0 \sin(\omega t) \quad (6.6)$$

und mit Einführung der Eigenkreisfrequenz

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (6.7)$$

sowie des Dämpfungsgrades

$$D = \frac{k}{2\sqrt{mc}} \quad (6.8)$$

kann die Gleichung auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$a + 2Dv\omega_0 + x\omega_0^2 = \omega_0^2 \hat{x}_0 \sin(\omega t). \quad (6.9)$$

Die Lösung der Differentialgleichung für das eingeschwungene System ergibt über den Ansatz [148]

$$\tilde{x} = V \hat{x}_0 \sin(\omega t + \beta) \quad (6.10)$$

als stationäre Lösung die komplexe Übertragungsfunktion

$$H = \frac{\tilde{x}}{\hat{x}_0} = \frac{1 - \eta^2 - j2D\eta}{(1 - \eta^2)^2 + (2D\eta)^2} \quad (6.11)$$

mit dem Abstimmungsverhältnis

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (6.12)$$

Dabei ist V die so genannte Vergrößerungsfunktion bzw. der Amplitudengang des Systems und entspricht dem Betrag der Übertragungsfunktion

$$V = |H| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2D\eta)^2}} \quad (6.13)$$

und β beschreibt den Phasenwinkel bzw. den Phasengang des Systems

$$\beta = -\arctan\left(\frac{2D\eta}{1 - \eta^2}\right) \quad (6.14)$$

mit der Bedingung $0 < \beta < 180^\circ$. Die Resonanzfrequenz, bei der die Vergrößerungsfunktion ihren Maximalwert erreicht, liegt für $D \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$ bei

$$\eta_{max} = \sqrt{1 - 2D^2} \quad \text{bzw.} \quad \omega_{res} = \omega_0 \sqrt{1 - 2D^2}. \quad (6.15)$$

Dieser Maximalwert der Vergrößerungsfunktion wird auch als Resonanzgüte Q bezeichnet und beträgt

$$V_{max} = Q = \frac{1}{2D\sqrt{1-2D^2}}. \quad (6.16)$$

In Abbildung 6.2 sind die Vergrößerungsfunktion und der Phasenwinkel in Abhängigkeit des Abstimmungsverhältnisses für unterschiedliche Dämpfungsgrade dargestellt. Mit steigender Dämpfung verflacht sowohl die Resonanzüberhöhung, als auch der Phasensprung von 0° auf -180° . Ab einer Dämpfung von $D = 0,707$ ist keine Resonanzüberhöhung mehr vorhanden. Das System ist überdämpft.

Der nutzbare Frequenzbereich in dem die Vergrößerungsfunktion den Betrag eins aufweist und damit der Zusammenhang zwischen Beschleunigung der Masse und Federauslenkung linear ist, liegt in Abhängigkeit der geforderten Genauigkeit und der Dämpfung bei $0 \leq \omega < 0,2 \dots 0,5 \omega_{res}$. Der größte nutzbare Frequenzbereich wird bei einer Dämpfung von $D = 0,707$ erreicht.

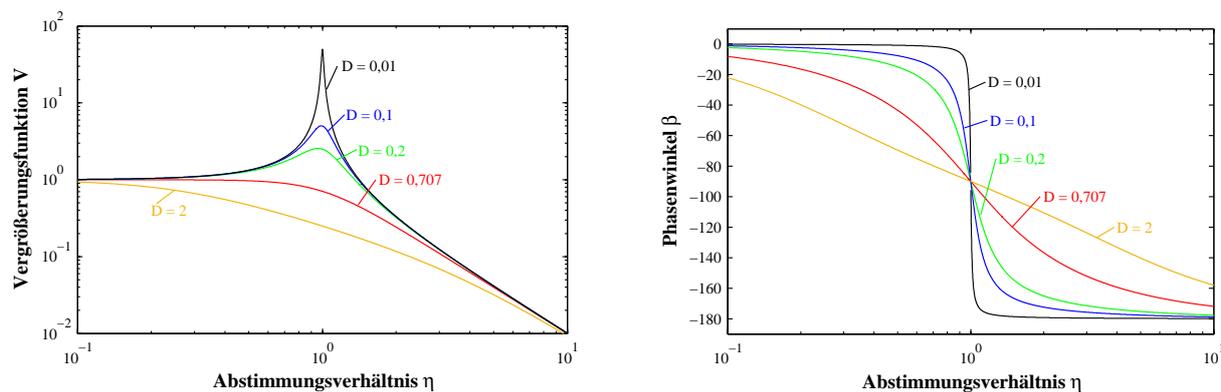


Abbildung 6.2: Vergrößerungsfunktion V und Phasenwinkel β als Funktion des Abstimmungsverhältnisses η für Dämpfungsgrade $0,01 \leq D \leq 2$

6.1.2 Kapazitive Signaldetektion

Die Wandlung der mechanischen Bewegung in ein elektrisches Signal erfolgt mittels des elektrostatischen Wirkprinzips. Dies ermöglicht neben der kapazitiven Signaldetektion auch die elektrostatische Aktuation des Massekörpers. In Abbildung 6.3 ist der kapazitive Wandler schematisch dargestellt. Am beweglichen Massekörper befinden sich Elektroden, die mit den festen Gegenelektroden vereinfacht als Plattenkondensator betrachtet werden können. Durch die Bewegung des Massekörpers ändert sich der Plattenabstand und damit die Kapazität C , die für ein Elektrodenpaar aus

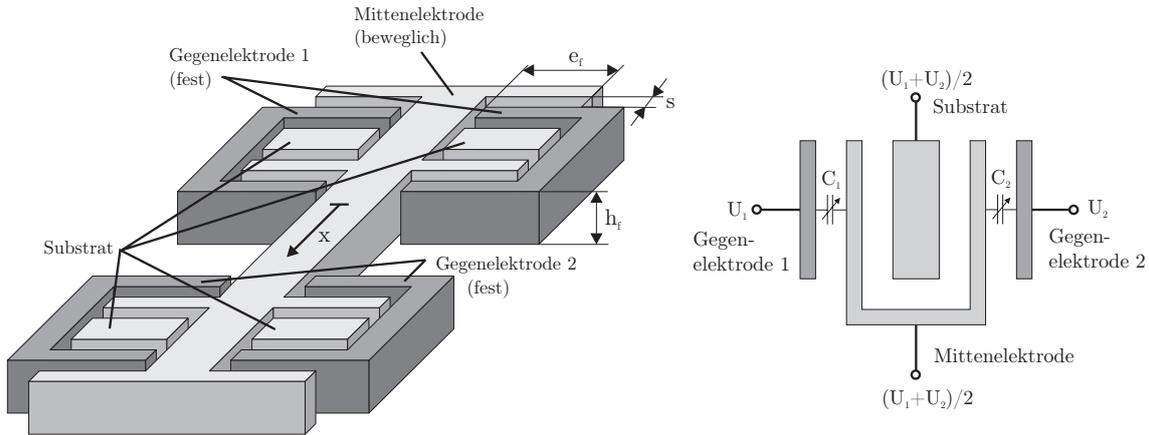


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung des kapazitiven Wandlers

$$C_{EP} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot e_f \cdot h_f}{s - x} \quad (6.17)$$

berechnet werden kann. Dabei ist ε_0 die Dielektrizitätskonstante, ε_r die relative Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums, e_f die Länge der Elektrodenüberlappung, h_f die Höhe der Elektroden und s der Elektrodenabstand. Zur Linearisierung dieser Funktion und zur Verringerung des Einflusses von Störgrößen können gegensinnig arbeitende Elektrodenpaare zu einem Differenzkondensator verschaltet werden. Außerdem werden bei oberflächennahen Mikrostrukturen eine Vielzahl von Elektrodenpaaren als so genannte Kammelektroden angeordnet, um eine ausreichend hohe Kapazitätsänderung zu gewährleisten [149]. Die Gesamtkapazität des Sensors beträgt dann für n Elektrodenpaare

$$C_{ges} = C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot n \cdot e_f \cdot h_f}{s - x} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot n \cdot e_f \cdot h_f}{s + x}. \quad (6.18)$$

Wie bereits erwähnt, kann der elektrostatische Wandler auch als Aktor betrieben werden. Eine zwischen zwei Elektroden angelegte Spannung U bewirkt eine Kraft F_{el} , die sich aus der Änderung der elektrostatischen Feldenergie im Kondensator bei der Verschiebung einer Elektrode um Δx ergibt [11]:

$$F_{el} = \frac{dW_{el}}{dx} = \frac{1}{2} \frac{dC(x)}{dx} U^2. \quad (6.19)$$

Durch Anlegen einer sinusförmigen Wechselspannung kann so die Mittenelektrode zum Schwingen angeregt werden. Die elektrostatische Aktuierung kann für den Selbsttest des Systems oder auch für die Charakterisierung des Sensors verwendet werden.

6.1.3 Luftdämpfung in lateral bewegten Mikrostrukturen

Die Dämpfung des Beschleunigungssensors wird überwiegend durch die Energiedissipation im umgebenden Medium bestimmt. Da die Strukturdämpfung in Mikrostrukturen aus einkristallinem Silizium sehr gering ist [18], wird diese bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt.

Aus dem Detektionsprinzip der gegeneinander bewegten Kondensatorplatten ergibt sich als vorrangiger Dämpfungsmechanismus die *Squeeze-Film*-Dämpfung. Durch die aufeinander zu bewegten Platten bildet sich eine ebene Strömung heraus, die durch die linearisierte Reynoldsche Schmierfilmgleichung beschrieben werden kann [150]. Voraussetzungen sind kleine Plattenauslenkungen, ein kleiner Spaltabstand im Verhältnis zur Plattengröße, laminares Strömungsverhalten und die relative Dichteänderung im Medium bleibt klein. Kriterium für laminares Strömungsverhalten ist eine kleine Reynolds-Zahl Re und für die relative Dichteänderung eine Mach-Zahl $Ma < 0,3$ [18]:

$$Re = \frac{s \cdot \rho \cdot v_{Fluid}}{\eta_v} \quad Ma = \frac{v_{Fluid}}{c_S}, \quad (6.20)$$

wobei ρ die Dichte des Fluids, v_{Fluid} die Fluidgeschwindigkeit, s der Plattenabstand, η_v die dynamische Viskosität und c_S die Schallgeschwindigkeit sind. Die Reynoldszahl ist bei der vorliegenden Geometrie unabhängig vom Arbeitsdruck kleiner als eins. Eine Mach-Zahl kleiner als 0,3 ist bei Luft bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 100 m/s ($c_{S, Luft} = 330$ m/s) gegeben. Für den Beschleunigungssensor sind also beide Kriterien erfüllt.

Um das Fluid als Kontinuum zu betrachten, muss außerdem die mittlere freie Weglänge λ viel kleiner als die Kanalbreite s sein. Kriterium ist dabei die Knudsen-Zahl Kn [150]:

$$Kn = \frac{\lambda}{s} < 0,01. \quad (6.21)$$

Für einen Plattenabstand s von 4,5 μm und den maximalen Arbeitsdruck von 100 kPa beträgt die Knudsen-Zahl 0,015. Für niedrigere Drücke erhöht sich die freie Weglänge und damit auch Kn . Um die Kontinuumsbetrachtung dennoch aufrecht zu erhalten, wurde von Veijola für den Gültigkeitsbereich $0 \leq Kn \leq 880$ die effektive Viskosität η_{eff} eingeführt [151]:

$$\eta_{eff} = \frac{\eta_v}{1 + 9,638 \left(\frac{p^0 \lambda_0}{p s} \right)^{1,159}}. \quad (6.22)$$

Für die Dämpfungskraft F_D ergibt sich damit nach [18]:

$$F_D = I_t \frac{3\eta_{eff}}{s^3} v_{Platte}. \quad (6.23)$$

Für einen rechteckigen Spalt zwischen zwei Kondensatorplatten (s. Abb. 6.3) kann mit der entsprechenden Torsionssteifigkeit I_t die Dämpfungskonstante k berechnet werden:

$$k = \frac{F_D}{v_{Platte}} = \left(1 - \frac{0,63h_f}{e_f} + \frac{0,052h_f^5}{e_f^5} \right) \frac{\eta_{eff} \cdot h_f^3 \cdot e_f}{s^3} \quad (h_f < e_f). \quad (6.24)$$

Die Dämpfung wird also von der Geometrie der Plattenanordnung und über η_{eff} auch vom Druck beeinflusst.

Mit steigender Frequenz der Plattenschwingung kann der Gasfilm aus dem Spalt nicht mehr entweichen und wird komprimiert. Neben der Dämpferkraft tritt dann eine zusätzliche Federkraft auf. Als Kriterium für die Berücksichtigung dieses Effektes wird die *Cut-Off*-Frequenz ω_c verwendet, bei der beide Kräfte betragsgleich werden. Für eine Rechteckplatte beträgt diese Frequenz [152]:

$$\omega_c = \frac{p \cdot \pi^2 \cdot s^2}{12\eta_{eff}} \left(\frac{1}{h_f^2} + \frac{1}{e_f^2} \right). \quad (6.25)$$

Im relevanten Druckbereich $10^{-3} \dots 10^5$ Pa liegt der niedrigste Wert für ω_c bei 1,13 MHz. Dieser Effekt muss damit für den entworfenen Beschleunigungssensor mit einer Eigenfrequenz von 2,16 kHz nicht berücksichtigt werden.

6.1.4 Design und Dimensionierung

Für den Entwurf der Sensorgeometrie wurden konzentrierte Parameter angenommen, d. h. die Nachgiebigkeit resultiert ausschließlich aus der Feder und die Masse ausschließlich aus dem Massekörper. Die Streufelder an den Elektrodenrändern wurden ebenfalls vernachlässigt.

Der Beschleunigungssensor wurde für einen Arbeitsbereich von 150 ms^{-2} und eine Bandbreite von 100 Hz dimensioniert. Die Aufhängung der seismischen Masse erfolgt über vier parallel geschaltete Mäanderfedern entsprechend Abbildung 6.4 mit einer Gesamtfedersteifigkeit von

$$c_{ges} = \frac{2E \cdot b_f^3 \cdot h_f}{l_f^3}. \quad (6.26)$$

Um die Beschleunigung in beiden lateralen Dimensionen zu messen, wurden zwei Strukturen in einem Winkel von 90° zueinander angeordnet. Die Parameter des Sensors sind in Abbildung 6.4 aufgelistet.

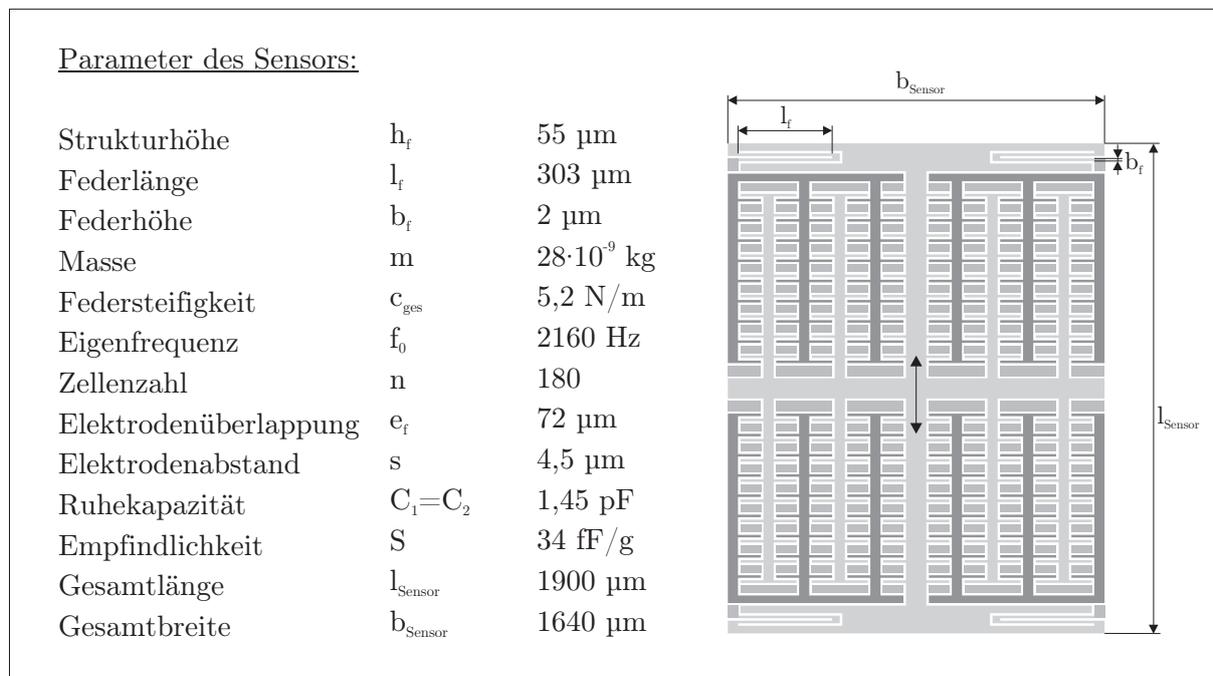


Abbildung 6.4: Parameter des entworfenen Sensors mit Prinzipskizze

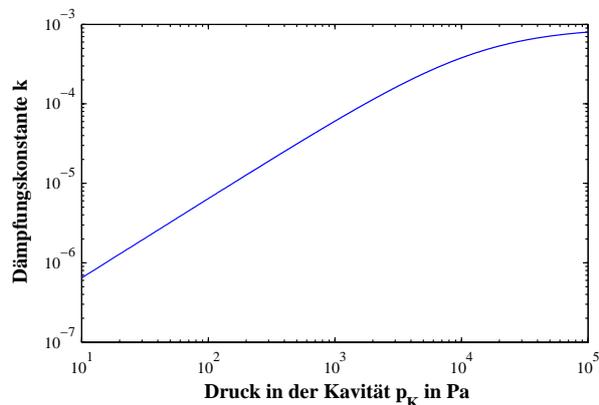


Abbildung 6.5: Dämpfungskonstante der Sensorstruktur in Abhängigkeit des Kavitätinnendruckes

Da die Dichtigkeit des Dünnschichtpackages mittels dieser Sensoren ermittelt werden soll, kann der Druck in der Kavität zwischen dem Prozessdruck während des Verschlusses und Atmosphärendruck variieren ($410 \text{ Pa} \leq p_K \leq 101 \text{ kPa}$). Die Dämpfungskonstante k ist deshalb in Abbildung 6.5 in Abhängigkeit des Druckes p_K für den entworfenen Sensor dargestellt.

6.2 Herstellung der verkapselten Mikrostruktur

Für die Herstellung des Beschleunigungssensors wurde die bereits in Kapitel 2.2.2 vorgestellte AIM-Technologie verwendet. Abbildung 6.6 zeigt die zwei Strukturen des zweiachsigen Beschleunigungssensors vor dem ersten Prozessschritt der Verkappungstechnologie. Die Mikrostrukturen sind in diesem Stadium voll funktionstüchtig.

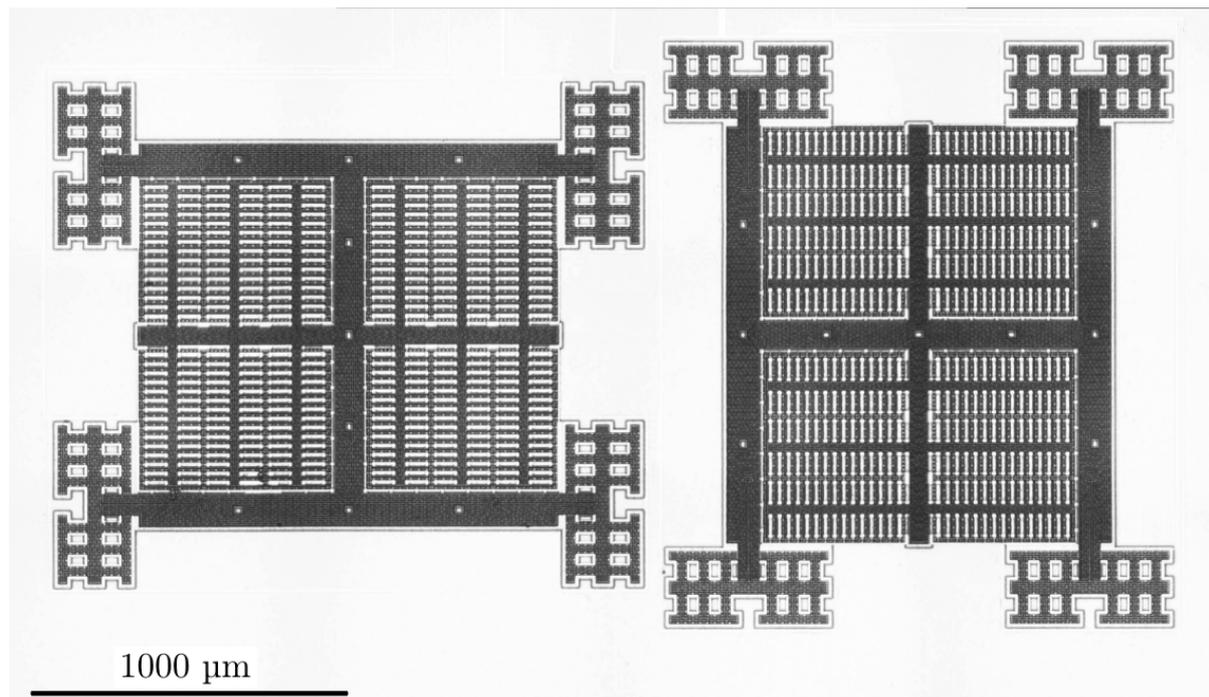


Abbildung 6.6: Lichtmikroskopische Aufnahme des zweidimensionalen Beschleunigungssensors in AIM-Technologie

Die Funktionselemente der realen AIM-Struktur sind in Abbildung 6.7 gekennzeichnet. Der Anker, der das Bindeglied zwischen Feder und Substrat darstellt, wird durch die für AIM typischen Träger am Substrat befestigt und gleichzeitig elektrisch kontaktiert [107]. Abbildung 6.8 zeigt den gleichen Ausschnitt nach der Opferschichtabscheidung. Da die maximale Grabenbreite innerhalb der gesamten Struktur $5\ \mu\text{m}$ beträgt, wurden entsprechend der ermittelten Abscheidecharakteristik $C_V = 1,2$ (Tab. 5.14, S. 131) $6\ \mu\text{m}$ CF-Polymer abgeschieden.

Für die Realisierung der Dünnschichtkappe wurden drei unterschiedliche Schichtstapel verwendet. Dabei wurde die Gesamtdicke von $9,5\ \mu\text{m}$ nicht verändert, sondern nur die Schichtdicken des PE-SiO und des PE-SiN variiert. Die Materialzusammensetzung der drei Varianten kann Tabelle 6.1 entnommen werden.

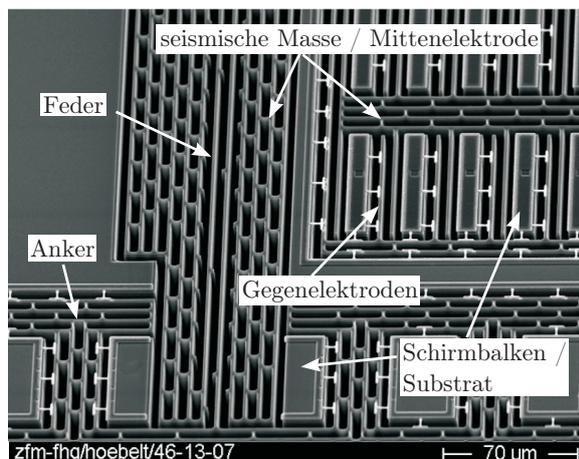


Abbildung 6.7: Detailansicht des AIM-Beschleunigungssensors vor der Opferschichtabscheidung

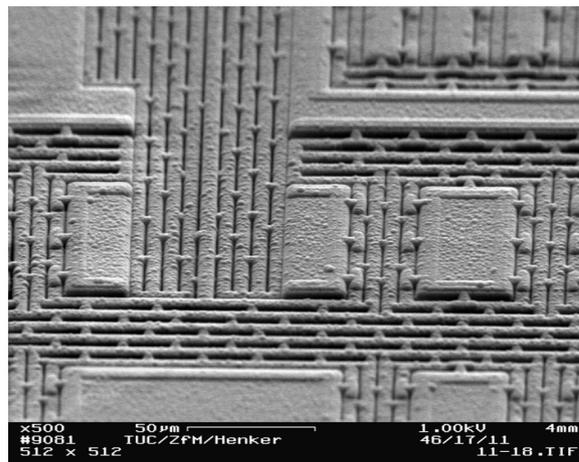


Abbildung 6.8: Detailansicht einer AIM-Struktur nach der Abscheidung von 6 µm CF-Polymer

Tabelle 6.1: Verwendete Schichtkombinationen

Bezeichnung	PE-SiO	PE-SiN	Al
	in µm	in µm	in µm
Schichtstapel S1	7,5	–	2,0
Schichtstapel S2	6,5	1,0	2,0
Schichtstapel S3	5,5	2,0	2,0

Aufgrund der zu verschließenden Sensorfläche von $1640 \times 1900 \mu\text{m}^2$ musste die freitragende Plattenfläche durch die Integration von Stützsäulen reduziert werden. Für die Dimensionierung der zulässigen Abstände zwischen den Säulen wurde eine Maximallast von 100 kPa veranschlagt. Unter Berücksichtigung der Entwurfsregeln der AIM-Technologie ergab sich ein maximaler Abstand zwischen den Säulen von 120 µm für die schmale Seite der freitragenden Fläche. Die Abbildungen 6.9 und 6.10 zeigen REM-Aufnahmen der hergestellten AIM-Beschleunigungssensoren mit integrierten Stützsäulen.

6.3 Experimentelle Charakterisierung

Neben dem Funktionsnachweis des Sensors, stand die Dichtheitsuntersuchung der Dünnschichtkappe im Vordergrund der experimentellen Untersuchungen. Die Bestimmung der Dichte durch Messung der Leckrate nach Methode 1014.9 des Teststandards MIL-STD-

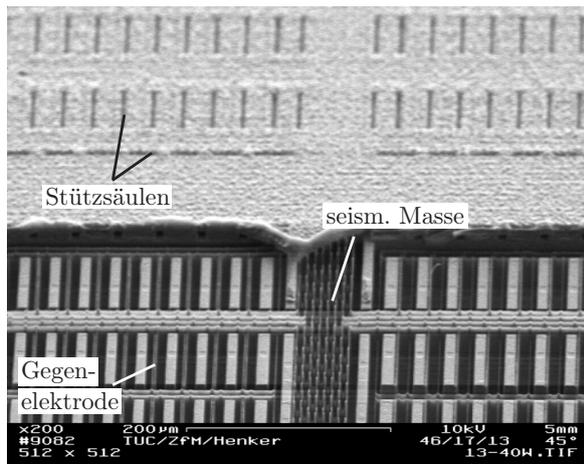


Abbildung 6.9: REM-Aufnahme eines verkapselten AIM-Beschleunigungssensors mit teilweise entfernter Kappe

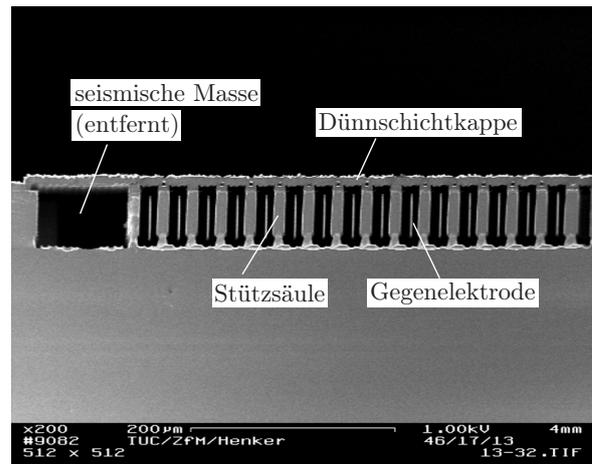


Abbildung 6.10: REM-Aufnahme eines verkapselten AIM-Beschleunigungssensors im Querschnitt

883D ist für typische Volumina der Mikrosystemtechnik ($< 1000 \text{ nl}$) sehr schwierig oder unmöglich [153]. Es besteht jedoch die Möglichkeit, den Druck in der Kavität über einen bestimmten Zeitraum zu messen, um darüber die Dichtigkeit zu bewerten. Dazu kann der Einfluss der druckabhängigen viskosen Dämpfung auf die Güte, bzw. auf die Übertragungsfunktion eines mechanischen Schwingers ausgenutzt werden [145, 154].

Die Dämpfungsmechanismen in der gefertigten Mikrostruktur wurden bereits in Abschnitt 6.1.3 behandelt und der Einfluss des Druckes auf die Dämpfungskonstante k in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Dämpfung kann anhand der Übertragungsfunktion der verkapselten Sensoren ermittelt werden. Um von der Dämpfung Rückschlüsse auf den Druck in der Kavität ziehen zu können, wurden als Referenz offene Sensoren in einer Vakuumkammer bei Drücken im Bereich von $2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$ bis 100 kPa gemessen. Im Folgenden werden der verwendete Messaufbau beschrieben und die gewonnenen Messergebnisse dargestellt und bewertet.

6.3.1 Messaufbau

Um die Übertragungsfunktion des Sensors aufzunehmen, ist es notwendig die Mikrostruktur über das notwendige Frequenzspektrum mit einer sinusförmigen Kraft zum Schwingen anzuregen, und dabei die Auslenkung der Mittenelektrode zu messen. Die Kraft kann dabei sowohl mechanisch als Stützerregung, als auch elektrostatisch als Krafterregung eingekoppelt werden [155]. Um die Referenzmessungen in einer Vakuumkammer durchführen zu können, wurde die elektrostatische Anregung gewählt.

Der verwendete Messaufbau ist in Abbildung 6.11 skizziert. Als Anregungssignal wird an der Festelektrode E1 eine Wechselspannung $u_w(t)$ der Frequenz f angelegt. Da elektrostatische Kräfte unabhängig von der Polarisation der verursachenden Spannung immer anziehend wirken (s. Gl. 6.19), führt dies zu einer Schwingung der Sensormasse auf der doppelten Frequenz $2f$. Durch Anlegen einer Polarisationsspannung U_{pol} zwischen Festelektrode E2 und Mittenelektrode M, fließt aufgrund der Änderung der Kapazität C_2 ein Umladestrom i_u mit der Frequenz $2f$:

$$i_u = U_{pol} \frac{dC_2}{dt}. \quad (6.27)$$

Dieser kann mittels eines *Lock-In*-Verstärkers (EG&G „7260“) frequenzselektiv gemessen werden. Die Nutzung der Frequenzverdopplung zur Trennung von Anregungs- und Detektionsfrequenz wird als 2f-Methode bezeichnet [146, 155]. Grundlegende Untersuchungen zur Anwendbarkeit dieses Verfahrens auf AIM-Strukturen wurden von Ziegler in einer Studienarbeit an der TU Chemnitz durchgeführt [156].

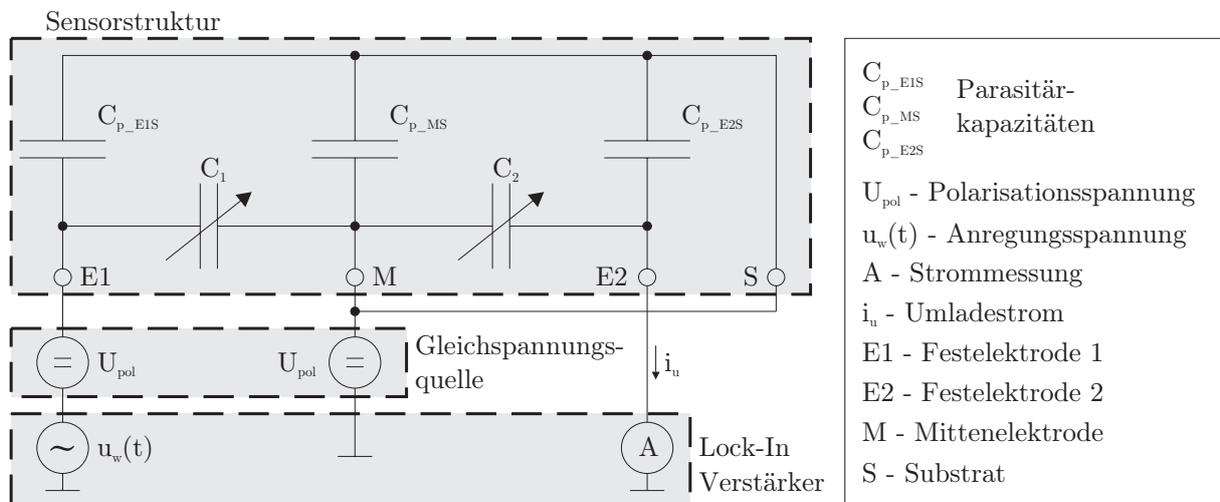


Abbildung 6.11: Messaufbau zur Aufnahme der Sensor-Übertragungsfunktion mittels 2f-Methode

Die Referenzmessungen an offenen Sensorstrukturen wurden in einer Vakuumkammer durchgeführt, die in einem Druckbereich von $2 \cdot 10^{-3}$ Pa bis $1 \cdot 10^5$ Pa betrieben werden kann. Die Kammer besitzt elektrische Durchführungen, um eine Testplatine mit dem Sensorchip anzuschließen. Die Messungen an den verkappten Sensoren können ebenfalls auf Testplatinen oder auch auf einem Waferprober durchgeführt werden. Dies ermöglicht die Messungen an vereinzelt Chips und im Waferverbund.

6.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Referenzmessungen an einer offenen Sensorstruktur sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Die ermittelte Eigenfrequenz des Systems liegt mit 1908 Hz 12 % unterhalb des Entwurfswertes. Der Grund dafür sind Prozesstoleranzen bei der isotropen Unterätzung der AIM-Träger [157]. Für die Dichtheitsuntersuchungen ist diese Abweichung jedoch nicht von Bedeutung.

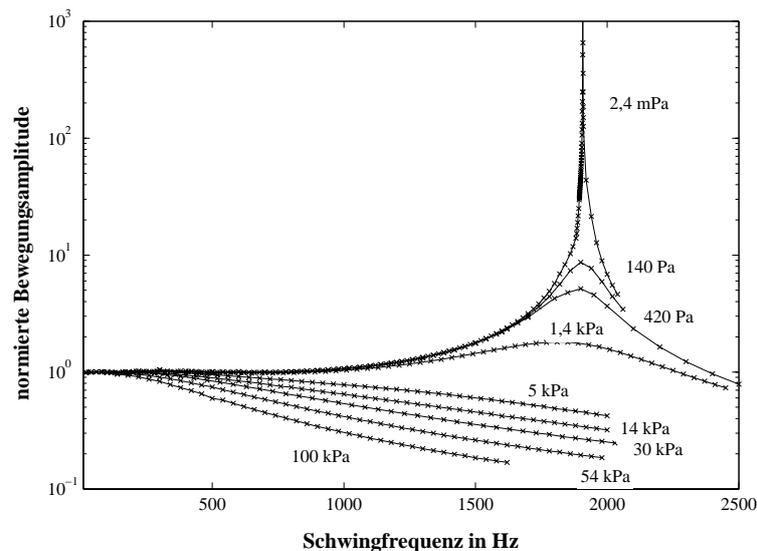


Abbildung 6.12: Ergebnisse der Referenzmessungen an einer offenen Sensorstruktur in der Vakuumkammer

Anhand der aufgenommenen Übertragungsfunktionen kann die Abhängigkeit des Dämpfungsgrades D vom Sensorinnendruck bestimmt werden. Üblich ist die Angabe der Güte Q [154, 3]. Da die verwendeten Systeme im relevanten Druckbereich aber keine Resonanzüberhöhung und damit auch keine Güte besitzen, wird D als Vergleichsgröße verwendet. Für überdämpfte Systeme ohne Resonanzüberhöhung ($D > 0,7$) ist die Knickfrequenz f_G , bei der die Schwingamplitude um 3 dB abgefallen ist, eine charakteristische Größe (s. Abb. 6.13a). Mittels Gleichung 6.13 kann dann der Dämpfungsgrad berechnet werden.

Für schwingfähige Systeme mit $D \ll 0,7$ kann der Dämpfungsgrad über die Güte Q mittels Gleichung 6.16 ermittelt werden. Für die Güte gilt

$$Q = \frac{f_0}{B}. \quad (6.28)$$

Dabei ist die Bandbreite B des Systems die Differenz aus oberer und unterer Grenzfrequenz f_{G2} bzw. f_{G1}

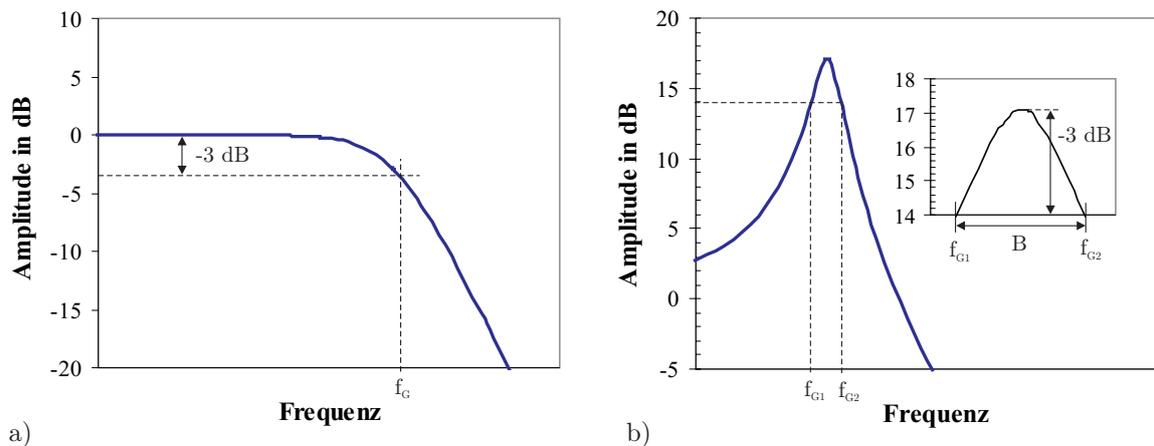


Abbildung 6.13: Bestimmung der Dämpfung aus der Übertragungsfunktion eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems a) über die Knickfrequenz bei einem Dämpfungsgrad $D > 0,7$ b) Bestimmung der Güte über die Bandbreite der Resonanzüberhöhung bei einem Dämpfungsgrad $D \ll 0,7$

$$B = f_{G2} - f_{G1}, \quad (6.29)$$

bei denen die Amplitude um 3 dB des Maximalwertes abgefallen ist (s. Abb. 6.13b). Die auf diese Weise ermittelten Werte für den Dämpfungsgrad der Sensorstruktur sind in Abbildung 6.14 über den Druckbereich von 2 mPa bis 100 kPa aufgetragen. Die Charakteristik der berechneten Dämpfungskonstante k (Abb. 6.5) ist deutlich zu erkennen.

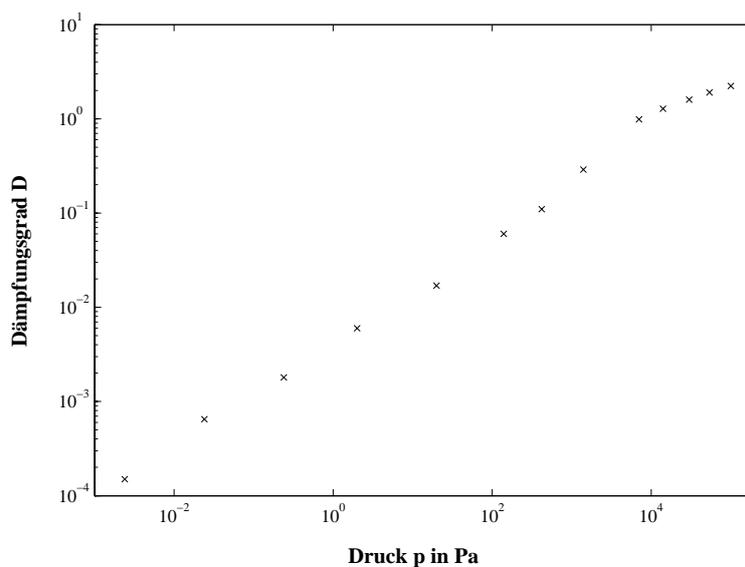


Abbildung 6.14: In Abhängigkeit des Druckes ermittelter Dämpfungsgrad der Sensorstruktur

Die Messungen an den verkapselten Sensorstrukturen erfolgten 20, 40 und 60 Tage nach dem Verschlussprozess. Unmittelbar nach der Schichtabscheidung können keine Messungen durchgeführt werden, da zuvor die Aluminiumkontakte freigelegt werden müssen und dazu eine Lithografie und zwei Strukturierungsprozesse notwendig sind. Die Messungen ergaben, dass alle durchprozessierten Wafer funktionstüchtige Strukturen enthielten. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass die Dünnschichtkappen der Vereinzelung der Chips durch Trennschleifen und der damit verbundenen Bespülung mit Kühlwasser standhalten. Abbildung 6.15 zeigt die Übertragungsfunktion einer Sensorstruktur nach der Vereinzelung, sowie die einer benachbarten Struktur nach dem Öffnen der Kappe. Der Sensor ist offensichtlich unbeschädigt und die Dämpfung entspricht 40 Tage nach dem Verschluss der Kappe einem Druck von ca. 30 kPa.

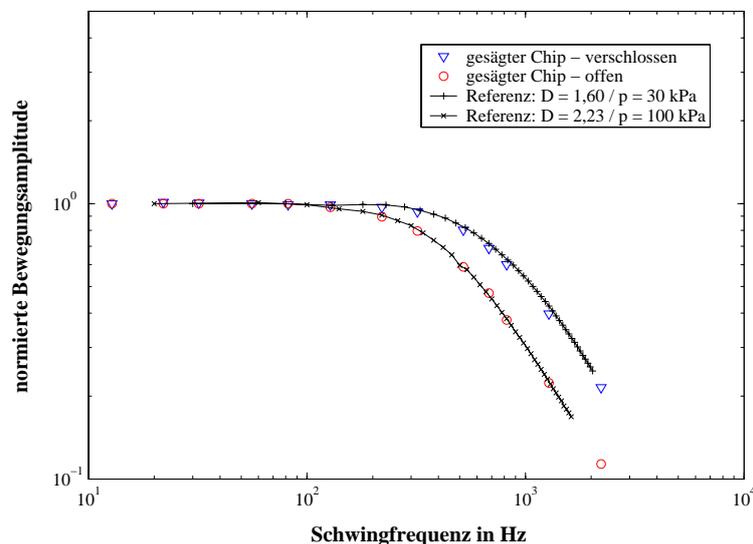


Abbildung 6.15: Übertragungsfunktion eines Sensors nach der Vereinzelung durch Trennschleifen, eines geöffneten Sensors, sowie des Referenzsensors

Die Dichtheit aller drei getesteten Schichtstapelvarianten (Tab. 6.1) konnte mit dem verwendeten Messverfahren nachgewiesen werden. Abbildung 6.16 stellt die nach 40 Tagen gemessenen Dämpfungsgrade in Relation zur Referenzkurve dar. Strukturen mit undichter Dünnschichtkappe (Mikroriss, Lithografiefehler) zeigen einen Dämpfungsgrad entsprechend des Referenzsensors bei Luftdruck (100 kPa). Es konnten aber auf jedem Wafer, d.h. für jede der drei Schichtkombinationen, Strukturen ermittelt werden, die eine deutlich niedrigere Dämpfung zeigten. Der Dämpfungsgrad lag für diese Strukturen im Bereich 1,5...1,8. Vergleicht man diese Werte mit den Messdaten der Referenzstruktur, entspricht das Drücken zwischen 23 kPa und 50 kPa.

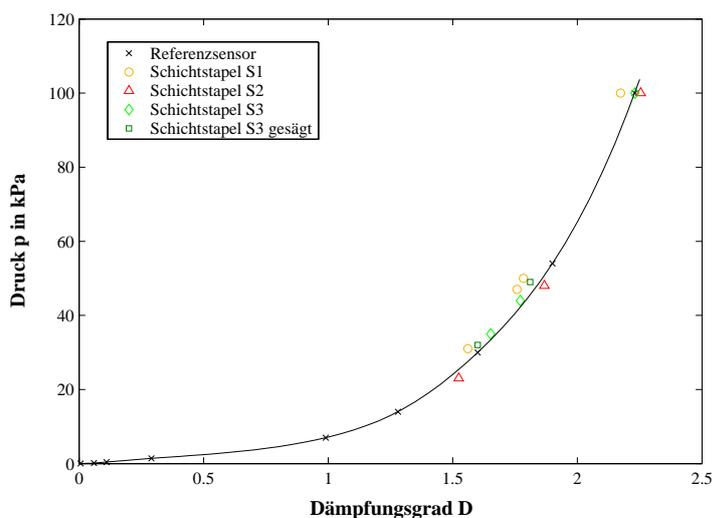


Abbildung 6.16: Darstellung des ermittelten Dämpfungsgrades von Sensorstrukturen aller drei Schichtstapelvarianten; durch die Relation von D einer offenen Struktur einer Schichtstapelvariante zum D der Referenzstruktur bei Luftdruck ergibt sich die Zuordnung der Dämpfungsgrade zu dem in der Kavität herrschenden Druck

Ein Vergleich der Messungen nach 20, 40 und 60 Tagen ergab keine signifikante Änderung der Dämpfung. Eine Leckrate konnte deshalb nicht ermittelt werden. Der Unterschied zwischen dem Druck in der Kavität $p_K \approx 16$ kPa und dem Druck während des Verschlussprozesses $p_V = 410$ Pa ist auf das Ausgasen der Sensorstrukturen und der Kappenmaterialien nach dem Verschluss der Kavität zurückzuführen [3, S. 70 ff.]. Das Ausgasen wird durch die Prozesstemperaturen während der PECVD, des Sputterns und der trockenchemischen Strukturierung des Schichtstapels zur Freilegung der Kontakte begünstigt.

6.4 Ausblick auf weitere Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen dienen in erster Linie dem Nachweis der erfolgreichen Technologieintegration. Dabei sollte die primäre Funktion der Dünnschichtkappe, nämlich der Schutz der Mikrostrukturen während der Einzelung und im Betrieb des Mikrosystems, erfüllt werden. Dieser Nachweis erfolgte durch die Messungen der Übertragungsfunktion und die dadurch nachgewiesene Dichtheit der Dünnschichtkappe. Ein ausreichender Schutz gegenüber Feuchtigkeit ist damit gegeben. Um einen für die Funktion des Mikrosystems notwendigen definierten Druck in der Kavität der Dünnschichtkappe zuverlässig einzuschließen, ist es erforderlich die Leckrate zu bestimmen. Dazu sind jedoch Messungen über einen längeren Zeitraum von mehreren Monaten notwendig.

Für die Umsetzung der Technologie auf die Produktion von Mikromechanischen Systemen ist es außerdem wichtig die Zuverlässigkeit der Dünnschichtkappe gegenüber mechanischen und thermischen Lasten zu prüfen. Dazu sollte die Robustheit der Verkappung gegenüber Vibrationen, mechanischem Schock sowie Temperaturlastwechseln ermittelt werden. Für diese Zuverlässigkeitsprüfungen existieren normierte Verfahren (Mil-Std-883 1010–Temperaturlastwechsel, 1011–Temperaturschock, 2002–mechanischer Schock, 2005 and 2007–Vibrationen). Vergleichbare AIM-Strukturen konnten bereits erfolgreich getestet werden [107].

Neben der Zuverlässigkeit ist es auch notwendig, Rückwirkungen der Dünnschichtkappe auf die verkapselten Mikrostrukturen zu analysieren. Das thermomechanische Verhalten ist dabei besonders von Interesse, da die aus dem Mehrschichtaufbau resultierenden thermischen Spannungen (s. Abschn. 5.2.1) das Verhalten der Mikrostruktur beeinflussen.

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Integration der Verkappungstechnologie in den Herstellungsprozess von AIMs konnte durch die Fertigung von kapazitiven Beschleunigungssensoren erfolgreich demonstriert werden. Die verkapselten Mikrostrukturen waren sowohl mechanisch als auch elektrisch voll funktionstüchtig.

Das verwendete Messverfahren unter Ausnutzung elektrostatischer Kräfte zur mechanischen Anregung der Strukturen bei gleichzeitiger Messung der Umladeströme auf der doppelten Frequenz ist gut geeignet für die Charakterisierung der hergestellten Sensoren. Mit dieser so genannten 2f-Methode konnten die Amplitudengänge gemessen, und so die zwischen den Elektroden der schwingenden Struktur wirkende *Squeeze-Film*-Dämpfung ermittelt werden. Aufgrund der Druckabhängigkeit dieses Dämpfungsmechanismus wurde der Druck im Inneren der Kavität bestimmt. Dazu wurden Referenzmessungen an einer offenen Struktur in einer Vakuumkammer durchgeführt.

Die Messungen ergaben für alle getesteten Dünnschichtkappen Kavitätinnendrucke im Bereich zwischen 23 kPa und 50 kPa. In dem Zeitraum zwischen dem 20. und dem 60. Tag nach dem Verschluss der Dünnschichtkappe wurde keine Änderung des Druckes beobachtet. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass diese Schichtkombinationen eine ausreichende Dichtheit zum Schutz vor Feuchtigkeit oder anderen Medien bietet. Ob die Vakuumdichtheit für spezielle Anwendungen, wie z. B. Resonatoren oder Drehratesensoren, ausreichend ist, muss durch Langzeitmessungen des Kavitätinnendruckes untersucht werden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Die industrielle Massenfertigung von kostengünstigen Mikrosystemen erfordert die Verwendung von effektiven Packagingverfahren. Aufgrund der besonderen Anforderungen an das MEMS-Packaging ist die Anwendung hoch entwickelter und standardisierter Prozesse aus der Mikroelektronik oftmals nicht möglich, weshalb in der Vergangenheit vor allem produktspezifische, aufwendige Lösungen auf Chipebene dominierten. Um die daraus resultierenden hohen Kosten für das Packaging zu reduzieren, hat die Entwicklung und Optimierung von Verfahren auf Waferebene zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Zurzeit existieren zwei Technologieansätze für das *Wafer-Level-Packaging* von oberflächennahen Mikrostrukturen. Das ursprünglich für die Volumenmikromechanik entwickelte Bonden von Silizium- oder Glaswafern ist für die Verkappung von Mikrostrukturen gut etabliert, benötigt aber ein zweites Substrat sowie zusätzliche Chipfläche, erhöht deutlich die Chiphöhe und stellt zum Teil hohe Anforderungen an die Beschaffenheit der Waferoberfläche. Die zweite Methode nutzt herkömmliche Schichtabscheidungs- und Strukturierungsprozesse zur Erzeugung einer Dünnschichtkappe. Wesentlich ist dabei die Verwendung einer Opferschicht, welche die Mikrostrukturen während der nachfolgenden Prozesse schützt. Die Verwendung von Siliziumdioxid konnte für opferschichtbasierte Mikrotechnologien bereits erfolgreich demonstriert werden. Für opferschichtfreie Technologien weist jedoch die Verwendung eines organischen Materials erhebliche Vorteile auf, da es trockenchemisch mittels Sauerstoffplasma entfernt werden kann. Dies ist technologisch einfacher und erhöht die Prozesskompatibilität im Vergleich zu einer Ätzung mit Flußsäure.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Dünnschichtverkappung von oberflächennahen Mikrostrukturen entwickelt, das auf der Verwendung eines CF-Polymers als organischer Opferschicht basiert. Die Abscheidung des Polymers erfolgt mittels PECVD in einer kommerziell erhältlichen Prozesskammer. Die Gräben der Mikrostruktur werden dabei nicht verfüllt, sondern nur an der Oberfläche verschlossen. Diese Technologie ist

deshalb unabhängig vom Aspektverhältnis der Strukturen anwendbar. Die Entfernung des CF-Polymers durch einen reinen Plasma-Sauerstoffprozess gewährleistet zudem die Prozesskompatibilität gegenüber einer Vielzahl von Mikrostrukturen.

Zwei unterschiedliche Varianten zur Herstellung der Dünnschichtkappe wurden untersucht und hinsichtlich der technologischen Realisierbarkeit sowie der anwendungsbezogenen Anforderungen bewertet. Eine durchgängig trockenchemisch prozessierte Variante stützt sich für alle drei Funktionsschichten im Wesentlichen auf die Abscheidung mittels PECVD. Die Kappe besteht in diesem Fall aus dielektrischen Materialien und einer gesputterten Aluminiumschicht. Alternativ dazu wird bei der zweiten Technologievariante die Membranschicht mittels elektrochemischer Abscheidung von Nickel erzeugt. In Grundlagenuntersuchungen wurden die verwendeten Schichten bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften, des E-Moduls und der Haftung auf dem Untergrund untersucht. Dabei haben sich die Schichtstapel der Variante A aufgrund des besser geeigneten thermomechanischen Verhaltens gegenüber der Verwendung von Nickel als vorteilhaft erwiesen. Obwohl die prozesstechnische Realisierbarkeit der Nickelkappe nachgewiesen werden konnte, lag der Schwerpunkt der weiteren Entwicklung auf Technologievariante A.

Für die Dimensionierung der Dünnschichtkappe hinsichtlich ihrer mechanischen Festigkeit wurden die aus einer äußeren Drucklast resultierende maximale Durchbiegung und die dabei auftretenden mechanischen Spannungen als Entwurfskriterien festgelegt. Die Kappenstruktur wurde dafür als dünne Platte modelliert. Für die Ermittlung der maximalen Durchbiegung konnte eine auf vereinfachenden Annahmen beruhende analytische Näherungslösung hergeleitet werden, die auf Basis numerischer Rechnungen (FEM) an die reale Geometrie der Dünnschichtkappe angepasst wurde. Die in den Schichten auftretenden mechanischen Spannungen wurden durch FEM-Simulationen ermittelt. Dabei lag das Augenmerk, aufgrund der mangelnden Kenntnis der Bruchfestigkeit der Schichten, weniger auf den quantitativen Werten als vielmehr auf der qualitativen Verteilung der Spannung, um Schwachstellen zu identifizieren.

Die Evaluation der Modelle erfolgte durch Verwölbungsmessungen an gefertigten Teststrukturen mittels eines Mirau-Interferometers. Diese ergaben eine gute Übereinstimmung sowohl mit den analytisch als auch mit den numerisch ermittelten Werten. Für die Dimensionierung der Dünnschichtkappe konnte anhand der erstellten Modelle abgeleitet werden, dass die Reduzierung der freitragenden Fläche durch die Integration von Stützsäulen deutlich effektiver als die Erhöhung der Schichtdicke ist. Bei einer Begrenzung der freitragenden Fläche auf beispielsweise $400 \times 400 \mu\text{m}$ ist eine Gesamtdicke der Kappenstruktur von $10 \mu\text{m}$ ausreichend, um der mechanischen Last bei einer Druckdifferenz von 100 kPa Atmosphärendruck standzuhalten.

Dennoch sind die verwendeten Schichtdicken im Vergleich zu herkömmlichen Technologien sehr groß, was die Modifikation einiger Prozesse erforderte. Die Abscheidung des CF-Polymers konnte mit einem zur Verfügung stehenden PECVD-Prozess realisiert werden. Für die anisotrope Strukturierung von 4-6 μm dicken Polymerschichten musste jedoch ein sauerstoffbasierter Ätzprozess mit hoher Ätzrate und guter Homogenität über den Wafer gefunden werden. Der in dieser Arbeit dafür entwickelte und charakterisierte ICP-Prozess erzielt eine Ätzrate von 14 nm/s bei einer Selektivität zur Oxidmaske von 24:1 und einer Homogenität von 0,9 auf einem 6-Zoll-Wafer.

Die rückstandsfreie Entfernung der Polymerschicht durch einen isotropen Sauerstoffprozess im Mikrowellenplasma konnte durch EDX-Messungen nachgewiesen werden. Untersucht wurde außerdem der Einfluss von geometrischen Parametern auf die Ätzrate. Dabei wurde festgestellt, dass das Aspektverhältnis der Ätzzugangsöffnungen bis zu einem Wert von mindestens 2:1 nahezu keinen Einfluss besitzt. Eine hohe Polymerdicke und eine niedrige Dicke der Membranschicht wirken sich dagegen positiv auf die Ätzrate aus.

Auf Grundlage der entwickelten Prozesse und Modellberechnungen, konnte die Verkappungstechnologie erfolgreich auf die Herstellung von kapazitiven AIM-Beschleunigungssensoren angewendet werden. Die verkapselten Mikrostrukturen dienen sowohl dem Nachweis der Integrationsfähigkeit der Verkappungstechnologie, als auch der Dichtheitsprüfung der Dünnschichtkappen. Für die Dichtheitsprüfung wurde der Innendruck in der Kavität durch den Zusammenhang zwischen Druck und viskoser Dämpfung bei gegeneinander bewegten Platten bestimmt. Die Ermittlung dieser so genannten *Squeeze Film* Dämpfung erfolgte durch die Messung der Sensor-Übertragungsfunktion mittels 2f-Methode. Dazu wurden die Sensorstrukturen sinusförmig zum Schwingen angeregt und dabei gleichzeitig die Umladeströme auf der doppelten Anregungsfrequenz mit einem *Lock-In*-Verstärker detektiert. Die Messungen ergaben Innendrucke in den Kavitäten im Bereich zwischen 23 kPa und 50 kPa. In einem Zeitraum von 40 Tagen konnte keine zeitliche Drift dieser Werte beobachtet werden, was auf eine ausreichende Dichtheit zum Schutz vor Feuchtigkeit und anderen Medien schließen lässt.

Im Rahmen der Arbeit wurden keine Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Dies ist aber notwendig für die Verwendung der Verkappungstechnologie als *Wafer-Level-Packaging* für Mikrosysteme. Insbesondere der Einfluss von Temperatur, Vibrationen und Schock sowie das Langzeitverhalten bezüglich Dichtheit sind von Interesse. Mit den gefertigten Beschleunigungssensoren stehen Testmuster für erste Versuche zur Verfügung. Im Hinblick auf eine Anwendung in der Massenproduktion sind des Weiteren der Abscheidungsprozess für das CF-Polymer im Bezug auf die Abscheiderate, sowie die Gesamttechnologie hinsichtlich Ausbeute zu optimieren.

Anhang A

Bestimmung der Haftfestigkeit von Schichten nach ASTM D3359-02

Die zu untersuchende Schicht wird mittels eines Diamantschneidewerkzeugs kreuzförmig eingeritzt, wobei die Schnittlänge ca. 40 mm beträgt. Auf das Kreuz wird ein Klebeband mit definierter Klebekraft (s. Tab. A.1) aufgebracht und nach einer Minute in einem Winkel von 180° zur Klebefläche mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 mm/s abgezogen.

Tabelle A.1: Liste der verwendeten Klebebänder

Klebebandbezeichnung	Klebekraft [N/mm]	Breite [mm]
Tesafilm 4104	0,2	25
Tesafilm 4129	0,3	25
Tesafilm 4130	0,4	25
Tesafilm 5270	0,6	25

Das Klebeband und der Wafer werden auf Schichtabrisse und versagende Grenzflächen untersucht und nach folgender Skala bewertet:

- 1 Ganzflächiger Abriss
- 2 Großer Teil der Schicht wurde abgerissen (35-65 % der Klebefläche)
- 3 Größere Abrisse entlang der Schnitte (15-35 % der Klebefläche)
- 4 Kleine Abrisse entlang der Schnitte (5-15 % der Klebefläche)
- 5 Leichtes Abplatzen der Schicht entlang der Schnitte (bis 5 % der Klebefläche)
- 6 Glatte Schnitttränder, kein Abplatzen

Anhang B

Realisierte Dünnschichtkappen aus Nickel

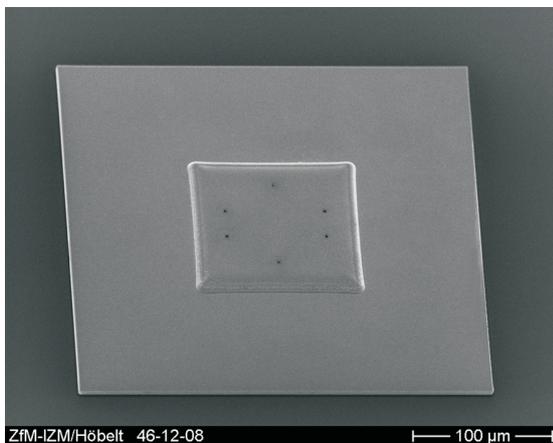


Abbildung B.1: Teststruktur mit einer Abmessung von $100 \times 100 \mu\text{m}^2$

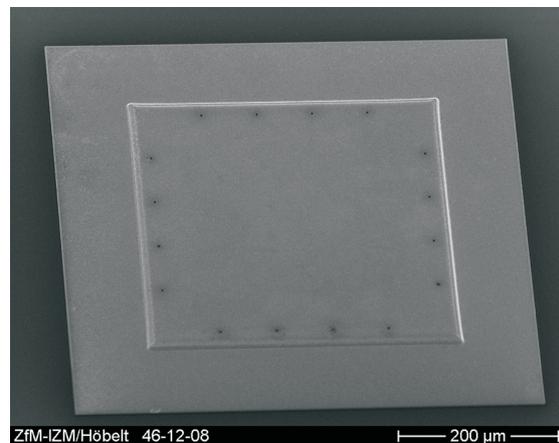


Abbildung B.2: Teststruktur mit einer Abmessung von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$

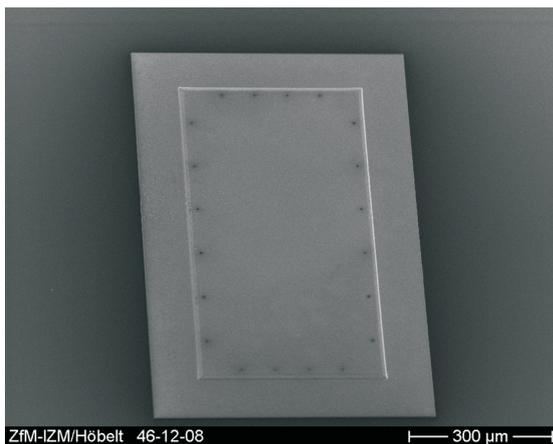


Abbildung B.3: Teststruktur mit einer Abmessung von $400 \times 800 \mu\text{m}^2$

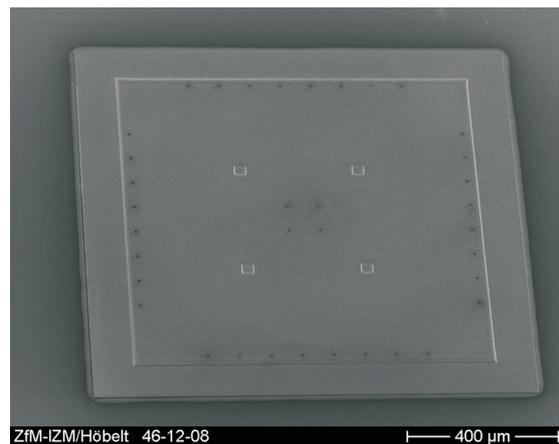


Abbildung B.4: Teststruktur mit einer Abmessung von $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$

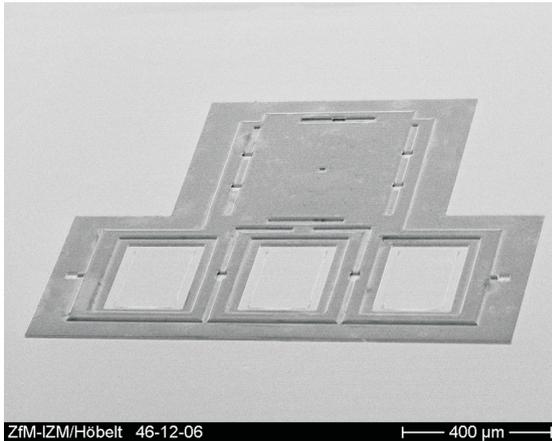


Abbildung B.5: Sensor-Teststruktur mit horizontalen Ätzzugangsöffnungen

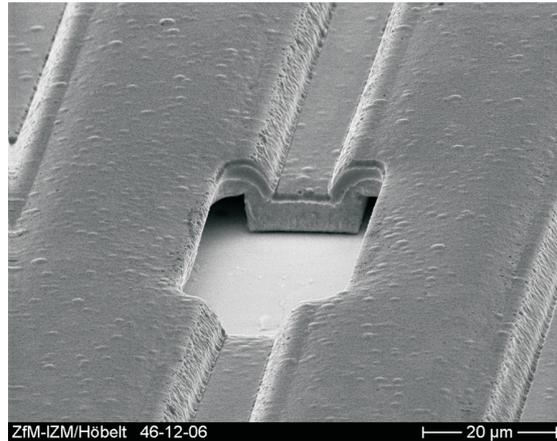


Abbildung B.6: Detailaufnahme einer horizontalen Ätzzugangsöffnung

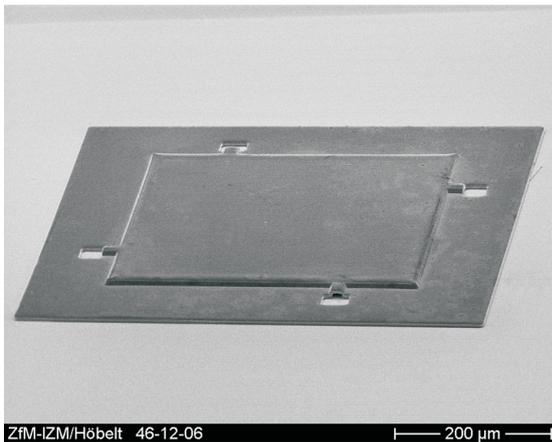


Abbildung B.7: Sensor-Teststruktur mit horizontalen Ätzzugangsöffnungen

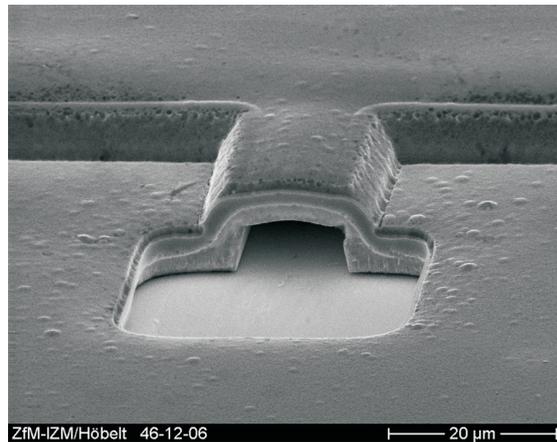


Abbildung B.8: Detailaufnahme einer horizontalen Ätzzugangsöffnung

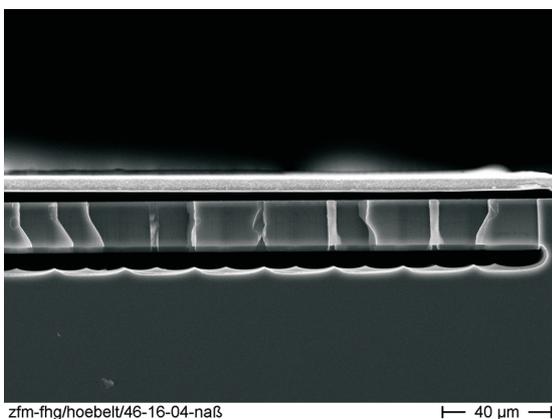


Abbildung B.9: Querschnitt durch eine Nickel-Kappe

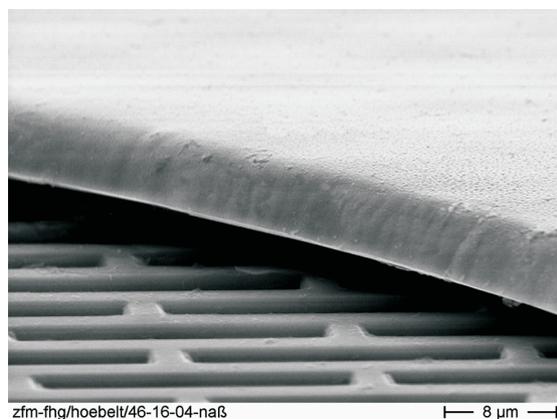


Abbildung B.10: Detailaufnahme einer geöffneten Nickel-Kappe

Anhang C

Teststrukturen

Für die Technologieentwicklung und für Vorversuche zur Prozessintegration wurden Teststrukturen verwendet. Neben der Bewertung der Einzelprozesse wurden an diesen Strukturen auch die Durchbiegung der Dünnschichtkappe mittels interferometrischer Messungen durchgeführt. Im folgenden wird das Layout der verwendeten Teststrukturen abgebildet, sowie die wichtigsten geometrischen Parameter angegeben.

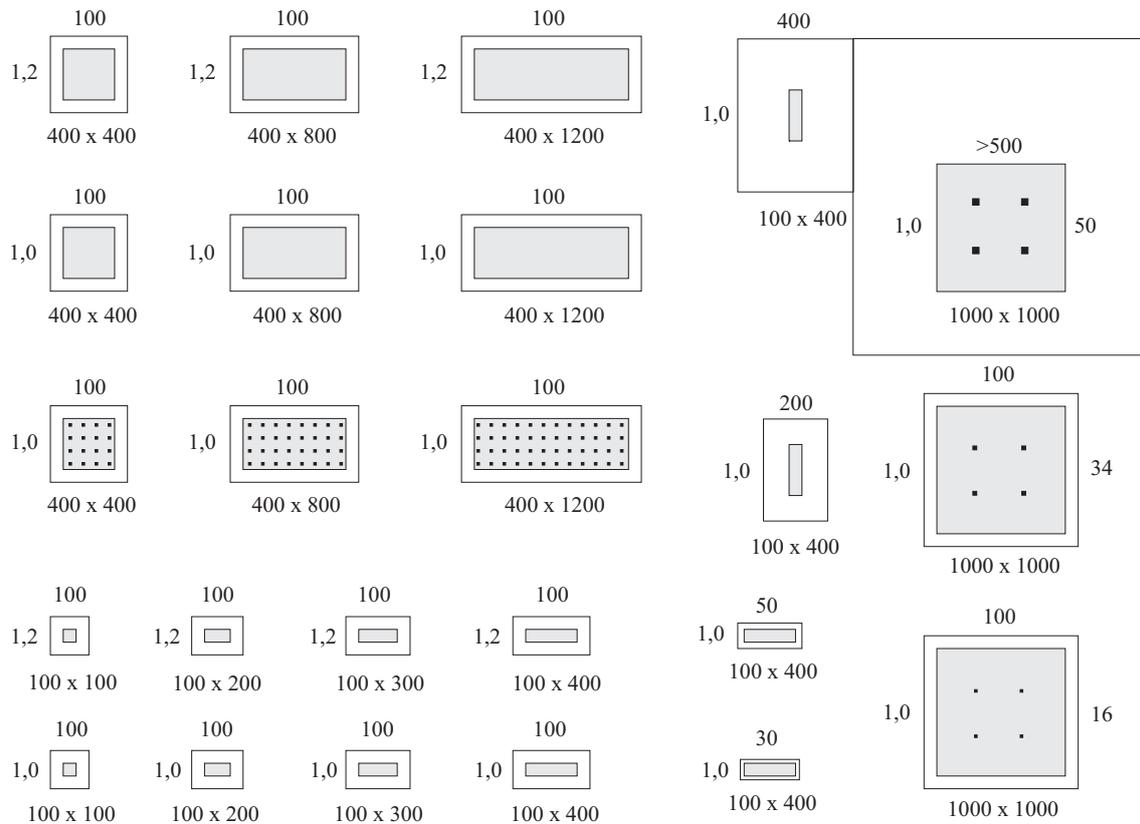


Abbildung C.1: Übersicht über die verwendeten Teststrukturen

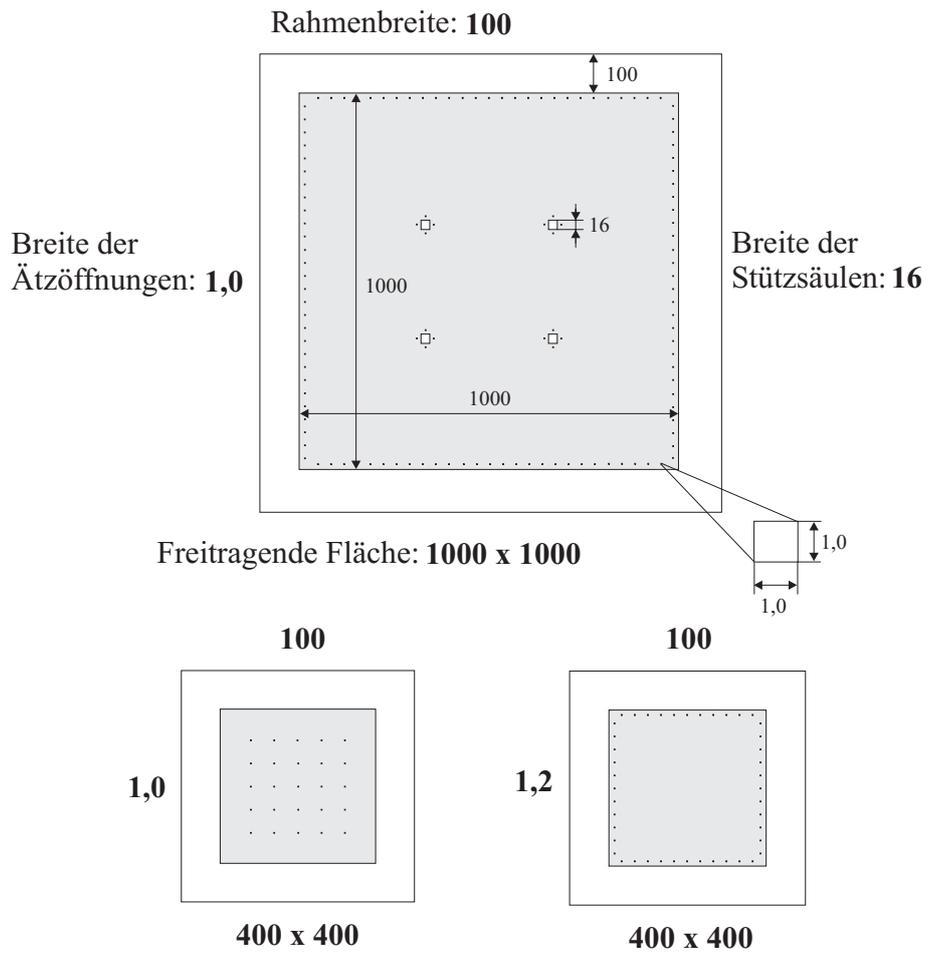


Abbildung C.2: Erläuterung der Bezeichnungen in Abbildung C.1

Literaturverzeichnis

- [1] Status of the MEMS Industry - 2007 Report. In: *Micronews* (2007), May, Nr. 58, S. 9
- [2] PETERSEN, K.E.: Silicon as a mechanical material. In: *Proceedings of the IEEE* 70 (1982), S. 420–457
- [3] HSU, T.-R.: *MEMS Packaging*. Institute of Electrical Engineers, London, U.K., 2004. – ISBN ISBN 0–86341–335–8
- [4] LYKE, J.: Packaging Technologies for Space-Based Microsystems and their Elements. In: HELVAJIAN, H. (Hrsg.): *Microengineering Technology for Space Systems*, The Aerospace Corporation, 1997. – ISBN 1–884989–05–5, S. 103–142
- [5] MAHAFFEY, J.: *Merging MEMS and wafer-level packaging*. http://ap.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=OnlineArticles&SubSection=Display&PUBLICATION_ID=36&ARTICLE_ID=203849&pc=ENL, Abruf: 21.08.2007. Advanced Packaging, May 2004
- [6] GUILLOU, D.F.: Packaging MEMS: New Manufacturing Methodology Substantially Reduces Smart MEMS Costs. In: *Sensors* 20 (2003), December, Nr. 12
- [7] MALUF, N. ; WILLIAMS, K.: *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. 2. Edition. Artech House Inc., 1999. – ISBN 0–89006–581–0
- [8] STARK, B.: MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications / Jet Propulsion Laboratory Publication 99-1. Pasadena (USA), Januar 1999. – Forschungsbericht
- [9] TUMMALA, R. R. ; RYMASZEWSKI, E. J.: *Microelectronics Packaging Handbook*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1989. – ISBN 0–442–20578–3
- [10] BAERT, K. e.: More than just a Package - wafer-level packaging of MEMS. In: *European Semiconductor* (2004), June, S. 27–29

- [11] GERLACH, G. ; DÖTZEL, W.: *Einführung in die Mikrosystemtechnik*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2006. – ISBN 3-446-22558-7
- [12] REICHL, H.: *Direktmontage*. Springer-Verlag GmbH, 1998. – ISBN 3-540-64203-x
- [13] HOFFMANN, R. ; GOTTFRIED, K. ; KAUFMANN, C. ; GESSNER, T. ; VOGEL, M. ; DIETEL, U.: Testing of a Gas Sensor for High Temperature Application. In: GBR, Werkstoffwoche-Partnerschaft (Hrsg.): *MATERIALS WEEK 2001 - Proceedings*. Frankfurt : Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, 2002. – ISBN 3-88355-302-6
- [14] TRAEGER, R.K.: Hermeticity of polymeric lid sealant. In: *Proc. of Electronic Components Conference*. San Francisco (USA), 1976, S. 361-367
- [15] GESSNER, T. ; WIEMER, M. ; FRÖMEL, J.: *MEMS-Packaging*. http://www.zfm.tu-chemnitz.de/tu/pdf/annual_report_2002/special_report_15.pdf, Abruf: 19.07.2006
- [16] MADOU, Marc: *Fundamentals of Microfabrication*. New York : CRC Press, 1997. – ISBN 0-8493-9451-1
- [17] WIEMER, M. ; HERZIGER, K. ; GESSNER, T.: *Silizium-Waferbonden: Montageprozesse für Silizium- und Glasmaterialien in der Mikromechanik*. Bd. 193. DVS-Berichte, 2000. – ISBN 3-87155-499-5
- [18] MEHNER, Jan: *Entwurf in der Mikrosystemtechnik*. Dresden University Press, 2000. – ISBN 3-931828-47-6
- [19] GALAYKO, D. ; KAISER, A. ; BUCHAILLOT, L. ; LEGRAND, B. ; COLLARD, D. ; COMBI, C.: Design, realization and testing of micro-mechanical resonators in thick-film silicon technology with postprocess electrode-to-resonator gap reduction. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13 (2003), S. 134-140
- [20] PARK, K. Y. ; JEONG, H. S. ; AN, S. ; SHIN, H. ; LEE, C. W.: Lateral Gyroscope suspended by two Gimbals Through High Aspect Ratio ICP Etching. In: *Proceedings of the Transducers '99*. Sendai, Japan, June 1999, S. 973 ff.
- [21] GESSNER, T. ; DÖTZEL, W. ; FUJITA, H. ; COLLARD, D.: Microactuators for Scanning and other applications. In: *Proceedings of the Actuators 98*. Bremen, 1998, S. 27 ff.
- [22] HOWE, R.T. ; MULLER, R.S.: Polycrystalline silicon micromechanical beams. In: *Electrochemical Society Spring Meeting*. Montreal, Kanada, May 9-14 1982, S. 184-185

- [23] HOWE, R.T. ; MULLER, R.S.: Stress in polycrystalline and amorphous silicon thin films. In: *Journal of Applied Physics* 54 (1983), Nr. 8, S. 4674–4675
- [24] ANALOG DEVICES INC. (Hrsg.): *Datenblatt ADXL330*. http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADXL330.pdf, Abruf: 16.02.2007
- [25] BOSCH SENSORTEC GMBH (Hrsg.): *Datenblatt SMB380*. http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/downloads/SMB380_Flyer_V1.0_122006.pdf, Abruf: 16.02.2007
- [26] GERLACH, Gerald ; DÖTZEL, Wolfram: *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1997. – ISBN 3–446–18395–7
- [27] BRUEL, M.: Silicon on insulator material technology. In: *Electronics Letters* Vol. 31 (1995), July, Nr. 14, S. 1201–1202
- [28] LEGTENBERG, R. ; ELDERS, J. ; ELWENSPOEK, M.: Stiction of surface micro-machined structures after rinsing and drying: model and investigation of adhesion mechanisms. In: *Proceedings of the Transducers '93*. Yokohama, Japan, 1993, S. 198 ff.
- [29] MULHERN, G.T. ; SOANE, D.S. ; HOWE, R.T.: Supercritical carbon dioxide drying of microstructures. In: *Proceedings of the Transducers '93*. Yokohama, Japan, 1993, S. 296 ff.
- [30] HOUSTON, M. R. ; MADOUDIAN, R. ; HOWE, R.T.: Ammonium fluoride anti-stiction treatments for polysilicon microstructures. In: *Proceedings of the Transducers '95*. Stockholm, Schweden, 1995, S. 210 ff.
- [31] LEE, J.H. et. a.: Characterization of anhydrous HF gas-phase etching with CH₃OH for sacrificial oxide removal. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 64 (1998), Nr. 1, S. 27–32
- [32] HILLER, Karla: *Technologieentwicklung für kapazitive Sensoren mit bewegten Komponenten*, Technische Universität Chemnitz, Habilitationsschrift, 2004
- [33] SHAW, K. A. ; ZANG, Z.L. ; MACDONALD, N.C.: SREAM I: a single mask, single-crystal silicon, reactive ion etching process for microelectromechanical structures. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 40 (1994), Nr. 1, S. 63–70

- [34] GRIESBACH, Kerst ; BERTZ, Andreas ; FAUST, Wolfgang ; DUDEK, Rainer ; KÜCHLER, Matthias ; GESSNER, Thomas: Investigation and Modification of the Mechanical Stress of Single Crystal Silicon Actuators Based on Surface Micromachining. In: *Proceedings of the 6th International Conference on New Actuators*. Bremen, 1998, S. 82–85
- [35] SAIF, Mohammed T. ; MACDONALD, Noel C.: Deformation of large microelectromechanical systems (MEMS) due to thermal and intrinsic stresses. In: *Smart Structures and Materials 1995: Smart Materials 2441* (1995), Nr. 1, S. 329–340
- [36] SRIDHAR, U. ; LIAN, L. ; DOW, F.P. ; YONG, L. ; BU, M.Y.: *Isolation Process For Surface Micromachined Sensors and Actuators*. United States Patent 5,930,595, October 1997
- [37] SRIDHAR, U. ; LAU, C.H. ; MIAO, Y.B. ; TAN, K.S. ; FOO, P.D. ; LIU, L.J. ; SOORIAKUMAR, K. ; LOH, Y.H. ; JOHN, P. ; LAY HAR, A.T. ; AUSTIN, A. ; LAI, C.C. ; BERGSTROM, J.: Single Crystal Silicon Microstructures using Trench Isolation. In: *Proceedings of the Transducers '99*. Sendai, Japan, June 1999, S. 258–261
- [38] SARAJLIC, E. ; BOER, M.J. de ; JANSEN, H.V. ; ARNAL, N ; PUECH, M. ; KRIJNEN, G. ; ELWENSPÖCK, M.: Advanced plasma processing combined with trench isolation technology for fabrication and fast prototyping of high aspect ratio MEMS in standard silicon wafers. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14 (2004), Nr. 9, S. 70–75
- [39] BERTZ, A. ; KÜCHLER, M. ; KNÖFLER, R. ; GESSNER, T.: A novel high aspect ratio technology for MEMS fabrication using standard silicon wafers. In: *Proceedings of the Transducers '01*. München, 2001, S. 1128–1131
- [40] LOHMANN, C. ; BERTZ, A. ; KÜCHLER, M. ; REUTER, D. ; GESSNER, T.: Mechanical reliability of MEMS fabricated by a special technology using standard silicon wafers, SPIE, 2003, S. 200–207
- [41] LOHMANN, C. ; REUTER, D. ; BERTZ, A. ; GESSNER, T.: High Aspect Ratio Micromachining using the AIM Technology. In: MICHEL, Bernd (Hrsg.) ; ASCHENBRENNER, Rolf (Hrsg.): *The World of Electronic Packaging and System Integration*, Dresden : ddp goldenbogen Verlag, 2005. – ISBN 3–932434–76–5, S. 544–548
- [42] BAERT, K. ; DE MOOR, P. ; TILMANS, H. ; JOHN, J. ; WITVROUW, A. ; VAN HOOFF, C. ; BEYNE, E.: Trends in Wafer-Level Packaging of MEMS - MEMS Packaging Solutions. In: *Advanced Packaging* 13 (2004), Nr. 4, S. 25–28

- [43] SHIMBO, M. ; FURUKAWA, K. ; FUKUDA, K. ; K., Tanzawa: Silicon-to-silicon direct bonding method. In: *Journal of Applied Physics* 60 (1986), S. 2987
- [44] LASKY, J.B. ; STIFFLER, S.R. ; WHITE, F.R. ; ABERNATHY, J.R.: Silicon-on-insulator (SOI) by bonding and etch back. In: *Proceedings of the IEEE International Electronic Device Meeting*. Piscataway, USA : IEEE, 1985, S. 684 ff.
- [45] TONG, Q.-Y. ; GÖSELE, U.: *Semiconductor Wafer Bonding*, The Electrochemical Society, 1999. – ISBN ISBN 0-471-57481-3
- [46] TONG, Q.-Y. ; CHA, G. ; GAFITEANU, R. ; GÖSELE, U.: Low temperature wafer direct bonding. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 3 (1994), S. 29 ff.
- [47] MACK, S. ; BAUMANN, H. ; GÖSELE, U.: Gas tightness of cavities sealed by silicon wafer bonding. In: *Proceedings of the IEEE Tenth Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1997, S. 488–493
- [48] SUN, G.L. ; ZHAN, J. ; TONG-QIN, Y. ; XIE, S.J. ; CAI, Y.M. ; LU, S.J.: Cool Plasma Activated Surface in Silicon Wafer Direct Bonding Technology. In: *Journal de Physique Colloq. C* 49 (1988), S. 79–82
- [49] BÄCKLUND, Y. u. a.: A suggested mechanism for silicone direct bonding from studying hydrophilic and hydrophobic surfaces. In: *Proceedings of Micromechanics Europe*, 1992, S. 26 ff.
- [50] JIA, C. ; WIEMER, M. ; GESSNER, T.: Direct bonding with on-wafer metal interconnections. In: *Microsystem Technologies* 12 (2006), S. 391–396
- [51] WALLIS, G. ; POMMERANTZ, D.I.: Field assisted glass metal sealing. In: *Journal of Applied Physics* 40 (1969), S. 3948 ff.
- [52] RECEVEUR, R.A.M. ; ZICKAR, M. ; MARXER, C. ; LARIK, V. ; ROOIJ, N.F. de: Wafer level hermetic package and device testing of a SOI-MEMS switch for biomedical applications. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16 (2006), S. 676–683
- [53] LEE, B. ; SEOK, S. ; CHUN, K.: A study on wafer level vacuum packaging for MEMS devices. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13 (2003), S. 663–669
- [54] COHN, M.B. ; LIANG, Y.-C. ; HOWE, R.T. ; PISANO, A.P.: Wafer-to-wafer transfer of microstructures for vacuum packaging. In: *In Proc. Solid State Sensor and Actuator Workshop*. Hilton Head, June 1996

- [55] LIN, L. ; CHENG, Y.-T. ; NAJAFI, K.: Formation of Silicon-Gold Eutectic Bond Using Localized Heating Method. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 37 (1998), Nr. 11, S. 1412–1414
- [56] YANG, Hsueh-An et. a.: Localized induction heating solder bonding for wafer level MEMS packaging. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005), S. 394–399
- [57] KNECHTEL, R. ; WIEMER, M. ; FRÖMEL, J.: Wafer level encapsulation of microsystems using glass frit bonding. In: *Microsystem Technologies* 12 (2006), S. 468–472
- [58] SPARKS, Douglas ; MASSOUD-ANSARI, Sonbol ; NAJAFI, Nader: Long-term evaluation of hermetically glass frit sealed silicon to Pyrex wafers with feedthroughs. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005), S. 1560–1564
- [59] KNECHTEL, R.: *Halbleiterwaferbondverbindungen mittels strukturierter Glaszwischen-schichten zur Verkapselung oberflächenmikromechanischer Sensoren auf Wafer-ebene*, Technische Universität Chemnitz, Dissertationsschrift, 2005
- [60] REUTER, D. ; FRÖMEL, J. ; SCHWENZER, G. ; BERTZ, A. ; GESSNER, T.: Selektives Niedertemperaturbonds mit SU-8 für Wafer-Level-Verkappung von mikromechanischen Strukturen. In: *6. Chemnitzer Fachtagung Mikromechanik & Mikroelektronik*. Chemnitz, Oktober 2003, S. 29–33
- [61] NIKLAUS, F.: *Adhesive wafer bonding for Microelectronic and Microelectromechanical Systems*. Schweden, Königlich Technische Hochschule Stockholm, Dissertation, 2002
- [62] BESTEN, C. den ; HAL, R. E. G. ; MUNOZ, J. ; BERGVELD, P.: Polymer Bonding of Micro-Machined Silicon Structures. In: *Proceedings of IEEE Workshop on Micro-Electro Mechanical Systems*. Travemünde, Deutschland, Februar 1992, S. 104–109
- [63] OH, K. W. ; HAN, A. ; BHANSALI, S. ; AHN, C. H.: A low-temperature bonding technique using spin-on fluorocarbon polymers to assemble microsystems. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 12 (2002), Nr. 2, S. 187–191
- [64] OBERHAMMER, J. ; NIKLAUS, F. ; STEMME, G.: Selective wafer-level adhesive bonding with bezocyclobutene for fabrication of cavities. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 105 (2003), Nr. 3, S. 297–304

- [65] PAN, C.-T. ; YANG, H. ; SHEN, S.-C. ; CHOU, M.-C. ; CHOU, H.-P.: A low-temperature wafer bonding technique using patternable materials. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 12 (2002), S. 611–615
- [66] REUTER, D. ; BERTZ, A. ; SCHWENZER, G. ; GESSNER, T.: Selective adhesive bonding with SU-8 for zero-level-packaging. In: *Proceedings of SPIE Micro- and Nanotechnology*. Sidney (Australien), Dezember 2004, S. 163–171
- [67] JOHNSON, W. D. ; NAGALE, M. P.: Packaging of MEMS Devices with SU-8 Processing. In: *Tagungsband des 1. Mikrosystemtechnik Kongresses*. Freiburg, 2005, S. 179–184
- [68] JOURDAIN, A. ; DE MOOR, P. ; BAERT, K. ; DEWOLF, I. ; TILMANS, H.A.C.: Mechanical and electrical characterization of BCB as a bond and seal material for cavities housing (RF-)MEMS devices. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005), S. 89–96
- [69] OBERHAMMER, J. ; NIKLAUS, F. ; STEMME, G.: Sealing of adhesive bonded devices on wafer level. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 110 (2004), Nr. 1-3, S. 407–412. – Compilation and indexing terms, Copyright 2004 Elsevier Engineering Information, Inc.
- [70] GUCKEL, H. ; BURNS, D. W.: Planar Processed Polysilicon Sealed Cavities for Pressure Transducer Arrays. In: *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting*, 1984, S. 223–225
- [71] PARTRIDGE, A. ; RICE, A.E. ; KENNY, T.W. ; LUTZ, M.: New thin film epitaxial polysilicon encapsulation for piezoresistive accelerometers. In: *In Proceedings of 14th IEEE Int. Conference MEMS'01*, 2001, S. 54–59
- [72] OUELLET, Luc: *An integrated process for single-substrate, wafer-level protective cap*. US patent 6,635,509
- [73] AIGNER, R. ; OPPERMANN, K. G. ; KAPELS, H. ; KOLB, S.: Cavity-Micromachining Technology: Zero-Package Solution for Inertial Sensors. In: *Proceedings of the Transducers '01*. München, Juni 2001, S. 186–189
- [74] MASTRANGELO, C. M. ; MULLER, R. S.: Vacuum-sealed silicon micromachined incandescent light source. In: *Techn. Digest of IEEE International Electron Devices Meeting*. San Francisco (USA), 1989, S. 503–506

- [75] LIN, L. ; HOWE, R. T. ; PISANO, A. P.: Microelectromechanical Filters for Signal Processing. In: *Journal of Micromechanical Systems* 7 (1998), September, Nr. 3, S. 286–294
- [76] LEBOUTZ, K. S. ; HOWE, R. T. ; PISANO, A. P.: Permeable polysilicon etch-access windows for microshell fabrication. In: *Proceedings of the Transducers '01*. Stockholm (Schweden), 1995, S. 224–227
- [77] HE, R. ; LI, F. ; WU, M. C. ; KIM, C.-J.: Porous polysilicon shell formed by electrochemical etching for on-chip vacuum encapsulation. In: *Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems workshop*. Hilton Head Island (USA), June 2004
- [78] GALLANT, J. A. ; WOOD, D.: Surface micromachined membranes for wafer level packaging. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005), S. 47–52
- [79] STARK, B.H. ; NAJAFI, K.: A low-temperature thin-film electroplated metal vacuum package. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 13 (2004), April, Nr. 2, S. 147 – 157
- [80] AIGNER, R.: *Verfahren zum Erzeugen einer Schutzabdeckung für ein Bauelement*. WO 2003/057618, 2003
- [81] FRANOSCH, M. ; OPPERMAN, K.-G. ; MECKES, A. ; NESSLER, W. ; AIGNER, R.: Wafer-Level Package for Bulk Acoustic Wave (BAW) Filters. In: *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2004, S. 493–496
- [82] MONAJEMI, P. ; JOSEPH, P. J. ; KOHL, P. A. ; AYAZI, F.: Wafer-level MEMS packaging via thermally released metal-organic membranes. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16 (2006), S. 742–750
- [83] UHLIG, M. ; BERTZ, A. ; RENNAU, M. ; SCHULZ, S.E. ; WERNER, T. ; GESSNER, T.: Low k Plasma CF Polymer Films Modified by in situ Deposited Carbon Rich Adhesion Layers. In: *MRS Conference Proceedings ULSI XV 1999*, MRS Warrendale, 2000, S. 395–401
- [84] SZE, S.M.: *VLSI Technology*. McGraw-Hill, 1988. – ISBN 0–07–062735–5
- [85] FUJINO, K. ; NISHIMOTO, Y. ; TOKUMASO, N. ; MAEDA, K.: Silicon Dioxide Deposition by Atmospheric Pressure and Low-Temperature CVD Using TEOS and Ozone. In: *Journal of the Electrochemical Society* 137 (1990), September, Nr. 9, S. 2883–2887

- [86] NOWACK, M.: *Galvanische Abscheidung von Dünnschichtkappen für Mikrostrukturen*, TU Chemnitz, Diplomarbeit, 2006
- [87] ESCHENAUER, H. ; SCHNELL, W.: *Elastizitätstheorie I: Grundlagen, Scheiben und Platten*. 3. Auflage. Mannheim, Wien, Zürich : BI Wissenschaftsverlag, 1993. – ISBN 3-411-16263-5
- [88] ALTENBACH, H. ; ALTENBACH, J. ; NAUMENKO, K.: *Ebene Flächentragwerke, Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1998. – ISBN 3-540-63228-x
- [89] UGURAL, A.C.: *Stresses in Plates and Shells*. New York : McGraw-Hill, 1981. – ISBN 0-07-065730-0
- [90] KNOTHE, K. ; WESSELS, H.: *Finite Elemente*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1999. – ISBN 3-540-64491-1
- [91] SOLECKI, R. ; CONANT, R. J.: *Advanced mechanics of materials*. Oxford : Oxford University Press, 2003. – ISBN 0-19-514372-8
- [92] STAVROULIS, S.: *Rechnergestützter Entwurf von piezoresistiven Silizium-Drucksensoren mit realem mechanischem Wandler*, TU Darmstadt, Dissertation, 2004
- [93] GÖLDNER, H.: *Lehrbuch höhere Festigkeitslehre*. Bd. 1. 2. Auflage. VEB Fachbuchverlag, 1984
- [94] BLETZINGER, K.U.: *Theory of Plates. Part II: Plates in bending*. TU München : Skript, Lehrstuhl für Statik, 2000
- [95] PFEIFER, G.: *Piezoelektrische Lineare Stellantriebe*. Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt, 1982
- [96] ALTENBACH, H. ; ALTENBACH, J. ; RIKARDS, R.: *Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke*. Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996. – ISBN 3-342-00681-1
- [97] STONEY, G. G.: The tension of thin metallic films deposited by electrolysis. In: *Proceedings of the Royal Society London* Bd. A 82, 1909, S. 172-175
- [98] ASTM INTERNATIONAL (Hrsg.): *ASTM D 3359-02*. Standard Test Method for Measuring Adhesion by Tape Test

- [99] SCHWARZER, N.: *Kugeleindruckversuch in geschichteten Materialien*, TU Chemnitz, Dissertation, 1998
- [100] HERMANN, I.: *Anwendung und Erweiterung der Methode des elastischen Kugeleindruckversuchs zur Bestimmung mechanischer Oberflächeneigenschaften*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2004
- [101] BUCKEL, W.: Internal Stresses. In: *Journal of Vacuum Science and Technology* 6 (1969), S. 606 ff
- [102] HAQUE, M.S. ; NASEEM, H.A. ; BROWN, W.D.: Stress in High Rate Deposited Silicon Dioxide Films for MCM Applications. In: *Reliability Physics Symposium* Bd. 34th Annual Proceedings, IEEE International, 1996, S. 274–280
- [103] VEN, E.P. van d. ; CONNICK, A.S. ; HARRUS, A.S.: Advantages of dual frequency PECVD for deposition of ILD and passivation films. In: *Proc. IEEE VMIC Conference*, IEEE, June 1990, S. 194–201
- [104] HUGHEY, M.P. ; COOK, R.F.: Massive stress changes in plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon nitride films on thermal cycling. In: *Thin solid films* 460 (2004), S. 7–16
- [105] COX, J.N.: Silanol in CVD thin films. In: *Silicon Nitride and Silicon Dioxide Thin Insulating Films* (1994), S. 117–126
- [106] LAHIRI, S.K. ; LIM, C.W. ; TOH, C.C. ; FU, J.K.: Effect of thermal cycling on stress in thin silicon nitride and silicon carbide films. In: *Journal of Materials Science Letters* 15 (1996), S. 2177–2179
- [107] LOHMANN, C.: *Beiträge zur Entwicklung einer Technologieplattform für die Herstellung von oberflächennahen Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen*, TU Chemnitz, Dissertation, Juli 2006
- [108] KRUIJATZ, J.: *Herstellung von Spiegelschichtsystemen auf der Basis von Aluminium oder Silber für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik*, TU Chemnitz, Dissertation, 2002
- [109] MAX SCHLÖTTER GMBH & CO. KG: *Sicherheitsdatenblatt des Nickelbadzusatzes BFL*
- [110] BERGAUER, A. ; EISENMENGER-SITTNER, C.: *Physik und Technologie dünner Schichten*. http://www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/duenne_schichten/german/index_g.htm, Abruf: 23.02.2007

- [111] CAO, Z. ; ZHANG, T.-Y. ; ZHANG, X.: Microbridge testing of plasma-enhanced chemical- vapor deposited silicon oxide films on silicon wafers. In: *Journal of Applied Physics* 97 (2005), Nr. 10, S. 104909–104909–9
- [112] CIANCI, E. ; FOGLIETTI, V. ; COPPA, A.: Young's modulus and residual stress of DF PECVD silicon nitride for MEMS free standing membranes. In: *Micro- and Nanoengineering Conference 06*. Barcelona, 2006
- [113] BRUGGER, R.: *Die galvanische Vernickelung*. Saulgau : Eugen G. Lenze Verlag, 1984
- [114] HOWATSON, A.M. ; LUND, P.G. ; TODD, J.D.: *Engineering Tables and Data*. 2nd ed. London : Chapman and Hall, 1991
- [115] CHINMULGUND, M. ; INTURI, R.B. ; BARNARD, J.A.: Effect of Ar gas pressure on growth, structure, and mechanical properties of sputtered Ti, Al, TiAl and Ti_3Al films. In: *Thin Solid Films* 270 (1995), December, Nr. 1-2, S. 260–263
- [116] BOLSHAKOV, A. ; PHARR, G.M.: Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques. In: *Journal of Material Research* 13 (1998), S. 1049–1058
- [117] GOTTFRIED, K.: *Metallisierungssysteme für temperaturbelastete Bauelemente der Mikrosystemtechnik*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2004
- [118] TAKEISHI, S. ; KUDO, H. ; SHINOHARA, R. ; HOSHINO, M. ; FUKUYAMA, S. ; YAMAGUCHI, J. ; YAMADA, M.: Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Fluorocarbon Films with High Thermal Resistance and Low Dielectric Constants. In: *Journal of the Electrochemical Society* 144 (1997), May, Nr. 5, S. 1797–1802
- [119] LÄRMER, F. ; SCHILP, L.A.: *A method for anisotropically etching silicon*. Deutsches Patent Nr. DE4241045, 1992
- [120] YANEV, W.: *Erzeugung, Charakterisierung und Strukturierung von Fluorocarbon-Plasmapolymeren für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2004
- [121] YASUDA, H.: *Plasma Polymerization*. London : Academic Press, 1985. – ISBN 0127687602
- [122] CUNGE, G. ; BOOTH, J. P.: CF_2 production and loss mechanisms in fluorocarbon discharges: Fluorine-poor conditions and polymerization. In: *Journal of Applied Physics* 85 (1999), Nr. 8, S. 3952–3959

- [123] CRUDEN, B. ; CHU, K. ; GLEASON, K. ; SAWIN, H.: Thermal Decomposition of Low Dielectric Constant Pulsed Plasma Fluorocarbon Films. In: *Journal of the Electrochemical Society* 146 (1999), Nr. 12, S. 4590–4596
- [124] D'AGOSTINO, R.: *Plasma Deposition, Treatment and Etching of Polymers*. San Diego : Academic Press, 1990. – ISBN 0122004302
- [125] COBURN, J.W. ; KAY, E.: Some Chemical Aspects of the Fluorocarbon Plasma Etching of Silicon and Its Compounds. In: *IBM Journal of Research and Development* 23 (1979), Nr. 1, S. 33–41
- [126] OEHRLEIN, G. S. ; ZHANG, Y. ; VENDER, D. ; HAVERLAG, M.: Fluorocarbon high-density plasmas. I. Fluorocarbon film deposition and etching using CF_4 and CHF_3 . In: *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 12 (1994), Nr. 2, S. 323–332
- [127] KAY, E. ; DILKS, A.: Plasma polymerization of fluorocarbons in rf capacitively coupled diode system. In: *Journal of Vacuum Science & Technology* 18 (1981), Nr. 1, S. 1–11
- [128] UHLIG, M. ; GESSNER, T.: Chemical vapor deposition of C-F-low-k materials. In: MURAKA, S. (Hrsg.) ; MURARKA, S.P. (Hrsg.) ; EIZENBERG, M. (Hrsg.): *Interlayer dielectrics for Semiconductor Technologies*, Academic Press, 2003
- [129] UHLIG, M. ; BERTZ, A. ; RENNAU, M. ; SCHULZ, S.E. ; WERNER, T. ; GESSNER, T.: Electrical and adhesion properties of plasma-polymerised ultra-low k dielectric films with high thermal stability. In: *Microelectronic Engineering* 50 (2000), S. 7–14
- [130] RUSU, C. ; KLAASSE, G. ; SEDKY, S. ; ESCH, H. ; PARMENTIER, B. ; VERBIST, A. ; WITROUW, A.: Planarization of deep trenches. In: *Micromachining and Microfabrication Process Technology VII* Bd. Proceedings of SPIE Vol. 4557, SPIE, 2001
- [131] PRAT, R. ; KOH, Y.J. ; BABUKUTTY, Y. ; KOGOMA, M. ; OKAZAKI, S. ; KODAMA, M.: Polymer deposition using atmospheric pressure plasma glow (APG) discharge. In: *Polymer* 41 (2000), S. 7355–7360
- [132] EGITTO, F.D.: Plasma etching and modification of organic polymers. In: *Pure and Applied Chemistry* 62 (1990), Nr. 9, S. 1699–1708
- [133] FRANZ, G.: *Oberflächentechnologie mit Niederdruckplasmen*. 2. Auflage. Berlin : Springer-Verlag, 1994. – ISBN 3–540–57360–7

- [134] KÖHLER, M.: *Ätzverfahren für die Mikrotechnik*. 1. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH, 1998
- [135] HANSEN, R.H. ; PASCALE, T. ; DE BENEDICTIS, T. ; RENTZEPIS, P.M.: Effect of Atomic Oxygen on Polymers. In: *Journal of Polymer Science A* 3 (1965), S. 2205–2214
- [136] ZAROWIN, C.B.: Plasma Etch Anisotropy - Theory and some Verifying Experiments Relating Ion Transport, Ion Energy and Etch Profiles. In: *Journal of the Electrochemical Society* 130 (1983), May, Nr. 5, S. 1144–1152
- [137] KELLER, J.H.: Inductive plasmas for plasma processing. In: *Plasma Sources, Science and Technology* 5 (1996), Nr. 2, S. 166–172
- [138] NING, Z. ; CHENG, S. ; YANG, S.: Influence of thermal annealing on bonding structure and dielectric properties of fluorinated amorphous carbon film. In: *Current Applied Physics* 2 (2002), S. 439–443
- [139] YANG, D.J. H.and T. H.and Tweet ; MA, Y. ; NGUYEN, T.: Deposition of highly crosslinked fluorinated amorphous carbon film and structural evolution during thermal annealing. In: *Applied Physics Letter* 73 (1998), September, Nr. 11, S. 1514–1516
- [140] ENDO, K. ; TATSUMI, T.: Controlling Fluorine Concentration of Fluorinated Amorphous Carbon Thin Films for Low Dielectric Constant Interlayer Dielectrics. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 36 (1997), November, Nr. 11B, S. 1531–1533
- [141] LIU, C. ; TAI, Y.-C.: Sealing of Micromachined Cavities Using Chemical Vapor Deposition Methods: Characterization and Optimization. In: *Journal of Micromechanical Systems* 8 (1999), June, Nr. 2, S. 135–145
- [142] MEI, Q. ; TAMAGAWA, T. ; YE, C. ; LIN, Y. ; ZURN, S. ; POLLA, D.L.: Planar-processed tungsten and polysilicon vacuum microelectronic devices with integral cavity sealing. In: *Journal of Vacuum Science and Technology* B11 (1993), Nr. 2, S. 493
- [143] BARTEK, M. ; FOERSTER, J.A. ; WOLFFENBUTTEL, R.F.: Vacuum sealing of microcavities using metal evaporation. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 61 (1997), Nr. 1-3, S. 364–368

- [144] RUSU, C. ; JANSEN, H. ; GUNN, R. ; WITROUW, A.: Self-aligned 0-level sealing of MEMS devices by a two layer thin film reflow process. In: *Microsystem Technologies* 10 (2004), S. 364–371
- [145] FRÖMEL, J. ; BILLEP, D. ; GESSNER, T. ; WIEMER, M.: Application of micromechanical resonant structures for measuring the sealing of bonded sensor systems. In: *Microsystem Technologies* 12 (2006), S. 481–483
- [146] LOGEESWARAN, V.J. ; TAY, F.E.H. ; CHAN, M.L. ; CHAU, F.S. ; LIANG, Y.C.: First Harmonic (2f) Characterisation of Resonant Frequency and Q-Factor of Micromechanical Transducers. In: *DTIP 2002*. Cannes, 2002, S. 584–593
- [147] BOHRMANN, S. ; PITKA, R. ; STÖCKER, H. ; TERLECKI, G.: *Physik für Ingenieure*. Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch, 1993. – ISBN 3–8171–1242–4
- [148] FISCHER, U. ; STEPHAN, W.: *Mechanische Schwingungen*. Leipzig : VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1981
- [149] FEDDER, G.K.: *Simulation of Microelectromechanical Systems*, University of California at Berkeley, Dissertation, 1994
- [150] BILLEP, Detlef: *Modellierung und Simulation eines mikromechanischen Drehratesensors*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 1999
- [151] VEIJOLA, T. ; KUISMA, H. ; LAHDENPERÄ, J. ; RYHÄNEN, T.: Equivalent-circuit model of the squeezed film in silicon accelerometer. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 48 (1995), Nr. 3, S. 239–248
- [152] GRIFFIN, W.S. ; RICHARDSON, H.H. ; YANAMANI, S.: A Study of Fluid Squeeze-Film Damping. In: *Journal of Basic Engineering* (1966), June, S. 451–456
- [153] JOURDAIN, A. ; DE MOOR, P. ; PAMIDIGHANTAM, S. ; TILMANS, H.A.C.: Investigation of the Hermeticity of BCB-Sealed Cavities for Housing (RF-)MEMS Devices. In: *Proceedings of MEMS 2002 IEEE International Conference*. Las Vegas, USA : IEEE, Jan. 2002, S. 677–680
- [154] BILLEP, D. ; HILLER, K. ; FRÖMEL, J. ; TENHOLTE, D. ; REUTER, D. ; DÖTZEL, W. ; GESSNER, T.: Post-Processing Gap Reduction in a Micromachined Resonator for Vacuum Pressure Measurement. In: *SPIE Conference: Microtechnologies for the New Millennium*. Sevilla (Spain) : SPIE, May 2005

-
- [155] SCHEIBNER, Dirk: *Entwicklung eines frequenzselektiven Schwingungsmesssystems mit abstimmbaren mikromechanischen Resonatoren*, TU-Chemnitz, Dissertation, 2004
- [156] ZIEGLER, P.: *Automatisierte Funktionskontrolle von kapazitiven Inertialsensoren auf Waferebene*, TU Chemnitz, Studienarbeit, 2006
- [157] LOHMANN, C. ; BERTZ, A. ; REUTER, D. ; KÜCHLER, M. ; GESSNER, T.: Flexible Herstellung und Charakterisierung von Inertialsensoren basierend auf der AIM-Technologie. In: *Mikrosystemtechnik Kongress*. Freiburg, 10.-13. Oktober 2005, S. 539–542

Abbildungsverzeichnis

2.1	Funktionen und Schnittstellen, die das Gehäuse eines elektrischen Bauelementes realisieren oder gewährleisten muss.	26
2.2	Hierarchie der Aufbau und Verbindungstechnik in der Elektronik/Gerätetechnik.	27
2.3	Elektrische Chipkontaktierungen in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik: a) durch Drahtbondung, b) durch Flip-Chip-Bonden, c) durch <i>Tape-Automated-Bonding</i>	28
2.4	Montage eines Gassensorchips unter thermischen Gesichtspunkten: a) Lichtmikroskopische Aufnahme des Gassensors im Keramikgehäuse b) Seitenansicht des an Golddrähten aufgehängten Sensorchips [13]	30
2.5	Darstellung der Permeabilität verschiedener Dichtungswerkstoffe gegenüber Feuchtigkeit für eine definierte Geometrie und der daraus resultierenden Zeit in der das Gehäuseinnere 50 % der Umgebungsfeuchtigkeit aufgenommen hat (nach [14])	31
2.6	Hausungsvarianten von Bauelementen zum Schutz vor Umwelteinflüssen a) Kunststoffgehäuse b) Keramikgehäuse c) Direktmontierter Chip mit Vergussmasse (Globe-Top)	32
2.7	Schematischer Ablauf des a) SCP b) waferbasiertes SCP c) <i>WLP</i>	33
2.8	Übersicht aktueller Technologien der Silizium-Mikromechanik [21]	35
2.9	Schematischer Prozessablauf der Oberflächentechnologien (a) Polysilizium-Technologie (b) SOI-Technologie	37
2.10	Prinzipdarstellung des Prozessablaufs der SCREAM-Technologie	39
2.11	REM-Aufnahme eines Vibrationssensors in SCREAM-Technologie	39
2.12	Prinzipdarstellung des Prozessablaufs der LISA-Technologie	40

2.13	REM-Aufnahme einer an Al-Trägern aufgehängenen AIM-Ankerstruktur	41
2.14	Prinzipdarstellung des Prozessablaufs der AIM-Technologie	42
2.15	Prinzipdarstellung der Verkapselung von mikromechanischen Strukturen bei der Verwendung von Waferbondprozessen; (a) Zwischenschichtfreie Waferbondprozesse mit strukturiertem Deckelwafer; (b) Waferbondprozesse mit Zwischenschichten und strukturiertem Deckelwafer (c) Waferbondprozesse mit Zwischenschichten und unstrukturiertem Deckelwafer	44
2.16	REM-Aufnahme des Querschnitts einer mittels Glaslotbonden verkappten AIM-Struktur	49
2.17	REM-Aufnahme eines geöffneten, mittels Glaslotbonden verkappten AIM-Inertialsensors	49
2.18	REM-Aufnahme des Querschnitts durch einen mittels SU-8-Bonden verkappten Inertialsensors in SCREAM-Technologie	51
2.19	Draufsicht auf einen verkappten SCREAM-Chip, bei dem die Isolationsgräben zwischen den Bondpads durch SU-8 verschlossen werden	51
2.20	Schematischer Ablauf zum hermetischen Verschluss einer mittels Adhäsiven Bondens erzeugten Kavität	52
2.21	Prinzipdarstellung von Dünnpackages a) mit lateralen Ätzöffnungen; b) mit vertikalen Ätzöffnungen	53
2.22	Prozessablauf der auf epitaktisch aufgewachsenem Polysilizium basierenden Verkappungstechnologie für SOI-Mikrostrukturen [71]	55
2.23	Prozessablauf der Verkappungstechnologie für Polysilizium-Mikrostrukturen basierend auf einer Siliziumnitridkappe nach [75]	56
2.24	Prozessablauf der Dünnschichtverkappung mittels Nickelgalvanik a) mit kleinen Ätzöffnungen und Verschluss durch dünne Schichten (Sputtern und Galvanik) b) mit großen Ätzöffnungen und Verschluss durch Lotschmelze [79]	59
2.25	Schematischer Ablauf der SU-8 Dünnschichtverkappungstechnologie [81]	60
3.1	Darstellung der drei Funktionsschichten die für die Erzeugung der Dünnschichtkappe abgeschieden, strukturiert und gegebenenfalls entfernt werden	64

3.2	a) Verteilung der Ätzöffnungen in engem Raster – erforderlich bei geringen Ätzraten der Opferschicht b) Anordnung der Ätzöffnungen am Rand der Membranschicht oberhalb unstrukturierter Gebiete	64
3.3	Prozessablauf der Technologievariante auf Basis von PECVD-Prozessen . .	69
3.4	Prozessablauf der Technologievariante mit elektrochemischer Abscheidung der Membranschicht	72
4.1	Mechanische Beanspruchung der Dünnschichtkappe	74
4.2	Definition der Scheiben- und Plattenschnittgrößen sowie der Bemaßung ebener Flächentragwerke [88]	76
4.3	Definition der Spannungen am differentiell kleinen Plattenelement	77
4.4	Dimensionen der Dünnschichtkappe	82
4.5	Spannungs- und Dehnungsverlauf in einem Schichtverbund (nach [95]) . . .	83
4.6	Prinzipiskizze des FEM-Modells mit Rand- und Symmetriebedingungen (rot – Randbedingung, blau – Symmetriebedingung)	86
4.7	Vergleich der Ergebnisse des vereinfachten FEM-Modells mit denen von Gleichung 4.28 in Abhängigkeit der Plattenlänge bei einer Plattendicke von $6,5 \mu\text{m}$	87
4.8	Vergleich der Ergebnisse des vereinfachten FEM-Modells mit denen von Gleichung 4.28 in Abhängigkeit der Plattendicke	87
4.9	Simulation der Verwölbung einer $1200 \times 400 \mu\text{m}^2$ großen und $1,5 \mu\text{m}$ dicken SiO-Membran infolge einer Eigenspannung von -20 MPa	88
4.10	Mittels Mireau-Interferometer ermittelte Verwölbung einer $1200 \times 400 \mu\text{m}^2$ großen und $1,5 \mu\text{m}$ dicken SiO-Membran	88
4.11	Simulations- und Messergebnisse für die Durchbiegung von quadratischen Teststrukturen mit einer Plattenfläche von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ und unterschiedlichen Schichtkombinationen bei einer Flächenlast von 100 kPa ; die Schichtstapeldicke gibt die Gesamtdicke des Schichtstapels an und die Größe der Datenpunkte (Kreuze) entspricht der Messunsicherheit von $\pm 128 \text{ nm}$. . .	89
4.12	Simulationsergebnis für die 1. Hauptspannung in einer $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe bestehend aus dem Schichtstapel $7,6 \mu\text{m}$ PE-SiO und $2,0 \mu\text{m}$ Al bei einer Drucklast von 10 MPa	90

4.13	Simulationsergebnis für die 1. Hauptspannung in einer $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe bestehend aus dem Schichtstapel $5,5 \mu\text{m}$ PE-SiO, $2,0 \mu\text{m}$ PE-SiN und $2,0 \mu\text{m}$ Al bei einer Drucklast von 10 MPa	90
4.14	FEM-Simulation für die 1. Hauptspannung in einer $4,3 \mu\text{m}$ dicken Dünnschichtkappe mit Ätzöffnungen	91
4.15	Vektorsumme der Verschiebungen in Folge einer Drucklast von 100 kPa in a) dem Modell der Dünnschichtkappe b) einer fest eingespannten Platte . .	92
4.16	Abhängigkeit der Plattendurchbiegung von der Höhe der Kavität bei 100 kPa Drucklast	93
4.17	Abhängigkeit der Durchbiegung vom Verhältnis der Seitenlängen einer Platte V_S bei 100 kPa Drucklast	93
4.18	Abhängigkeit der Durchbiegung von der Plattendicke bei 100 kPa Drucklast	93
4.19	Vergleich der angepassten analytischen Näherungslösung mit dem vollständigen FEM-Modell anhand der maximalen Durchbiegung für Dünnschichtkappen unterschiedlicher Plattenfläche und -dicke bei 100 kPa Drucklast und -20 MPa Eigenspannung; die Gültigkeitsgrenze der Kirchhoffschen Gleichungen ($w = h/5$) ist ebenfalls angegeben	94
5.1	Übersicht über die Materialpaarungen der verwendeten Schichtstapel . . .	105
5.2	Schichtspannung von PE-SiO nach der Abscheidung in Abhängigkeit der Abscheiderate und der Schichtdicke	107
5.3	Schichtspannung von PE-SiN in Abhängigkeit der Plasmaleistung und der Schichtdicke	108
5.4	Darstellung der für die Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens der Schichten verwendeten Temperaturzyklen	109
5.5	Verlauf der Spannung bei der Probe 46/02/03 (3000 nm LDR PE-SiO) in Abhängigkeit von der Temperatur bei drei aufeinander folgenden Aufheiz- und Abkühlzyklen entsprechend des Temperaturzyklus A mit jeweils einmonatiger Lagerung zwischen den Messungen	109
5.6	Verlauf der Spannung bei der Probe 46/11/03 (2000 nm PE-SiN) in Abhängigkeit von der Temperatur bei zwei aufeinander folgenden Temperaturzyklen A mit einmonatiger Lagerung zwischen den Messungen	111

-
- 5.7 Verlauf der Schichtspannung einer Probe mit 500 nm Aluminium während einer Lagerung über einen Zeitraum von 900 Tagen bei Raumtemperatur . 112
- 5.8 Schichtspannung in Abhängigkeit der Temperatur einer Probe mit 1000 nm Al bei zwei Temperaturzyklen A (s. Abb. 5.4) 113
- 5.9 Resultierende Eigenspannung des Schichtstapels der Probe 46/08/01 in Abhängigkeit der Temperatur während der Temperaturzyklen A und C 114
- 5.10 Resultierende Eigenspannung des Schichtstapels der Probe 46/11/01 in Abhängigkeit der Temperatur während der Temperaturzyklen A und C 115
- 5.11 Einfluss des Nickelbadzusatzes BFL auf die verbleibende Schichtspannung nach der Abscheidung in Abhängigkeit der Schichtdicke; dargestellt sind Schichten aus einem zusatzfreien Bad, einem Bad mit $c_{\text{BFL}} = 0,75 \text{ ml/l}$ und einem Bad mit $c_{\text{BFL}} = 5,0 \text{ ml/l}$ 117
- 5.12 Schichtspannung in Abhängigkeit der Temperatur einer Probe mit $0,9 \mu\text{m}$ Ni, $0,1 \mu\text{m}$ Cu und $0,01 \mu\text{m}$ Ti über zwei Temperaturzyklen B (Abb. 5.4) . 118
- 5.13 Einfluss des F:C-Verhältnisses im Reaktionsgasgemisch und der Bias-Spannung auf die Reaktionsverläufe auf der Substratoberfläche (nach Coburn [125]) 125
- 5.14 Prinzipielle Möglichkeiten der Planarisierung von Mikrostrukturgräben a) vollständige Verfüllung der Gräben b) Bedeckung der Grabenöffnungen ohne Materialabscheidung in den Gräben c) Verschluss von Gräben durch PECVD mit nichtkonformer Kantenbedeckung 127
- 5.15 REM-Aufnahme des Verschlusses von Ätzgräben durch vollständige Befüllung der Öffnungen mit Fotolack 127
- 5.16 Verschluss von Ätzgräben, bei dem das Eindringen des Lackes in die Gräben durch eine Antihafschicht an den vertikalen Wänden verhindert wird . . . 127
- 5.17 Verschluss von Ätzgräben im Silizium durch die PECVD-Abscheidung von CF-Polymer mit nichtkonformer Kantenbedeckung 128
- 5.18 Kantenbedeckung von CVD-Schichten (nach [84]) 129
- 5.19 REM-Aufnahme der Kantenbedeckung des CF-Polymers (Maße in μm) . . 129
- 5.20 REM-Aufnahmen des Grabenverschlusses mit einer Opferschichtdicke von $d_{\text{OS}} = 4,2 \mu\text{m}$ bei unterschiedlichen Grabenbreiten w_G 130
- 5.21 Mögliche Ätzprofile der Opferschichtstrukturierung und deren Einfluss auf die Geometrie der Dünnschichtkappe 134

- 5.24 REM-Aufnahmen des von der Oxidmaske abgedeckten CF-Polymers nach der Strukturierung über eine 300 nm dicke Oxidmaske, links: das CF-Polymer am Waferrand ist nicht beschädigt, rechts: die Oxidmaske in der Wafermitte war aufgrund der höheren Ätzrate nicht ausreichend dick und das CF-Polymer wurde beschädigt 136
- 5.25 REM-Aufnahme einer Teststruktur nach der Maskenstrukturierung mit dem in Tabelle 5.16 angegebenen Ätzprozess 138
- 5.26 REM-Aufnahme einer Teststruktur nach der Polymer-Strukturierung mit 1800 W ICP-Leistung, 160 W Bias-Leistung und 0,43 Pa Prozessdruck . . . 138
- 5.27 Einfluss des Prozessdruckes auf die Ätzrate des CF-Polymers 139
- 5.28 Einfluss des Prozessdruckes auf die Selektivität zur Hartmaske 139
- 5.29 Einfluss des Prozessdrucks auf die Homogenität des Polymerabtrages . . . 139
- 5.30 Abhängigkeit der CF-Polymer-Ätzrate von der Bias- und der ICP-Leistung bei 0,43 Pa Prozessdruck 140
- 5.31 Einfluss der Bias- und der ICP-Leistung auf die Selektivität gegenüber der Hartmaske 140
- 5.32 Abhängigkeit der Homogenität des Polymer-Abtrags von der ICP-Leistung 141
- 5.33 Abhängigkeit der Homogenität des Polymer-Abtrags von der Bias-Leistung 141
- 5.34 Mittels des optimierten Ätzprozesses (Tabelle 5.18) strukturierte 2,3 µm dicke Polymerschicht 141
- 5.35 REM-Aufnahme einer Ätzzugangsöffnung nach deren Verschluss; Während dem Verschlussprozess wird durch die Öffnungen auch im Inneren der Kavität Material abgeschieden 142
- 5.36 Rückstandsfreie Entfernung des CF-Polymers mit dem Sauerstoffprozess; REM-Aufnahmen der untersuchten Probe und EDX-Messergebnisse, oben: Nach der Abscheidung des CF-Polymers können ausschließlich Fluor und Kohlenstoff nachgewiesen werden, unten: nach der Polymerentfernung mit dem Sauerstoffprozess (Tabelle 5.19) sind nur das Silizium und der Sauerstoff des unter dem Polymer befindlichen SiO₂ nachzuweisen. Eine geringe Menge an Kohlenstoff wird auch bei einer Referenzmessung (gefüllte Fläche) vor der Polymerabscheidung detektiert 143
- 5.37 Ätzprofil des isotropen Freilegungsprozesses (siehe Tabelle 5.19) 144

5.38	Lichtmikroskopische Aufnahme der Versuchsprobe 37-21-03 zur Bestimmung der lateralen Ätzrate für 1 μm PE-SiO, 5 μm CF-Polymer bei 300 s Ätzzeit	144
5.39	Unterätzung der PE-SiO-Membranschicht in Abhängigkeit der Ätzdauer für verschiedene Schichtkombinationen bei einem Lochdurchmesser von 2 μm	145
5.40	Abhängigkeit der Polymerätzrate vom Aspektverhältnis der Ätzöffnungen .	145
5.41	Einfluss der Schichtdicken auf die Polymerätzrate für einen Ätzöffnungsdurchmesser von 1,2 μm , links: Einfluss der Polymerdicke bei einer Oxiddicke von 1,0 μm ; rechts: Einfluss der Oxiddicke bei konstanter Polymerdicke von 2 μm	146
5.42	Schichtabhebungen auf einem Wafer mit 5 μm CF-Polymer und 2 μm PE-SiO; das PE-SiO wurde bei 400 °C abgeschieden	148
5.43	Defektfreier Wafer mit 5 μm CF-Polymer und 2 μm PE-SiO; das PE-SiO wurde bei 350 °C abgeschieden	148
5.44	REM-Aufnahme einer Teststruktur mit freistehender, vertikaler Kante nach der Abscheidung einer 1,5 μm dicken PE-SiO-Membran	149
5.45	REM-Aufnahme einer Teststruktur mit einem Aspektverhältnis des zu beschichtenden Grabens von ca. 0,8 nach der Abscheidung einer 1,0 μm dicken PE-SiO-Membran	149
5.46	REM-Aufnahme einer selbsttragenden 1,5 μm dicken Oxidmembran nach Entfernung der Opferschicht	150
5.47	Lichtmikroskopische Aufnahme einer 1,5 μm dicken Oxidmembran mit Stützstellen nach der Opferschichtätzung	151
5.48	Lichtmikroskopische Aufnahme einer 1,0 μm dicken Oxidmembran nach der Opferschichtätzung	151
5.49	REM-Aufnahme einer mit Fotolack beschichteten Oxidmembran	152
5.50	REM-Aufnahme einer Oxidmembran nach deren Strukturierung; aufgrund der zu dünnen Lackschicht an der Kante wurde die Membranschicht angegriffen	152

5.51	REM-Aufnahmen von Ätzöffnungen nach deren Strukturierung mittels RIE a) Ätzöffnung am Rand der Dünnschichtkappe, die Öffnung ist korrekt strukturiert aufgrund der niedrigeren Lackdicke b) Ätzöffnung in der Mitte der Dünnschichtkappe, die Belichtungszeit von 6 s war nicht ausreichend für eine Lackdicke von $2,5\ \mu\text{m}$	153
5.52	Verschluss einer Ätzöffnung durch $7\ \mu\text{m}$ PE-SiO, links: REM-Aufnahme, rechts: Grafische Veranschaulichung der Einzelschichten	155
5.53	REM-Aufnahme einer Dünnschichtkappe aus der Materialkombination PE- SiO/Al	156
5.54	REM-Aufnahme einer Dünnschichtkappe aus der Materialkombination PE- SiO/PE-SiN/Al	156
5.55	REM-Aufnahme einer Silizium-Mikrostruktur mit Dünnschichtkappe, die aus der Materialkombination PE-SiO/PE-SiN/Al besteht und eine Fläche von $400\times 400\ \mu\text{m}^2$ überspannt	156
5.56	Einkerbung der PE-SiO Schicht durch die nichtkonforme Abscheidung an Stufen, links: REM-Aufnahme einer $6,5\ \mu\text{m}$ dicken Dünnschichtkappe, rechts: Prinzipskizze	157
5.57	REM-Aufnahme einer gerissenen Teststruktur, der Riss verläuft zwischen den beiden Spannungsmaxima quer durch die Schicht, statt entlang der markierten Grenzfläche	158
5.58	Simulation der 1. Hauptspannung in einer $400\times 400\ \mu\text{m}^2$ großen Dünnschichtkappe aus $8,5\ \mu\text{m}$ spannungsarmen ($10\ \text{MPa}$) PE-SiO unter $100\ \text{kPa}$ Flächenlast	158
5.59	Interferometrische Aufnahmen der Durchbiegung von Dünnschichtkappen mit einer quadratischen Plattenfläche von $400\times 400\ \mu\text{m}^2$ nach der Abscheidung der Verschlusschicht; a) Abscheidung von $4,8\ \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. $260\ \text{nm}$ und korrespondiert mit dem numerisch ermittelten Wert für eine Schicht mit $-20\ \text{MPa}$ Eigenspannung ohne zusätzliche Last und ist demzufolge nicht verschlossen; b) Abscheidung von insgesamt $7,0\ \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. $1,5\ \mu\text{m}$ und korrespondiert mit dem numerisch ermittelten Wert für eine Schicht mit $-20\ \text{MPa}$ Eigenspannung und einer Drucklast von $100\ \text{kPa}$, die Dünnschichtkappe ist verschlossen c) Abscheidung von $4,8\ \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. $4,1\ \mu\text{m}$, die Kappe ist verschlossen; d) Abscheidung von $6,0\ \mu\text{m}$ PE-SiO, die Durchbiegung beträgt ca. $2,3\ \mu\text{m}$, die Kappe ist verschlossen	160

5.60	Interferometrische Aufnahmen der Durchbiegung von Dünnschichtkappen mit einer quadratischen Plattenfläche von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ nach der Abscheidung von a) $7,0 \mu\text{m}$ PE-SiO und $2 \mu\text{m}$ Al, die Durchbiegung beträgt ca. 640 nm , bzw. b) $4,0 \mu\text{m}$ PE-SiO und $2 \mu\text{m}$ PE-SiN; die Durchbiegung beträgt ca. 900 nm	161
6.1	Prinzipskizze eines krafterregten Feder-Masse-Dämpfer-Systems	166
6.2	Vergrößerungsfunktion V und Phasenwinkel β als Funktion des Abstimmungsverhältnisses η für Dämpfungsgrade $0,01 \leq D \leq 2$	168
6.3	Schematische Darstellung des kapazitiven Wandlers	169
6.4	Parameter des entworfenen Sensors mit Prinzipskizze	172
6.5	Dämpfungs konstante der Sensorstruktur in Abhängigkeit des Kavitätinnendruckes	172
6.6	Lichtmikroskopische Aufnahme des zweidimensionalen Beschleunigungssensors in AIM-Technologie	173
6.7	Detailansicht des AIM-Beschleunigungssensors vor der Opferschichtabscheidung	174
6.8	Detailansicht einer AIM-Struktur nach der Abscheidung von $6 \mu\text{m}$ CF-Polymer	174
6.9	REM-Aufnahme eines verkapselten AIM-Beschleunigungssensors mit teilweise entfernter Kappe	175
6.10	REM-Aufnahme eines verkapselten AIM-Beschleunigungssensors im Querschnitt	175
6.11	Messaufbau zur Aufnahme der Sensor-Übertragungsfunktion mittels 2f-Methode	176
6.12	Ergebnisse der Referenzmessungen an einer offenen Sensorstruktur in der Vakuumkammer	177
6.13	Bestimmung der Dämpfung aus der Übertragungsfunktion eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems a) über die Knickfrequenz bei einem Dämpfungsgrad $D > 0,7$ b) Bestimmung der Güte über die Bandbreite der Resonanzüberhöhung bei einem Dämpfungsgrad $D \ll 0,7$	178
6.14	In Abhängigkeit des Druckes ermittelter Dämpfungsgrad der Sensorstruktur	178

6.15	Übertragungsfunktion eines Sensors nach der Vereinzelung durch Trennschleifen, eines geöffneten Sensors, sowie des Referenzsensors	179
6.16	Darstellung des ermittelten Dämpfungsgrades von Sensorstrukturen aller drei Schichtstapelvarianten; durch die Relation von D einer offenen Struktur einer Schichtstapelvariante zum D der Referenzstruktur bei Luftdruck ergibt sich die Zuordnung der Dämpfungsgrade zu dem in der Kavität herrschenden Druck	180
B.1	Teststruktur mit einer Abmessung von $100 \times 100 \mu\text{m}^2$	189
B.2	Teststruktur mit einer Abmessung von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$	189
B.3	Teststruktur mit einer Abmessung von $400 \times 800 \mu\text{m}^2$	189
B.4	Teststruktur mit einer Abmessung von $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$	189
B.5	Sensor-Teststruktur mit horizontalen Ätzzugangsöffnungen	190
B.6	Detailaufnahme einer horizontalen Ätzzugangsöffnung	190
B.7	Sensor-Teststruktur mit horizontalen Ätzzugangsöffnungen	190
B.8	Detailaufnahme einer horizontalen Ätzzugangsöffnung	190
B.9	Querschnitt durch eine Nickel-Kappe	190
B.10	Detailaufnahme einer geöffneten Nickel-Kappe	190
C.1	Übersicht über die verwendeten Teststrukturen	191
C.2	Erläuterung der Bezeichnungen in Abbildung C.1	192

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von mikromechanischen Systemen mit mikroelektronischen Schaltungen (nach Hsu [3])	24
2.2	Überblick über angewandte Bondtechniken basierend auf Zwischenschichten	48
4.1	Klassifizierung ebener Flächentragwerke hinsichtlich vereinfachender Modellannahmen [88, 94]	78
4.2	Überblick über die Lagerungsarten von Platten und die dazugehörigen Randbedingungen [88]	81
5.1	Parameter der PECVD-Anlage „P 5000“	96
5.2	Parameter der RIE-Anlage „Plasmalab System 100 ICP“	97
5.3	Parameter des Mikrowellen-Plasmastrippers „300“	97
5.4	Parameter der Trockenätzanlage „XPL 251“	97
5.5	Zusammensetzung des Nickelbades „Norma“	99
5.6	Übersicht über die verwendeten Prozessparameter bei der Abscheidung von Siliziumoxid und Siliziumnitrid mittels PECVD	106
5.7	Veränderung der Schichtspannung in LDR-SiO unterschiedlicher Dicke nach Temperaturbehandlungen und Lagerungen bei Raumtemperatur . . .	110
5.8	Zusammensetzung der für die Spannungsmessungen verwendeten Schichtsysteme	114
5.9	Zusammenstellung der resultierenden Eigenspannungen der Schichtsysteme aus Tabelle 5.8 nach den jeweiligen Prozessschritten	116
5.10	Eigenspannungen in den Schichtstapeln nach der galvanischen Abscheidung des Nickels und nach der Temperung B bis 200 °C in Abhängigkeit der Schichtdicke des Nickels und der Konzentration des BFL im Elektrolyten .	119

5.11	E-Modul und Bruchfestigkeit der verwendeten Materialien	120
5.12	Einfluss von Tempertaurobehandlungen auf die Haftfestigkeit des Schichtsystems Ti/Cu/Ni, die Ermittlung der Haftfestigkeit erfolgte mittels Tape-test (Anhang A)	121
5.13	Prozessparameter für die CH/CF-Abscheidung auf der PECVD-Anlage P5000	126
5.14	Verwendete Schichtdicke des CF-Polymers um eine Grabenöffnung von gegebener Breite zu verschließen	131
5.15	Vergleich der für den Grabenverschluss notwendigen Abscheideparameter für unterschiedliche Prozesse und Materialien	131
5.16	Parameter des verwendeten Oxidätzprozesses und Startparameter für die Optimierung des Polymerätzprozesses nach [128]	135
5.17	Überblick über den Einfluss der Prozessparameter auf die festgelegten Zielgrößen der Ätzprozessoptimierung	137
5.18	Optimierte Prozessparameter für die anisotrope Strukturierung des CF-Polymers	142
5.19	Prozessparameter für die Isotrope Entfernung des CF-Polymers	144
5.20	Ergebnisse der PE-SiO Abscheidung auf das CF-Polymer für verschiedene Schichtdickenkombinationen bei HDR- und LDR-SiO	148
5.21	Übersicht über die Ergebnisse der interferometrisch gemessenen Schichtkombinationen	162
6.1	Verwendete Schichtkombinationen	174
A.1	Liste der verwendeten Klebebänder	187

Selbständigkeitserklärung

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

KEINE

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorliegenden Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Chemnitz, 24.10.2007

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Thesen

zur Dissertation

„Entwicklung einer Dünnschichtverkappungstechnologie für oberflächennahe Mikrostrukturen“

zur Erlangung des akademischen Grades eines „Dr.-Ing.“
an der Technischen Universität Chemnitz,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

vorgelegt von Danny Reuter
Chemnitz, 24. Oktober 2007

1. Die industrielle Massenfertigung von Mikrosystemen benötigt zuverlässige, effektive und kostengünstige Packagingverfahren. Für mikromechanische Systeme erfordert dies die Verkappung der Strukturen auf Waferebene.
2. Die Dünnschichtverkappung von mikromechanischen Strukturen weist gegenüber der Verkappung durch Waferbondverfahren insbesondere in der Massenfertigung einen deutlichen Kostenvorteil auf. Die Gründe dafür sind die Reduzierung der Chipfläche, die zu einer Steigerung der Waferausbeute führt, sowie die Verringerung der Chiphöhe, welche die Verwendung flacher Standardgehäuse ermöglicht.
3. Dünnschichtverkappungstechnologien auf Basis von Siliziumoxid als Opferschicht sind aufgrund der Opferschichtätzung mittels Fluorwasserstoff nicht kompatibel mit Mikrostrukturen die Siliziumoxid, Aluminium oder andere gegenüber Fluorwasserstoff nicht resistente Materialien enthalten.
4. Die Verwendung von organischen Opferschichtmaterialien ermöglicht die trockenchemische Opferschichtätzung in reinem Sauerstoffplasma. Dieser Prozess ist mit einer Vielzahl von in der Mikrotechnologie verwendeten Materialien kompatibel und stellt keine Gefährdung von beweglichen Mikrostrukturen dar. Dünnschichtverkappungstechnologien auf Basis einer organischen Opferschicht sind deshalb auf vielfältige Mikrotechnologien anwendbar.

5. Plasmapolymere, die mittels PECVD-Prozessen abgeschieden werden können, eignen sich sehr gut für die Verwendung als Opferschicht in einer Dünnschichtverkapptungstechnologie. Die Prozessierung erfolgt trockenchemisch und die typische Abscheidecharakteristik von PECVD-Prozessen ermöglicht den Verschluss von Öffnungen mit hohem Aspektverhältnis an der Waferoberfläche.
6. Das verwendete Fluor-Kohlenstoff-Polymer erreicht eine Temperaturstabilität von über 400°C. Für nachfolgende Prozesse zur Erzeugung der Dünnschichtkappe können deshalb neben der elektrochemischen Abscheidung und der physikalischen Dampfphasenabscheidung auch die plasmagestützte chemische Dampfphasenabscheidung verwendet werden.
7. Eine anisotrope Strukturierung von dicken Fluor-Kohlenstoff-Polymerschichten ist mittels reaktiven Ionenätzens im Sauerstoffplasma möglich. Ausreichend hohe Ätzraten können durch die Verwendung eines induktiv gekoppelten Plasmas erzielt werden.
8. Die Entfernung des Opferpolymers erfolgt durch einen isotropen Ätzprozess im Sauerstoffplasma mit Ätzraten von bis zu 10 µm/min. Beeinflusst wird die Ätzrate durch die thermische Vorbehandlung des Fluor-Kohlenstoff-Polymers. Eine Temperung oberhalb von 350°C führt zu einer höheren Vernetzung verbunden mit einer steigenden Temperaturstabilität, was sich in einer reduzierten Ätzrate niederschlägt. Die Geometrie der Ätzöffnungen hat bis zu einem Aspektverhältnis von 2:1 praktisch keinen Einfluss.
9. Die Realisierung der Dünnschichtkappe mit PECVD-Siliziumnitrid als Bestandteil eines Schichtstapels ist vorteilhaft, da die resultierende Schichtspannung in der Kapfenstruktur dadurch gezielt eingestellt werden kann. Dies ist möglich, weil die Schichtspannung in diesem Material von der verwendeten Plasmaleistung abhängt und durch die Verwendung eines *Dual-Frequency*-Prozesses kontrollierbar ist.
10. Die primären Entwurfskriterien für die Dimensionierung der Dünnschichtkappe sind die unter einer äußeren Last auftretende maximale Auslenkung in Richtung der Mikrostruktur und die dabei auftretenden mechanischen Zugspannungen. Für die Modellbildung kann die Kappe als umlaufend eingespannte Rechteckplatte betrachtet werden.
11. Da für die komplexe Struktur der Dünnschichtkappe keine geschlossene analytische Lösung existiert, wurde mit Hilfe numerischer Modelle eine analytische Näherungslösung für die Berechnung der maximalen Durchbiegung hergeleitet. Das Ergebnis

konnte anhand von FEM-Simulationen und Messungen an Teststrukturen verifiziert werden.

12. Verschiedene Schichtstapel aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid und Aluminium wurden erfolgreich zur Herstellung von Dünnschichtkappen mit einer Gesamtdicke zwischen $5\text{ }\mu\text{m}$ und $12\text{ }\mu\text{m}$ bei einer maximalen Fläche der freitragenden Platte von $400\times 1200\text{ }\mu\text{m}^2$ verwendet.
13. Durch die Integration von Stützsäulen kann die bei einer Drucklast effektiv wirkende Plattenfläche reduziert werden. Dadurch ist es möglich, trotz technologisch begrenzter Schichtdicke der Kappenstruktur auch für hohe Druckunterschiede eine ausreichende mechanische Stabilität zu gewährleisten.
14. Die vorgestellte Dünnschichtverkappungstechnologie auf Basis eines Fluor-Kohlenstoff-Polymers als Opferschicht in Verbindung mit einem Schichtstapel aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid und Aluminium konnte erfolgreich zur Verkapselung von Beschleunigungssensoren in AIM-Technologie angewendet werden.
15. Eine für den Schutz der Mikrostrukturen ausreichende Hermetizität der Dünnschichtkappe konnte anhand von Dämpfungsmessungen an kapazitiven AIM-Beschleunigungssensoren nachgewiesen werden. Die Messungen erfolgten mittels der 2-f-Methode, die eine elektrostatische Anregung eines Feder-Masse-Systems bei gleichzeitiger kapazitiver Detektion der Bewegungsamplitude ermöglicht.

Lebenslauf

Danny Reuter

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 26. Mai 1974
Geburtsort: Karl-Marx-Stadt (jetzt Chemnitz)
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet

Schulbildung

09/80 - 10/89 Polytechnische Oberschule „Friedrich Schiller“ in Karl-Marx-Stadt
10/89 - 06/91 Realschule Böklund (Schleswig Holstein)
08/91 - 06/94 Fachgymnasium Schleswig – technischer Zweig

Wehrdienst

10/94 - 09/95 Grundwehrdienst in Rendsburg

Studium

10/96 - 03/02 Studium der Elektrotechnik an der TU Chemnitz
Studienrichtung: Mikrosystem- und Gerätetechnik
Abschluss: Diplomingenieur Elektrotechnik, Prädikat: „sehr gut“
08/00 - 12/00 Auslandssemester an der Königlich Technischen
Hochschule in Stockholm (Schweden)
02/01 - 06/01 Praktikum bei Infineon Technologies in München
09/01 - 03/02 Diplomarbeit: „Flexible Gelenke aus Silizium“
Prädikat: „sehr gut“

Berufliche Tätigkeit

seit 04/02 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mikrotechnologien
der TU Chemnitz, Arbeitsgebiet: Entwurf und Packaging von
mikromechanischen Bauelementen in Oberflächentechnologie

Chemnitz, den 24.10.2007

Eigene Veröffentlichungen und Veröffentlichungen mit eigener Beteiligung

REUTER, Danny; BERTZ, Andreas; WERNER, Thomas; NOWACK, Markus; GESSNER, Thomas: Thin Film Encapsulation of Microstructures using sacrificial CF-Polymer. In: *Proceedings of the Transducers '07*. Lyon, France, 2007, S. 343–346

REUTER, Danny; BERTZ, Andreas; GESSNER, Thomas: Thin Film Encapsulation of High Aspect Ratio Microstructures using sacrificial CF-Polymer. In: *Smart Systems Integration 2007*. Paris, France, 2007, S. 597–599

NOWACK, Markus; REUTER, Danny; RENNAU, Michael; BERTZ, Andreas; GESSNER, Thomas: Wafer-level active testing of capacitive inertial sensors. In: *MicroNanoReliability 2007*. Berlin, 2007.

REUTER, Danny; BERTZ, Andreas; BILLEP, Detlef; SCHEIBNER, Dirk; DÖTZEL, Wolfram; GESSNER, Thomas: In-Process Gap Reduction of Capacitive Transducers. In: *Sensors and Actuators, A* 126 (2006), Nr. 1, S. 211–217

REUTER, Danny; BERTZ, Andreas; BILLEP, Detlef; SCHEIBNER, Dirk; BUSCHNAKOWSKI, Stephan; DÖTZEL, Wolfram; GESSNER, Thomas: In-Process Gap Reduction of Capacitive Transducers. In: *Proceedings of the Transducers '05*. Seoul, Korea, 2005, S. 1358–1361

LOHMANN, Christian; BERTZ, Andreas; REUTER, Danny; KUECHLER, Matthias; GESSNER, Thomas: Validierung der AIM-Technologie: Darstellung der Leistungsfähigkeit anhand hergestellter Sensor- und Aktorstrukturen. In: *7. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik- Mikromechanik & Mikroelektronik*, Chemnitz, 2005.

BILLEP, Detlef; HILLER, Karla; FRÖMEL, Jörg; TENHOLTE, Dirk; REUTER, Danny; DÖTZEL, Wolfram; GESSNER, Thomas: Post-Processing Gap Reduction in a Micromachined Resonator for Vacuum Pressure Measurement. In: *Proceedings of SPIE Vol. 5836 Smart Sensors, Actuators and MEMS II*. Seville, Spain, 2005, S.341–350

LOHMANN, Christian; BERTZ, Andreas; REUTER, Danny; KUECHLER, Matthias; GESSNER, Thomas: Flexible Herstellung und Charakterisierung von Inertialsensoren basierend auf der AIM- Technologie. In: *Tagungsband Mikrosystemtechnik Kongress 2005*, VDE Verlag. – ISBN 978–3–8007–2926–5, S.539–542

SCHEIBNER, Dirk; MEHNER, Jan; REUTER, Danny; GESSNER, Thomas; DÖTZEL, Wolfram: A spectral vibration detection system based on tunable micromechanical resonators. In: *Sensors and Actuators, A* 123–124 (2005), S. 63–72

LOHMANN, Christian; REUTER, Danny; BERTZ, Andreas; GESSNER, Thomas: High Aspect Ratio Micromachining using the AIM Technology. In: MICHEL, Bernd (Hrsg.) ; ASCHENBRENNER, Rolf (Hrsg.): *The World of Electronic Packaging and System Integration*, Dresden : ddp goldenbogen Verlag, 2005. – ISBN 3–932434–76–5, S.544–548

REUTER, Danny; SCHWENZER, Gunther; BERTZ, Andreas; GESSNER, Thomas: Selective adhesive bonding with SU-8 for zero-level-packaging. In: *Proceedings of SPIE Vol. 5650 Micro- and Nanotechnology: Materials, Processes, Packaging and Systems II*. Sydney, Australia, 2005, S.163–171

BERTZ, Andreas; BUSCHNAKOWSKI, Stephan; BILLEP, Detlef; GESSNER, Thomas; REUTER, Danny: Device for Gap Adjustment. Patent WO/2006/058516

SCHEIBNER, Dirk; MEHNER, Jan; REUTER, Danny; KOTARSKY, Ulf; GESSNER, Thomas; DÖTZEL, Wolfram: Characterization and Self Test of Electrostatically Tunable Resonators for Frequency Selective Vibration Measurements. In: *Sensors and Actuators, A* 111 (2004), Nr. 1, S. 93–99

LOHMANN, Christian; GOTTFRIED, Knut; BERTZ, Andreas; REUTER, Danny; HILLER, Karla; KUHN, Michael; GESSNER, Thomas: MEMS Metallization In: *Materials Research Society Symposium Proceedings*. Vol. 812 (2004), S.233–242

REUTER, Danny; SCHWENZER, Gunther; FRÖMEL, Jörg; BERTZ, Andreas; GESSNER, Thomas: Selektives Niedertemperaturbonden mit SU-8 für Wafer-Level-Verkappung von mikromechanischen Strukturen. In: *6. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik-Mikromechanik & Mikroelektronik*, Chemnitz, 2003.

LOHMANN, Christian; BERTZ, Andreas; KUECHLER, Matthias; REUTER, Danny; GESSNER, Thomas: Mechanical reliability of MEMS fabricated by a special technology using standard silicon wafers. In: *Proceedings of SPIE Vol. 4980 Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II*. San Jose, CA, USA, 2003, S.200–207

GÄRTNER, Eva; FRÜHAUF, Joachim; JÄNSCH, Erhard; REUTER, Danny: Flexural solid hinges etched from silicon. In: *Proceedings of the EUSPEN*. Aachen, 2003, S.43–46

SCHEIBNER, Dirk; MEHNER, Jan; REUTER, Danny; GESSNER, Thomas; DÖTZEL, Wolfram: Tunable Resonators with Electrostatic Self Test Functionality for Frequency Selective Vibration Measurements. In: *Proceedings of the MEMS 2003* Kyoto, Japan, 2003, S. 526–529