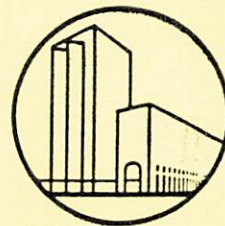


HAUS DER TECHNIK E.V.

Außeninstitut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen-
Kooperationspartner der Universität-GHS Essen, der Westfälischen Wilhelms-
Universität Münster und der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn



VERANSTALTUNGSUNTERLAGEN

MIKROTECHNIK IM AUTOMOBILBAU

Leitung

Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Termin

Dienstag, 13. Februar 1996

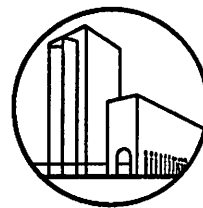
Mittwoch, 14. Februar 1996

Veranstaltungsnummer

30-220-056-6

Veranstaltungsort

Essen



Hinweise für unsere Teilnehmer

Namensschild

Wir bitten Sie das Namensschild im Haus der Technik zu tragen.

Namensschilder, die Sie nach Schluß der Veranstaltung nicht mehr benötigen, bitten wir in den Sammelbehälter an der Garderobe zu werfen, „der Umwelt zuliebe“.

Gutscheine für Mittagessen

Bitte vergessen Sie nicht, den Gutschein für das Mittagessen in das angegebene Restaurant mitzunehmen. Ohne diesen Gutschein können Sie nur auf eigene Rechnung dort am Mittagessen teilnehmen. Der Gutschein gilt für ein Mittagessen mit einem alkoholfreien Kaltgetränk am Veranstaltungstag im angegebenen Restaurant.

Für die Bekanntgabe der Pausenzeiten und des Restaurants beachten Sie bitte die Hinweisschilder im Hörsaal. (Lage der Restaurants siehe Lageplan auf der Rückseite)

Pausenregelung

Kaffee und sonstige Getränke erhalten Sie in den Vor- und Nachmittagspausen im Foyer, neben der Garderobe, 2. Etage. Wir bitten Sie, die Speisen und Getränke nicht mit in die Vortragsräume zu nehmen. In den Pausenzeiten werden die Hörsäle verschlossen.

Für Ihr Verständnis danken wir Ihnen.

Öffentlicher Fernsprecher/Fax

2. Etage (gegenüber den Toiletten)

Fahrpläne der Deutschen Bahn AG

2. Etage (neben den Toiletten)

Ausstellungen

Beachten Sie bitte auch die Ausstellungen in den Wandelgängen sowie die Schaukästen.

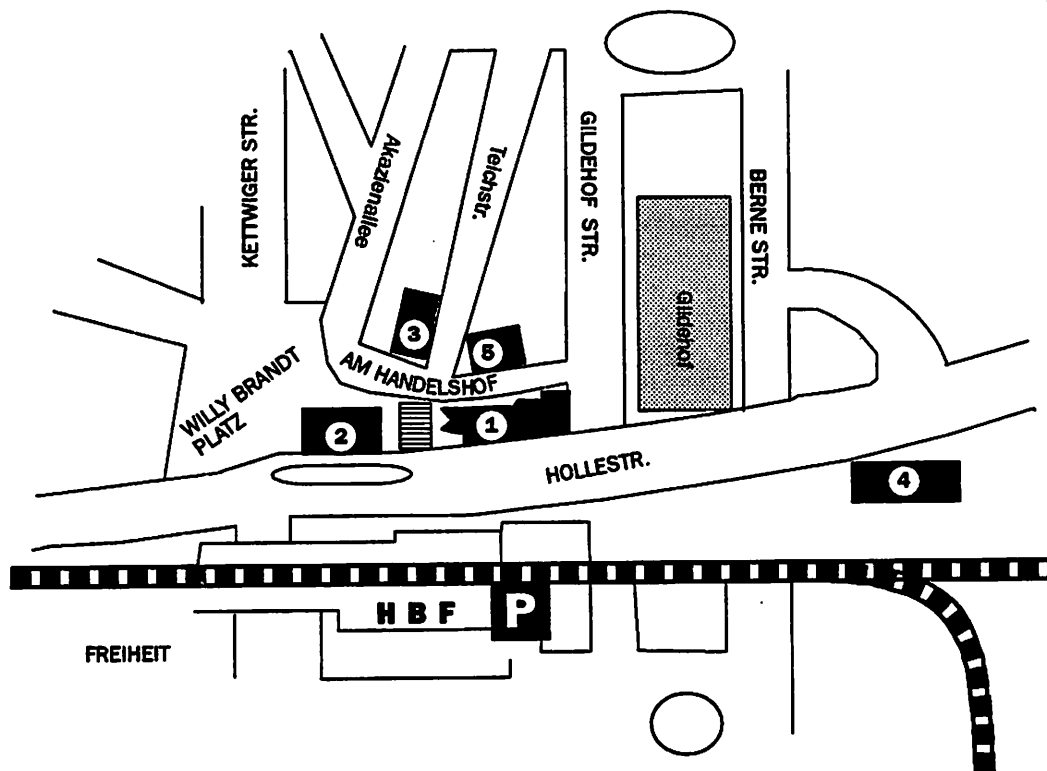
Parkmöglichkeit

BP-Parkhaus Südseite Hbf., Telefon 0201/200870, geöffnet von 5.⁰⁰ Uhr früh bis 1.⁰⁰ Uhr nachts. Sie erhalten den HDT-Sondertarif, wenn Sie Ihre Parkkarte in dem dafür vorgesehenen Gerät markieren. Das Gerät steht im HDT-Gebäude auf der 2. Etage neben der Garderobe. (Lage des Parkhauses siehe Lageplan auf der Rückseite)

Wir wünschen Ihnen einen angenehmen Aufenthalt in unserem Hause und eine erfolgreiche Teilnahme an einer unserer Veranstaltungen.

Haus der Technik e.V.

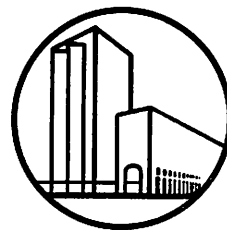
Lageplan



1. Haus der Technik, Hollestraße 1
2. Mövenpick Hotel Handelshof, Am Hauptbahnhof 2
3. Klepenkerl zu Essen, Teichstraße 1
4. Hotel Ibis Essen, Hollestraße 50
5. Hotel Essener Hof, Teichstraße 2
- P. BP-Parkhaus, Hauptbahnhof Südseite

HAUS DER TECHNIK E.V.

Außeninstitut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen



Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

wir freuen uns über Ihr Interesse an dem Veranstaltungsthema und begrüßen Sie an dieser Stelle recht herzlich im Haus der Technik.

Das Haus der Technik ist eine der größten Weiterbildungseinrichtungen in Deutschland mit mehreren Zweigstellen. Gegründet wurde das HDT bereits 1927 als erste Einrichtung dieser Art. Unser umfangreiches Veranstaltungsangebot deckt fast alle Bereiche der Technik und der Wirtschaft ab.

Eine eventuell für Sie interessante Veranstaltungsvorschau ist beigelegt. Bitte lassen Sie diese in Ihrem Betrieb bzw. Ihrer Abteilung umlaufen. Einzelprogramme erhalten Sie direkt unter der Rufnummer 0201/1803-344 kostenlos zugesandt.

Wir wünschen Ihnen einen angenehmen Aufenthalt in unserer Stadt und viel Erfolg bei der Veranstaltung.

Bei weiteren Fragen und Anregungen wenden Sie sich bitte an den Unterzeichnenden.

Mit freundlichen Grüßen
HAUS DER TECHNIK E.V.
i.A.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'H. Hahn', written in a cursive style.

(Dr. H. Hahn)

Mikrotechnik im Automobil – eine Einschätzung des Potentials

Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Technologien der Mikromechanik

Dr. B. Schmidt

Technologien der Mikromechanik

Dr. Bertram Schmidt
Institut für Mikro- und Informationstechnik,
Wilhelm-Schickard-Straße 10,
78052 Villingen-Schwenningen

Inhalt:

- 1. Materialien**
- 2. Technologische Grundlagen**
- 3. Spezifische Technologien:**
 - Bulk-Mikromechanik**
 - Oberflächenmikromechanik**
 - LIGA-Verfahren**
 - Tiefenätzverfahren**
 - Aufbau- und Gehäusetechnik**
- 4. Literaturverzeichnis**

1. Materialien

1.1 Silicium

In der Mikromechanik und Mikosystemtechnik spielt Silicium eine herausragende Rolle. Dies ist sowohl auf die ausgereiften Verfahren der Mikroelektronik als auch auf die Verfügbarkeit von großen und defektfreien Silicium-Einkristallen zurückzuführen. Die elastischen und mechanischen Eigenschaften von Silicium (Bruchgrenze, Knoop-Härte und E-Moduln) sind vergleichbar mit denen von Stahl, wogegen die Dichte etwa mit der von Aluminium vergleichbar ist. Die thermische Leitfähigkeit ist vergleichbar mit der von Molybdän und Wolfram. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Materialeigenschaften verschiedener Materialien /Pet 82/. Die Verfügbarkeit von Silicium ist nahezu unbegrenzt, da ca. 1/3 der Erdrinde aus Silikatverbindungen (Quarzsand, SiO_2) aufgebaut ist, die als Ausgangsmaterial für die Kristallzüchtung dienen.

Materialeigenschaft Material	Bruch-Grenze GPa	E-Modul GPa	Knoop-Härte kg/mm ²	Dichte g/cm ³	Thermische-Leitfähigkeit W/cm K	Thermische Ausdehnung 10 ⁻⁶ /K
Silicium*	7.0	110	850	2.3	1.57	2.3
Diamant*	53.0	1000	7000	3.5	20.00	1.0
SiC*	21.0	700	2480	3.2	3.50	6.4
GaAs*		500		4.9	0.46	6.9
Al ₂ O ₃	15.0	530	2100	4.0	0.50	5.4
SiO ₂	8.4	70	400	2.5	0.014	0.5
Quarz*	1.0	100		2.6	0.14	13.0
Si ₃ N ₄	14.0	390	3486	3.1	0.019	0.8
Stahl	4.0	210	1500	7.9	0.97	12.0
Wolfram	4.0	410	485	19.3	1.78	4.6
Molybden	2.1	340	660	10.3	1.40	5.1
Aluminium	0.2	70	130	2.7	2.36	22.4

* Einkristalle

Tabelle 1: Materialeigenschaften von Silicium und anderen Materialien /Pet 82/

Die strukturelle Perfektion von einkristallinem Silicium ist nahezu ideal. Aufgrund der Einkristallinität können ca. 10-fach höhere Dehnungen als bei polykristallinen Gefüge (Stahl etc.) bei linearem Spannungs-Dehnungs-Verhalten realisiert werden /Elw 93/ (Abb. 1). Im elastischen Bereich tritt bei Silicium kein Kriechen und keine plastische Verformung auf, was zu hohen Lebensdauern bei verschwindender Hysterese führt.

Durch einfache chemische Reaktionen lassen sich eine Reihe von Siliciumverbindungen

herstellen (SiO_2 , Si_3N_4 , SiC etc.) die hervorragende mechanische, dielektrische und thermische Eigenschaften besitzen /Büt 91, Heu 89, Scha 92, Rug 91, Ris 91, Men 92/.

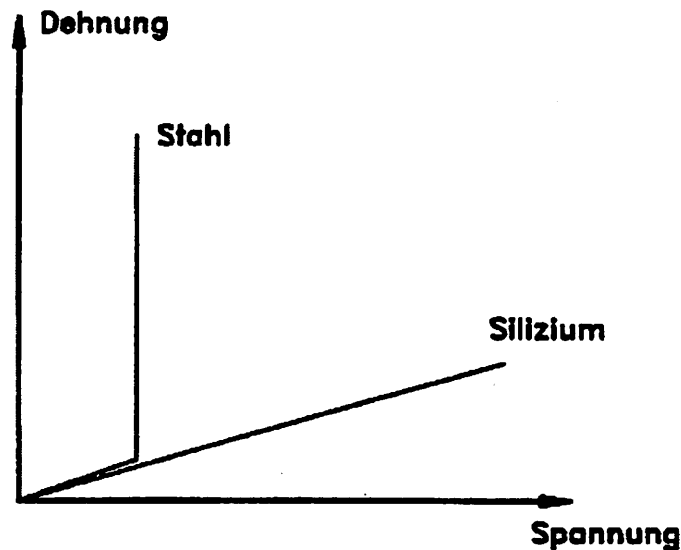


Abb.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Silizium und Stahl (nach /Elw 93/)

Weiterhin steht eine große Anzahl von Dünnschichtmaterialien zur Verfügung, die als mechanische Mikrostrukturen oder als aktive Sensor- oder Aktorschicht mit mikrotechnischen Verfahren auf Silizium abgeschieden werden können.

Ein Hauptvorteil des Siliziums als Material der Mikromechanik ist die Möglichkeit der Integration von mikroelektronischen Komponenten /Ris 94/. Hierbei ist oft z.B. die Integration eines einfachen Inverters als Impedanzwandler oder einer Treiberstufe für einen Aktor von entscheidender Bedeutung für das Gesamtsystem. Bei fast allen anderen Materialien muß bei der Weiterverarbeitung eines Sensorsignals oder der Ansteuerung eines Aktors eine Schnittstelle zur Mikroelektronik in Silizium realisiert werden.

Da die meisten mikromechanischen Bauelemente durch anisotropes Ätzen hergestellt werden, ist die kristallographische Orientierung der Silizium-Scheiben (Wafer) ein wichtiger Parameter. Während in der Mikroelektronik die Wafergröße derzeit bei 10 Zoll liegt, hat sich in der Mikromechanik ein Waferdurchmesser von 100 mm als Quasistandard etabliert.

Für Silizium-Substrate, die für mikromechanische Bauelemente geeignet sind, müssen die Spezifikationen anhand der Anwendung erstellt werden. Wichtige Unterschiede sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Parameter	Definition	IC-Anwendungen	Mikromechanik
Orientation	Fehlorientierung in Grad	$\pm 1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$
Orientatierung der Flats	Fehlorientierung in Grad	$\pm 1^\circ$	$\pm 0,2^\circ$
Politur	—	Einseitig	Doppelseitig
Dickenschwankung (TTV)	$d_{\max} - d_{\min}$	4 - 10 μm	$< 2 \mu\text{m}$
Dotierstoffkonzentration	Abweichung in %	$\pm 10 - 35 \%$	$\pm 100 \%$

Tabelle 2: Wafer-Anforderungen für Mikroelektronik und Mikromechanik

Im Vergleich zu mikroelektronischen Siliciumwafern, bei denen der Preis pro Wafer bei ca. 20 DM (100 mm Durchmesser) liegt, reichen die Waferkosten für die Mikromechanik von ca. 80 DM für doppelseitig polierte Wafer mit einem TTV von 4 μm bis hin zu ca. 800 DM pro Wafer für SOI-beschichtete Scheiben.

1.2 Weitere Materialien

Neben Silizium spielen auch andere Materialien eine wichtige Rolle in der Mikromechanik /Büt 91, Men 92/. Dies sind zum einen Materialien, die in der Optoelektronik eingesetzt werden (GaAs, AlGaAs, InP etc.) und für die entsprechende Fertigungsverfahren und Substratverfügbarkeit vorhanden ist. Daneben ist einkristalliner Quarz ein wichtiger Werkstoff der Mikromechanik, vor allem für resonante Kraftsensoren und Gyroskope. Gläser mit an Silicium angepassten Ausdehnungskoeffizienten (z.B. Pyrex-Glas) spielen für die Aufbautechnik mit anodischem Bonden eine wichtige Rolle /Scha 92, Ris 94/. Auch photostrukturierbare Gläser (z.B. FOTURAN) haben eine gewisse Bedeutung in der Mikromechanik erlangt.

Für die LIGA-Technik /Men 92/ (LIGA = Lithographie, Galvanik und Abformung) sind galvanisch abscheidbare Metalle (Nickel, Gold etc.) von besonderer Bedeutung. Daneben sind spritzbare Kunststoffe für die Massenfertigung mit LIGA wichtig.

Da Mikrosysteme derzeit meist eine Kombination feinwerktechnischer Funktionen und mikrotechnischer Bauelemente sind, spielen auch alle Materialien der Feinwerktechnik eine Rolle, wie z.B. Keramiken, Stahl, Glas, Kunststoffe, Leiterplatten, Lote, Dickschichtpasten etc.

2. Technologische Grundlagen

2.1 Prozeßablauf

Die mikrotechnische Herstellung von Bauelementen und Strukturen auf der Basis von Wafermaterialien (Silicium, GaAs, Gläser, Quarz etc.) besteht in der Regel aus einer Sequenz sich wiederholender Arbeitsschritte /Büt 91/. Nach dem Einspeisen der Wafer in die Prozeßlinie werden üblicherweise die Prozeßschritte:

- *Schichtabscheidung bzw. Schichtmodifikation*
- *Strukturerzeugung mithilfe lithographischer Verfahren*
- *Strukturübertragung mit Ätzverfahren*

entsprechend der Anzahl der Maskenebenen ein- bis mehrmals durchlaufen. Ist die vorgesehene Anzahl von Prozessequenzen auf dem Wafer erfolgt, so können weitere Schritte sein: Test auf Waferebene, Wafer-Bondverfahren, Sägen und Vereinzeln der Chips, Aufbau- und Gehäusetechnik. Dieser Ablauf gilt sowohl für die Mikromechanik als auch für die Mikroelektronik.

2.1 Schichtabscheidung und Schichtmodifikation

Für die Herstellung mikroelektronischer und mikromechanischer Bauelemente wird eine Vielzahl von Schichtenabscheidungsverfahren eingesetzt. Allerdings unterscheiden sich die Eigenschaften dünner Schichten oftmals stark von denen des Vollmaterials. Aufgrund von Struktur, Morphologie, Kristallanordnung und der chemischen Zusammensetzung können dünne Schichten einzigartige physikalische Eigenschaften besitzen, die durch die Prozeßparameter wie Druck, Temperatur, Leistung etc. beeinflußt werden können. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über verschiedene Abscheide- und Modifikationsverfahren, von denen einige im folgenden näher betrachtet werden.

Prozess	Beispiel	Trägermedium	Schicht-Teilchen	Teilcheninjektion ins Medium	Oberflächenreaktion	Transportmechanismus
Oxidation	SiO ₂ auf Si	fest	Atome	Diffusion vom Substrat	Chemische Reaktion an der Oberfl.	Diffusion
Ionen-Implantation	Bor in Si	Vakuum	Ionen	Plasma oder Ionenquelle	Implantation	Freier Flug im Vakuum
CVD*	Si ₃ N ₄ auf Si	gasförmig	Moleküle	Mischung	Chemische Reaktion a.d. Oberfläche	Diffusion
LPE*	GaAs	flüssig	Atome/Moleküle	wirkt als sein eigener Träger	Kristall-Wachstum	Diffusion
MBE*	GaAs	Vakuum	Atome/Moleküle	Verdampfung aus Quelle	Kondensation	Freier Flug im Vakuum
Aufdampfen	Al auf Si	Vakuum	Atome	Aufheizen des Materials	Kondensation	Diffusion
Sputtern	Au auf Si	gasförmig	Atome	Beschuß durch pos. Ionen des Trägergases	Kondensation	Diffusion

*CVD – Chemical Vapour Deposition, Chemische Gasphasenabscheidung

*LPE – Liquid Phase Epitaxy, Flüssigphasenepitaxie

*MBE – Molecular Beam Epitaxy, Molekularstrahlepitaxie

Tabelle 3: Übersicht der gängigsten Abscheidungsverfahren

2.1.1 Mechanische Eigenschaften dünner Schichten

Die mechanischen Eigenschaften dünner Schichten hängen ab von der Reinheit, der Mikrostruktur, der Dichte, der Defektkonzentration, der Korngröße, von internen Spannungen und anderen Faktoren, die mit Prozeßparametern und Wachstumsbedingungen zu tun haben.

Die am deutlichsten beobachtbaren Parameter sind innere Spannungen [Ris 94]. Bei hohen Gesamtspannungen (= Summe der äußeren und inneren Spannungen) kann die abgeschiedene Schicht das Substrat deformieren. Druckspannungen führen zu einem Aufbuckeln der Substrate, wogegen Zugspannungen bei Überschreitung der elastischen Grenzen die Schichten abplatzen lassen. Bei hohen inneren Spannungen kann es zu plötzlichen Ausfällen kommen, die durch geringe äußere Spannungen ausgelöst werden können. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten kommt es zu zusätzlichen thermischen Verspannungen zwischen Schicht und Substrat.

Aus diesem Grund sind Schichten mit hohen inneren Spannungen generell für mikro-mechanische Anwendungen unerwünscht. Zielvorgabe ist es hier, Schichten mit definierten Spannungen oder spannungsfrei abzuscheiden.

2.1.2 Thermische Oxidation

Die thermische Oxidation dient zur Erzeugung von SiO_2 -Schichten auf dem Silicium-Substrat. Beim Oxidationsvorgang /Büt 91, Rug 91, Scha 92/ wird bei einer erzeugten Schichtdicke d vom Silicium $0.44 d$ verbraucht. Die Temperaturen für die Oxidation können zwischen 700 und 1200 °C liegen. Man unterscheidet die sog. Trockenoxidation, die ausschließlich Sauerstoff, teilweise mit geringen Zugaben von HCl verwendet und die Feuchtoxidation, bei der Wasserdampf zugesetzt wird. Sinnvolle erreichbare Oxiddicken liegen bei der Trockenoxidation bei ca. $0,2 \mu\text{m}$ (10 h bei 1000°C) und bei der Feuchtoxidation bei ca. $2 \mu\text{m}$ (10 h bei 1050°C). Typische Oxiddicken als Funktion der Abscheidezeit bei verschiedenen Abscheidetemperaturen sind in Abb. 2 gezeigt.

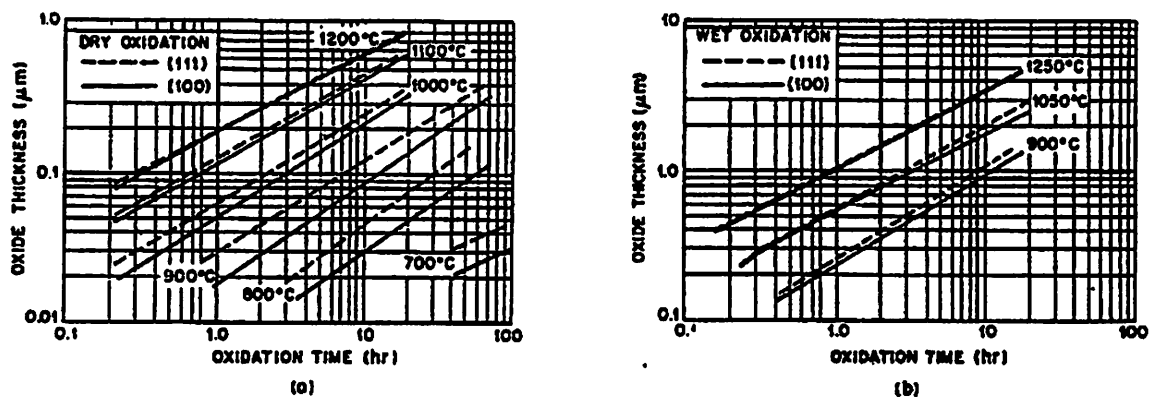


Abb.2: a) Trockenoxidation b) Feuchtoxidation

2.1.3 Diffusion

Die Diffusion von Fremdatomen ist vor allem für die Mikroelektronik von großer Bedeutung. Damit lässt sich die Leitfähigkeit und der Leitfähigkeitstyp von Halbleitermaterial gezielt einstellen oder ändern. Übliche Verfahren sind:

- Diffusion aus einer dotierten Oxidquelle (Feststoffdotierung)
- Diffusion aus einer chemischen Gasquelle bei hohen Temperaturen
- Diffusion und Ausheilen bei der Ionenimplantation.

Als Dotierstoffe werden standardmäßig Bor zur p-Dotierung und Phosphor oder Arsen zur n-Dotierung eingesetzt. Diese Dotierstoffe sind als Gas, Flüssigkeit oder Feststoffe verfügbar /Büt 91, Scha 92/. Für die Diffusion kann als maximale Konzentration an der Oberfläche die Löslichkeitsgrenze der jeweiligen Dotierung bei gegebener Temperatur erreicht werden. In Abb.3 sind die Löslichkeitsgrenzen einiger Dotierstoffe in Silicium dargestellt.

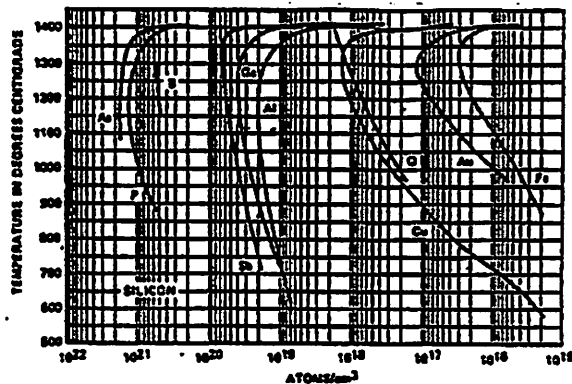


Abb.3: Löslichkeitsgrenzen von Dotierstoffen in Silicium

Aufgrund der Physik des Diffusionsvorganges verteilen sich die Dotierstoffe im Silicium und ergeben bei Diffusion aus unerschöpflicher Quelle (z.B. Gasdotierung) ein Fehlerfunktionsprofil, bei Diffusion aus der erschöpflichen Quelle ein Gausprofil. Typische Profile sind in Abb.4 gezeigt /Büt 91/. Wesentlich ist, daß bei der Dotierung durch Diffusion die Konzentration an der Oberfläche mit ihrem Maximalwert beginnt und dann im Silcium abfällt. Dies stellt eine Beschränkung für mikromechanische Anwendungen dar.

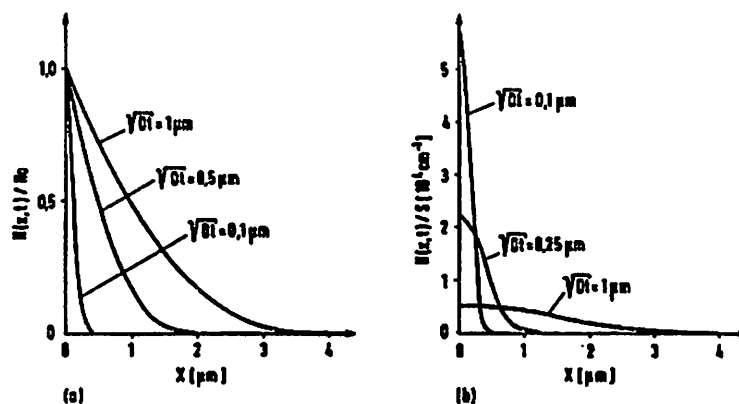


Abb.4: Dotierprofile a) erschöpfliche Quelle
b) unerschöpfliche Quelle (nach Büttgenbach /Büt 91/)

Für die Mikromechanik werden Dotierungen hauptsächlich als Ätzstopp eingesetzt. Dazu sind hochbordotierte Schichten für direkten Ätzstopp oder pn-Übergänge für elektrochemische Verfahren geeignet.

2.1.4 Ionenimplantation

Zur definierten Dotierung in Silicium hat die Ionenimplantation gegenüber der Diffusion gewisse Vorteile. Zunächst existiert hier keine Obergrenze der Dotierung durch die Löslichkeitsgrenze wie bei der Diffusion. Weiterhin sind Reproduzierbarkeit und Homogenität wesentlich besser als bei der Diffusion. Die Dotierkonzentration kann durch Integration des Ionenstromes ständig überwacht werden. Die Eindringtiefe und das Profil kann durch Ionenenergie und Temperaturbehandlung in weiten Grenzen eingestellt werden. Eine typische Implanteranordnung ist in Abb. 5 gezeigt.

Typische Implantationsprofile sind in Abb. 6 gezeigt.

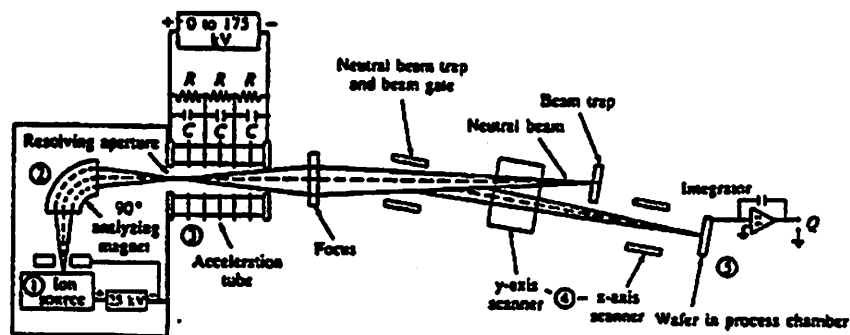


Abb.5: Schema eines Ionenimplanters

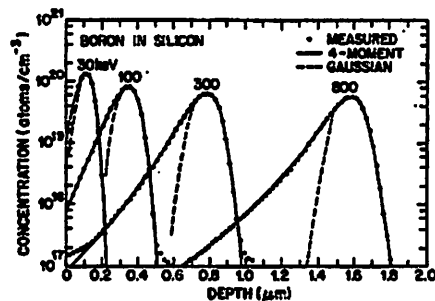


Abb.6: Implantationsprofile von Bor in Silicium
im Bereich 30 - 800 KeV

Für die Mikromechanik ist die Ionenimplantation neben der Herstellung von Dotierkonzentrationen für Ätzstoppverfahren eine wichtige Anwendung auch die Schichtmodifikation. So lassen durch Ionenimplantation von Atomen geeigneter Größe sowohl Zug- als auch Druckspannungen in Schichten kompensieren /San 92/. Ein Beispiel zeigt Abb.7.

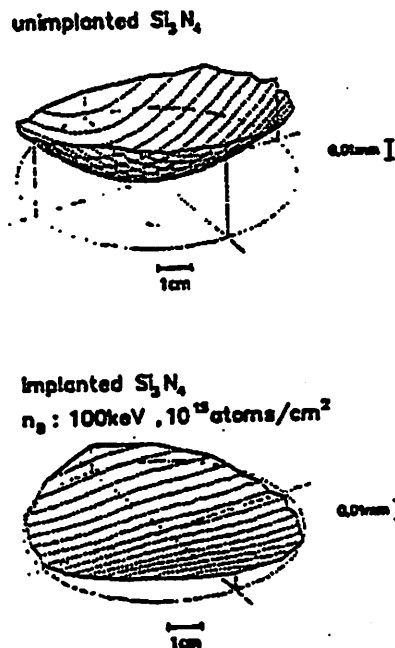


Abb.7: Stresskompensation in Siliciumnitridschichten durch Ionenimplantation (nach /San 92/).

2.1.5 Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)

Die chemische Gasphasenabscheidung ist eine der Schlüsselprozesse in der Halbleiterfertigung. Die Verfahren, die in der Mikromechanik eingesetzt werden, unterscheiden sich teilweise in der Prozeßführung mit dem Ziel, die Schichtspannungen besser kontrollieren zu können /Ris 94/. Bei CVD-Prozessen werden dünne Schichten an der Oberfläche eines Substrates durch chemische Zersetzung oder Reaktion von gasförmigen Reaktanten erzeugt. Die Reaktionsgase werden in eine Reaktionskammer eingebracht, in der sie aus der Gasphase direkt auf den Substraten abgeschieden werden. Der CVD- Vorgang kann schematisch mit den folgenden Reaktionschritten beschrieben werden (Abb.8):

- 1 Transport der Reaktanten in die Grenzschicht
- 2 Diffusion der Reaktanten in der Grenzschicht zur Substratoberfläche
- 3 Adsorption der Reaktanten an die Substratoberfläche
- 4 Chemische Reaktion an der Oberfläche
- 5 Keimbildung, Migration, Einbau der festen Reaktionsprodukte in den Gitterverband, Bildung der flüchtigen Reaktionsprodukte
- 6 Desorption der flüchtigen Reaktionsprodukte
- 7 Diffusion der flüchtigen Reaktionsprodukte durch die Grenzschicht
- 8 Abtransport der flüchtigen Reaktionsprodukte

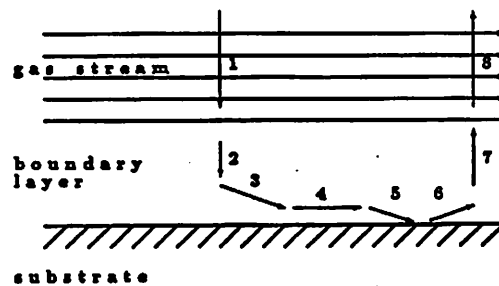


Abb.8: CVD-Vorgang (schematisch)

Für die Wachstumsrate der Schicht ist stets der langsamste Reaktionsschritt der geschwindigkeitsbestimmende Schritt (siehe auch Goethe: Das Flekma regiert die Welt!). Die Reaktion kann durch Wärme, Plasma oder Laserstrahlung angeregt werden:

thermische Anregung:	APCVD (Atmospheric Pressure CVD) LPCVD (Low Pressure CVD)
Plasma:	PECVD (Plasma Enhanced CVD)
Laser:	Laser-CVD

Typische CVD-Prozesse sind in Tabelle 4 gezeigt /Büt 91/:

Prozess (Druckbereich)	CVD-Schicht	Gase oder Reaktion	Temperatur
APCVD (10^5 Pa)	Poly-Silicium SiO ₂ aus Silanoxid Si- Epitaxie	SiH ₄ → Si + 2 H ₂ SiH ₄ + O ₂ → SiO ₂ + H ₂ SiH ₂ Cl ₂ → Si + 2 HCl	650°C 430°C 1050- 1200°C
LPCVD (10-100 Pa)	Poly-Silicium SiO ₂ (TEOS) SiO ₂ (LTO) SiO ₂ (HTO) PSG Si ₃ N ₄	SiH ₄ → Si + 2 H ₂ Si(OC ₂ H ₅) → SiO ₂ + Gase SiH ₄ + O ₂ → SiO ₂ + 2H ₂ SiH ₂ Cl ₂ + 2N ₂ O → SiO ₂ + Gase SiH ₄ + O ₂ → SiO ₂ + 2H ₂ 2PH ₃ + 4O ₂ → P ₂ O ₅ 3 SiH ₂ Cl ₂ + 4 NH ₃ → Si ₃ N ₄ + 6HCl + 6H ₂	630°C 700-730°C 430°C 900°C 430°C 800°C
PECVD (10-100 Pa)	SiO ₂ (Plasmaox.) Si ₃ N ₄ (Plasma- Nitrid)	SiH ₄ + 4N ₂ O → SiO ₂ + Gase 3 SiH ₄ + 2NH ₃ + N ₂ → Si ₃ N ₄ + 9H ₂	350°C 300°C

Tabelle 4: Typische CVD-Schichten

2.1.6 Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)

Bei der PVD findet keine Oberflächenreaktion mit dem Substrat statt; der Prozeß läuft nach dem folgenden Schema ab:

- a) Verdampfen des abzuscheidenden Materials
- b) Transport des Dampfes zum Substrat
- c) Kondensation des Dampfes auf dem Substrat.

Beim Verdampfungsprozess werden durch Temperaturerhöhung des zu verdampfenden Materials die Sättigungsdampfdrucke der einzelnen Species entsprechend erhöht. Für eine akzeptable Verdampfungsrate muß ein Sättigungsdampfdruck von mindestens 1 Pa eingestellt werden [Büt 91]. Dies kann durch Widerstandsheizter, Strahlung, Strom, Elektronenstrahl, Laserstrahlung oder Gasentladung erfolgen. Typische Verdampferquellen sind in Abb. 9 gezeigt.

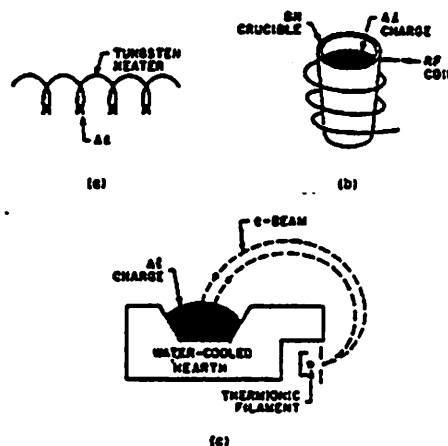


Abb.9: Verdampferquellen: a) Widerstandsheizung b) induktive Heizung c) Elektronenstrahlverdampfer

Beim Sputtern werden positive Gasionen in einer Gasentladung erzeugt, die auf das Targetmaterial beschleunigt werden und dort Atome aus einem Target herausschlagen. Diese Atome schlagen sich auf dem Substrat nieder. Bezüglich des Überganges Festkörper-Gasphase ist das Sputtern relativ ineffektiv, aber die Schichthftung auf dem Substrat ist besser. Abb. 10 zeigt schematisch eine Sputterapparatur.

Durch Sputtern lassen sich nicht nur Metalle und Dielektrika, sondern auch aktive Schichten, wie z.B. Piezoelektrika oder Sensorschichten wie SnO oder magnetische Materialien abscheiden. Durch geeignete Wahl der Prozeßparameter können auch Kristallorientierung und Schichtmorphologie gezielt eingestellt werden.

2.2 Strukturerzeugung mit Lithographie

Eine der grundlegenden Schritte bei der Herstellung von mikroelektronischen und mikro-mechanischen Bauelementen und Strukturen ist der Einsatz der Lithographie zur Struktur-erzeugung. Dabei wird sowohl Lithographie mit optischen Verfahren (Photolithographie) als auch mit Elektronenstrahl, Röntgenstrahlung und Ionenstrahl eingesetzt. Für die Mikromechanik ist in der Regel der Einsatz lichtoptischer Photolithographie ausreichend.

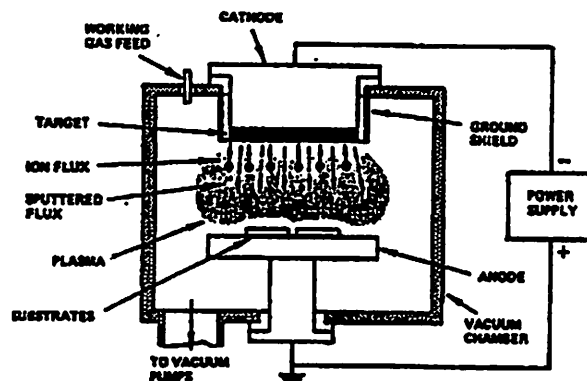


Abb. 10: Sputteranlage (Planare Diodenanordnung)

Bei der Photolithographie wird das Substrat zunächst mit einem Strahlungsempfindlichen Lack (Resist) beschichtet. Die Belichtung verändert die Löslichkeit des Resists im Entwickler. Die Belichtung erfolgt über Direktbelichtung mit einer Photomaske, die aus transparenten und nicht transparenten Bereichen besteht. Im Anschluß an die Entwicklung wird die mit dem resist erzeugte Struktur durch Ätzverfahren in die darunterliegende Dünnschicht oder in das Substrat übertragen. Eine schematische Darstellung der Photo-lithographie ist in Abb.11 gezeigt.

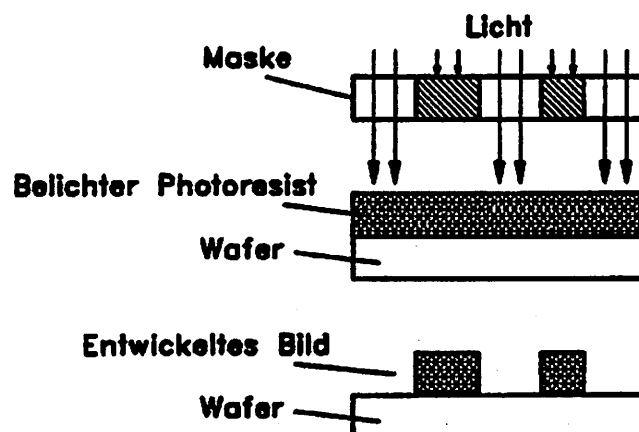


Abbildung mit Positiv-Resist

Abb.11: Photolithographie

Bei der Direktbelichtung unterscheidet man Kontaktbelichtung und Proximity-Belichtung /Büt 91/. Die Kontaktbelichtung mit Soft- oder Vakuumkontakt erbringt die höchste Auflösung ($\sim 1\mu\text{m}$), andererseits sind die Standzeiten der Masken durch Photolackreste und Beschädigungen gering. Beim Proximity-Verfahren wird die Maske bei der Belichtung mit einem Abstand von einigen $10\mu\text{m}$ von der zu belichtenden Scheibe gehalten. Dadurch verringert die Auflösung auf $2-3\mu\text{m}$, aber die Maskenlebensdauern sind höher. Für die Mikromechanik ist die Proximity-Belichtung für die meisten Anwendungen ausreichend. Wichtig ist außerdem die doppelseitige Belichtung und die Lithographie in tiefgeätzten Gruben, für die es allerdings noch keine Patentlösung gibt. Die optischen Belichtungsverfahren sind in Abb.12 schematisch dargestellt.

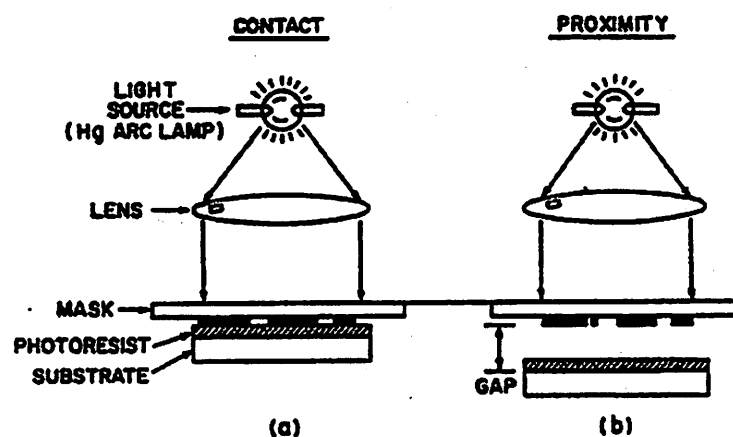


Abb.12: Optische Lithographie: a) Kontaktbelichtung
b) Proximity-Belichtung

2.3 Strukturübertragung mit Ätzverfahren

In der Mikromechanik werden alle Ätzverfahren der Mikroelektronik und darüberhinaus weiterentwickelte Verfahren eingesetzt. Zusätzliche Verfahren sind beispielsweise die anisotrope Ätztechnik in einkristallinem Silicium oder Tiefenätzverfahren durch Trockenätztechniken mit hohen Aspektverhältnissen.

2.3.1 Naßchemische Ätzverfahren

Beim isotropen Ätzen ist die Ätzrate unabhängig von der Richtung, so daß kleine Löcher in der Ätzmaske in halbkugelförmigen Vertiefungen resultieren. Dagegen haben anisotrope Ätzungen richtungsabhängige Ätzraten im Substrat, die bei einkristallinen Substraten mit kristallographischen Kristallorientierungen zusammenfallen. Einige kristallographischen Hauptrichtungen in Silicium sind in Abb. 13 gezeigt.

Wafer mit einer (100)-Oberflächenorientierung unterscheiden sich in den geätzten

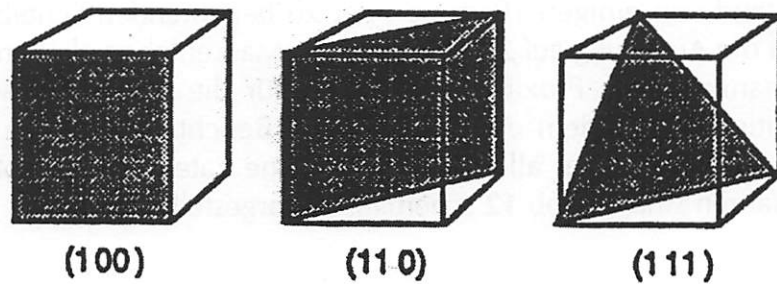


Abb.13: Kristallographische Hauptebenen in Silicium

Strukturen von (110)-orientierten Scheiben. Dies ist schematisch in Abb.14 dargestellt.

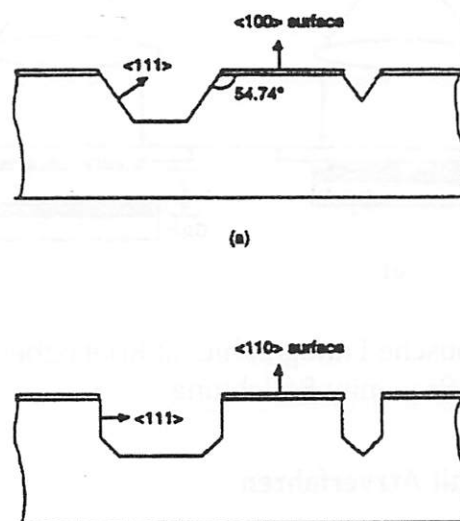


Abb.14: Anisotrope Ätzung in Silicium a) (100)-Orientierung b) (110)-Orientierung

Als Ätzmittel werden wässrige KOH, EDP, Hydrazin, Natriumhydroxids und tetramethylammoniumhydroxid (TMAH) eingesetzt. Tabelle 5 gibt einen Überblick über Ätzmittel, Temperaturen und erreichbare Ätzratenverhältnisse.

Ätzmittel	Temperatur	Ätzzratenverhältnis <100>: <111>
KOH + H ₂ O (+ IPA) 20-50%	50 - 100°C	100:1 - 30:1
EDP-Lösung Ethylendiamin + Brenzkatechin + Wasser (+ Pyrazin)	60 - 115 °C	35 : 1
Hydrazin-Lösung N ₂ H ₄ + Wasser 50%	115°C	16 : 1
NH ₄ OH + H ₂ O 1-18%	45 - 90°C	25 : 1
TMAH (CH ₃) ₄ NOH + H ₂ O 2 - 40 %	70 - 90°C	50 :1 - 10 : 1

Tabelle 5: Ätzmittel für Silicium

Ätzstoppverfahren

Um dünne Membranen oder Balkenstrukturen mit hoher Genauigkeit herzustellen, sind Ätzstoppverfahren erforderlich. Hierzu werden entweder hochbördotierte Schichten ($> 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), hochvoltimplantierte Oxid- oder Nitridschichten oder pn-Übergänge und elektrochemische Ätzstoppverfahren eingesetzt. Eine typische Anordnung für den elektrochemischen Ätzstopp ist in Abb.15 gezeigt. Soll die Membran aus n-Si passiviert werden, so wird sie auf ein positives Passivierungspotential gelegt. Das p-Si Substrat liegt auf einem Potential, das negativer als das OCP (Open Circuit Potential) und kann damit geätzt werden. Der pn-Übergang ist zur Aufrechterhaltung des Potentialunterschiedes erforderlich.

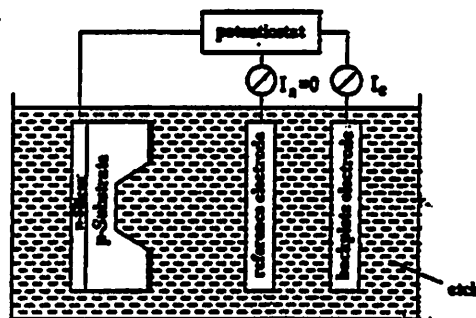


Abb. 15: Anordnung zum elektrochemischen Ätzstopp

2.3.2 Trockenätzverfahren

Neben den naßchemischen Ätzverfahren für dünne Schichten und Vollmaterial haben Trockenätzverfahren in der Halbleiterindustrie eine Schlüsselstellung eingenommen und dringen allmählich auch in die Mikromechanik vor. Die Vorteile sind die geringeren Kosten für Chemikalien, geringere Umweltbelastung und die einfache Automatisierung. Mit Trockenätzverfahren können isotrope und anisotrope Ätzungen realisiert werden. Für die Mikromechanik interessant sind das Hochratenätzen mit Ätzraten, die für Silicium in Richtung $10\mu\text{m}$ gehen, sowie Tiefenätzungen mit (nahezu) senkrechten Wänden und hohen Aspektverhältnissen. Diese Verfahren sind für Anwendungen in der Mikromechanik bei den Technologien unter Kap. 3.4 behandelt. Das Plasmaätzverfahren ist schematisch in Abb. 16 dargestellt.

Eine Übersicht verschiedener Ätzverfahren ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

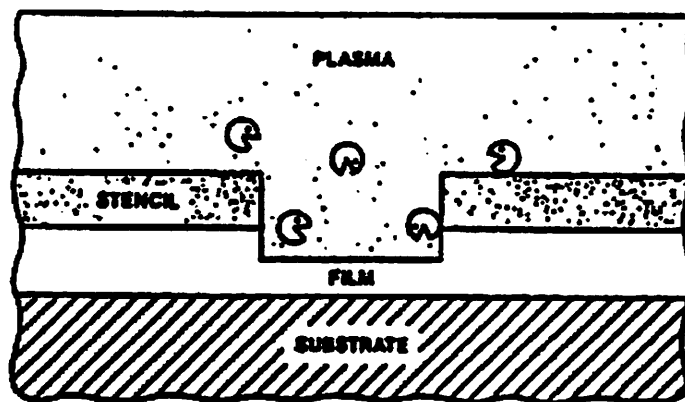


Abb.16: Schematische Darstellung des Plasmaätzverfahrens (nach Flamm et al.: Plasma Etching Technology - An Overview).

Technik	Druck (Torr)	Ätz- mechanismus	Selektivität	Ätzprofil
Barrel-Ätzer	$10^{-1} - 10^0$	chemisch	hervorragend	isotrop
Plasmaäätzer (PE)	$10^{-1} - 10^1$	chemisch	gut	isotrop oder anisotrop
Ionenätzen	$10^{-3} - 10^{-1}$	physikalisch	schlecht	anisotrop
Reaktives Ionenätzen (RIE)	$10^{-3} - 10^{-1}$	chemisch- physikalisch	gut	isotrop oder anisotrop
Ionenstrahl-Ätzen (IBE)	$\sim 10^{-4}$	physikalisch	schlecht	anisotrop
Reaktives Ionen- strahlätzen (RIBE)	$\sim 10^{-4}$	chemisch- physikalisch	gut	anisotrop
Chemisch unter- stütztes Ionenstrahlätzen (CAIBE)	$\sim 10^{-4}$	chemisch- physikalisch	gut	anisotrop oder isotrop

Tabelle 6: Vergleich unterschiedlicher Trockenätzverfahren

3. Technologien

Grundsätzlich kann die Silicium-Mikromechanik in zwei Kategorien aufgeteilt werden: die Bearbeitung von vollem Wafermaterial (Bulk-Mikromechanik) /Büt 91, Heu 89, Pet 82, Ris 94/ und die Bearbeitung oberflächennaher Schichten (Oberflächenmikromechanik) /Büt 91, Ris 94/. Weiterhin gibt es das LIGA-Verfahren (LIGA = Lithographie und Galvanische Abformung), das in Deutschland entwickelt wurde /Men 92/, und das in der Regel Synchrotronstrahlung für die Belichtung dicker Resistschichten verwendet. In jüngster Zeit wurden mehrere Verfahren vorgestellt, die Strukturen mit nahezu senkrechtgeätzten Wänden und hohen Aspektverhältnissen zum Ziel hatten /Elw 95, Li 95, Pet 95, Sha 94/. Diese werden unter Kap. 3.4 bei den Tiefenätzverfahren vorgestellt.

3.1 Bulk-Mikromechanik

Beispiele für die Bulk-Mikromechanik sind die Herstellung von Zungen oder Membranen aus Silicium-Wafern durch naßchemische anisotrope Ätztechniken zusammen mit Ätzstoppverfahren.

Die Bulk-Mikromechanik ist seit über 20 Jahre Gegenstand von Entwicklungen und kann als etablierte Technologie bezeichnet werden. Eine ganze Anzahl von Firmen produzieren und vertreiben Silicium-Sensoren und -Aktoren mit dieser Technologie.

Als Beispiel für einen Bulk-Prozess, kombiniert mit reaktivem Ionenätzen und Silizium-Direktbonden soll hier die Herstellung von Mikrozungen für die Anwendung in der Atomic-Force Mikroskopie dienen (Abb.17).

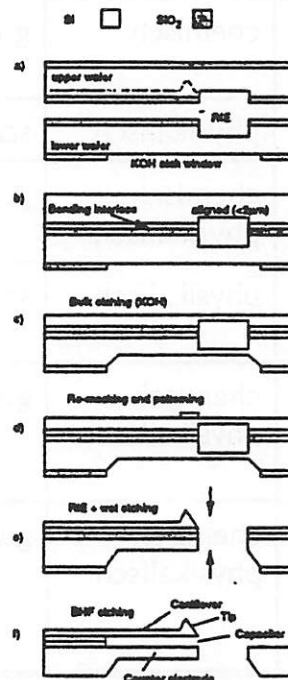


Abb. 17: Bulk-Mikromechanik: Herstellung kapazitiver Zungenstrukturen für die Kraftmikroskopie

3.2 Oberflächenmikromechanik

Die Oberflächenmikromechanik wurde in den letzten 10 Jahren entwickelt. Diese Technologie, die die 3-D Strukturierung von Polysilizium oder anderer Dünnschichten zum Inhalt hat, ist inzwischen eine bedeutende Alternative zur klassischen Bulk-Mikromechanik geworden. Die Dimensionen der damit hergestellten Mikrostrukturen sind in der Regel um zwei Größenordnungen kleiner als bei der Bulk-Mikromechanik. Ein wichtiger Vorteil ist die einfache Integrationsfähigkeit mit mikroelektronischen Komponenten auf dem Chip. Derzeit befindet sich die Oberflächenmikromechanik in einer Phase des Überganges in Produkte. Die meisten Entwicklungen befinden sich allerdings noch in einer Prototypenphase. Hauptgründe dafür sind Ausbeuteprobleme, die durch "Verkleben" der Mikrostrukturen mit dem Substrat und durch Partikelprobleme beim Vereinzeln auftreten.

Herstellung

Die grundlegenden Herstellprozesse der Oberflächenmikromechanik sind in Abb 18. dargestellt. Grundsätzlich finden auch die Technologiezyklen Schichtabscheidung,

Strukturübertragung und selektive Ätzung Anwendung. Die üblichen Schichten sind Siliciumoxid und Polysilicium. Die Materialien werden in HF und KOH geätzt. Bei der Schichtabscheidung ist eine gute Kantenbedeckung wichtig. Aus diesem Grund wird in der Regel ein LPCVD-Verfahren eingesetzt. Opferschichten mit hohen Ätzraten sind wünschenswert, weshalb üblicherweise PSG-Schichten (PSG = Phosphorus doped Silicon Glass, Phosphordotiertes Siliciumdioxid) zum Einsatz kommen. Um die Kräfte bei Aktorstrukturen bzw. die Kapazitätsänderungen bei Sensoren groß zu halten, ist es wichtig, möglichst kleine Abstände bei möglichst großen Strukturhöhen (große Aspektverhältnisse) zu realisieren. Für die Herstellung von Strukturen kleiner als $2\mu\text{m}$ sind entsprechende Lithographieverfahren erforderlich. Die Herstellung dicker Polysiliciumschichten ist aufgrund der Schichtspannungen ebenfalls ein Problem.

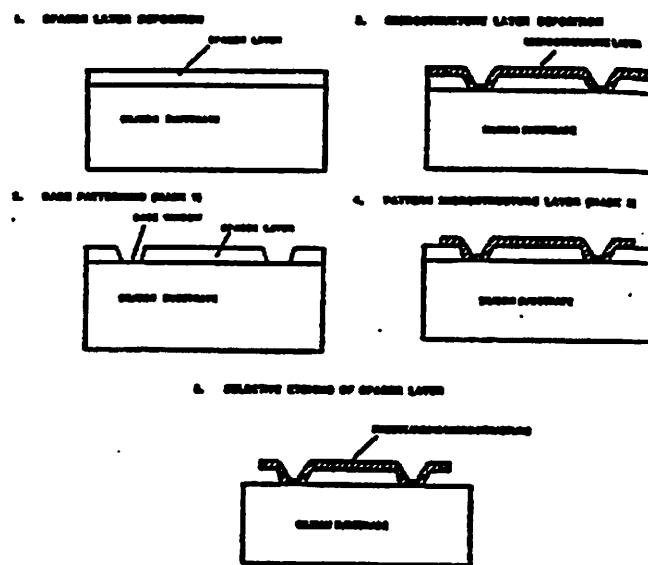


Abb.18: Herstelltechnologie Oberflächenmikromechanik

Prozeßkompatibilität mit der Mikroelektronik

Die Oberflächenmikromechanik benutzt die gleichen Materialien und Ätzlösungen wie in der Mikroelektronik. Aus diesem Grund lassen sich die Verfahren leicht kombinieren. Tabelle 7 zeigt einen schematischen Vergleich zwischen einem CMOS-Prozess und der Oberflächenmikromechanik mit Poly-Silicium.

Technologie	CMOS	Oberflächenmikromechanik
Gemeinsame Merkmale	Planar Technologie Gleiche Materialien Gleiche Ätzverfahren	
Komplexität (Maskenebenen)	> 10	4-6
Laterale Dimensionen	1-2 μm	5-100 μm
Vertikale Dimensionen	< 1 μm	1-5 μm
Prozeßfolge	sorgfältig abgestimmt	flexibel

Tabelle 7: Vergleich von CMOS und Oberflächen-Mikromechanik

3.3 LIGA-Verfahren

Das LIGA-Verfahren ist eine Technik zur Herstellung dreidimensionaler Mikrostrukturen mit hohen Aspekverhältnissen bei Höhen von mehreren 100 Mikrometern. LIGA /Men 92/ steht für Lithographie, Galvanik und Abformung und wurde in Deutschland am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt. Das Verfahren kombiniert Röntgentiefenlithographie in dicken Lackschichten und benutzt galvanisch abgeschiedene Metalle als Mikrostrukturen. Die galvanisch abgeschiedenen Mikrostrukturen können als Formeinsatz für Spritzgußverfahren verwendet werden, wodurch das Verfahren für Massenfabricationen tauglich ist.

Der grundlegende Technologieablauf für das LIGA-Verfahren ist in Abb. 19 dargestellt.

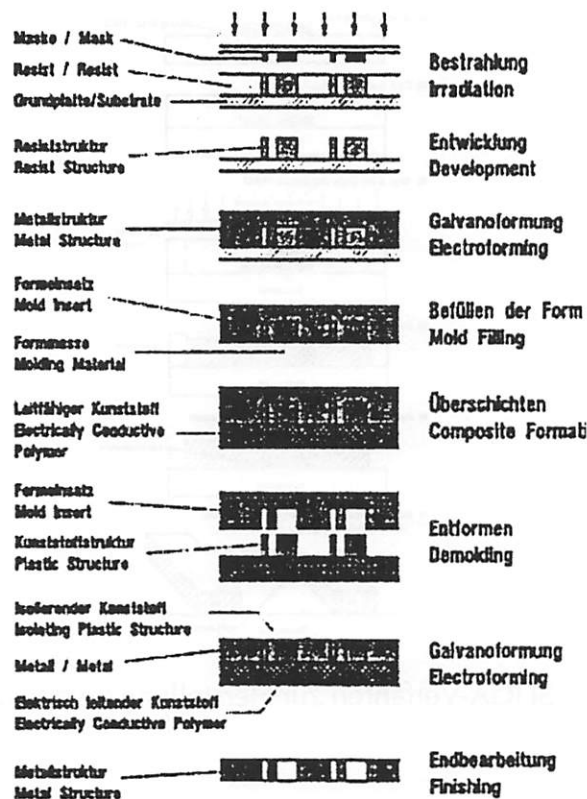


Abb.19: LIGA-Verfahren

SLIGA

Zur Herstellung beweglicher oder freitragender Strukturen wurde ein modifiziertes, sogenanntes SLIGA (Sacrificial LIGA, Opferschicht-Liga) entwickelt. Der modifizierte Prozeßablauf ist in Abb.20 dargestellt.

Poor man's LIGA

Diese Technologie benutzt optische Lithographie (UV) und dicke (bis $40\mu\text{m}$) Lackschichten aus Polyimid. Aufgrund der geringen Kosten im Vergleich zum LIGA-Verfahren mit Röntgentiefenlithographie, nennt man es auch poor man's LIGA (arme Leute LIGA). Strukturhöhen von ca. $40\text{--}50\mu\text{m}$ bei Aspektverhältnissen von ca. 1:10 wurden bereits realisiert. Das Schema und ein Beispiel ist in Abb. 21 dargestellt.

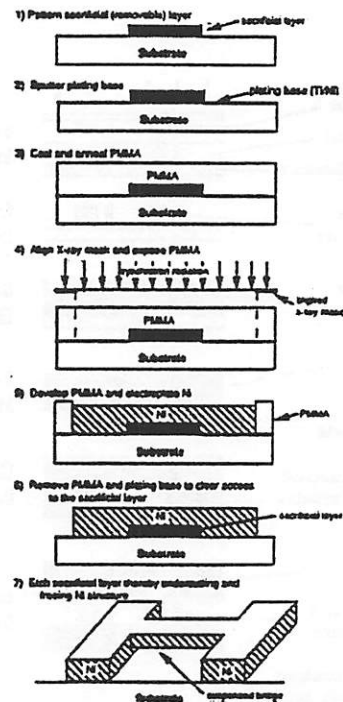


Abb. 20: SLIGA-Verfahren zur Herstellung freitragender Strukturen.

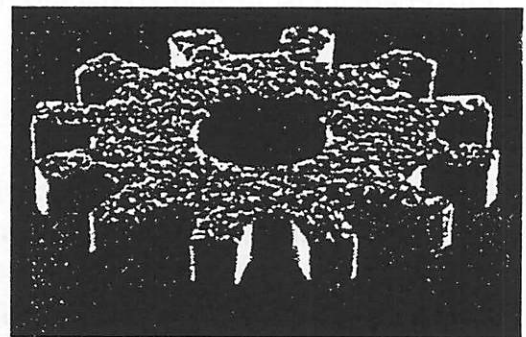
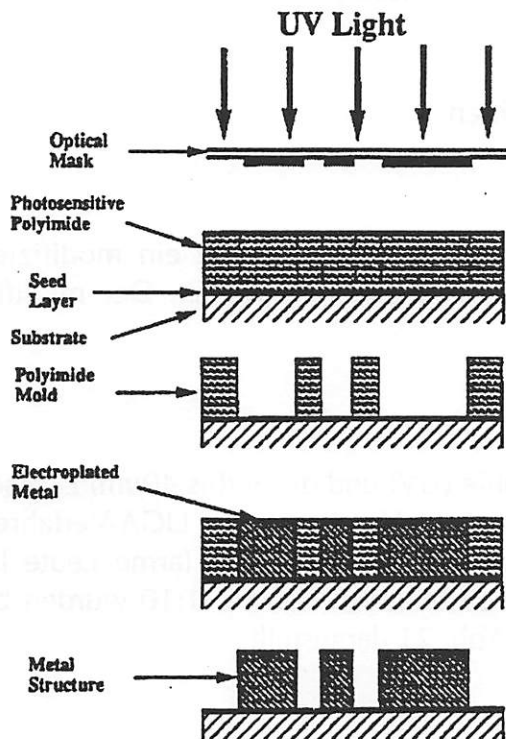


Abb.21: Poor man's LIGA: a) Schema

b) Beispiel aus 40 μm galvanischem Cu

3.4 Tiefenätzverfahren (SCREAM, SIMPLE, BSM, SFB/DRIE)

Aufgrund vielfältiger Probleme bei der Oberflächenmikromechanik sowohl hinsichtlich Verkleben (sticking) der Strukturen mit dem Substrat durch Oberflächenkräfte als auch aufgrund von geringen Kapazitätsänderungen durch geringe Strukturhöhen wurde die Technologie auf der Basis der Oberflächenmikromechanik weiterentwickelt.

Um das Problem des sticking zu vermeiden wurden Trockenätzverfahren eingesetzt und Verfahren wie SCREAM und SIMPLE /Li 95, Sha 94/ entwickelt. Beide Technologien sind selbstjustierend und für die Batch-Prozessierung geeignet. Das Herauslösen der Strukturen geschieht hier in der Gasphase, so daß durch Vermeidung der flüssigen Phase auch das Problem der Oberflächenspannung und damit das Verkleben umgangen wird.

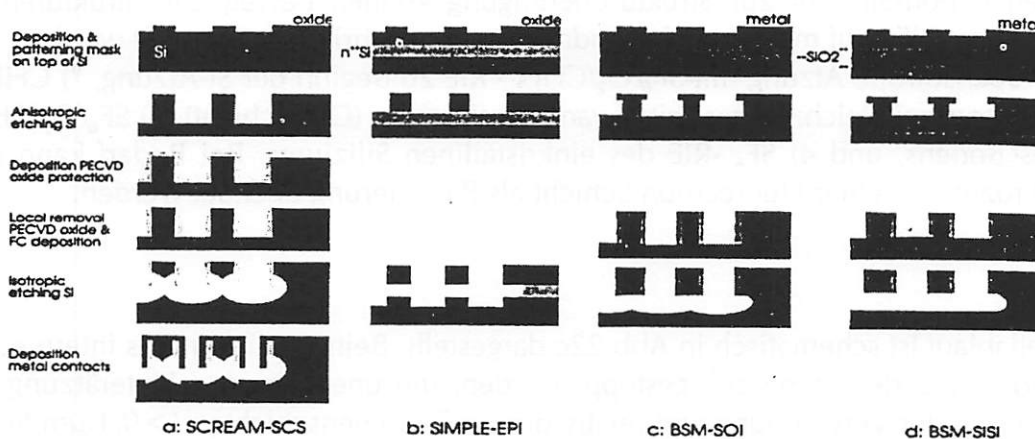


Abb.22: Verschiedene Trockenätzverfahren: a)SCREAM, b)SIMPLE, d)BSM-SOI, d)BSM-SiSi

SCREAM

SCREAM steht für Single Crystal Reactive Etching and Metalisation (Reaktives Ätzen von einkristallinem Silicium und Metallisierung) /Sha 94/. Der Prozeßablauf ist in Abb 22a schematisch dargestellt. Zunächst wird mit einem Chlorgas-Gemisch anisotrop in Silicium mit Siliziumdioxid-Maske tiefengeätzt (ca. 40-50 μm). Anschließend erfolgt eine Passivierung der tiefengeätzten Strukturen mit PECVD-Oxid. Dieses Oxid wird selektiv am Boden der tiefengeätzten Gruben entfernt (CHF_3 -Plasma) und anschließend mit einem isotropen Ätzschritt (SF_6) freigeätzt. Zur elektrischen Kontaktierung wird eine Metallisierung (z.B.) Al abgeschieden. Probleme liegen in der Veränderung der Mikrostrukturen während des isotropen Ätzprozesses und der Verbiegung der Strukturen durch interne Schichtspannungen der Maskierschichten.

SIMPLE

Simple steht für Silicon Micromachining by Single Step Plasma Etching /Li 95/. Es wird ein Chlorgas-Plasma verwendet, das leicht p-dotiertes Silicium anisotrop und stark n-dotiertes

Silicium isotrop ätzt. Dadurch können bewegliche Mikrostrukturen im gleichen RIE-Plasma hergestellt und vom Substrat gelöst werden. Dies ist schematisch in Abb. 22b gezeigt. Nachteile sind: 1) aufgrund der geringen Selektivität von Si zu SiO_2 im Chlorgasplasma müssen dicke SiO_2 -Schichten verwendet werden. 2) Die isotrope Ätzung hinterläßt tiefe Gräben, die ggf. die Mikrostruktur beeinflussen können.

BSM multi-step one-run

Um die Probleme der vorherigen Verfahren zu überwinden wurde eine neue Technologie entwickelt, die die Prozeßschritte Ätzen, Passivieren und Lösen der Mikrostrukturen ermöglicht. Diese Technologie wird BSM (Black Silicon Method) multi-step one-run genannt [Elw 95]. Die Technologie basiert auf der Verwendung von kommerziellen BESOI-Wafern (BESOI = Back Etched Silicon On Insulator). Nach Abscheidung einer 30 nm dicken Lift-off-Struktur zur Strukturübertragung können bewegliche Strukturen in einem einzigen RIE-Lauf mit vier aufeinanderfolgenden Schritten hergestellt werden:

1) Anisotrope/isotrope Ätzung mit $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{CHF}_3$ - RIE zu Beginn der Si-Ätzung, 2) CHF_3 - RIE des Isolators bei gleichzeitiger Seitenwand-Passivierung (C_xF_y -Schicht), 3) $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{CHF}_3$ - RIE des Bodens, und 4) SF_6 - RIE des einkristallinen Siliziums. Bei Bedarf kann der gesamte Prozeß mit einer Fluorcarbon-Schicht als Passivierung beendet werden.

BSM SOI

Der Prozeßablauf ist schematisch in Abb. 22c dargestellt. Beim Erreichen des intermediären Isolators muß der Ätzprozeß gestoppt werden, um unerwünschte Unterätzung zu vermeiden. Bei der Verwendung von relativ dicken Zwischenschichten ($> 0.1 \mu\text{m} \text{SiO}_2$) können Durchbiegungen der Balkenstrukturen durch Druckspannungen im Oxid auftreten.

BSM SISI

Um die Probleme der Begrenzung des Unterätzens durch das hohe Si-Loading nach der Ablösung der freitragenden Strukturen zu umgehen wurden Wafer mit einer $1\text{-}2 \mu\text{m}$ dicken Siliciumschicht hergestellt, wobei die Siliciumschicht beidseitig mit einer dünnen Oxidschicht umgeben war (SISI = Silicon on Insulator on Silicon on Insulator). Diese Siliciumschicht diente als Opferschicht. Die untere Isolatorschicht schützt das Silicium während des Freiätzens und bewirkt eine gute Ebenheit des Ätzgrundes (Abb. 22d).

Typische Daten der genannten Prozesse sind in Tabelle 8 aufgeführt:

Balkenstruktur	SCREAM	SIMPLE	BSM
Höhe (μm)	< 20	< 4	< 400
Weite (μm)	< 5	< 4	< 50
Länge (μm)	< 2000	< 2000	< 2001
Laterale Spalte (μm)	> 1	> 3	> 1
Aspekt-Verhältnis Balken	< 10	< 10	< 50
Aspekt-Verhältnis Trench	< 7	< 7	< 10

Tabelle 8: Typische Werte für die Prozesse SCREAM, SIMPLE und BSM

SFB/DRIE

Ein von Petersen et al. /Pet 95/ vorgeschlagenes Verfahren (Abb.23) benutzt Wafer mit vorgeätzten Kavitäten, die mit einem zweiten Wafer mit Sicium-Direktbonden (SFB, Silicon Fusion Bonding) verbunden wird. Der obere Wafer kann nun auf die erforderliche Dicke durch Polierätzen oder elektrochemischen Ätzstopp abgedünnt werden. Anschließend wird eine metallische Maskierschicht aufgebracht und strukturiert. Mit Tiefenätzverfahren in Silicium (DRIE – Deep Reactive Ion Etching) wird nun der obere Wafer durchgeätzt und damit freitragende Strukturen hergestellt. Für die freitragenden Strukturen wurden Aspektverhältnisse von 15:1 erreicht. Ein Vorteil wird hier in der vollen Integrationsfähigkeit mit Mikroelektronik gesehen, da nach dem Direktbonden keine hohen Temperaturen für die Mikrostrukturen mehr erforderlich sind.

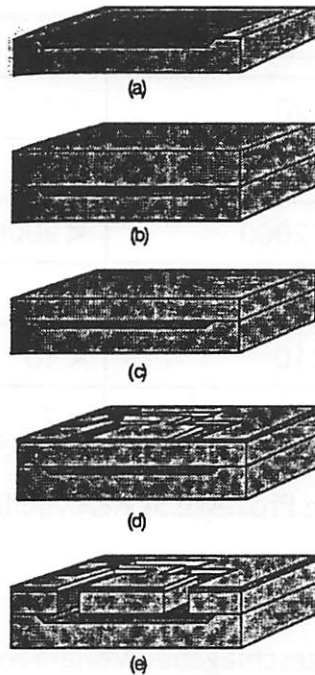


Abb. 23: SFB-DRIE Prozeßablauf:

- a) Ätzen einer Vertiefung in den unteren Wafer
- b) Verbindung mit einem zweiten Wafer durch SFB
- c) Abdünnen des oberen Wafers auf die gewünschte Dicke
- d) Metallisierung und Strukturübertragung
- e) Freiätzen der Mikrostruktur mit DRIE

3.5 Aufbau- und Gehäusetechnik

3.5.1 Vom Chip zum Bauelement

Die Aufbau- und Gehäusetechnik /Rei 88/ realisiert alle Schritte vom fertig prozessierten Si-Wafer bis hin zum einsatz- und verkaufsfähigen Bauelement. Dabei treten die folgenden Arbeitsschritte auf:

Waferbondverfahren :	anodisches Bonden auf Glasscheiben, Bonden mit Siliciumoxid-Zwischenschichten, Silcium-Direktbonden, eutektisches Bonden
Vereinzeln:	Sägen, Aufbringen auf Spannfolie, Magazinierung zur automatischen Montage

Gehäuse:	Entwurf u. Herstellung von Sondergehäusen
Montage:	Handling der Chips und Einbringen in ein Gehäuse, Fügen mit Klebetechniken oder Lötverfahren, ggf. Herstellung von Medienanschlüssen,
Verkapselung:	Dichtschweißen von Gehäuse, ggf. Verkapselung der aufgebauten und kontaktierten Chips mit Vergußmasse (Molding)
Kontaktierungsverfahren:	Herstellung elektrischer Verbindungen mit Drahtbonden oder anderen Verfahren,
Modulaufbau:	Kombination mit Linearisierungselementen oder Vorverstärkern (Sensoren) oder mit Treiberstufen (Aktoren) auf gemeinsamen Substraten ggf. Entwurf und Realisierung einer mikroelektronischen Auswerteschaltung mit definierten Schnittstellen Unterbringung in einem Modulgehäuse, das den Anwendungs- und Umweltbedingungen genügt.

3.5.2 Full-Wafer Bondprozesse

Trend zu Full-Wafer Bondprozessen

Verglichen mit der Mikroelektronik unterscheiden sich diese Arbeitsschritte vom Silicium-Chip zum Bauelement lediglich durch die Waferbondverfahren und ggf. durch Gehäuse mit Medienanschlüssen (z.B. für Strömungssensoren oder Aktoren wie Pumpen oder Ventile).

Um möglichst wenig Probleme beim Aufbau der Silicium-Chips zu bekommen, geht der Trend in Richtung Waferbondverfahren. Dies bedeutet, daß möglichst viele Fügeprozesse im Waferbondverfahren realisiert werden, um sowohl die Ausbeute als auch die Prozeßkosten niedrig zu halten.

Anodisches Bonden

Durch das Verfahren des anodischen Bondens kann Silicium mit Glas oder Silicium mittels Pyrex-Zwischenschichten mit Silicium verbunden werden. Beide Scheiben werden in engen Kontakt gebracht und erwärmt. Dabei werden die im Glas befindlichen Na^+ -Ionen unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes in Richtung der freien Grenzfläche des Glases transportiert. Wegen der Ladungserhaltung entsteht an der Glas-Si-Grenzfläche ein negativer Ladungsüberschuß, der ein starkes elektrisches Feld mit hohen Kräften erzeugt. Durch Ionendiffusion vom Glas in das Silicium entsteht eine mechanisch feste und hermetisch dichten Verbindung. Das anodische Bonden von Silicium auf Glas ist schematisch in Abb. 24 (nach /Ris 94/) dargestellt.

Silicium-Direktbonden

Mit diesem Verfahren lassen sich zwei Siliciumscheiben nach entsprechender Vorbehandlung (Hydrophilierung) bei hohen Temperaturen ($\sim 1100^\circ\text{C}$) ohne Druck oder Spannung sowie ohne Zwischenschichten miteinander verbinden. Die Stärke der Verbindung hängt primär von der Temperatur beim Bondvorgang ab. Verbindungen mit geringerer Festigkeit, z.B. nach Justiertvorgängen (Prebond) können schon bei Temperaturen ab 200°C realisiert werden.

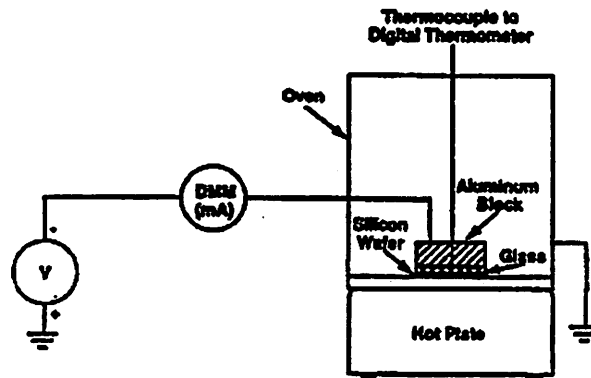


Abb.24: Anodisches Bonden von Silicium und Glas

3.5.3 Eutektisches Bonden

Beim eutektischen Bonden wird die Entstehung eines Gold-Silicium-Eutektikums ausgenutzt, das seinen Schmelzpunkt bei 363°C hat. Dieses Verfahren, das in der Mikroelektronik häufig eingesetzt wird, dient zum Aufbau von Si-Chips auf Metall oder Keramiksubstraten. Für die Full-Wafer-Montage wird dieses Verfahren zur Verbindung von Silicium-Wafern eingesetzt. Nach Beschichtung der Fügepartner mit einer Goldschicht von einigen μm Dicke werden die zu fügenden Partner nach Erwärmung aneinandergedrückt. Dabei kann der Verbindungsvorgang durch eine reibende Bewegung (scraping) unterstützt werden. Beim Verbindungsvorgang diffundiert Gold in das Silicium, bis das Eutektikum bei 3 Gew% Si erreicht ist. Gleichzeitig bildet sich eine flüssige Phase, die beim Abkühlen oder nach Verbrauch des Goldes erstarrt. Zum Abbau mechanischer Spannungen wird eine Temperaturbehandlung nachgeschaltet.

Da die zu fügenden Flächen absolut oxidfrei sein müssen, wird unter Stickstoff- oder Formiergasatmosphäre gearbeitet.

Ebenfalls Anwendung zur Full-Wafer-Montage findet das Al-Si-Eutektikum bei 580°C , das ebenfalls mit aufgedampften Al-Schichten von einigen μm Dicke auskommt.

4. Literaturverzeichnis

- /Büt 91/ Büttgenbach, S.: Mikromechanik, Stuttgart: Teubner 1991
- /Elw 93/ Elwenspoek, M.: Etching technology, UETP-MEMES course, FSRM, Neuchâtel, Switzerland 1993
- /Elw 95/ Elwenspoek, M. et al.: The Black Silicon Method V: A Study Of The Fabricating Of Movable Structures For Micro Electromechanical Systems, Transducers '95 and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, Digest of Techn. papers, pp 565-568
- /Li 95/ Y. Li et al. Proc. IEEE MEMS (1995) 398
- /Men 92/ Menz, W.; Bley, P.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure, Weinheim: VCH-Verlagsgesellschaft 1992
- /Pet 82/ Petersen, K.E.: Silicon as a mechanical material, Proc. IEEE, Vol 70, no 5, pp 420-457, 1982
- /Pet 95/ Petersen, K.E. et al.: Silicon Fusion Bonding and Deep Reactive Ion Etching; A New Technology for Microstructures, Transducers '95 and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, Digest of Techn. papers, pp 556-559
- /Rei 88/ Reichl, H. (Hrsg.): Hybridintegration, Heidelberg: Hüthig 1988
- /Ris 94/ Ristic, L. (editor): Sensor Technologies and Devices, Artec House, Boston, 1994, ISBN 0-89006-532-2
- /Rug 91/ Ruge, I.; Mader, H.: Halbleiter-Technologie, Springer-Verlag, Berlin, 1991
- /San 92/ Sandmaier, H.; Csepregi, L.: Spezifische Prozeßtechnik in der Mikromechanik, in: Mikromechanik Baustein der Mikrosystemtechnik, Lehrgang Nr. 15053/63.026, Technische Akademie Esslingen, Esslingen, 9. und 10.3. 1992
- /Scha 92/ Schade, K. (Hrsg.): Mikroelektroniktechnologie, Berlin Verlag Technik GmbH, 1992
- /Sha 94/ K.A. Shaw, Z. Zhang and N. McDonald, Sensors and Actuators A40 (1994) 63
- /Sze 88/ Sze, S.M.: VLSI Technology, McGraw Hill, 1988