

5 Mehrfachbalken-Resonatoren in Silizium mit piezoelektrischem Antrieb

H.-J. WAGNER

INSTITUT FÜR MIKRO- UND INFORMATIONSTECHNIK DER
HAHN-SCHICKARD-GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE FORSCHUNG E.V.,
VILLINGEN-SCHWENNINGEN

5.1 Einleitung

5.1.1 Analytische Berechnung von Balkenstrukturen

Die bisher in der Literatur vorgestellten und veröffentlichten resonanten Kraftsensor-Strukturen auf Quarz- bzw. Siliziumbasis gehen meist von einfachen geometrischen Grundstrukturen aus. Zur Anwendung kommen entweder Einfachbalken- (SB = Single-Beam) [ALB 84] oder Doppelstimmgabel-Geometrien (DETF = Double-Ended-Tuning-Fork) [CHU 83].

Bei der Anwendung als Kraftsensor liegt diesen Schwingergeometrien das gleiche Funktionsprinzip zugrunde. Die von der physikalischen Meßgröße Φ im Resonator hervorgerufene mechanische Spannung σ_M wird in eine möglichst große, zu dieser proportionalen Eigenfrequenzänderung Δf umgesetzt:

$$\Delta f \sim \sigma_M, \text{ wobei: } \sigma_M = g(\Phi). \quad (1)$$

Die dadurch hervorgerufene Steifigkeitsänderung in der Resonatorstruktur bewirkt eine Frequenzerhöhung bei Zug- bzw. eine Frequenzerniedrigung bei Druckbelastung. Brückenartig ausgebildete, beidseitig eingespannte Resonatorstrukturen lassen sich durch die Balkenlänge l , die Balkenbreite w und der Balkendicke t beschreiben, wobei $l \gg w, t$ ist.

Analytisch lassen sich für diese Balken die Schwingungsfrequenzen in transversaler Richtung (y- und z-Richtung) berechnen. Für die Frequenzen f_i der transversalen Schwingungsmoden des betrachteten, unbelasteten Balkens gilt, [TIL 91]:

$$f_i \approx c_{fi} \frac{x}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho (1-\nu^2)}} \quad (2)$$

wobei gilt: $x = w, t$: für Schwingungen in y - bzw. z -Richtung

$f_{0,i}$: Eigenfrequenzen

E : isotroper Elastizitätsmodul

ρ : Materialdichte

ν : Poissonsche Querkontraktionszahl.

In die Gleichung (2) für die Schwingungsfrequenzen geht lediglich die Abmessung x des Balkens in Schwingungsrichtung ein. Die Proportionalitätskonstante c_f ist vom Schwingungs-mode i abhängig und beträgt ungefähr 1,028 für den Grundmode [KIR 83],[LAN 85].

Ferner gelten für einen Siliziumbalken, der in $\langle 110 \rangle$ -Richtung ausgerichtet ist, der Elastizitätsmodul $E = 1,689 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ bzw. $\nu = 0,063$.

Die Dichte beträgt $\rho = 2,329 \text{ g/cm}^3$.

Unter einer Kraftbeaufschlagung F_x in axialer Richtung (x -Richtung) gilt für die transversale Schwingungsfrequenz f_i des i -ten Modes [ALB 88]:

$$f_i(F_x) = f_{0,i} \sqrt{1 + S F_x} \quad (3)$$

wobei: $f_{0,i}$: Frequenz des i -ten Modes bei $F_x = 0$

F_x : axial angreifende Kraft in [N]

S : Kraftempfindlichkeit in [N^{-1}]:

$$S \approx 0.294 \frac{l^2}{E b a^3} \quad (4)$$

Für Schwingungen in y - bzw. z -Richtung ist $a = w$ bzw. t und $b = t$ bzw. w .

...

Dieser Ausdruck läßt sich nach Potenzen höherer Ordnung von F_x ($:= F$) entwickeln:

$$f_i(F) = f_{0,i} (1 + \alpha_{1,i} F + \alpha_{2,i} F^2 + \alpha_{3,i} F^3 + \dots) \quad (5)$$

Für die lineare Kraftempfindlichkeit η des Grundmodes, bezogen auf die Eigenfrequenz f_0

gilt in linearer Näherung:

$$\eta := \frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial F} \approx c_\eta \frac{1}{E} \left(\frac{l}{x}\right)^2 \frac{F}{w t} \quad (6)$$

wobei: $\partial f \approx \Delta f$: Frequenzänderung
 $\partial F \approx \Delta F$: Kraftänderung
 $x = w, t$: für Schwingungen in y- bzw. z-Richtung
 $c_\eta = 0,148 \text{ N}^{-1}$ für Einfachbalkenstrukturen.

Die Kraft-Frequenz-Kennlinie eines Kraftsensors in Balkengeometrie ist nach Gleichung (3) also nichtlinear. Nach Gleichung (6) ist die Kraftempfindlichkeit stark vom Verhältnis l zu x abhängig, sodaß die Empfindlichkeit umso größer wird, je kleiner die Abmessung x des Resonatorbalkens in Schwingungsrichtung ist. Abhängig von dem Verhältnis der Parameter l , w und t zueinander, der Beschaffenheit der Strukturgeometrie und den Randbedingungen, denen der Sensor unterliegt, sind die Beiträge α_2 und α_3 um jeweils mehrere Größenordnungen niedriger ($\alpha_1 \gg \alpha_2 \gg \alpha_3$) [ALB 82], so daß ein annähernd gerader Verlauf der Kennlinie in einem bestimmten Kraftbereich erreicht werden kann. Die Konstante c_η in Gleichung (6) beträgt für Einfachbalkenstrukturen $0,148 \text{ N}^{-1}$ [ZIN 85] und ist für Doppelbalkenstrukturen (Doppelstimmgabeln) halb so groß [EER 86], da sich die anliegende Kraft F im Idealfall auf die zwei Stimmgabelstege gleich verteilt. Daraus folgt, daß Einfachbalkenstrukturen (SB) eine doppelt so hohe Kraftempfindlichkeit aufweisen wie Doppelstimmgabeln.

In der realen Anwendung muß ein Kompromiß zwischen der Empfindlichkeit und der Linearität des Sensors gefunden werden.

In Gleichung (6) stellt der letzte Ausdruck auf der rechten Seite die mechanische Spannung σ_M im Resonator dar. Da diese die Bruchspannung σ_B nicht übersteigen kann, läßt sich die theoretisch erreichbare maximale Frequenzänderung abschätzen:

$$\frac{F}{w t} = \sigma_M < \sigma_B (\text{Material}) \quad (7)$$

Ersetzt man σ_M durch σ_B des verwendeten Materials (Quarz bzw. Silizium) und betrachtet das Verhältnis der Frequenzverschiebung Δf zur Kraftänderung ΔF , so gilt (Glg.(7) und Glg.(2) in Glg.(6) eingesetzt):

$$\frac{\Delta f}{\Delta F} = \eta f_0 = \frac{c_\eta c_f}{\sqrt{E} \rho} \frac{\sigma_M}{x} < \text{const} \frac{\sigma_B}{x} \quad (8)$$

Gleichung (8) zeigt, daß das Verhältnis nur von der geometrischen Größe x , der Abmessung des Balkens in Schwingungsrichtung, abhängt. Der Verkleinerung des Parameters x stehen aber sowohl prozeßtechnische Grenzen ($x \approx \mu\text{m}$ -Bereich) als auch funktionsstechnische Gesichtspunkte entgegen. Falls x zu klein wird, so nimmt bei Zugbelastung und Druckbelastung die Bruchgefahr zu (bei Druckbelastung zusätzliche Knickung).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß bei einer **Sensorkonstruktion in Silizium** (z-Schwingungsrichtung), bei der eine hohe Empfindlichkeit η bei niedriger Grundresonanzfrequenz f_0 erreicht werden soll, die Balkendicke t minimiert werden sollte.

Als Randbedingungen bei der Festlegung des Sensorarbeitspunktes ist außerdem zu beachten, daß die Verhältnisse l/w und t/w nur in bestimmten Bereichen variiert werden können, um eine einwandfreie Funktion des Sensors sicherzustellen. Abhängig von der Kristallorientierung, bei der die Strukturierungsmöglichkeit durch das Ätzen geeignet erscheinen, müssen die Elektrodenformen entsprechend ausgelegt werden, um die Schwingung piezoelektrisch anzuregen. Da Silizium nicht piezoelektrisch ist, müssen Siliziumstrukturen extrinsisch mittels piezoelektrischer Schichten angeregt werden.

5.1.2 Motivation für die Verwendung von Zinkoxid-Schichten

Als piezoelektrisch aktive Wändlerschichten für Silizium kommen einige Materialien, wie z.B. Zinkoxid (ZnO), Aluminiumnitrid (AlN), Cadmiumsulfid (CdS) oder auch Blei-Zirkon-Titanat-Keramiken (PZT) in Frage (siehe auch Kapitel 2.1.2). Zu Beginn dieser Arbeit wurde das Material ZnO favorisiert, da umfangreiche Literatur-Referenzen vorhanden waren und die Entwicklung von ZnO als mikromechanisches Dünnschichtmaterial für zukünftige

Anwendungen in der integrierten Optik und in der chemischen Sensorik von großem Interesse ist. Zinkoxid als piezoelektrische Schicht kann sehr gut durch Sputterprozesse hergestellt werden. Eine starke Anisotropie der Wachstumsraten kann bei ZnO während der Abscheidung zu hochgradig vorzugsorientierten polykristallinen Schichten führen. Obwohl diese Schichten nicht einkristallin sind, führt die Gleichmäßigkeit der Orientierung bei optimierten Abscheidungsbedingungen zu piezoelektrischen Kenngrößen, die 85 % der Werte einkristalliner Elemente erreichen können [HEU 89].

5.1.3 Piezoelektrischer Effekt zur Anregung dünner Siliziumbalken

Die hexagonale Kristallstruktur von ZnO ist vom Wurtzit-Typ (Bild 5.1). Die Kristallklasse ist 6mm.

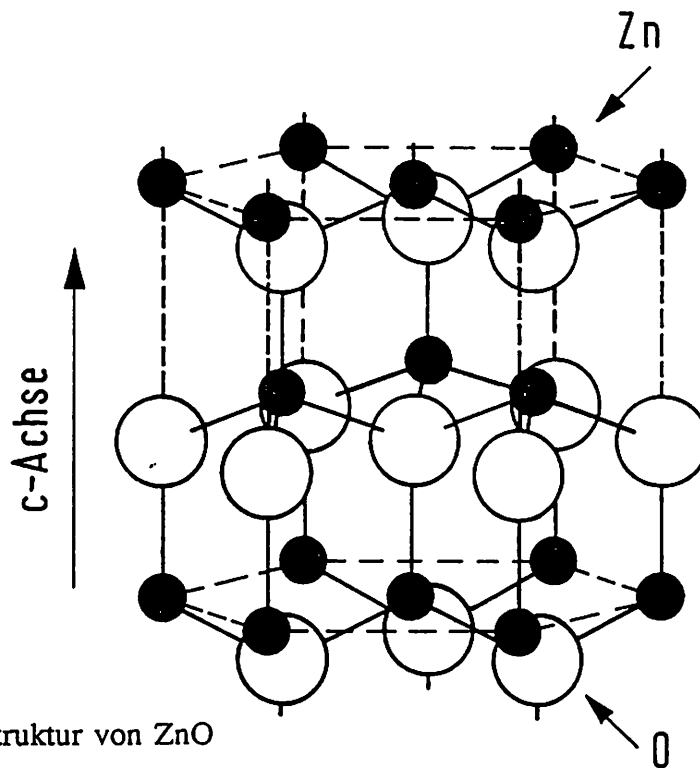


Bild 5.1 Wurtzitstruktur von ZnO

Die piezoelektrischen Koeffizienten von ZnO sind (siehe auch Kapitel 2.1.2):

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -8,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -8,3 & 0 & 0 \\ -5,1 & -5,1 & 12 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times 10^{-12} \text{ [m/V]}.$$

Eine quantitative Aussage über die Effektivität eines piezoelektrischen Elements ist durch die Angabe des piezoelektrischen Kopplungsfaktors, der die elektrische und die mechanische Energiedichte miteinander verknüpft, möglich. Verglichen mit dem klassischen Material Quarz ist der piezoelektrische Effekt für ZnO-Schichten größer (s.Kap. 2.1.2). Zur Anregung/Detektion von dünnen Siliziumbalken wird der piezoelektrische Transversaleffekt ausgenutzt. Dies zeigt Bild 5.2 bezüglich einer Plausibilitätsbetrachtung mit folgendem Abschätzungsbeispiel: werden die ZnO-Kristallite in einer Vorzugsrichtung senkrecht zur Substratebene aufgewachsen, so wird bei einem angelegten elektrischen Feld von z.B.

$1 \text{ V}/\mu\text{m}$ in X_3 -Richtung (\parallel c-Achse) eine Verlängerung (bzw. Kontraktion) in X_3 -Richtung $\Delta l/l = d_{33} E_3 = 12 \times 10^{-6}$ und eine Kontraktion (bzw. Verlängerung) in X_1 bzw. X_2 -Richtung $\Delta l/l = d_{31} E_3 = -5,1 \times 10^{-6}$ bewirkt. Legt man in X_3 -Richtung eine Dimension von $3 \mu\text{m}$ ZnO-Schichtdicke in Relation zur Balkenlänge von ca. $3000 \mu\text{m}$ in X_1 -Richtung zugrunde, so ist der absolute Betrag der Verlängerung Δl in X_1 bzw. X_2 -Richtung gegenüber der X_3 -Richtung um den Faktor:

$$\text{laterale Schichtdimension [mm]} / \text{Schichtdicke [\mu m]}$$

größer.

Für die Bimorph-Struktur ZnO/Silizium ergibt sich somit (mit den oben erwähnten Werten) ein transversaler Verstärkungseffekt von > 500 .

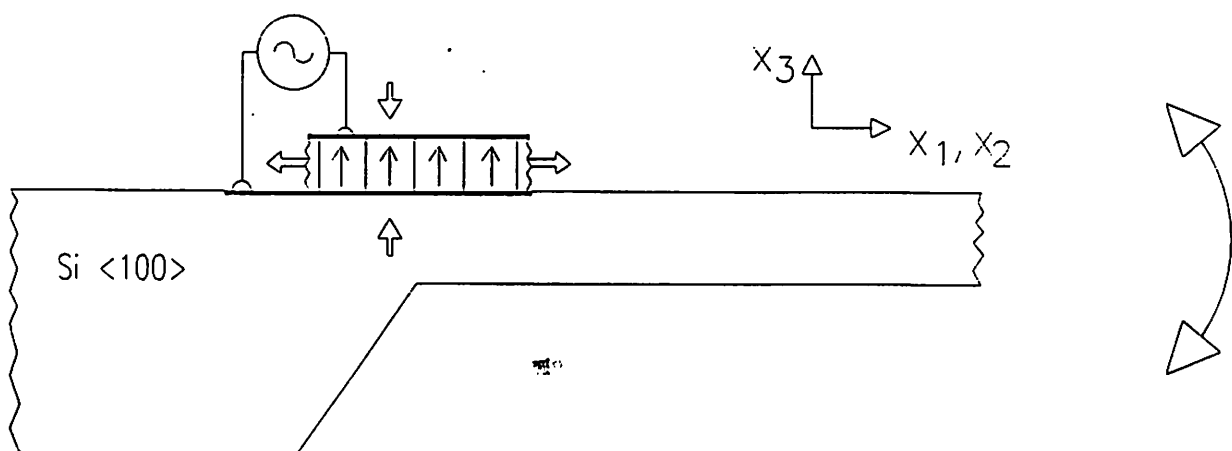


Bild 5.2 Piezoelektrischer Transversaleffekt zur Anregung/Detektion von dünnen Siliziumbalken (schematisch).

5.2 Herstellung von dünnen Zinkoxid-Schichten

5.2.1 Sputterparameter und Schichtgüte-Kriterien

Die ZnO-Schichten werden mittels HF-Magnetron-Sputtern mit hohen Kondensationsraten in einer Sputteranlage Alcatel SCM 600 erzeugt. Die Struktur aufgesputterter Schichten ist wesentlich abhängig vom Sputtergasdruck und von der Substrattemperatur. Die vorhandene Anlage wurde deshalb mit einer On-line-Druckregelung, einem Massenspektrometer und einer Substratheizung ausgerüstet, da für gut orientierte Schichten eine Substrattemperatur von 300 °C bis 500 °C notwendig ist. Einige wichtige Sputterprozeßparameter sind in

Tabelle 5.1 aufgeführt:

Tabelle 5.1 Sputterparameter zur Herstellung von ZnO-Schichten

Target	ZnO (Reinheit 99,999 %)
Substrat	Si (100), 4"
Substrattemperatur	300 - 500 [°C]
Prozeßgase	Ar / O ₂
Prozeßgasdruck	3 - 8 [$\times 10^{-3}$ hPa]
Sputterleistung	200 - 480 [W _{HF}]
Sputterrate	→ 80 [nm/min]

Das Sputtertarget besteht aus gesintertem ZnO (Reinheit 99,999 %) und hat einen Durchmesser von 150 mm. Mit o.g. Sputterleistungswerten ergibt sich damit eine Sputterleistungsdichte von bis zu 2,8 W/cm². Mit dieser Leistungsdichte wurden Sputterraten bis zu 80 nm/min erreicht.

Als Substrate wurden zunächst <100>-Siliziumwafer mit polierter Oberfläche ganzflächig beschichtet. An diesen Proben wurden vergleichende Schichtdickenmessungen (Talystep Stylusgerät, optisches UBM-Profilometer) durchgeführt. Bild 5.3 zeigt die Schichtdickenverteilung über den Durchmesser eines Wafers. Eine Optimierung der Schichthomogenität wurde über eine Variation des Target/Substratabstands und des Sputterdrucks durchgeführt. Das Ergebnis einer Schichtrauhigkeitsmessung in Wafermitte ist in Bild 5.4 dargestellt.

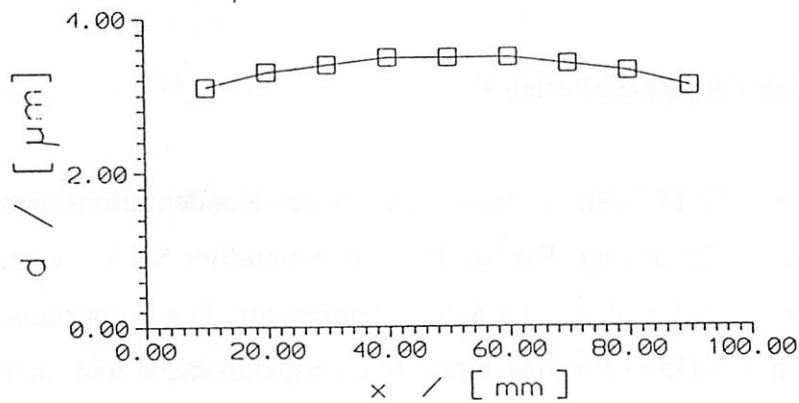


Bild 5.3 Schichtdickenverteilung über einen 4"-Siliziumwafer.

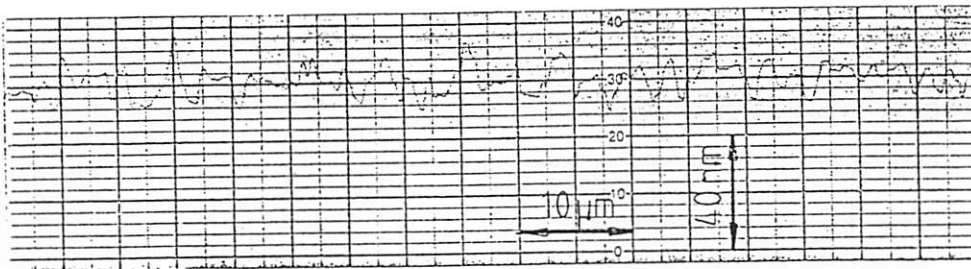


Bild 5.4 Schichtrauigkeit in Wafermitte.

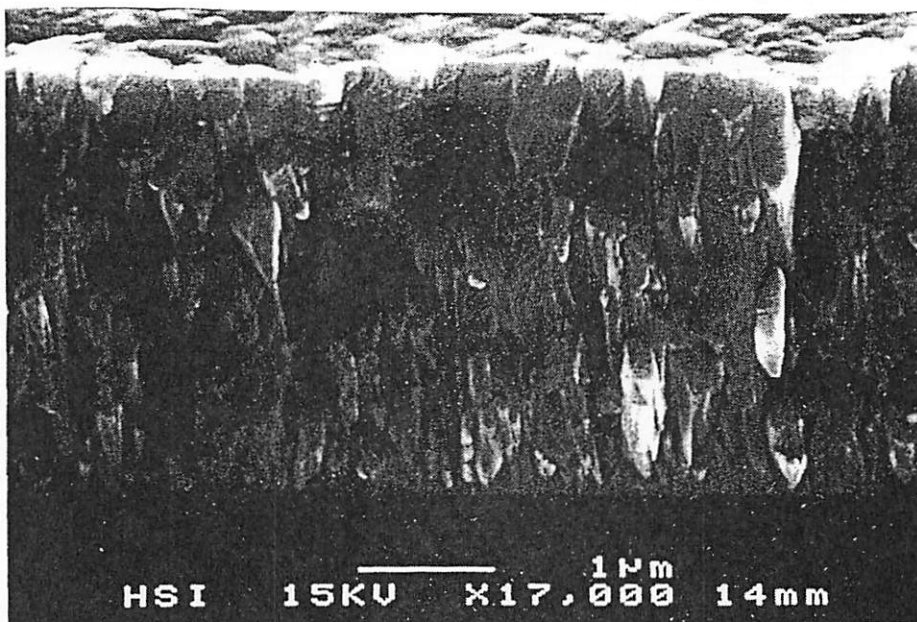


Bild 5.5 REM-Aufnahme einer Bruchkante einer ZnO-Schicht. Die Schicht ist auf $\langle 100 \rangle$ Si aufgewachsen. Die Vorzugsorientierung der Kristallite (c-Achsen-Orientierung) senkrecht zur Waferoberfläche (im Bild unten) ist zu sehen.

Eine REM-Aufnahme von einer Bruchkante einer ZnO-Schicht zeigt Bild 5.5. Es ist deutlich die Vorzugsorientierung der Kristallite senkrecht zur Substratoberfläche zu sehen. Durch eine Röntgenbeugungsanalyse kann die Orientierung der Kristallite quantitativ gemessen und für eine Schichtgüte-Charakterisierung als Kriterium herangezogen werden. Eine derartige Schichtanalyse mittels Röntgendiffraktometer zeigt Bild 5.6. Dargestellt sind die, über die Bragg-Bedingung gemessenen, Θ -2 Θ Scans der Intensitätsverläufe der {0002}-Beugungslinie bei einem Kippwinkel von -4° bis $+4^\circ$ ("Rockingkurve"). Der ausgeprägt auftretende (0002)-Peak zeigt, daß die gemessene Schicht hochgradig mit der c-Achse senkrecht zum Substrat orientiert ist. Die Halbwertsbreite der Ausrichtungsverteilung beträgt $1,3^\circ \pm 0,02^\circ$. Die gemessene Halbwertsbreite (FWHM) des (0002)-Peaks beträgt ca. $0,28^\circ$. Dieser Wert ist vergleichbar mit dem ZnO-Einkristallwert (Bulkmaterial: $\Delta\Theta = 0,19^\circ$).

Charakterisierung der Schichten Röntgenographische Beugungsanalyse (Bragg-Bedingung)

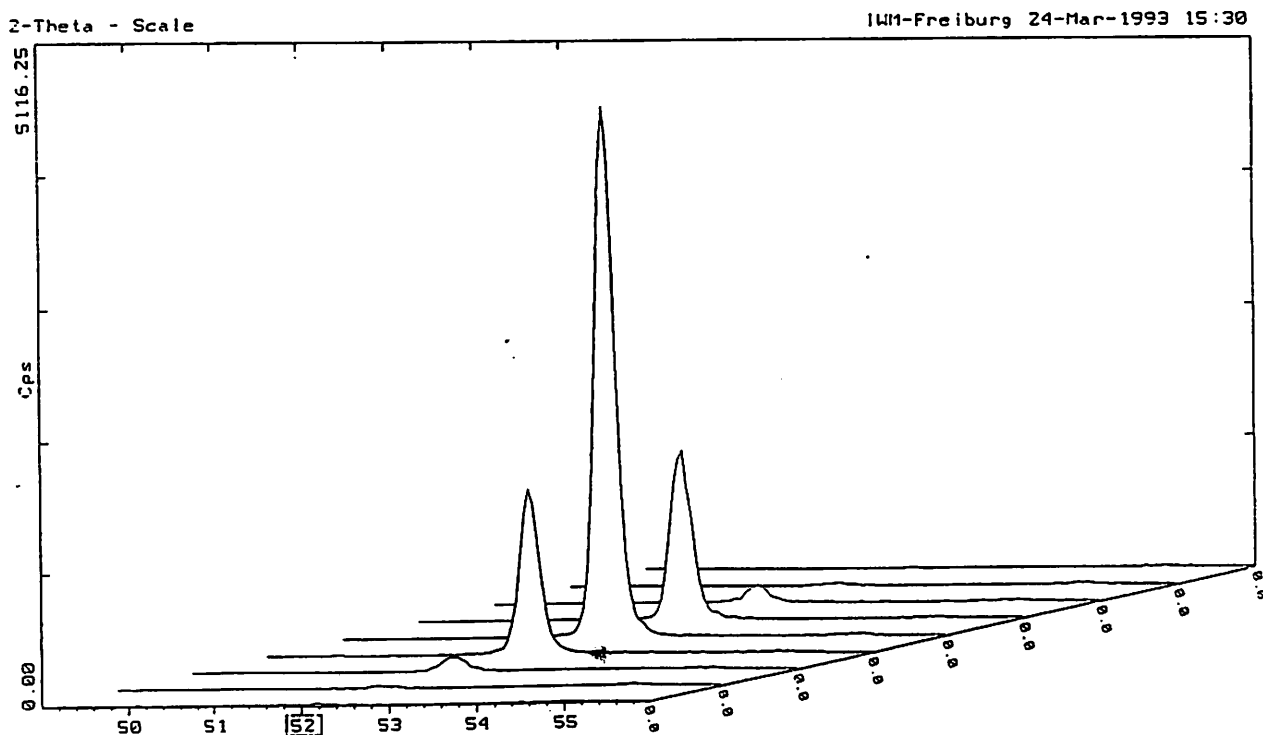


Bild 5.6 Röntgenbeugungsanalyse (Θ -2 Θ Scan) einer ZnO-Schicht. Dargestellt sind die Intensitätsverläufe der {0002}-Beugungslinie bei einem Kippwinkel von -4° (Scan im Bild vorn) bis $+4^\circ$ (Scan im Bild hinten).

5.2.2 Versuche zur Prozeßintegration von ZnO

Um die piezoelektrische Effektivität von ZnO-Schichten beurteilen zu können, wurden Vorversuche mit verschiedenen strukturierten ZnO-Schichten durchgeführt. Mit Hilfe von Schattenblenden wurden Balkenstrukturen (in Waferdicke) mit ZnO beschichtet und anschließend ebenfalls durch Schattenblenden mit Aluminium (als oberer Elektrode) besputtert. Die untere Elektrode bildete dabei ein auf Silizium-Bulk aufgesputtertes Al(1% Si)-Pad. Diese Schichten konnten mit einem Frequenzgenerator (Wavetek; $U = 10 \text{ V}_{pp}$) im kHz-Frequenzbereich zum Schwingen angeregt werden. Die Schattenmaske, die aus einem anisotrop geätzten $\langle 100 \rangle$ -Siliziumwafer bestand, wurde dabei auf die breitere Seite der im Querschnitt trapezförmigen freigeätzten Balken gelegt.

Der Herstellungsprozeß der Siliziumbalkenstruktur erfordert bei einem der acht Lithographieschritte eine Justiermarkenerkennung durch eine mehrere Mikrometer dicke Zinkoxidschicht hindurch. Versuche zeigten, daß bei der geeigneten Wahl der Sputterparameter eine 100 nm tiefe Stufe einer im thermischen Oxid geätzten Grabenstruktur durch eine mehrere μm dicke, transparente ZnO-Schicht im Auflicht-Mikroskop im Maskaligner noch deutlich zu erkennen ist (siehe Bild 5.7).

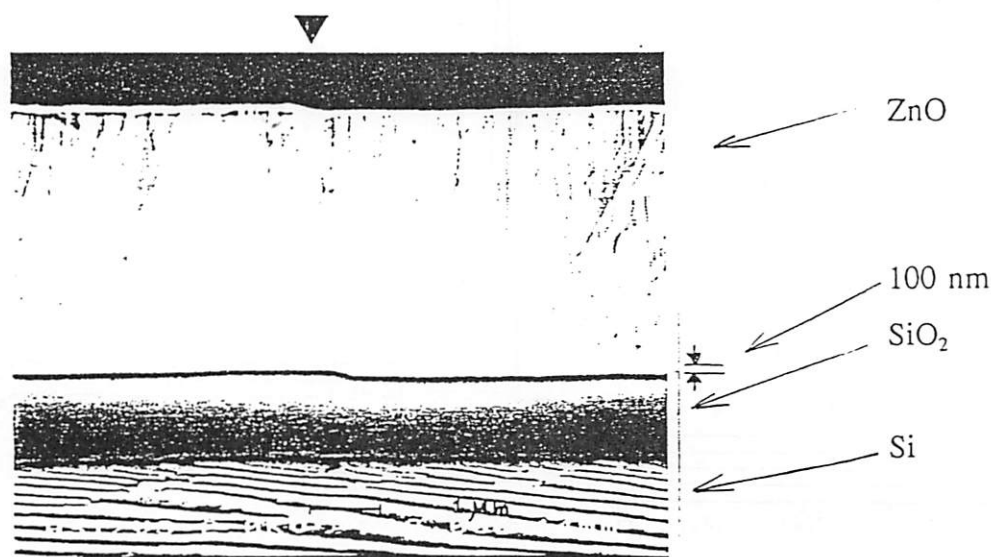


Bild 5.7 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Bruchkante eines ZnO-beschichteten Siliziumwafers. In die thermische Oxidschicht wurden vor der ZnO-Beschichtung 100 nm tiefe Stufen geätzt. In der Bildmitte ist die Stufenabbildung an der ZnO-Oberfläche zu sehen.

Das Zinkoxid ist ein sehr reaktives Material, das bei den nachfolgenden Herstellungsprozessen der Siliziumwafer eine Kontamination der Prozeßgeräte verursachen kann. Umgekehrt können auch die nachfolgenden Prozesse die erzeugte ZnO-Schicht zerstören [VEL 90]. Fragen der Prozeßkompatibilität und der Passivierung sind daher für ZnO besonders wichtig. Aus diesem Grund wurden umfangreiche Voruntersuchungen zur photolithographischen Strukturierung und zum naßchemischen Ätzen von dünnen ZnO-Schichten durchgeführt. Sie dienten zur Bestimmung der Ätzeigenschaften (Ätzraten, Ätzprofile, Rauigkeiten der Ätzfronten) in Abhängigkeit der Ätzparameter (Zusammensetzung, Temperatur und Bewegung der Ätzlösung, sowie der Ätzdauer). Die Versuche wurden an 3 - 5 μm dicken ZnO-Schichten, die auf $\langle 100 \rangle$ -Siliziumproben (p-dotiert, einseitig poliert) abgeschieden wurden, durchgeführt. Die beschichtete Seite der Substrate wurde belackt (AZ 1518) und die Lackschicht photolithographisch strukturiert. Hierbei sind das Wässern und die Aceton-Reinigung unkritisch, der Entwicklungsprozeß im AZ-Developer jedoch kritisch. Als naßchemische Ätzlösungen für ZnO dienten Mischungen aus Essigsäure (CH_3COOH , 100%), Ortho-Phosphorsäure (H_3PO_4 , 85%) und Wasser bei Raumtemperatur (21 °C):



Der Ätzprozeß wurde jeweils abgebrochen, sobald die Siliziumoberfläche sichtbar wurde. Aus dem Ausgangssubstrat wurden durch Ritzen und Brechen Testsubstrate mit darauf befindlichen ZnO-Stufen hergestellt. Die Bruchstücke wurden nochmals gereinigt und anschließend im Trockenofen bei 100 °C getrocknet. Die ZnO-Ätzlösung hat bei 21 °C eine Ätzrate von 3,3 $\mu\text{m}/\text{min}$. Silizium wird von dieser Lösung nicht angegriffen. Anschließend wurden die ZnO-Schichtdicken mittels Auflicht-Lichtmikroskopie und REM-Aufnahmen vermessen. Für jede Testätzung wurde die jeweilige Zusammensetzung der Ätzlösung in ein Diagramm übertragen (Bild 5.8).

Sämtliche Ätzversuche wurden bei ständiger Bewegung der Ätzlösung durchgeführt. Eine Kontrollmessung in unbewegter Flüssigkeit ergab eine ca. 4,4-fache Ätzdauer in derselben Ätzlösung. Die Bewegung der Ätzlösung hat somit einen wesentlichen Einfluß auf das Ätzverhalten. Dies ist auch daran zu erkennen, daß bei sämtlichen Ätzversuchen die Ätzraten am Substratrand am größten waren. Die Ätzrate nimmt mit steigendem Phosphorsäuregehalt zu und mit steigendem Essigsäuregehalt ab. Bei hohem Essigsäuregehalt (50%) findet eine große Unterätzung der Fotolackschicht statt, und es ist ein Eindringen der Ätzlösung zwischen ZnO-Schicht und Substrat zu beobachten.

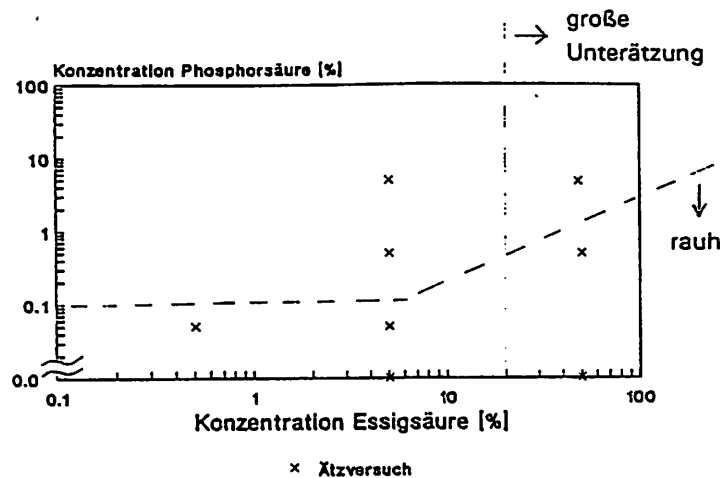


Bild 5.8 Ätzergebnis in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Ätzlösung

Das beste Ergebnis wird mit 0,5% Phosphorsäuregehalt erzielt. Mit abnehmendem Phosphorsäuregehalt werden die Ätzfronten allgemein rauher.

In weiteren Versuchen wurde der zeitliche Verlauf des Ätzzvorgangs unter gleichen Versuchsbedingungen zur Ermittlung der optimalen Ätzdauer und zur Untersuchung des Ätzverhaltens der ZnO-Kristallite untersucht (Ätzlösung: 5 ml H_3PO_4 + 50 ml CH_3COOH + 945 ml H_2O ; RT). Nachdem die Kristallite an den nicht maskierten Stellen entfernt sind, bildet sich eine Ätzfront mit zunächst flacher Neigung aus. Dies ist der optimale Zeitpunkt zum Abbruch des Ätzzvorgangs im Hinblick auf weitere darauffolgende Beschichtungen.

Im weiteren Ätzverlauf nimmt der Neigungswinkel der Ätzfront zu und erreicht nach 100% Überätzung ca. 90° , d. h. die Kristallite werden seitlich abgetragen (Bild 5.9).

Ergebnisse der Ätzversuche:

- Die Ätzrate steigt mit steigendem Phosphorsäuregehalt und nimmt mit zunehmendem Essigsäuregehalt ab.
- Die Ätzlösung und/oder die Probe müssen während des Ätzzvorgangs bewegt werden. Rühren steigert die Ätzrate um ca. Faktor 4, d.h. die Ätzreaktion ist diffusionsbegrenzt.
- Bei großen Substraten (100 mm Durchmesser) treten hervorgerufen durch lokal unterschiedliche Strömungsverhältnisse während des Ätzzvorgangs verschiedene Ätzzraten auf. Dadurch kann ein Überätzen der Probe an manchen Stellen nicht vermieden werden. Die dadurch bewirkte Unterätzung der Resistschicht muß durch ein entsprechendes Maskenlayout berücksichtigt werden.

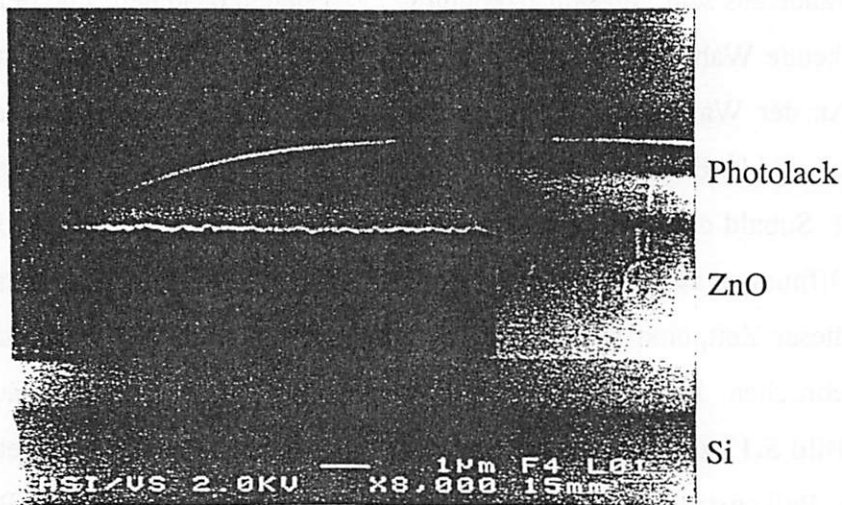


Bild 5.9 ZnO-Ätzprofil nach 100% Überätzung.

5.3 Dreifachbalken-Resonatoren aus Silizium

5.3.1 Herstellung von schwingfähigen Balken-Grundstrukturen aus Silizium

In (001)-Siliziumscheiben lassen sich mit Hilfe von KOH-Ätzlösungen Balken herstellen, die durch senkrecht zur Scheibenoberfläche stehende Wände begrenzt sind, d.h. die einen rechteckförmigen Querschnitt besitzen. Dazu muß die Maske parallel zur (100)-Richtung, d.h. 45° zum (110)-Waferflat ausgerichtet werden. Die seitlich begrenzenden Wände und der Grubenboden sind (100)-Ebenen bzw. kristallographisch gleichwertige Ebenen mit entsprechend identischen Ätzraten. Die Unterätzung der Maske (auf beiden Seiten des Wafers) stimmt also mit der Tiefe der Ätzgrube überein. Das bedeutet, daß sich die entstehenden Ätzgruben mindestens doppelt so breit wie tief ausbilden. Treffen sich die beidseitigen Ätzgruben in der Wafermitte, so entstehen **Balken mit rechteckförmigen Querschnitten** (siehe Bild 5.10)

Zur Herstellung von **trapezförmigen Balken** werden (100)-Si-Wafer in einem feuchten Oxidationsprozeß von beiden Seiten mit einer $1,5 \mu\text{m}$ dicken SiO_2 -Schicht versehen. Anschließend wird diese mittels Fotolithographie von beiden Seiten strukturiert. Beim darauf-

folgenden anisotropen Tiefenätzen mit KOH-Lösung bilden sich an der Wafervorderseite V-Gräben aus, deren Seitenwände aus sehr langsam ätzenden $\{111\}$ -Ebenen bestehen, und deren Tiefe durch eine entsprechende Wahl der Grubenbreite an der Waferoberfläche sehr genau bestimmt werden kann. An der Waferrückseite bildet sich eine größere Grube aus, deren Seitenwände ebenfalls aus $\{111\}$ -Ebenen bestehen, während dessen Boden eine ebene $\langle 100 \rangle$ -Ätzfront darstellt. Sobald diese Ätzfront die V-Gräben an der Vorderseite erreicht, bilden sich spaltförmige Öffnungen aus, die für eine Separierung der Balken sorgen. Durch optische Kontrolle kann dieser Zeitpunkt sehr genau bestimmt werden, und der Ätzprozeß wird an dieser Stelle abgebrochen. Im letzten Prozeßschritt wird mit gepufferter Flußsäure die Oxidschicht entfernt. Bild 5.11 zeigt in einem Querschliff eine mit dem oben beschriebenen Verfahren hergestellte Balkenstruktur. Durch Anätzen der konvexen Ecken an der Balkenunterseite bildet sich eine von der Trapezform abweichenden Form des Balkenprofils aus. Folgende geometrischen Strukturdaten wurden im Experiment verwendet:

$t = 28 \mu\text{m}$; $w = 50 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m}, 200 \mu\text{m}, 400 \mu\text{m}$; $l = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$.

Die Belichtung der Waferrückseite wurde mit speziellen Belichtungsgeräten (Süss MA 6 mit Infrarotbeobachtungseinrichtung und ET-AL6-2) durchgeführt, die auf optischem Weg eine genaue Vorder- zu Rückseitenbelichtung ermöglichen.

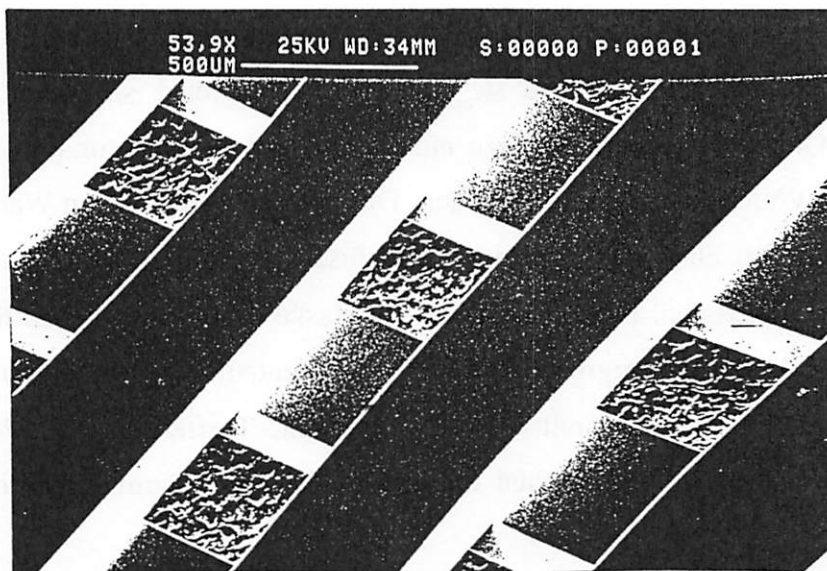


Bild 5.10 Balkenarray mit rechteckförmigen Querschnitten. Die Balken der rückseitigen Strukturierung sind um 90° versetzt angeordnet und mit den vorderseitigen Balken gitterförmig verbunden.

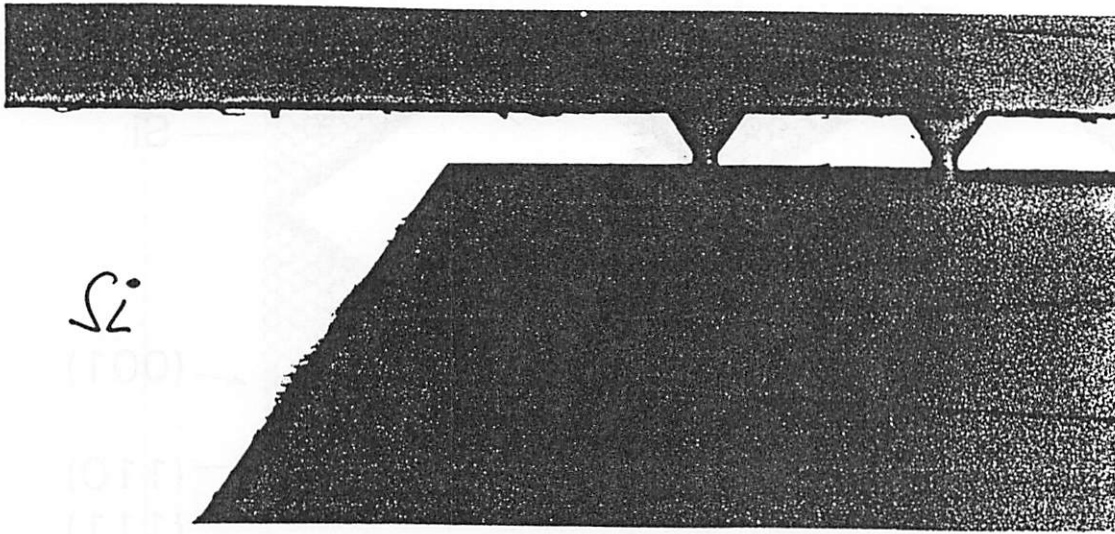


Bild 5.11 Querschliff einer Balkenstruktur aus einkristallinem Silizium

Versuche zur **Balkenherstellung mittels Laserschneiden** von Silizium-Membranen wurden ebenfalls erfolgreich durchgeführt. Das Schneiden von Silizium-Membranen mit Festkörperlaser stellt ein maskenloses Verfahren dar, das ohne den Einsatz aggressiver Ätzmedien auskommt. Somit ist das Laserschneiden als Alternative zu Trockenätzprozessen zur Separierung von ZnO-beschichteten Silizium-Membranstrukturen denkbar.

Die Schneidversuche wurden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser (mit Q-Switch zur Pulsleistungs/Pulsdauer-Verbesserung) in dünngeätzten Silizium-Membranen durchgeführt.

Mit den Laserparametern: Pulsenergie 4 mJ, Pulsdauer 200 ns, Pulsfrequenz 1 kHz, Strahldurchmesser ca. 10 μm , Leistungsdichte ca. 1 GW/cm², Vorschubgeschwindigkeit 200 $\mu\text{m/s}$ und Positioniergenauigkeit 1 μm wurden freitragende Balkenstrukturen erzeugt.

Durch **Laserbearbeitung** von geeignet maskierten $\langle 110 \rangle$ -Siliziumsubstraten und anschließend anisotropen Ätzen ist es möglich, ohne die Verwendung von Ätzstoppschichten freistehende monolithische Balkenstrukturen in Silizium herzustellen. Das am Institut entwickelte Verfahren [ALA 91] beruht auf der gleichzeitigen Erzeugung von zwei parallel angeordneten, teilweise geschlossenen Mikrokanalstrukturen [ALA 92], die sich bei geeignetem Abstand überlagern (Bild 5.12). Bild 5.13 zeigt eine REM-Aufnahme einer mit diesem Verfahren erzeugten monolithischen Balkenstruktur in $\langle 110 \rangle$ -Silizium [ALA 93].

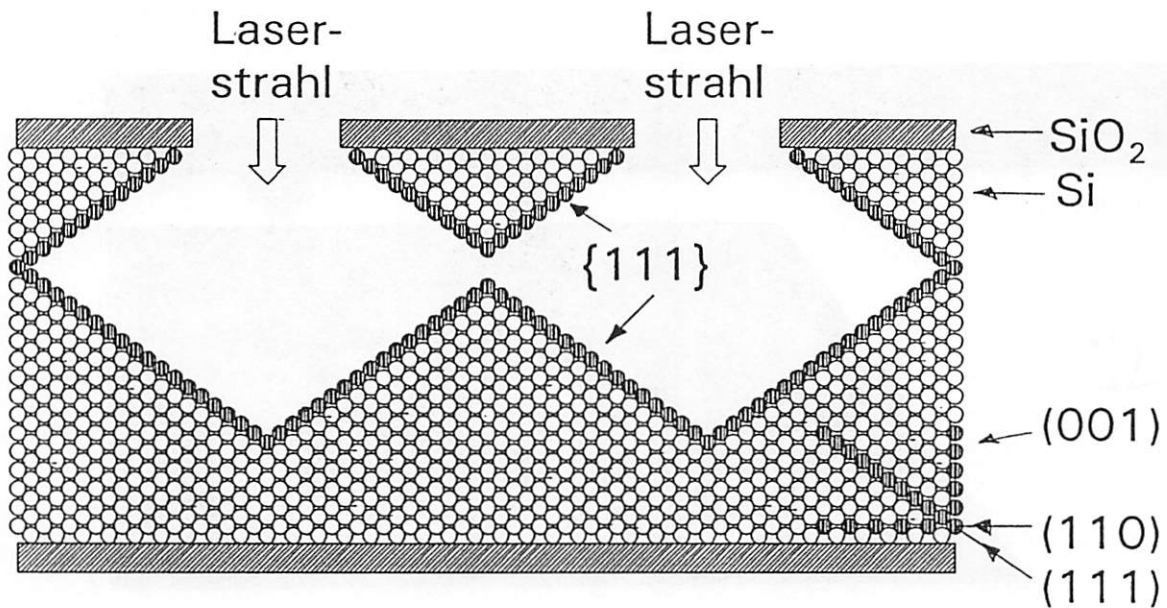


Bild 5.12 Schematische Darstellung einer monolithischen Balkenstruktur in $\langle 110 \rangle$ -Silizium, hergestellt durch Laserbearbeitung und anisotropes Ätzen

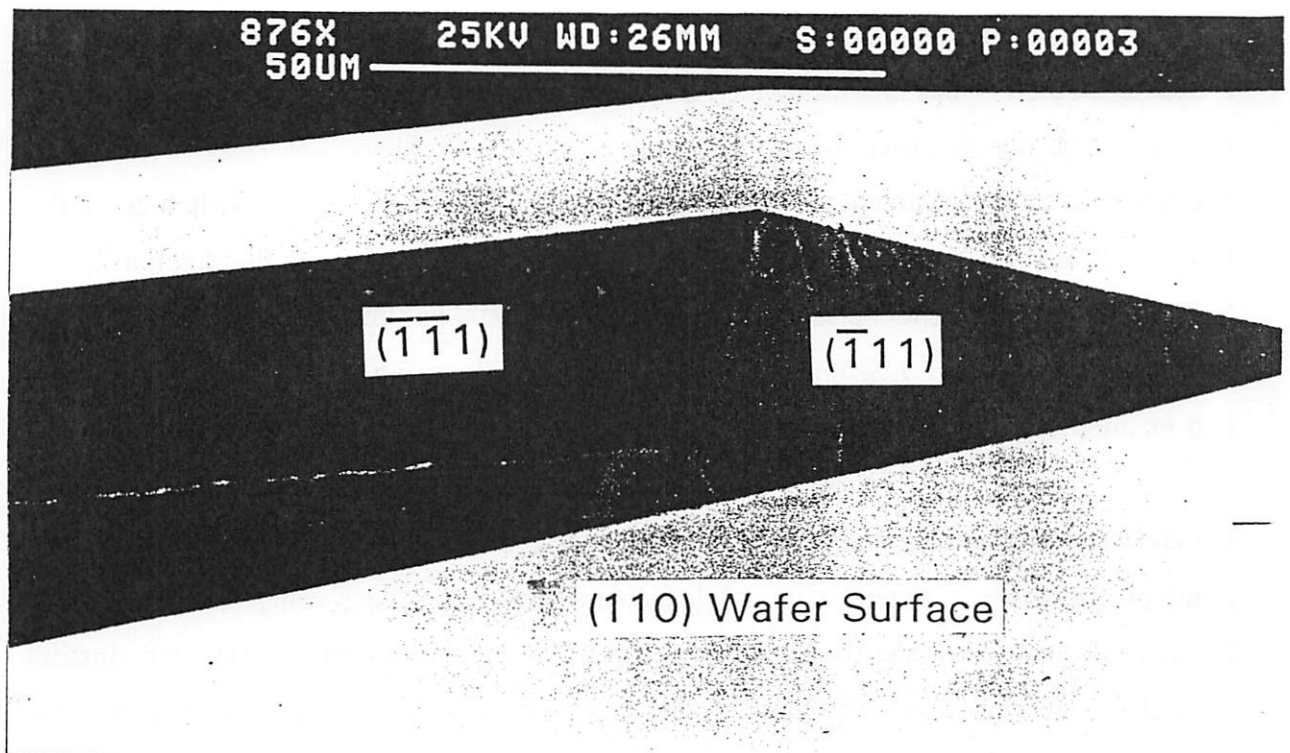


Bild 5.13 REM-Aufnahme einer monolithisch eingespannten Balkenstruktur in $\langle 110 \rangle$ -Silizium.

5.3.2 Herstellung von frequenzanalogen Kraftsensoren

Anhand einer Musterstruktur (Bild 5.14) wurden die einzelnen Prozessschritte, die Prozeßabfolge und die Prozeßkompatibilitäten untersucht und optimiert.

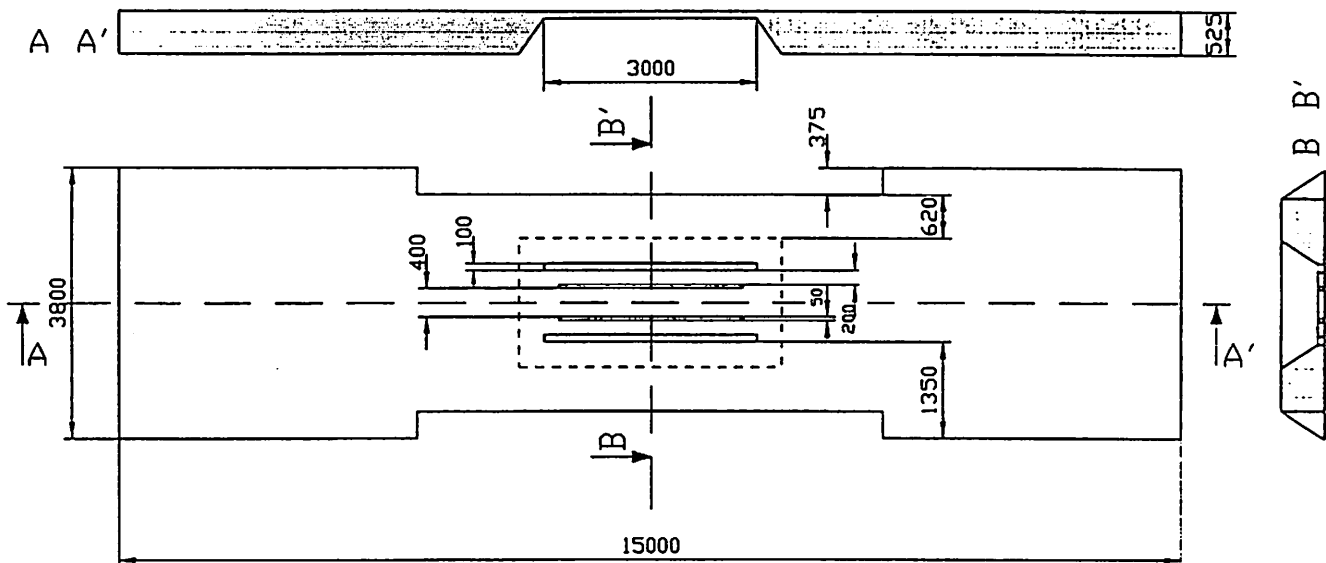


Bild 5.14 Dimensionen der Dreifachbalken-Musterstruktur zur Erarbeitung des Herstellungsprozesses.

Für die Herstellung von resonanten Siliziumstrukturen mit ZnO-Anregung wurde der folgende Prozeßablauf entwickelt:

Ausgangsmaterial: (100)-Siliziumwafer, \varnothing 100 mm, niedrig n-dotiert, $d = 520 - 530 \mu\text{m}$, beidseitig poliert.

Prozeßabfolge:

- 1.) p^+ -Diffusion auf Vorderseite, strukturiert.
- 2.) Drive-in.
- 3.) Abscheiden und Strukturieren von ZnO auf Vorderseite.
- 4.) Aufputtern und Strukturieren von Aluminium auf Vorderseite.
- 5.) Passivieren mit LTO und PECVD-Nitrid auf Vorderseite.
- 6.) Naßchemisches Tiefenätzen auf der Rückseite in KOH bei geschützter Vorderseite.
- 7.) Durchätzen der Membran von der Vorderseite (Plasmaätzen).

Die Ausgangssubstrate werden thermisch oxidiert. Das anschließend strukturierte Oxid dient als Diffusionsmaske für die darauffolgende p^+ -Dotierung zur Herstellung der Grundlektrode auf der Wafervorderseite. Darauf wird Siliziumnitrid abgeschieden, das als Ätzmaske für die Waferrückseite und als Isolationsschicht für die Vorderseite dient. Im Nitrid werden die Kontaktpads und die Fenster für die ZnO-Beschichtung auf der p^+ -Wanne geöffnet. Anschließend wird auf der Vorderseite ganzflächig Zinkoxid abgeschieden und photolithographisch strukturiert.

Für diesen Prozeßablauf sind insgesamt 8 Masken notwendig. Der Maskendatensatz wurde im Datenformat GDSII mit dem Maskenprogramm *Edge* (Fa. Cadence) erstellt. Dieser Maskendatensatz wurde extern bei einem kommerziellen Maskenhersteller mittels Pattern-Generator-Verfahren zur Herstellung der Belichtungsmaskensätze verwendet.

Die Verteilung der Siliziumbalkenstrukturen "DROSO(2-9)" sowie der Testfelder "TF3", der Justierfelder "ALI4" und der Testmembranen "MEM(1,2)" sind in Bild 5.15 dargestellt.

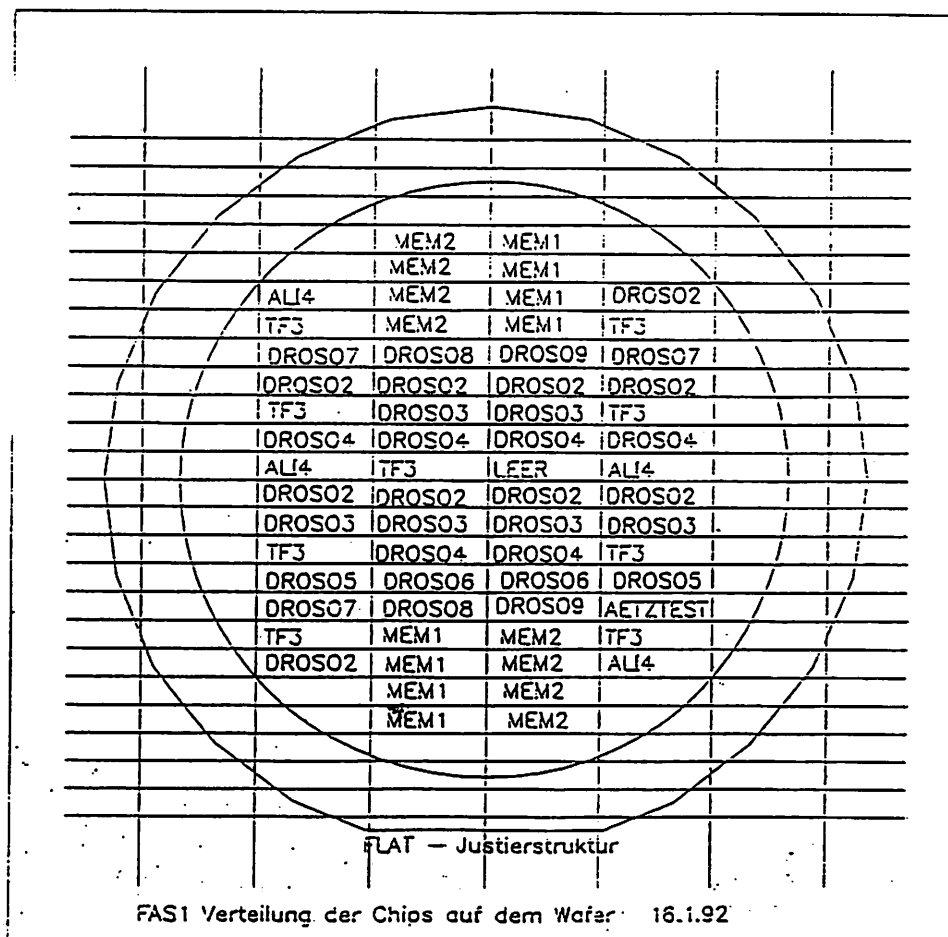


Bild 5.15 Verteilung der verschiedenen Chips auf dem Siliziumwafer.

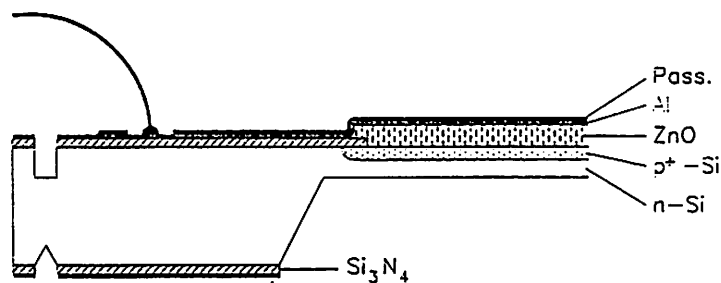
Auf jedem Wafer waren jeweils noch ein Ätztest-Chip für die Tiefenätzung in KOH und ein Leerchip vorhanden. Der Randbereich des Wafers ist so gestaltet, daß eine Ätzhalterung ("Ätzlöffel") zum einseitigen naßchemischen Ätzen verwendet werden kann.

Die Siliziumbalken-Chips DROSO 2 - DROSO 9 mit den Außenabmessungen $15 \times 3,75$ mm enthalten Balkenstrukturen mit den Spezifikationen:

- Einfachbalkenstrukturen mit den Balkenlängen $l = 3, 4, 5$ mm, der Balkendicke $t = 25 \mu\text{m}$ und der Balkenbreite $w = 400 \mu\text{m}$.
- Dreifachbalkenstrukturen mit den Balkenlängen $l = 3, 4, 5$ mm; $t = 25 \mu\text{m}$; $w = 400 \mu\text{m}$ (Innenbalken) bzw. $w = 200 \mu\text{m}$ (Außenbalken).
- ZnO-Bedeckung der Balkenenden (am Übergangsbereich zum Bulkmaterial): jeweils 17, 20 und 23% der Länge des Balkens.

Die ZnO-Bedeckung der Balkenenden ist schematisch in Bild 5.16 dargestellt.

Kontaktierung obere Elektrode



Kontaktierung untere Elektrode

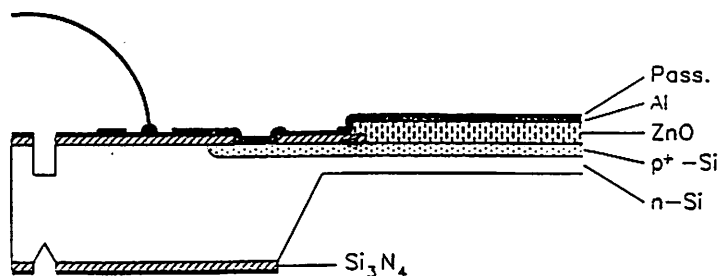


Bild 5.16 ZnO-Bedeckung der Balkenenden (schematisch).

5.3.3 Güte-Erhöhung durch Momenten-Kompensation

Mehrfachbalken-Resonatoren haben in der Anwendung als Kraftsensoren gegenüber Einfachbalken-Resonatoren den Vorteil, daß bei geeignetem Befestigungsbereich und gegenphasiger Anregung eine Momenten-Kompensation im Befestigungsbereich erreicht werden kann. Diese Momenten-Kompensation bewirkt, daß die Bewegung der "Nettomasse" im Resonator null ist, d.h. in den Befestigungsbereich (bzw. in das Bulkmaterial) des Resonators dissipiert keine Energie. Die Schwingungsenergie bleibt im Resonator und dadurch ist eine höhere Schwingungsgüte der Resonatoren erreichbar. Eine hohe Güte des Resonators bedeutet einen scharfen Resonanz-Peak und hat die Vorteile, daß zur Aufrechterhaltung der Oszillation im Anregungsschwingkreis minimale Energie verbraucht wird und daß die Frequenzstabilität sehr ausgeprägt ist, was wiederum störende Einflüsse des Oszillatorschaltkreises in der Rückkopplung auf den Resonator verringert.

Piezoelektrisch über dünne Schichten angetriebene Silizium-Balkenresonatoren schwingen im transversalen Biegeschwingungsmodus aus der Ebene heraus (Out-of-plane). Berücksichtigt man dies, so kann eine bei axialer Zugbeanspruchung sinnvolle Momenten-Kompensation erst mit einer Dreifach- oder Vierfach-Balkenstruktur verwirklicht werden. Bei der hier betrachteten **Dreifach-Balkenstruktur** muß der mittlere Balken die doppelte Breite der äußeren Balken haben. Desweiteren müssen die beiden äußeren Balken gegenphasig zum mittleren Balken zum Schwingen angeregt werden. Bild 5.17 zeigt die ersten drei Schwingungsmoden M1, M2 und (den hier relevanten gegenphasigen Mode) M3.

Diese Schwingungsmoden wurden durch FEM-Simulation mit den Vorgaben: Balkenlänge $l = 3000 \mu\text{m}$, Balkendicke $= 20 \mu\text{m}$, mittlere Balkenbreite $= 400 \mu\text{m}$ und Entkoppelbereich $= 200 \mu\text{m}$ berechnet. Der **Entkoppelbereich** ist die Länge des auf Balkendicke geätzten, membranartig gestalteten Befestigungsbereichs der Balken zum Bulkmaterial (Bild 5.18).

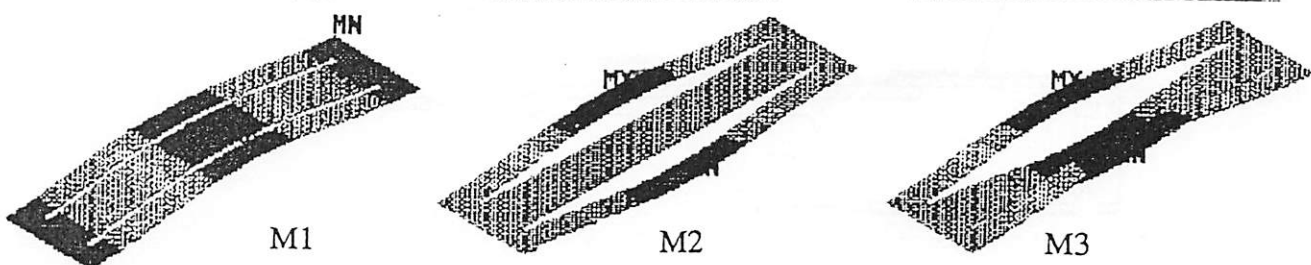


Bild 5.17 Schwingungsmoden M1, M2 und M3

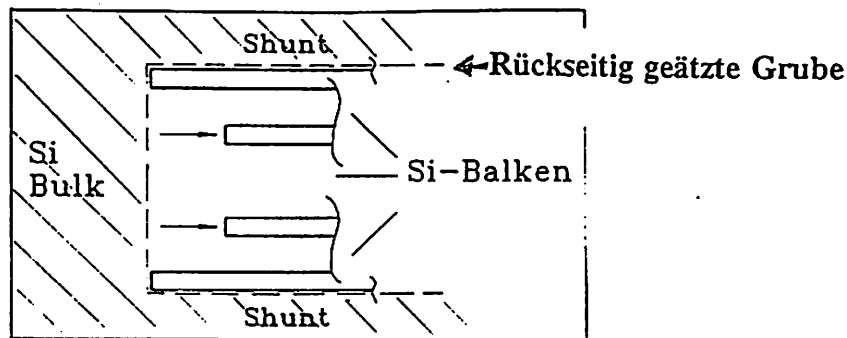


Bild 5.18 Entkoppelbereich der Dreifach-Balkenstruktur (siehe Pfeil).

5.3.4 Resonator-Optimierung durch Modenentkopplung

FEM-Berechnungen und Messungen mit dem Laser-Vibrometer zeigen, daß bei größer werdendem Entkoppelbereich eine höhere Modenaufspaltung erreicht werden kann. Dies ist in Bild 5.19 dargestellt. Durch FEM-Simulation wurde die Abhängigkeit der Resonanzfrequenzen der Moden M1, M2 und M3 von der Länge des Entkoppelbereichs von $50\text{ }\mu\text{m}$ bis $400\text{ }\mu\text{m}$ errechnet. Ein deutliches Aufspalten der Moden ist aus dem FEM-Ergebnis ersichtlich. Mit Hilfe piezoelektrischer Anregung und optischer Abtastung zweier verschiedener Dreifachbalkenstrukturen mit den Längen des Entkoppelbereichs $= 50\text{ }\mu\text{m}$ (Schaubild links unten, Bild 5.19) bzw. $200\text{ }\mu\text{m}$ (Schaubild rechts unten, Bild 5.19), wurde diese durch FEM-Simulation errechnete Aufspaltung nachgemessen. Trotz geringer Veränderungen der relativen Länge des Entkoppelbereichs ($50\text{ }\mu\text{m}$ entsprechen $1,7\%$ der Balkenlänge; $200\text{ }\mu\text{m}$ entsprechen $6,7\%$ der Balkenlänge) werden hohe relative Aufspaltungen der Moden M1, M2 und M3 erreicht (siehe Tabelle 5.2)

Tabelle 5.2 Relativer Abstand der Resonanzfrequenzen f_{M2} , f_{M3} , normiert auf f_{M1} .

50 μm		200 μm	
FEM	Messung	FEM	Messung
0,3 %	0,5 %	7,5 %	7 %
0,6 %	0,7 %	14,1 %	13 %

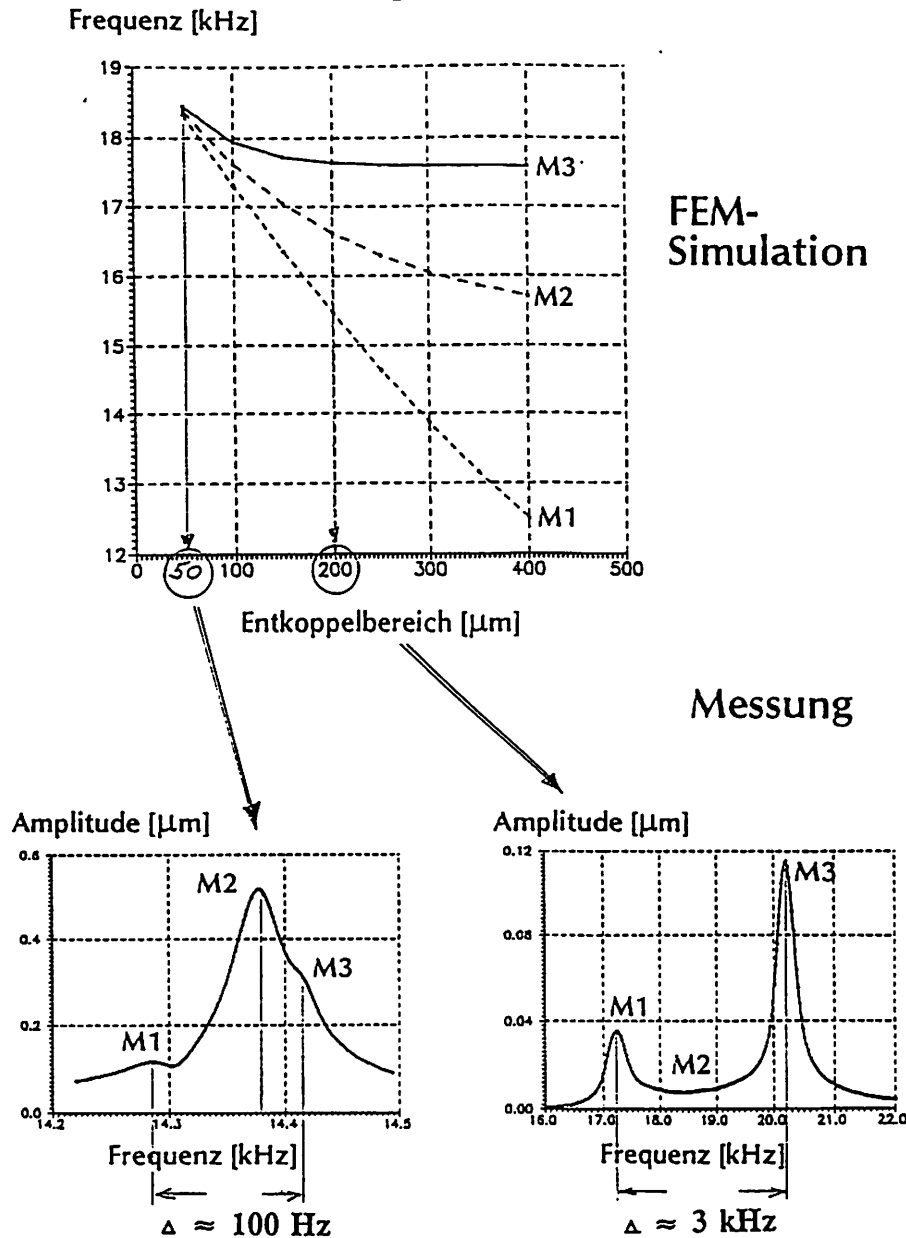


Bild 5.19 Modenaufspaltung der Grundmoden M1, M2 und M3 in Abhängigkeit von der Länge des Entkoppelbereichs. Die Messungen (Bild links unten: Entkoppelbereich = $50 \mu\text{m}$; Bild rechts unten: Entkoppelbereich = $200 \mu\text{m}$) wurden mit dem POLYTEC-Laser-Vibrometer durchgeführt.

Wie im Bild 5.19 gezeigt, kann durch eine geeignet gewählte Entkopplung eine völlige Modentrennung bzw. -entkopplung und dadurch eine Unimodalität im Resonanzverhalten erreicht werden. Dies begünstigt ein besseres "Einlocken" einer Oszillatorschaltung. Ein weiterer Effekt einer geeignet gewählten Entkopplung ist die Verbesserung der Momenten-Kompensation bei der Mode M3.

5.4 Aufbau- und Verbindungstechnik

Zur Vereinzelung der Kraftsensoren aus dem Waferverbund (siehe auch Bild 5.15) wurde der fertig prozessierte Wafer mit einem speziell für diese Anwendung entwickelten, CAD-unterstützten Laser-Schneidverfahren prozessiert. Bei diesem Prozeßschritt erfolgte noch kein vollständiges Durchtrennen des Bulkmaterials, d.h. Vereinzelung der Bauelemente, da die einzelnen Kraftsensoren jeweils noch mit zwei individuell angepaßten Rundlöchern im Bulk-Bereich versehen wurden. Diese Rundlöcher, die zur axialen Krafteinleitung mittels Stahlstiften dienen, müssen aus diesem Grund senkrecht zur Oberfläche stehende Wände haben und durchgehend zylindrisch und gratfrei sein. Nach dem Laser-Schneiden der Löcher (vollständiges Durchtrennen mit hoher Laserstrahlenergie) erfolgt ein definiertes "Anscheiden" zur Chip-Vereinzelung (mit geringerer Laserstrahlenergie) und anschließendes mechanisches Trennen des Wafers. Das Trennen des Wafers in einzelne Chips kann sehr definiert durchgeführt werden, da die Bauteil-Bereiche auf dem Wafer rückseitig mit anisotrop geätzten V-Gräben vorstrukturiert sind. Der vereinzelte Sensor-Chip wird mittels Stahlstift auf ein Keramikchip, der ebenfalls mit einem Loch desselben Durchmessers versehen ist, geklebt. Anschließend werden die Bondpads der Dreifachbalkenstruktur mit denjenigen des Keramikchips durch Drahtbonden kontaktiert. Das Handling dieses hybriden Aufbaus (Sensorelement, Keramikleiterplättchen, Stahlstifte; siehe Ausschnitt Bild 5.20) ist einfach und sicher, da dieser geklebte Aufbau mit den Stahlstiften über passend gebohrte Reiter-Halterungen in einen dafür konstruierten Meßaufbau für die Krafteinleitung (Bild 5.20) eingesetzt werden kann.

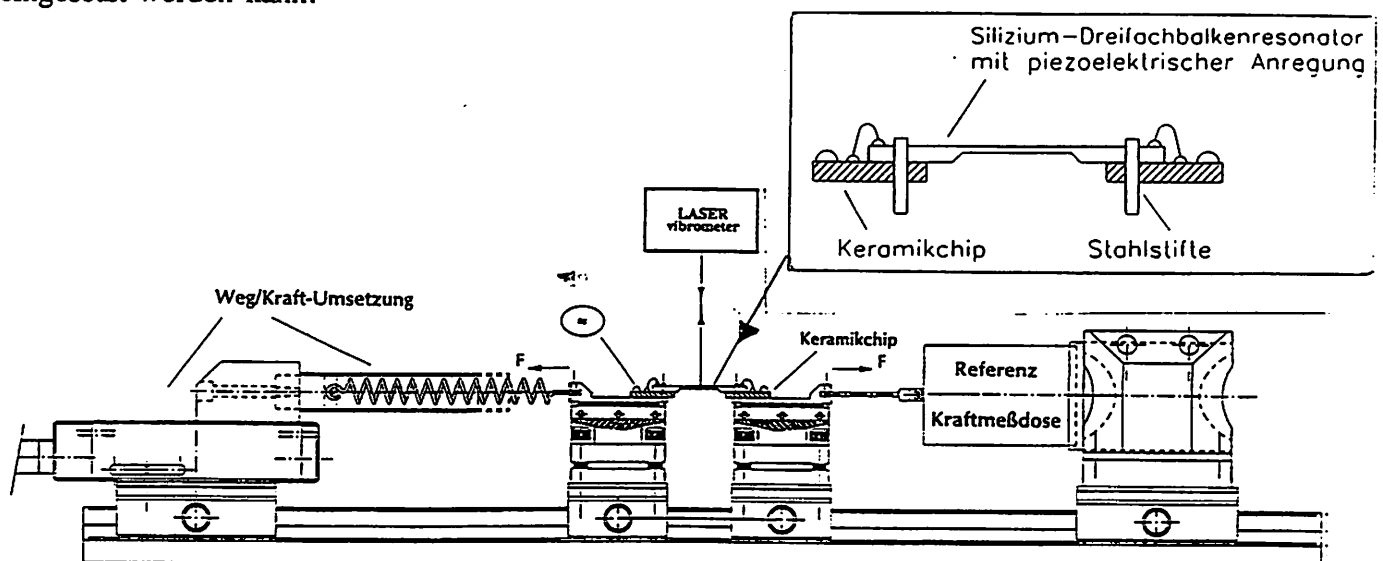


Bild 5.20 Meßaufbau für die Krafteinleitung (Prinzip: piezoelektrische Anregung/optische Abtastung).

5.5 Messungen

5.5.1 Vermessung der Dreifachbalken mit einem Laservibrometer

Die Resonanzfrequenzen, Schwingungsformen und absoluten Amplitudenspektren der resonanten Sensorstrukturen wurden am Institut mit den optischen Meßsystemen Autofocussystem (Fa. UBM) und Laservibrometer (Typ OFV 1100, Fa. POLYTEC) vermessen, so daß eine quantitative Charakterisierung der hergestellten Silizium-Dreifachbalken vorgenommen werden konnte. Beim Laservibrometer handelt es sich um ein interferometrisches Nachweisverfahren, bei dem die durch die Bewegung der Siliziumbalken hervorgerufene Dopplerverschiebung des rückreflektierten Laserlichtes detektiert wird [POLY]. Die Dopplerverschiebung ist proportional zur Schwingungsschnelle (Geschwindigkeit) der reflektierenden Oberfläche. Die optischen Messungen mit dem Laservibrometer ermöglichen die Bestimmung der Eigenfrequenzen mit Hilfe der Geschwindigkeits- und Amplitudenspektren bis 1 MHz. Das Laservibrometer bietet zusätzlich zur Messung der Schwingungsschnelle die Möglichkeit der absoluten Amplitudenbestimmung (Auflösung: 8 nm).

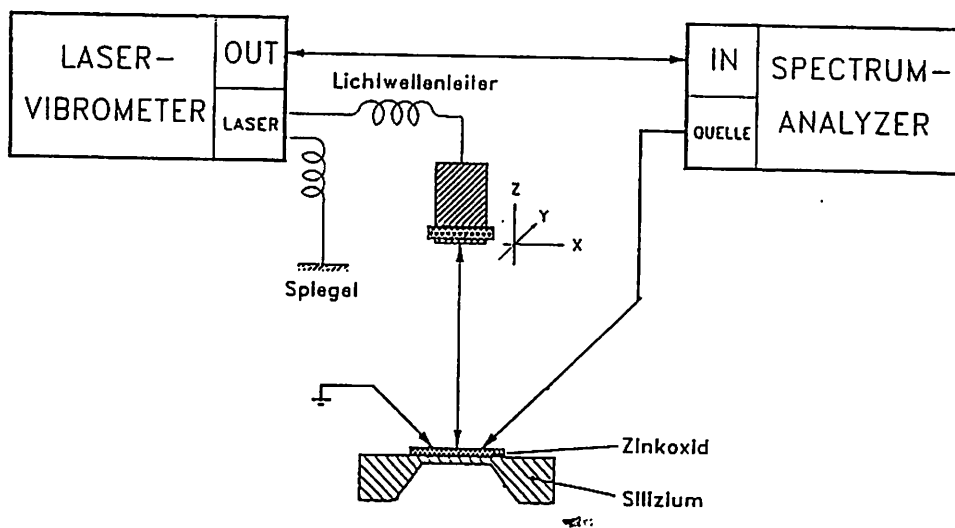


Bild 5.21 Piezoelektrische Ansteuerung der Kraftsensoren

Die piezoelektrische Anregung der Dreifachbalken erfolgte über die ZnO-Schichten, deren Elektroden mittels Frequenzgenerator-Ausgang eines Spektrumanalysators (Typ 3588A, Fa. Hewlett-Packard; Frequenzbereich 10 Hz - 1 MHz; max. Amplitude 10 dBm = 4,2 V)

angesteuert wurden (Bild 5.21). Die optische Abtastung mit dem Laservibrometer erfolgte jeweils in der Balkenmitte der beiden äußeren bzw. des mittleren Balkens. Der Laserspot-Durchmesser betrug - abhängig von der Justierung - etwa 100 - 200 μm . Die quantitative Charakterisierung der Resonatoren ist bei geeigneter Fixierung der Dreifachbalken (Vereinzelung, Kleben und Bonden der Chips; siehe Kap. 5.4) im Meßaufbau für die Krafteinleitung (s. Bild 5.20) sehr gut durchzuführen. Insbesondere kann mit diesem Meßaufbau der Einfluß des Entkoppelbereichs auf die Modenaufspaltung und die Momenten-Kompensation gemessen werden, da die Möglichkeit zur Messung der Frequenzen, mechanischen Güten, Schwingungsformen und -amplituden aller drei Balken gegeben ist.

5.5.2 Kraft/Frequenz-Kennlinie

Mit dem in den vorigen Kapiteln erwähnten Meßprinzip der piezoelektrischen Anregung und optischen Abtastung wurden mit dem im Bild 5.20 dargestellten Meßaufbau für die Krafteinleitung die Dreifachbalkenstrukturen definiert mit Kraft beaufschlagt. Der Meßaufbau wurde speziell für diese Untersuchungen im Institut mit der Vorgabe entwickelt, im Zusammenhang mit dem hybriden Aufbau der Kraftsensoren eine hysteresefreie Krafteinleitung in das Bauelement zu erhalten. Der Meßaufbau für die Krafteinleitung besteht aus einer Präzisions-Referenzkraftmeßdose (Typ Q11, Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik), zwei justierbaren Reiter-Aufnahmen, einer Präzisionsfeder mit Einstellvorrichtung (Mikrometerschraube oder DC-Motorantrieb für Dauerversuche) für die präzise Weg/Kraft-Umsetzung und zwei reibungsfrei kugelgelagerten Reitern aus Titan zur torsionsfreien Aufnahme des hybriden Sensoraufbaus. Durch den horizontalen Aufbau der Anordnung, die Verwendung von Standardkomponenten der optischen Präzisionsmeßtechnik (Optische Bank, Laserhalterung, Taumelausgleich-Justierung) und dem CAD-unterstützten Laserschneiden der Durchgangslöcher im Siliziumsensorchip für die Stiftaufnahme kann dadurch eine exakt axiale Krafteinleitung in die Dreifachbalkenstruktur sowie eine genaue Justierung des Laservibrometers (siehe auch Bild 5.21) erfolgen.

Im Bild 5.22 ist eine mit dieser Anordnung gemessene Kraft/Frequenz-Kennlinie einer Dreifachbalkenstruktur dargestellt. Der Meßbereich der Referenzkraftdose beträgt 5 N.

Für diese Messung wurde eine Silizium-Dreifachbalkenstruktur mit der Balkenlänge $l = 3$

mm verwendet und im Schwingungsmod M3 angeregt. Die Meßkurve zeigt hier einen deutlichen Buckling-Effekt (Auslenkung aufgrund einer Vorspannung) der Zinkoxidschicht. Bei Anlegen einer äußeren Kraft nimmt die Resonanzfrequenz ab (Ausgangswert $f = 22$ kHz bei Referenzkraft $F = 0$ N) und steigt nach einer Vorspannung von ca. 2,7 N (entsprechend $f_0 = 8,25$ kHz) wieder mit einer Kraftempfindlichkeit $\Delta f/\Delta F \approx 8,6$ kHz/N kontinuierlich an.

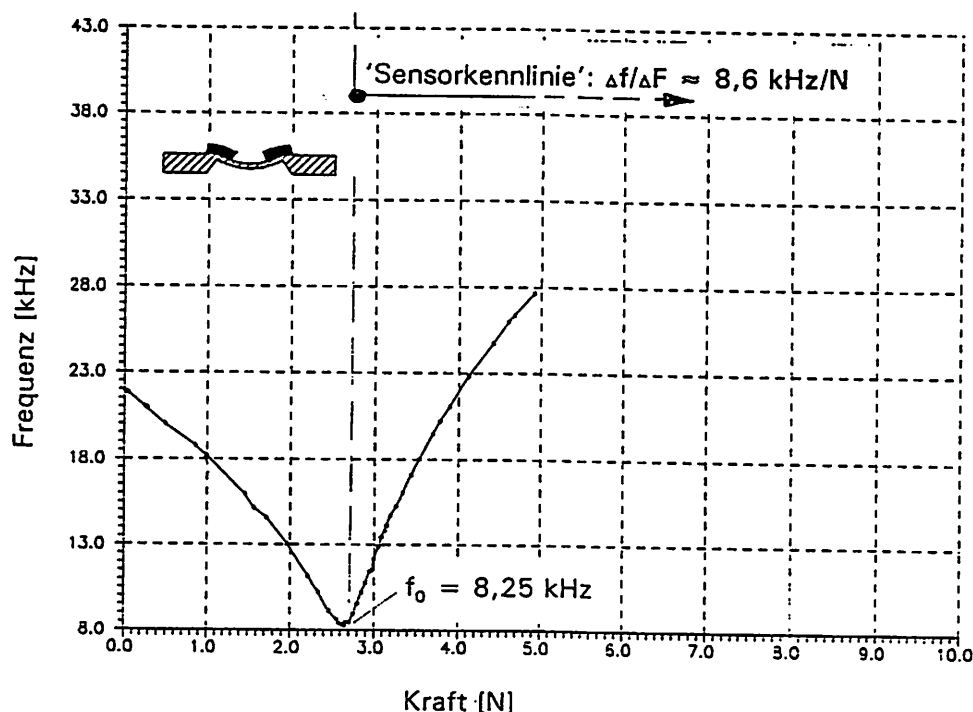


Bild 5.22 Kraft/Frequenz-Kennlinie einer Dreifachbalkenstruktur im Mode M3. Der Verlauf der Kennlinie zeigt einen Buckling-Effekt der ZnO-Schicht.

Dieser Verlauf der Kennlinie kann dadurch erklärt werden, daß durch die hier gewählten Sputterparameter eine hohe Druckspannung (c-Stress) in der Schicht erzeugt wird, welche die Siliziumbalken (Dicke ca. $25 \mu\text{m}$) nach unten auslenken (buckling). Durch eine äußere Zugkraft am Sensor wird die Steifigkeitsänderung im bimorph aufgebauten Resonatorbalken, die durch die Auslenkung aufgrund der Schichtspannung verursacht wird, relaxiert. Diese Relaxation der Steifigkeit des Resonatorbalkens bedingt eine Frequenzerniedrigung bis zu der äußeren Kraft, die einem Ausgleich der Schicht-Druckspannung (bzw. der Auslenkung) im Resonatorbalken entspricht. Wird die äußere Kraft weiter erhöht, so führt dies wieder zu einer Änderung im Spannungszustand des Resonators und damit zu einer Frequenzerhöhung. Ein sinnvoller Kraftsensoreinsatz ist somit erst ab einer "prozeßspezifischen Vorspannung"

des Sensorelements gegeben. Die Schichtspannung der ZnO-Schicht läßt sich über komplexe Sputterparameter-Änderungen in einem weiten Bereich von Druck- bis Zugspannungen über mehrere hundert MPa einstellen. Reproduzierbare, weitgehend spannungsfreie Schichten sind somit eine wichtige Vorgabe bei dieser Kraftsensor-Applikation der piezoelektrischen Schichten. Die im Bild 5.22 dargestellte Fraft/Frequenz-Kennlinie wurde über mehrere Meßdurchläufe gemessen und zeigte im Rahmen der Meßauflösung keine Hysterese.

Die großen Einflüsse von prozeßtechnischen Herstellungsparametern auf das Sensorverhalten sind besonders auch bei den ätztechnischen Prozeßschritten festzustellen.

Eine Auswertung von mehreren Messungen ergab, daß z.B. bereits kleine Toleranzen bei der naßchemisch geätzten Balkendicke t zu erheblichen Resonanzfrequenzvariationen führen: Balkendickenschwankungen um $\Delta t = \pm 2 \mu\text{m}$ ergeben Frequenzänderungen um $\Delta f \approx \pm 1 \text{ kHz}$ bei Sensoren mit der Balkenlänge $= 4 \text{ mm}$.

Weitere Messungen ergaben, daß die Schwingungsmoden M3, wie erwartet, die höchste Kraftempfindlichkeit und die höchste Schwingungsgüte hat. Güten von $Q_{M3} \approx 600$ wurden gemessen, wobei $Q_{M3} \approx 2 - 4 Q_{M1}$ ist.

5.6 Zusammenfassung

Frequenzanaloge Kraftsensoren in Silizium mit quasi-digitalem Frequenzausgang werden vorgestellt. Der kraftempfindliche Resonator wurde durch eine membranartige Dreifachbalkenstruktur (Dicke $= 25 \mu\text{m}$) realisiert.

Die Anregung der Resonanzschwingungen des im antisymmetrischen Grundmode (äußere Balken gegenphasig zum inneren Balken) schwingenden Kraftsensors erfolgt durch eine piezoelektrische Zinkoxid-Dünnschicht (Dicke $= 3 \mu\text{m}$). Die Zinkoxidschichten werden durch HF-Magnetron-Sputtern hergestellt. Die für den transversalen piezoelektrischen Effekt vorteilhafte Vorzugsorientierung der Kriställite (c-Achse senkrecht zur Substratoberfläche) kann in komplexer Weise durch die Sputterparameter beeinflußt werden.

Mehrfachbalken-Resonatoren haben den Vorteil, daß bei geeignetem Entkoppelbereich und gegenphasiger Anregung eine Momenten-Kompensation der Balkenschwingungen im Befestigungsbereich erreicht werden kann, d.h. die Schwingungsenergie dissipiert nicht ins Bulkmaterial. Dadurch sind im Vergleich zu Einfachbalken-Strukturen höhere Resonatorgüten

erreichbar.

FEM-Berechnungen und Messungen zeigen, daß bei größer werdendem Entkoppelbereich eine hohe Modenaufspaltung erfolgt. Dadurch ergibt sich eine gute Unimodalität für das "Einlocken" einer Oszillatorschaltung.

Die prozeßtechnische Realisierung der Dreifachbalken-Kraftsensoren erfolgt durch eine p⁺-Dotierung von n-Silizium für den Grundelektrodenbereich, Abscheiden und Strukturieren der ZnO-Anregungsbereiche und Abscheiden von Aluminium für die obere Elektrode. Anschließend wird die Passivierung, das rückseitige anisotrope Tiefenätzen zur Festlegung der Balkendicke und das Freilegen der Balken von der Vorderseite durch Plasmaätzen durchgeführt.

Durch einfaches Ändern (prozeßtechnisch nur eine Maske) des Entkoppelbereichs können durch FEM-Simulation und korrelierte Messungen die Momenten-Kompensation und die Modenaufspaltung untersucht werden.

Kraft/Frequenz-Messungen zeigen, daß der antisymmetrische Grundmode die höchste Kraftempfindlichkeit und die höchste Güte hat. Diese Messungen zeigen auch, daß möglichst stressfreie ZnO-Dünnschichten für Sensor-Anwendungen gefordert sind.

Literaturverzeichnis

- [ALA 91] Alavi, M.; Büttgenbach, S; Schumacher, A.; Wagner, H.-J.,
Laser machining of silicon for fabrication of new microstructures,
Proc. 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'91),
San Francisco, CA, U.S.A., June 23-27 1991, pp. 512-515.
- [ALA 92] Alavi, M.; Büttgenbach, S.; Schumacher, A.; Wagner, H.-J.,
Fabrication of microchannels by Laser machining and anisotropic etching of
silicon,
Sensors and Actuators A, Vol. 32, No. 1-3 (1992) 299-302.
- [ALA 93] Alavi, M.; Fabula, Th.; Schumacher, A.; Wagner, H.-J.,
Monolithic microbridges in silicon using laser machining and anisotropic
etching,
Proc. Eurosensors VI, San Sebastian, Spain, October 5-7 1992,
to be published in Sensors and Actuators A (1993).
- [ALB 82] Albert, W.C.,
Vibrating quartz crystal beam accelerometer,
ISA 28th Int. Instr. Symp., Vol.28, No.1 (1982) 33.

- [ALB 84] Albert, W.C.,
Force sensing using quartz crystal flexure resonator,
Proc. 38th Ann. Frequency Contr. Symp. (1984) 233.
- [ALB 88] Albert, W.C.,
A low cost force sensing crystal resonator applied to weighing,
Proc. 42th Ann. Frequency Contr. Symp. (1988) 78.
- [CHU 83] Chuang, S.S.,
Force Sensor using DETF quartz crystals,
Proc. 38th Ann. Frequency Contr. Symp. (1983) 248.
- [EER 86] EerNisse, E.P.; Paros, J.M.,
Resonator force transducer,
Patentschrift # 0 050 307 B1, QUARTEX, Inc. (1986).
- [HEU 89] Heuberger (Hrsg.),
Mikromechanik,
Springer-Verlag, 1989.
- [IKE 90] Ikeda, T.,
Fundamentals of piezoelectricity,
Oxford Science Publications, 1990.
- [KIR 83] Kirman, R.G.,
Vibrating quartz force sensor transducer,
Tempcon Conf. Papers, London (1983).
- [LAN 85] Langdon, R.M.,
Resonator sensors - a review,
J.Phys.E: Sci.Instrum., Vol.18 (1985) 103.
- [POLY] POLYTEC - Benutzeranleitung,
Laservibrometer OFV 1100,
POLYTEC GmbH, Waldbronn.
- [TIL 91] Tilmans, H.A.C.; Bouwstra, S.; Fluitman, J.H.J.,
Design considerations for micromechanical sensors using encapsulated
built-in resonant strain gauges,
Sensors and Actuators A, 25-27 (1991) 79.
- [VEL 90] Vellekoop, M.J.; Visser, C.C.G.; Sarro, P.M.; Venema, A.,
Compatibility of zinc oxide with IC processing,
Sensors and Actuators, A21 - A23 (1990) 1027.
- [ZIN 85] Zingg, W.,
Miniatur-Quarزشwinger und -Quarzsensoren,
Jahrbuch Deutsche Ges. f. Chronometrie, 36 (1985) 27.