

### **3.Zwischenbericht**

**zum**

**BMFT-Verbundprojekt  
"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung  
frequenzanaloger Sensoren"**

**Teilvorhaben  
"Entwicklung der technologischen Grundlagen  
mit dem Schwerpunkt Silicium-Mikromechanik"**

**Förderkennzeichen 13 AS 0118**

**Berichtszeitraum: 1.7.-31.12.1990**

**Robert Bosch GmbH  
Postfach 106050  
7000 Stuttgart 10**

**Projektleiter: Dr.J. Schweikhardt**

## INHALT

### Zusammenfassung:

- Stand der Arbeiten
- Geplanter Fortgang der Arbeiten

### Einzeldarstellung:

1. Bearbeitung von Silicium mit Laserstrahlen
  - 1.1 Bearbeitung mit einem Nd/YAG-Laser
  - 1.2 Bearbeitung mit einem Excimer-Laser
  - 1.3 Vermeidung des Abtrennens mit Laserstrahl
2. Prinzip eines resonanten Kraftsensors
3. Berechnungen zur Auslegung
4. Masken-Layout FAS2-3
5. Doppelseitige Ätzung
6. Beschichtung mit Zinkoxid und Aluminium-Elektroden
7. Bisherige Messungen
  - 7.1 Versuche zur Anregung von Eigenschwingungen
  - 7.2 Messungen der Übergangswiderstände und Ströme
  - 7.3 Beispiel für rechnerischen spezifischen Widerstand des ZnO
  - 7.4 Mögliche Ursachen für zu geringe Übergangswiderstände und damit Nichtschwingen

## Zusammenfassung:

### Stand der Arbeiten:

- Die nichtreaktive, rein pyrolytische Materialbearbeitung von Silicium mit Laserstrahlen wurde weiter verfolgt. Dabei lag der Schwerpunkt bei der Erzeugung schwingungsfähiger Strukturen aus dünngätzten Membranen und dem Schneiden von ungedünnten Silicium-Wafern, insbesondere zum Herauslösen fertiger Proben aus dem Waferverband. Die Ergebnisse mit einem Nd/YAG-Laser wurden mit ersten Versuchen mit einem Excimerlaser verglichen.
- Prinzip und Auslegung eines frequenzanalogen Kraftsensors, der mit einer dünnen Zinkoxidschicht piezoelektrisch angeregt werden soll, wurden ausgearbeitet. Grundschrwingungen und Empfindlichkeiten auf Zugkräfte wurden in Abhängigkeit von den verschiedenen geometrischen Größen berechnet und daraus ein Layout mit Sensorstrukturen erarbeitet.
- In einem doppelseitigen zweistufigen Prozeß wurden Strukturen für Kraftsensoren naßchemisch geätzt. Die Dicke der dünnen Schwingbalken wurde dabei über die Ätzzeiten frei wählbar eingestellt.
- Die geätzten Strukturen wurden durch Metallmasken hindurch mit 5 µm Zinkoxid und 0,5 µm Aluminium als Elektrodenmaterial beschichtet. Mit einer rechnergesteuerten Einrichtung wurden die verschiedenen elektrischen Kennlinien aufgenommen. In ersten Versuche gelang es noch nicht, die Schwingbalken zum Schwingen anzuregen. Es müssen dazu noch verschiedene Punkte verbessert werden.

### Geplanter Fortgang der Arbeiten:

1. Technologien für die Anwendung von piezoelektrischen Zinkoxidschichten
  - Prozeßkompatibilität von Zinkoxid
  - Strukturieren über Photolithographie und Naßätzen
  - Passivieren von Zinkoxidschichten
  - Kontaktierverfahren
2. Antriebe mit Zinkoxidschichten
  - Design, optimale Auslegung für Sensorik
  - Analytik der piezoelektrischen Eigenschaften
  - Messung der Eigenschwingungen

3. Herstellen von Strukturen

- Proben für Belastungsversuche bei Projektpartnern
- Optimierung der Auslegung
- Naßätzen von Strukturen in Silicium
- Trockenätzen von Silicium mit RIE

4. Kraftsensor

- Krafteinleitung
- Aufbau- und Verbindungstechnik
- Befestigung des Sensors
- elektrische Kontaktierung
- Sensormessungen (Resonanz, Güte, Empfindlichkeit)

5. Sensor unter Ausnutzung der Coriolis-Beschleunigung

- Überprüfung der Eignung des frequenzanalogen Prinzips zusammen mit Projektpartnern
- Abschätzung einer Drehratenempfindlichkeit
- Auslegung mit größtmöglichem Effekt

## Einzeldarstellung:

### 1. Bearbeitung von Silicium mit Laserstrahlen

#### 1.1 Bearbeitung mit einem Nd/YAG-Laser

##### 1.1.1 Bohren von Löchern

Ein Nd/YAG-Laser, wie er vorhanden ist, kann auch bei der Materialbearbeitung von Silicium für verschiedene Aufgaben eingesetzt werden. Im letzten Halbjahresbericht ist beschrieben, daß das zur Verfügung stehende Modell zwar Justierlöcher erzeugen kann, daß sie aber für eine beidseitige Photolithographie nicht ausreichend reproduzierbar und stabil senkrecht erzeugt werden können. Die erreichbare Justiergenauigkeit von Vorderseite zu Rückseite konnte nicht unter  $\pm 15 \mu\text{m}$  gedrückt werden.

##### 1.1.2 Siliciumschneiden

Wenn die maximale Leistung des Lasers eingesetzt wird, kann damit auch ein Silicium-Wafer in voller Dicke geschnitten werden. Diese Möglichkeit ist besonders interessant für das Heraustrennen von Proben. Im Gegensatz zum Sägen mit einer Wafersäge können damit die Proben im Layout ohne Rücksicht auf über das ganze Substrat laufende gerade Sägelinien angeordnet werden. Außerdem können einzelne, gewünschte Proben herausgetrennt werden.

Für das sonst übliche Sägen der Wafer müssen sie auf Folie aufgeklebt und die vereinzelter Stücke später davon wieder abgelöst werden. Beim Sägevorgang tritt eine mechanische Belastung durch die Kühlung mit Flüssigkeit auf. Dies führt bei mikromechanisch bearbeiteten Proben zu Ausfällen, die über ein Lasertrennen vermieden werden können.

Wegen der Bearbeitung mit Einzelpulsen entsteht bei einem einzelnen Durchgang eine Art verzahnte Kammstruktur. Diese Verzahnung verhindert trotz vollkommener Trennung der beiden Teile ein leichtes Herausnehmen einer geschnittenen Probe bereits nach einem Durchlauf.

Es wurden folgende Einstellungen gewählt:

- Nd:YAG-Laser, gepulst mit 18 W maximale Leistung als Durchschnittswert
- Pulsfrequenz mit noch maximaler Leistung: 2500 Hz
- Energie pro Puls ca. 7,2 mJ
- Rechnerische mittlere Energiedichte dabei dann ca.  $125 \text{ J/cm}^2$  bei Annahme einer gleichmäßigen Energieverteilung über eine Kreisfläche mit Durchmesser  $85 \mu\text{m}$

- Fahrgeschwindigkeit 0,25 mm/s mit 0,1  $\mu\text{m}$  Pulsabstand auf der Probe
- Jede Linie mindestens 3 x schneiden, damit die Einzellöcher in statistischer Weise nebeneinander sitzen.

Diese Methode kann auch eingesetzt werden um beliebig geformte Löcher in einen Wafer oder eine Probe zu schneiden. Der Nachteil besteht im großen Zeitaufwand, der bei der beschriebenen Einrichtung für das Schneiden von 525  $\mu\text{m}$  dickem Material nötig ist.

### 1.1.3 Laserschneiden von Zungen

Auch bereits dünn geätztes Material kann mit Laserstrahlung strukturiert werden. Hier treten jedoch Probleme auf. Kanten, die mit einem gepulsten Laser erzeugt werden, sind ausgefranst und haben keine definierte Schnittlinie, was die Genauigkeit der Struktur beeinträchtigt und ihre Empfindlichkeit auf Verschmutzung und andere Einflüsse erhöht. Außerdem werden große thermische Spannungen induziert, die zu Rissen in den dünnen Strukturen führen. Dies ist bei einem rein pyrolytischen Verfahren nicht zu vermeiden, da für das Verdampfen von Silicium eine absorbierte Mindestenergie notwendig ist. Außerdem erreicht auch bei relativ niedrig eingestellter Durchschnittsleistung jeder Impuls hohe Spitzenwerte. Es ist deshalb nicht gelungen z. B. Zungen aus 20  $\mu\text{m}$  oder 50  $\mu\text{m}$  dicken geätzten Membranen zu schneiden. In allen Fällen bildeten sich Risse senkrecht zur Schnittrichtung, die an der Befestigung der Zunge ansetzten und die fertig geschnittene Zunge absprengten.

## 1.2 Bearbeitung mit einem Excimerlaser

### 1.2.1 Laserschneiden von Zungen

Um in Grundsatzversuchen die Wirkung eines Excimerlasers damit vergleichen zu können, wurden verschiedene Si-Membrane am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) mit einem KrF-Excimerlaser bearbeitet. Mit verschiedenen Einstellungen wurde versucht, Streifen oder Zungen aus einer vorhandenen, anisotrop geätzten Membran zu erzeugen. Abb. 1 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Schnitten in einer 120  $\mu\text{m}$  dicken Siliciummembran, erzeugt mit 6 J/cm<sup>2</sup>. Bei der Wellenlänge 248 nm ist die Absorption mit über 10<sup>6</sup> cm<sup>-1</sup> sehr hoch. Das bedeutet, daß bereits auf einer Strecke von nur 50 nm 99 % der Energie absorbiert werden. Dies hat zur Folge, daß pro Impuls ein sehr dünner Bereich abgedampft werden kann, andererseits aber auch ein Rückstoß auf die verbleibende Membran entsteht. Es zeigt sich, daß Streifen aus einer Membran herausgeschnitten werden können, aber daß dies aber auch mit einigen Nachteilen verbunden ist.

Die ursprünglich große Strahlfläche eines Excimerlasers mit voller Energie ist über Projektionsoptiken nur begrenzt verkleinerbar, was eine Mindestbreite von Schlitzern ergibt. Andernfalls kann durch Ausblenden über eine schmale Schlitzblende nur ein kleiner Teil der Laserenergie ausgenutzt werden. Die Pulsfrequenzen liegen üblicherweise bei nur 20 Hz. Sie wurden bei diesen Versuchen zum schonenden Abtragen bewußt noch niedriger gehalten.

### 2.1.2 Siliciumschneiden

Bei entsprechender Wahl eines Excimerlasers, z. B. der Fa. Polytec, kann bei Einsatz der vollen Energie für das Schneiden eines Schlitzes in Si-Vollmaterial mit einer Dicke von  $525\text{ }\mu\text{m}$  eine Schnittleistung von  $0,6\text{ mm/s}$  erreicht werden. Es wird dabei eine Frequenz von 150 Hz, eine 52fache Verkleinerung des dann auf  $0,4\text{ mm}$  abgebildeten Schlitzes, eine erreichbare Energiedichte pro Puls von  $60\text{ J/cm}^2$  und damit eine Abtragsrate von  $6,5\text{ }\mu\text{m}$  Tiefe pro Puls, d.h.  $525\text{ }\mu\text{m}$  in  $0,54\text{ s}$ , angenommen.

### 1.3 Vermeidung des Abtrennens mit Laserstrahl

Soll das Herausarbeiten von Proben mit einem Laserstrahl ganz vermieden werden, gibt es noch eine andere Möglichkeit, das Sägen zu umgehen. Wird im Layout auf dem Wafer bereits vorgesehen, daß an allen Kanten Ätzgräben vorhanden sind und nur noch schmale Stege die gewünschten Proben im Wafer halten, so können sie durch Herausbrechen vereinzelt werden. Eine einzelne Probe aus der Mitte eines Wafers kann damit jedoch nicht gewonnen werden.

## 2. Prinzip eines resonanten Kraftsensors

Im Gegensatz zu Quarz ist Silicium selbst nicht piezoelektrisch aktiv. Es ist deshalb eine Fremdanregung nötig. Eine Anregung über hybrid aufgebrachte Piezoelemente ist außer aus geometrischen Gründen bei den kleinen Kraftsensoren nicht für das frequenzanaloge Prinzip möglich, da sonst die Empfindlichkeit auf die Meßgröße drastisch verkleinert würde. Ein aufgeklebter Piezokristall zeigt keine große Veränderung seiner Eigenfrequenz bei Anlegung einer Zugspannung an das Silicium-Element. Eine Dünnschichtlösung ist deshalb erforderlich. Als geeignetes Material kann Zinkoxid angesehen werden, das hexagonal strukturiert ist und mit seiner c-Achse senkrecht auf der Probenoberfläche stehen sollte. Mit einer ZnO-Schicht ist es möglich, neben der Schwingungsanregung auch die Messung der Schwingung in einer einheitlichen Technik auszuführen.

Zwischen einer oberen Elektrode auf ZnO und der Elektrode, die über Aluminium durch das Silicium gebildet wird, soll dann eine Spannung angelegt werden können, die eine möglichst konstante Feldstärke parallel zur c-Achse des ZnO aufrechterhält. Diese Feldstärke verzerrt das Gitter über eine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte, führt zu einer Verbiegung der ZnO-Schicht und kann damit den Schwingbalken rhythmisch anregen. Umgekehrt erzeugt eine Bewegung des Schwingbalkens eine Verbiegung der ZnO-Schicht, was zur Gitterverzerrung und zu Ladungsverschiebungen führt. Über zwei Elektroden ist dann die Meßspannung abzugreifen.

Abb. 2 zeigt das verwendete Prinzip eines resonanten Kraftsensors im Querschnitt und in der Draufsicht. In einem stabilisierenden Rahmen aus ungedünntem Silicium befindet sich ein dünner Biegebalken, der in Resonanz schwingen soll. Bei äußerer Belastung verteilt sich die Zusatzspannung auf alle Querschnitte, also auch auf den Schwingbalken, und verändert dessen Eigenfrequenz. Die Veränderung seiner Resonanzfrequenz ist also ein Maß für die äußere Kraft. Angeregt wird über die piezoelektrische Schicht aus Zinkoxid, an die über eine Aluminium-Elektrode eine elektrische Feldstärke angelegt wird. Über eine zweite Elektrode auf dem Zinkoxid kann die Schwingung wieder abgegriffen werden. Es werden p-dotierte Silicium-Wafer mit rund  $10 \Omega\text{cm}$  verwendet. Sie bilden mit ihrer im Vergleich zu ZnO relativ guten Leitfähigkeit eine elektrische Äquipotentialfläche.

### 3. Berechnungen zur Auslegung

Für den Schwingbalken nach Abb. 2 gelten die Gleichungen für den beidseitig eingespannten Biegebalken. Die Werte von Grundfrequenzen sind für Biegebalken mit Längen von 1 - 10 mm in Abb. 3 dargestellt. Dabei kann die Auslegung auf einen sinnvollen Bereich eingegrenzt werden. Die folgende Abschätzung bildet jedoch keine starre Grenze.

Schwingbalken sollten nicht unter  $10 \mu\text{m}$  dick sein wegen der Herstellungsprobleme auch in Zusammenhang mit den folgenden Beschichtungen und der zu großen Gefahr des Ausknickens. Bei einer Dicke über  $100 \mu\text{m}$  ist die Eigenschwingung des Bändchens nicht mehr sicher vom stützenden Rahmen zu separieren. Für die Länge kann man von einer Obergrenze von 10 mm ausgehen, da es sich ja um einen Mikrosensor handeln soll, während sich aus dem Aufbau mit piezoelektrischen Schichten und den darauf platzierten Aluminium-Elektroden eine gewisse Mindestlänge von z. B. 1 mm ergibt. Die ersten Resonanzen sollten auch nicht zu hoch liegen, damit mit kleiner Energie noch deutliche Resonanz-Amplituden anregbar sind. Auch steigen die Dämpfungsprobleme und die Probleme mit der Güte des Schwingers mit steigender Frequenz. Dazuhin ist auch die nichtelektrische, spezielle Meßtechnik in der Frequenz begrenzt. Eine Obergrenze von 100 kHz ist wohl anzustreben.



Nimmt man eine Auslegung nach Abb. 2 und berücksichtigt, daß die seitlichen Trag- oder Verstärkungsbalken auch einen speziellen Ätzquerschnitt haben, wie er in Abb. 9 dargestellt ist, so verteilt sich eine äußere Kraft bei genau axialem Zug entsprechend ihrem Flächenanteil auf den dünnen Schwingbalken und zwei wesentlich dickere Tragbalken. Dies hat eine reduzierte Empfindlichkeit und eine größere Stabilität zur Folge.

Das Ergebnis dieser Überlegungen ist in Abb. 4, Abb. 5 und Abb. 6 dargestellt. Abb. 4 zeigt die Zugempfindlichkeit des Schwingbalkens in Abhängigkeit von einer direkt an ihn angreifenden Kraft. In Abb. 5 sind die äußeren Tragbalken mit berücksichtigt. Die Frequenzänderung ist logarithmisch aufgetragen, was den Einfluß der Balkenbreite bei größeren Dicken noch erkennen läßt. In Abb. 6 ist in der linearen Auftragung dafür der entscheidende Einfluß der Balkendicke auf die absolute Zugempfindlichkeit dünner Biegebalken besser zu sehen.

#### 4. Masken-Layout FAS2-3

Die so erarbeiteten Erkenntnisse und Abschätzungen wurden anschließend mit dem in der RB-Forschung entwickelten Programm "Biene" in ein Maskenlayout umgesetzt. Es besteht aus zwei Photomasken für Vorder- und Rückseite des Wafers zur Herstellung von Masken aus Siliciumnitrid für das doppelseitige Ätzen in KOH. Die Schwingbalkenlänge ist dabei von 2 mm bis 10 mm variiert, die Breite von 0,2 mm bis 0,8 mm (Abb. 7). Jede der elf Sensorstrukturen ist auf einem Wafer zweimal vertreten. Die Anordnung ist spiegelsymmetrisch gewählt.

Die Dicke wird durch die Ätzbedingungen zeitabhängig eingestellt und ist demzufolge bei gegebenem Layout noch frei wählbar. Die Eigenresonanzen bei anzustrebenden Dicken von 20  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$  liegen dann bei 1,8 kHz bis 44 kHz. Die Zusammenstellung der Variationen zeigt Abb. 8.

Jede Sensorstruktur ist von der nächsten durch einen durchgeätzten Längsschlitz getrennt, so daß sie jeweils nur an den Längsseiten mit dem Rest des Wafers zusammenhängt, wo sie dann auf kurzem Weg mit dem Laserstrahl abgetrennt werden kann.

Für die doppelseitige Belichtung im Süss-Maskaligner MA 25 sind sehr präzise Justiermarken und Meßstrukturen nötig, die sich unter der mittleren Reihe der Sensorstrukturen jeweils bei der äußersten Struktur befinden.

## 5. Doppelseitige Ätzung

Abb. 9 zeigt das Prinzip der doppelseitigen anisotropen Ätzung in KOH. Beispielfhaft werden die Ätzschritte dargestellt, mit denen aus Wafern der Dicke  $500\text{ }\mu\text{m}$  ein  $50\text{ }\mu\text{m}$  dicker Schwingbalken hergestellt wurde (aus herstelltechnischen Gründen hatten die von Fa. Wacker gelieferten doppelseitig polierten Wafer eine nicht geplante Dicke von nur  $500\text{ }\mu\text{m}$  statt der üblichen  $525\text{ }\mu\text{m}$ ):

- a. Der beidseitig mit deutlich verschiedenen plasmageätzten Siliciumnitrid-Ätzmasken versehene Wafer wird in eine Teflon-Ätzdose eingesetzt, so daß die "Vorderseite" gegen den naßchemischen Ätzprozeß geschützt wird.
- b. In 30prozentiger Kalilauge wird die Rückseite bei  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit einer Ätzrate von  $90\text{ }\mu\text{m/h}$  5 Stunden lang, d. h.  $400\text{ }\mu\text{m}$  tief, geätzt. Es entsteht eine  $100\text{ }\mu\text{m}$  dicke Membran, deren Größe die Fläche für die Schwingbalken und die danebenliegenden Schlitzte bestimmt.
- c. Nach Herausnehmen aus der Ätzdose wird beidseitig solange geätzt, bis alle gewünschten Öffnungen durchgeätzt sind. Von jeder Seite werden also  $50\text{ }\mu\text{m}$  in etwa 33 Minuten abgetragen. Als Ergebnis erhält man dann den gewünschten  $50\text{ }\mu\text{m}$  dicken Schwingbalken. Daneben zeigen die Verstärkungsbalken die typische Form aus der doppelseitigen anisotropen Ätzung.

In Abb. 10 sind geätzte Strukturen in rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von Probe FAS2-3/1 Nr. 5 mit Balkenlänge  $8\text{ mm}$  und -breite  $0,2\text{ mm}$  zu sehen. Die Messung der Dicke des Schwingbalken kann optisch nach dem bereits früher geschilderten Fokussierverfahren am Mikroskop bestimmt werden. Allerdings ist dabei eine kleine Differenz aus großen Werten zu bestimmen. Das Verfahren ist deshalb ungenau und zeigt eine relativ große Streuung der Meßwerte. Auch aus der Geometrie der Ätzstruktur kann bei den exakt mit der Kristallographie zusammenhängenden Strukturen die Dicke  $d$  der Balken bestimmt werden. Die (100)-Projektion der schrägen Seitenkante ((111)-Ebene) hat eine Breite  $b$ , aus der sich die Dicke zu  $d = b/2$  ergibt. Da jedoch am Ende des Naßätzens wegen der Durchätzungen Kanten freiliegen, werden sie angegriffen und es ergibt sich beim Auswerten eine zu geringe Dicke.

Im Gegensatz dazu kann die Dicke eines Schwingbalkens mit einem mechanischen Taster und digitaler Anzeige (Fa. Mitutoyo), der eine Auflösung von  $1\text{ }\mu\text{m}$  hat, recht genau bestimmt werden. Die Streuung der Meßwerte beschränkte sich gut reproduzierbar auf  $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .

## 6. Beschichtung mit Zinkoxid und Aluminium-Elektroden

Abb. 11 zeigt das Prinzip der Aufdampfmasken aus Edelstahl, mit denen die ZnO-Schicht auf die wesentlichen Bereiche des Sensors beschränkt wird. Außerdem ist die Aufdampfmaske für die anschließend notwendigen Aluminium-Elektroden dargestellt. Es sind aus Symmetrie- und Zuverlässigkeitsgründen auch zwei Elektroden auf Silicium vorgesehen.

Die Proben werden nach einem speziellen Sputterverfahren bei erhöhter Temperatur mit ZnO beschichtet, um die genaue kristallographische Ausrichtung zu erzielen. Diese Schichten wurden für ein anderes Projekt entwickelt und werden für dieses Projekt als Dienstleistung aufgebracht. Es wurden Schichten bis 5  $\mu\text{m}$  Dicke hergestellt, deren Ausrichtung im Röntgendiffraktometer kontrolliert wurde. Damit kann ein kräftiger Effekt erreichen werden. Auch ist die Beschichtung über die ganze Probe sehr gleichmäßig, was Abb. 12 durch eine Meßkurve am Stufenmeßgerät Dektak II (Fa. Sloan) deutlich zusammen mit dem Photo einer beschichteten Probe zeigt.

Nach der ZnO-Beschichtung wird in einer anderen Vakuumanlage durch eine zweite Edelstahlmaske 0,5  $\mu\text{m}$  Aluminium aufgedampft. Abb. 13 zeigt einen fertig beschichteten Sensor, dem allerdings noch Schutzschichten fehlen, die für einen realistischen Betrieb als Sensor notwendig wären. Die Detailaufnahme zeigt die Mitte des in diesem Fall 57  $\mu\text{m}$  dicken Schwingbalkens, der ganz mit ZnO beschichtet ist, während die Al-Elektroden sich weder berühren noch einen Kurzschluß hinunter zum Silicium erzeugen dürfen.

## 7. Bisherige Messungen

### 7.1 Versuche zur Anregung von Eigenschwingungen

Für erste Versuche wurde eine einfache Anordnung aufgebaut, mit der Eigenschwingungen angeregt werden sollen. Die Probe nach Abb. 13 wurde dazu ohne eine Halterung auf eine Glasplatte gelegt. Mit aufgesetzten und vorne abgerundeten Spitzen wurde elektrisch kontaktiert. Dann wurde ein Frequenzgenerator mit einer Spannung von bis zu  $\pm 20$  V angeschlossen. Um auszuschließen, daß eine elektrische Rückwirkung über das Zinkoxid an dem zweiten Elektrodenpaar eine Bewegung nur vortäuscht, wurde zur Aufnahme der Bewegung ein unabhängiges Meßprinzip eingesetzt und optisch gemessen. Der Laser Stylus RM600 von Fa. Rodenstock hat in seinem sogenannten "adjust mode" eine nominelle Grenzfrequenz von 300 kHz. In dieser Betriebsart wird der Meßlaser nicht mehr nachfokussiert, sondern ein Fokusfehlersignal ausgewertet. Dabei können keine Absolutwerte der Auslenkung mehr angegeben werden. Das Analogsignal am Ausgang dieses Abstandsmeßgerätes wird mit einem Speicher-Oszilloskop dargestellt und über den Schreiber- ausgang aufgezeichnet.

Es zeigte sich, daß die ersten Versuche zur Schwingungsanregung nicht erfolgreich waren und an diesen Proben nicht die aufgrund anderer Versuche erwarteten Auslenkungen erreicht wurden. Nur bei hohen Frequenzen war ein kleiner, sofort wieder abklingender Ausschlag zu beobachten, der allerdings der mechanischen Auslenkung nicht eindeutig zuzuordnen war.

## 7.2 Messungen der Übergangswiderstände und Ströme

Um die Ursachen näher zu untersuchen, wurden die Übergangswiderstände in den verschiedenen Kombinationen bestimmt. Mißt man mit Hilfe eines Digitalvoltmeters die Widerstände von Elektrode zu Elektrode, so erhält man für diese Probe nach Abb. 13 sehr unterschiedliche Werte, die zudem noch von der elektrischen Polung abhängig sind. Ein Beispiel für einen Satz von Meßwerten ist in Abb. 14 schematisch dargestellt. Es ist offensichtlich, daß es sich nicht um ohmsche Widerstände handelt. Bei allen Übergängen haben wir es vielmehr mit Schottky-Dioden zu tun, was mehr oder weniger ausgeprägt bereits aus den Zahlenwerten deutlich wird. Es wurde dabei ein Digitalvoltmeter Keithley DVM 195A verwendet, bei dem Ströme bis zu  $100\text{ }\mu\text{A}$  bei Meßspannungen bis zu  $2,0\text{ V}$  fließen.

Aufschluß über die wahren Verhältnisse können also nur Kennlinien geben, die anschließend mit einer automatisierten, rechnergesteuerten Einrichtung aufgenommen wurden. Ein Beispiel für eine solche typische Kennlinie, die das Verhalten eines Schottky-Kontaktes zeigt, d. h. eines pn-Überganges, ist unten in Abb. 14 dargestellt. Sie wurde zwischen den Al-Kontakten 1 und 2 auf Si bzw. ZnO gemessen.

## 7.3 Beispiel für rechnerischen spezifischen Widerstand des ZnO

Mißt man eine Kennlinie zwischen den beiden Al-Kontakten auf ZnO, so erhält man einen rein ohmschen Übergang. Von Kontakt 2 zu 3 entsprechend Abb. 14 ergibt sich ein Widerstand von nur  $5,5\text{ k}\Omega$ ! Daraus würde sich ein Wert für den spezifischen Widerstand von  $9 \cdot 10^{-5}\text{ }\Omega\text{cm}$  errechnen. Dieser Wert ist jedoch viel zu klein und stellt nach der bisherigen Erfahrung an unstrukturierten, ebenen Proben keinen Materialwert für das gesputterte ZnO dar.

Aus den verschiedenen Kennlinienmessungen ergeben sich, wenn Silicium als Widerstand vernachlässigt wird, rechnerische Werte für ZnO, die zwischen  $8 \cdot 10^{-6}\text{ }\Omega\text{cm}$  bis  $4 \cdot 10^{-8}\text{ }\Omega\text{cm}$  liegen. Die spezifischen Widerstände sollten jedoch zwischen  $1 \cdot 10^{-8}\text{ }\Omega\text{cm}$  und  $1 \cdot 10^{-10}\text{ }\Omega\text{cm}$  liegen.

#### 7.4 Mögliche Ursachen für zu geringe Übergangswiderstände und damit Nichtschwingen

Um den gewünschten inversen Piezoeffekt zu erhalten, muß nach Kapitel 2. über die ZnO-Schicht längs der c-Achse senkrecht zur Probenoberfläche eine Feldstärke angelegt werden, um die Ladungsschwerpunkte im Kristall zu trennen und eine Verformung zu erzielen. Bei dem in dieser Probe vorhandenen zu geringen Widerstand auf dieser Strecke fließen die Ladungen sofort wieder ab und es zeigt sich kein Effekt.

Die Problemkreise a. und b. können dies verursachen:

##### a. Das Herstellverfahren

Die Aufdampfmasken werden durch Funkenerosion in Öl hergestellt. Vor einer weiteren Verwendung werden sie mit organischen Lösungsmitteln gereinigt. Trotzdem dampfen offensichtlich Ölreste bei den Vakuumprozessen ab und schlagen sich auf der Probe nieder. Bei den dunklen ZnO-Schichten ist ein Einfluß nicht zu sehen. Aufgedampfte Aluminiumschichten der verwendeten Dicke von  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  glänzen jedoch nicht metallisch, sondern sehen milchig mattgrau aus und zeigen verschiedene dunkelgraue Schleier. Für zukünftige Kontrollversuche werden deshalb die Probenhalter durch Sandstrahlen gereinigt um ein einwandfreies Aluminium zu garantieren.

##### b. Seitliche Beschichtung des Schwingbalkens mit ZnO + Al

Beim Aufspattern und Aufdampfen durch metallische Schattenmasken wachsen die Schichten nicht ausschließlich auf den Flächen auf, die senkrecht zur Dampfquelle ausgerichtet sind oder deren Projektion einen Anteil in dieser Richtung hat. Es werden deshalb auch Seitenflächen beschichtet, an denen dann undefinierte, nach unten abnehmende Schichtdicken vorhanden sind. Entsprechend der Detailaufnahme in Abb. 13 sind also auch die Seitenflächen des Schwingbalkens mit abnehmender Schichtdicke mit ZnO und Al bedeckt. Da das dort dünnere ZnO vermutlich nicht ausreichend dicht ist und Poren besitzen kann, kann das auch dünnere, aber trotzdem noch ausreichend leitfähige Aluminium bewirken, daß ein zu kleiner Übergangswiderstand zum Silicium entsteht. Durch solche Nebenschlüsse kann erklärt werden, daß der bei ebenen Proben an den gleichen Schichten nachgewiesene Piezoeffekt nicht auftritt.

c. Verfahrensgrenze für Schattenmasken

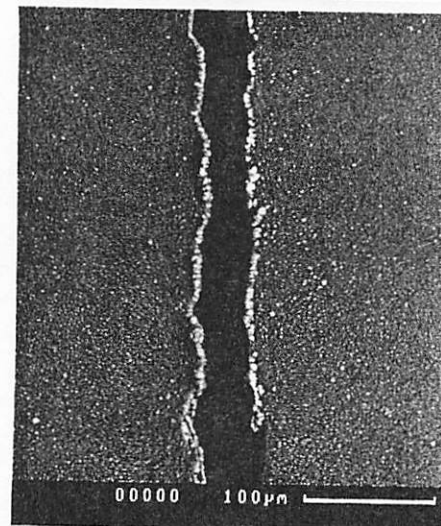
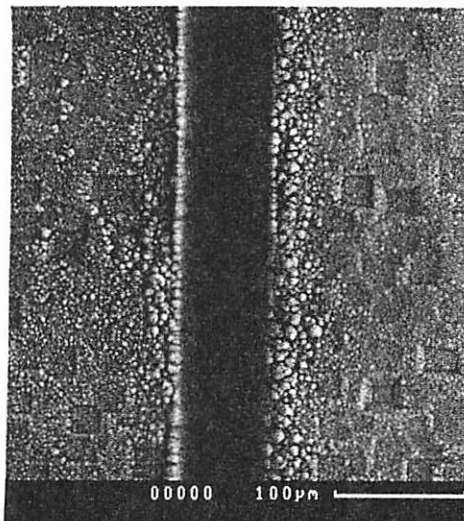
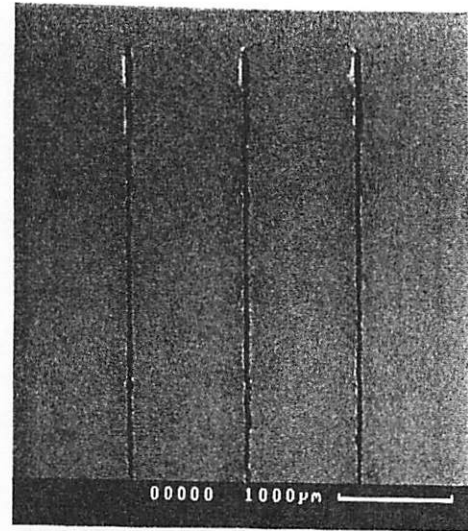
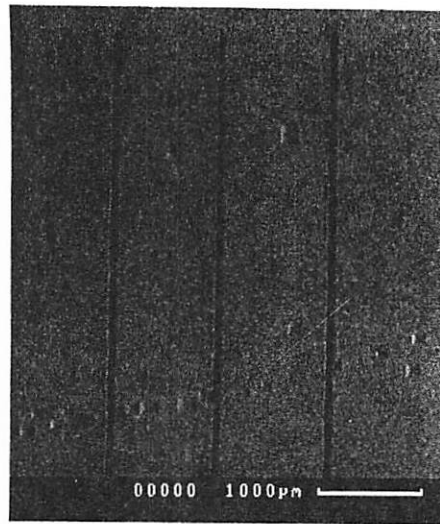
Ein zusätzliches Problem stellen die kleinen Dimensionen dar. Bereits eine kleine, auch durch Einlegen in Einfräsungen nicht zu vermeidende Verschiebung der Aufdampfmaske kann bereits zu einem Kurzschluß der oberen Al-Elektrode hinunter auf das Si führen. Der Abstand der beiden Schichtkanten beträgt in dieser Auslegung nach Abb. 11 nur 0,5 mm. Der Sicherheitsabstand kann in einer verbesserten Version jedoch erhöht werden.

Es zeigt sich, daß eine dauerhafte Lösung nur über die ausreichend exakte photolithographische Strukturierung von ZnO und Aluminium erreicht werden kann. Dies wird deshalb ein Schwerpunkt der Weiterarbeit sein.

ZWD-Dr. Schweikhardt - 6383  
20.2.1991/Hr

## LISTE DER ABBILDUNGEN

- Abb. 1: Schlitze in Silicium-Membranen mit dem Excimerlaser, Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop
- Abb. 2: Resonanter Kraftsensor, Prinzip und Layout FAS2-3
- Abb. 3: Grundschiwingung von mikromechanischen Biegebalken
- Abb. 4: Zugempfindlichkeit mikromechanischer Biegebalken ohne äußere Tragbalken
- Abb. 5: Zugempfindlichkeit dünner mikromechanischer Biegebalken mit äußeren Tragbalken, logarithmische Auftragung
- Abb. 6: Zugempfindlichkeit dünner mikromechanischer Biegebalken mit äußeren Tragbalken, lineare Auftragung
- Abb. 7: Layout FAS2-3 für Sensorstrukturen, Auslegung auf Wafer
- Abb. 8: Variationen im Layout FAS2-3: Länge, Breite und Dicke
- Abb. 9: Prinzip der doppelseitigen Ätzung mit Zeitsteuerung
- Abb. 10: Details geätzter Strukturen  
(REM-Aufnahmen Probe FAS2-3/1 Nr. 5)
- Abb. 11: Sensorstruktur mit Aufdampfmasken für Al und ZnO für Layout - FAS2-3
- Abb. 12: Geätzte Struktur für einen Kraftsensor, mit ZnO beschichtet
- Abb. 13: Kraftsensorstruktur, beschichtet mit ZnO und Al;  
Detail: Schwingbalkenmitte
- Abb. 14: Beispiel für Widerstands-Meßergebnisse (oberer Teil);  
Beispiel für Kennlinie zwischen Al-Kontakten auf Si und ZnO



→ | | ← 80µm

→ | | ← 80µm

Bestrahlungsseite

Rückseite

Si-Membran: 120µm dick, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oben

Schlitzabbildung: 890µm x 90µm

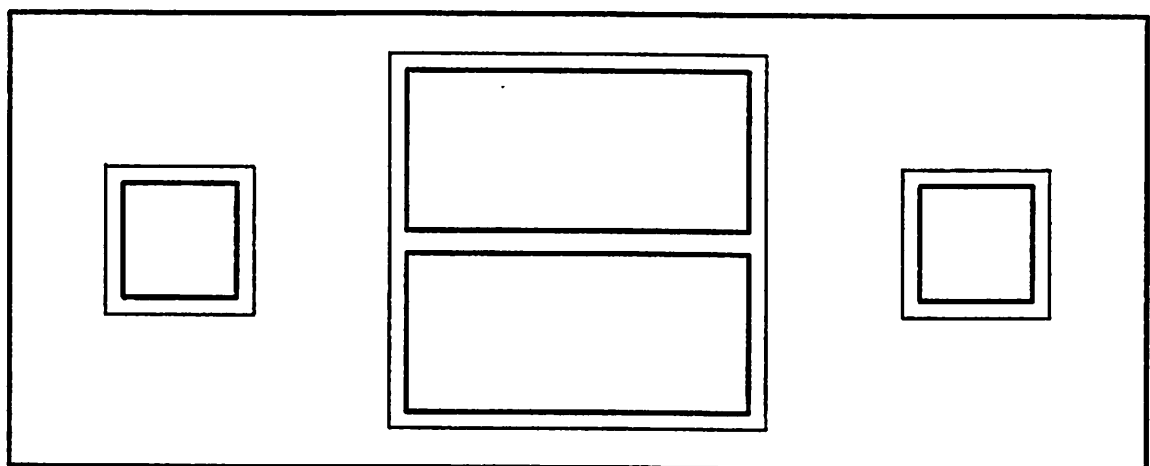
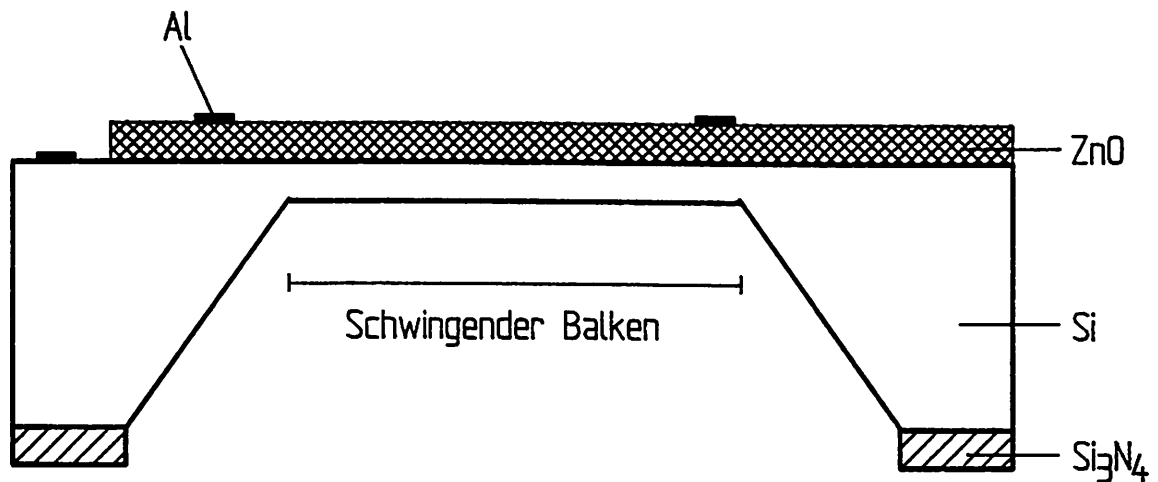
(14 fach verkleinert)

KrF:  $\lambda = 248\text{nm}$ ,  $f = 10\text{Hz}$ Pulsenergie:  $6\text{J/cm}^2 \Rightarrow 0.6\mu\text{m/Puls}$  $18\text{J/cm}^2 \Rightarrow 2\mu\text{m/Puls}$ 

\*) Durchgeführt am IFSW, Universität Stuttgart



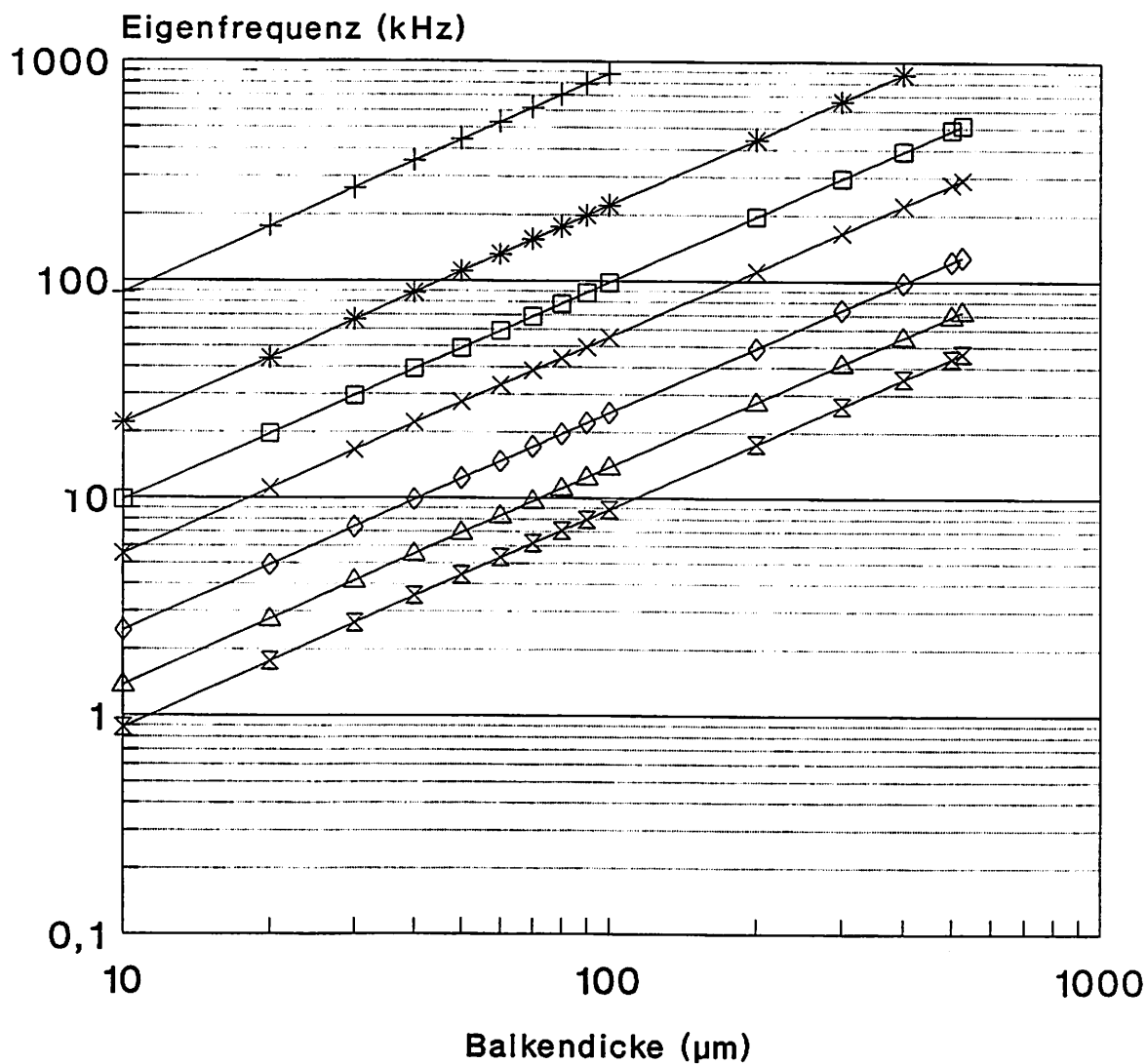
## Querschnitt und Draufsicht



Layout FAS2 + FAS3

# Grundschiwingung von Biegebalken

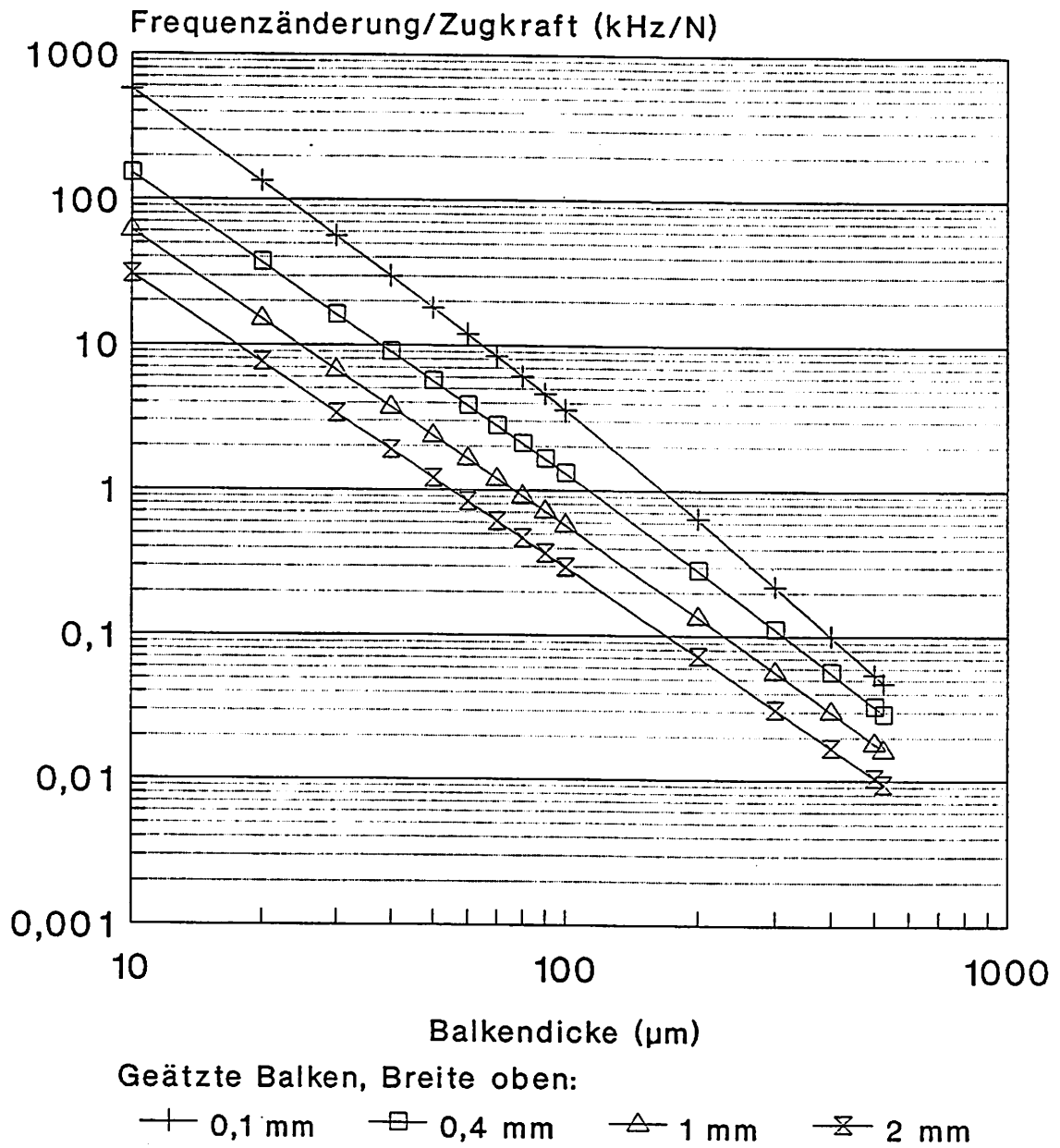
## Frequenzanaloge Sensoren in Si



RB/ZWD/Schweikhardt 22.1.1991

# Zugempfindlichkeit von Biegebalken

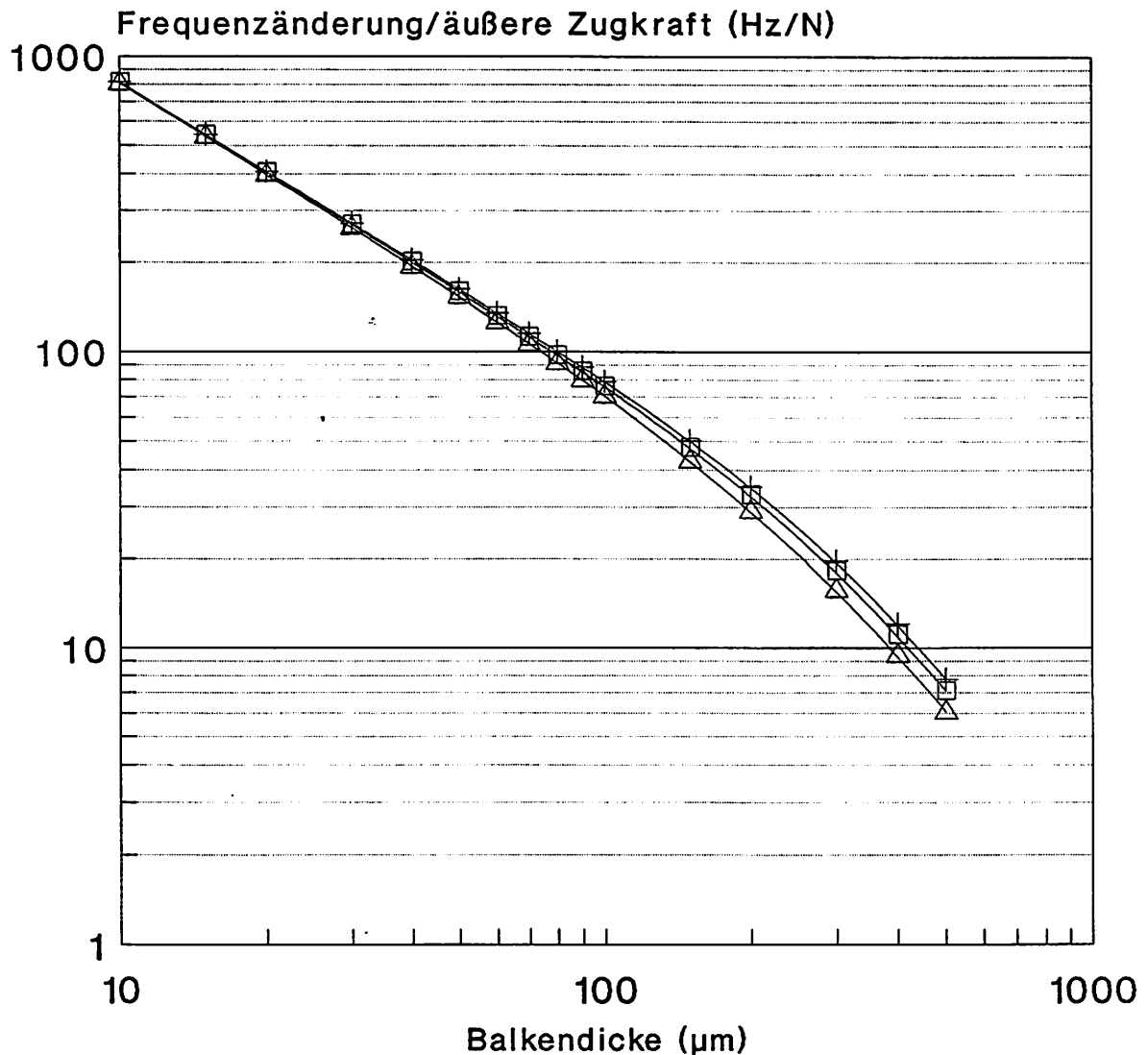
## Frequenzanaloge Sensoren in Si



# Zugempfindlichkeit dünner Biegebalken

## Frequenzanaloge Sensoren in Si

Zwei doppelseitig geätzte Tragbalken 



Geätzte Balken, Breite oben:

—+— 0,1 mm

—□— 0,4 mm

—△— 1,0 mm

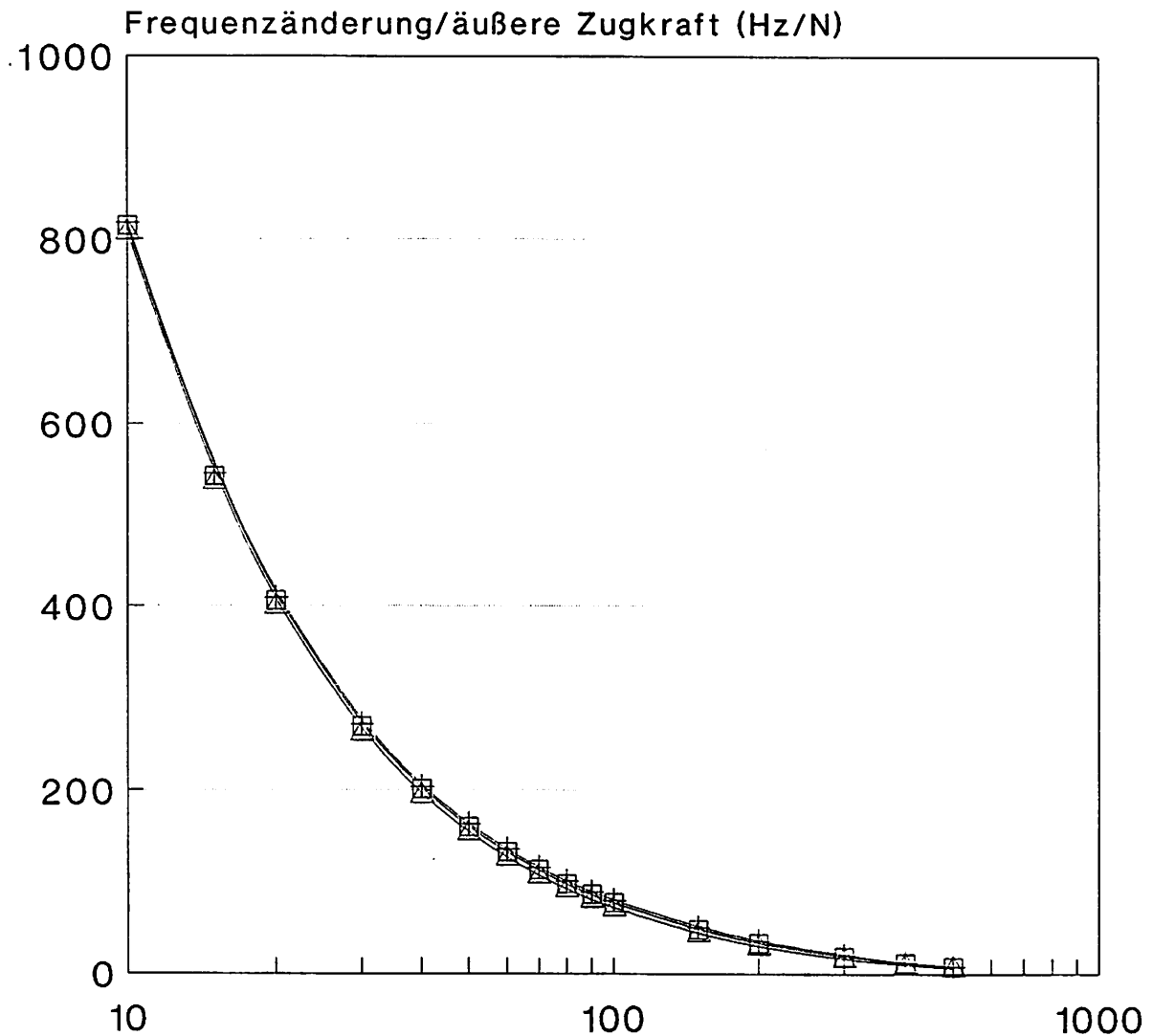
Berücksichtigung des Schwingbalkenanteils  
an der äußeren Kraft

RB/ZWD/Schweikhardt 11.1.1991

# Zugempfindlichkeit dünner Biegebalken

## Frequenzanaloge Sensoren in Si

Zwei doppelseitig geätzte Tragbalken



Geätzte Balken, Breite oben:

—+— 0,1 mm

—□— 0,4 mm

—△— 1,0 mm

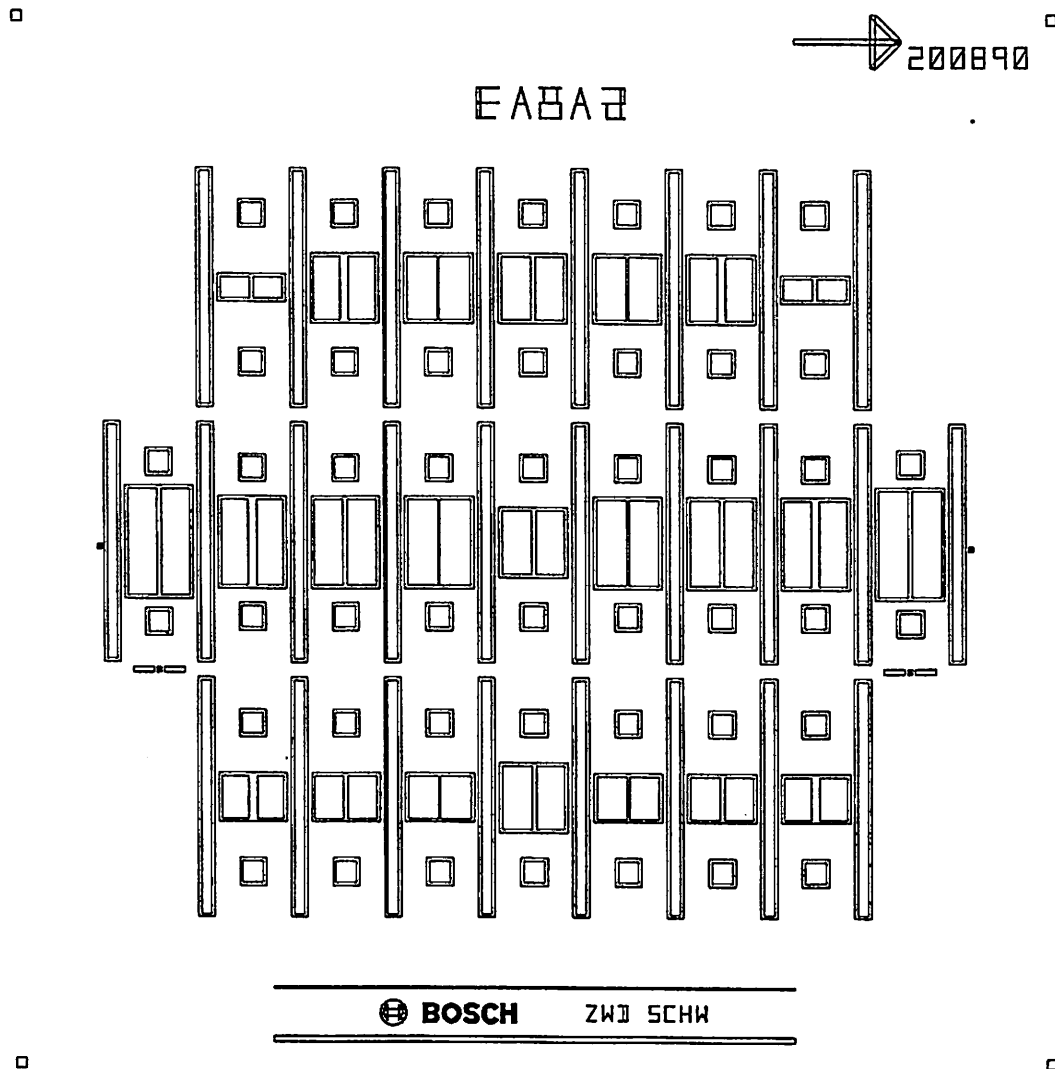
Berücksichtigung des Schwingbalkenanteils  
an der äußeren Kraft

RB/ZWD/Schweikhardt 14.1.1991

5"-Masken FAS2 und FAS3 für 4"-Wafer

Doppelseitige Belichtung und Ätzung

Erstellt mit Programm "Biene"



Schwingbalken:

Rechnerische Eigenfrequenz (kHz)

Breite (mm) 0,2   0,4   0,8			Länge (mm)	Dicke 20 µm	Dicke 50 µm
	X		2	44,06	110,1
X	X	X	4	11,02	27,55
X	X	X	6	4,896	12,24
X	X	X	8	2,753	6,884
	X		10	1,762	4,406

**BOSCH**

ZWD



# Frequenzanaloge Sensoren in Si-Mikromechanik Doppelseitige Ätzung einer Sensorstruktur

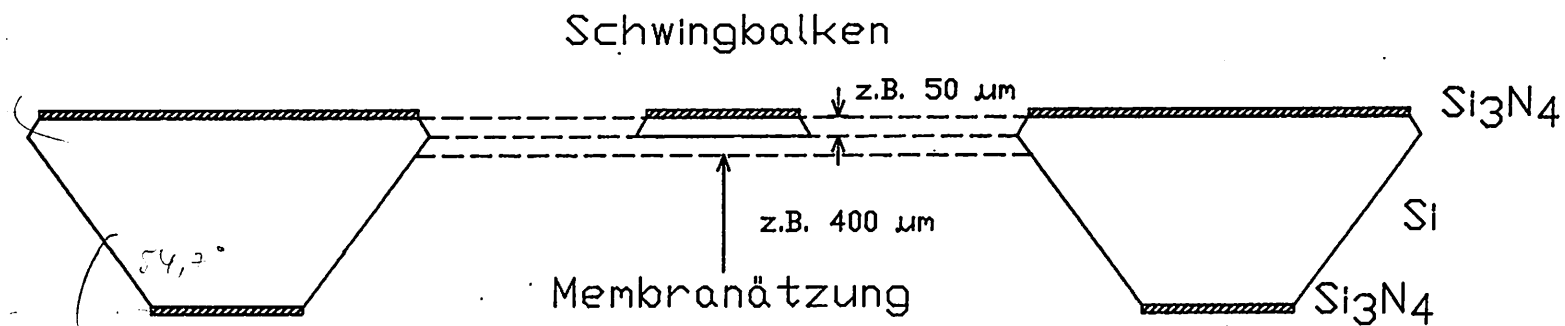


Abbildung 9



Aufnahmen im Rasterelektronenmikroskop

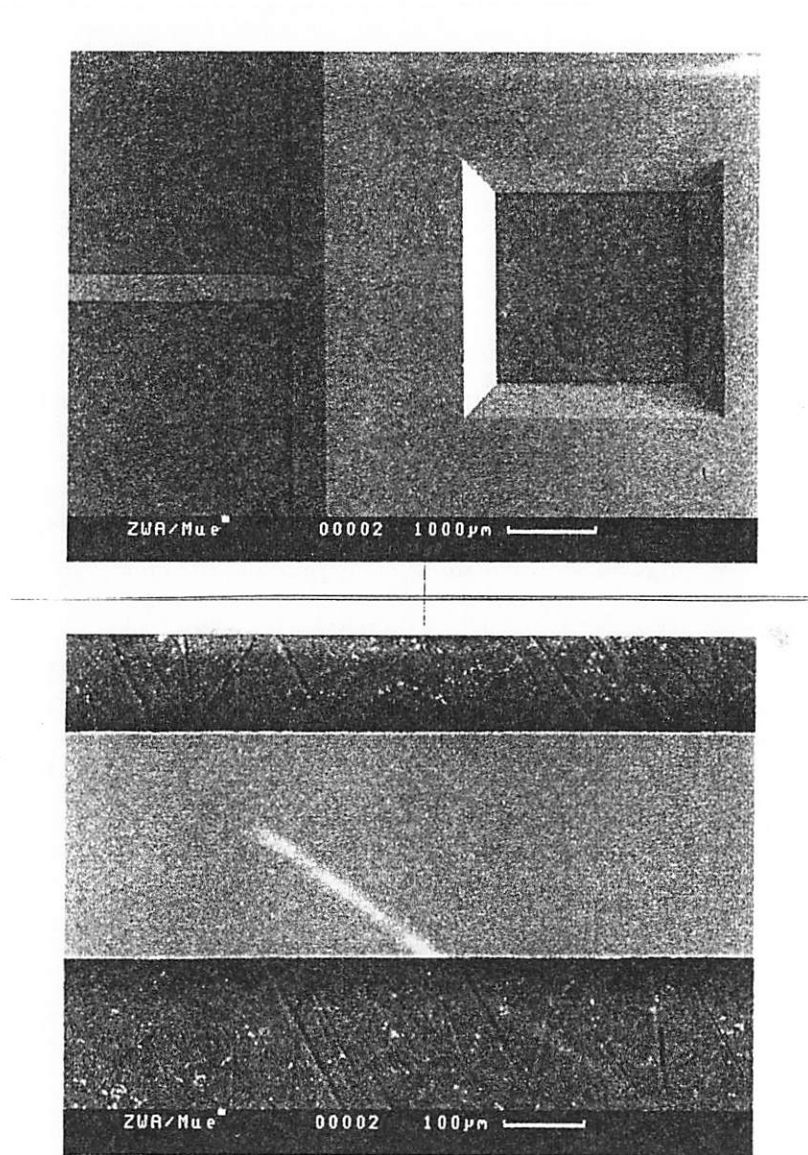
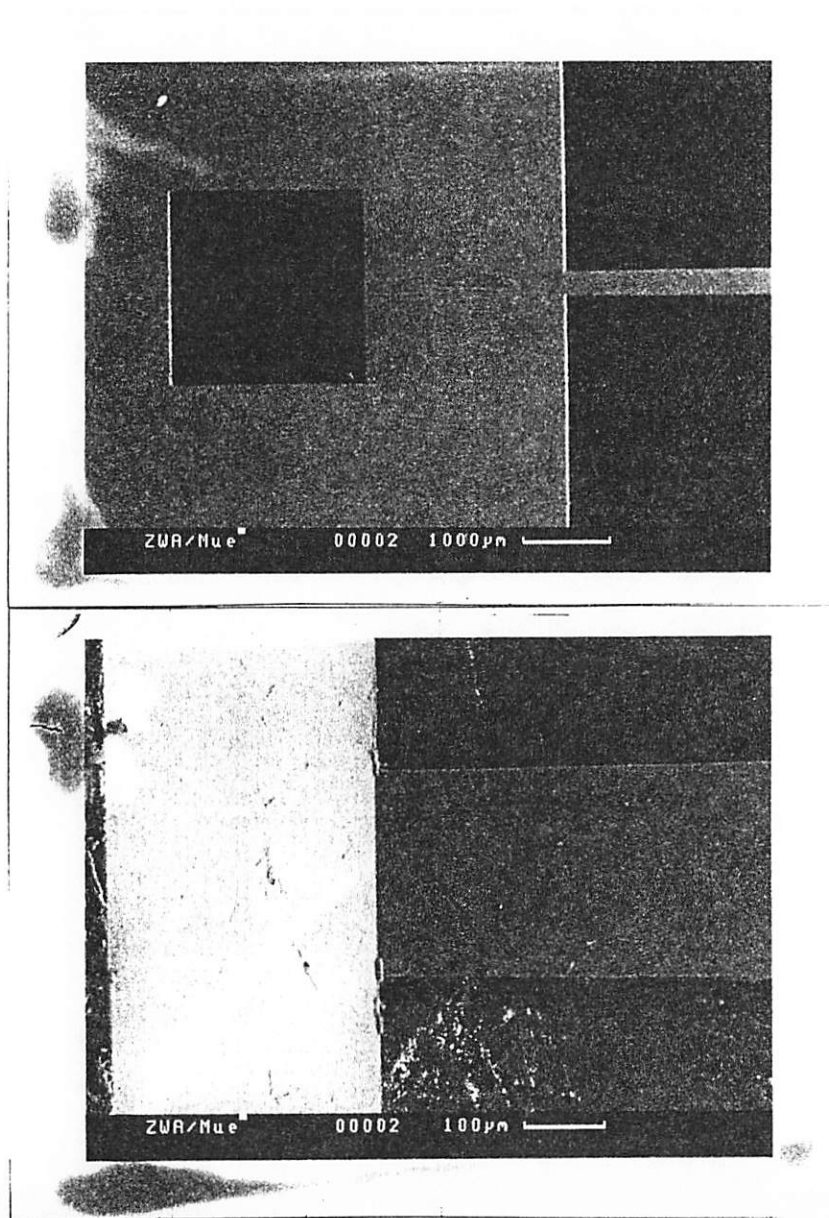


Abbildung 10

## Layout FAS2-3

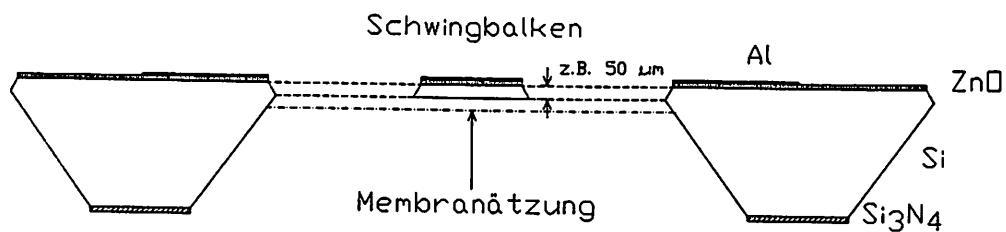
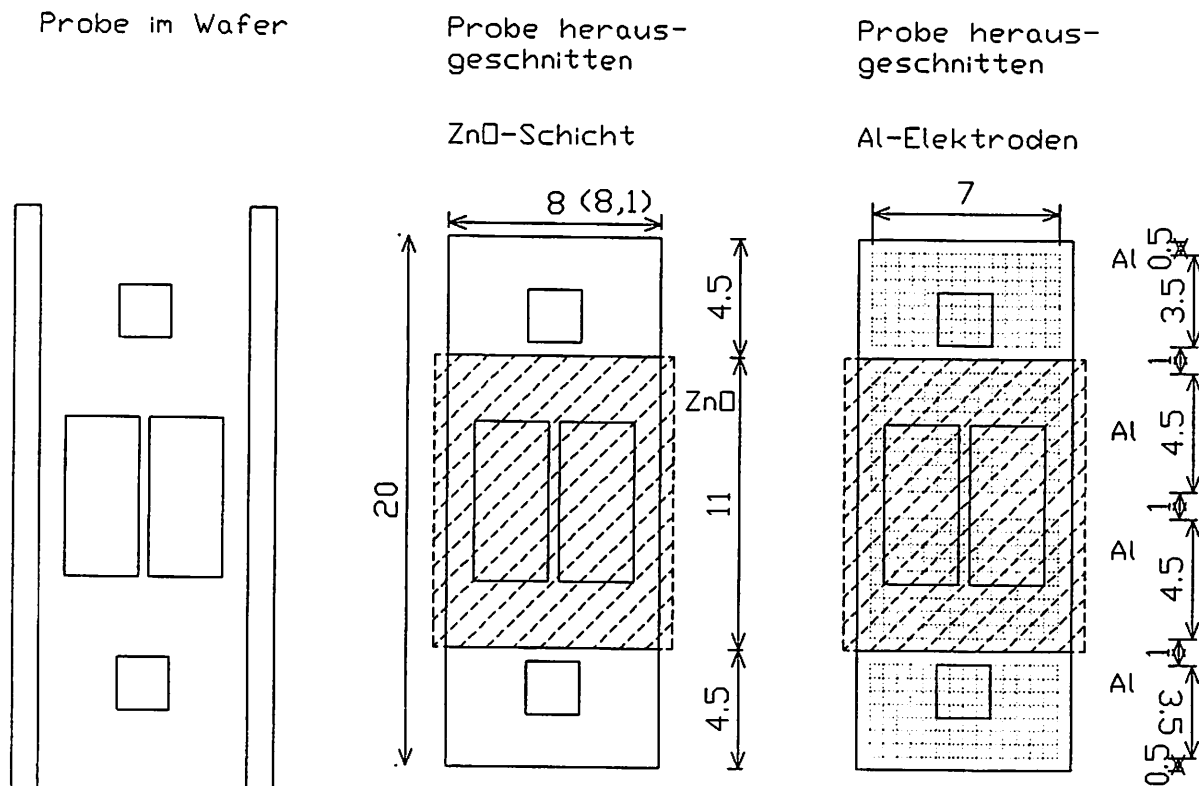
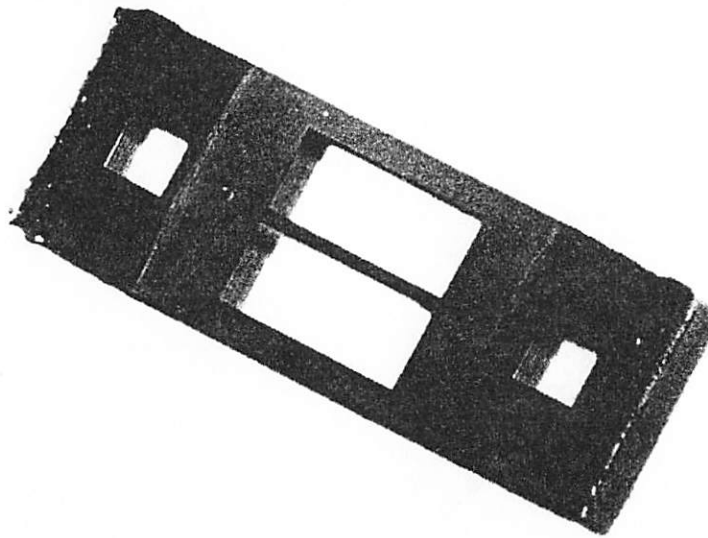
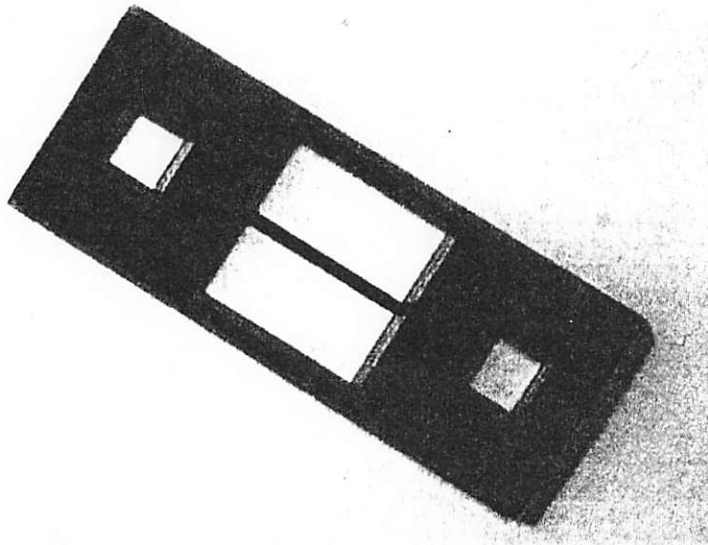


Abbildung 11



Schwingbalken 0,4 mm breit, 6 mm lang

- Vorderseite mit ZnO-Schicht
- Rückseite geätzt



Oberflächenprofil: Schichtdicke ZnO 4,5  $\mu\text{m}$

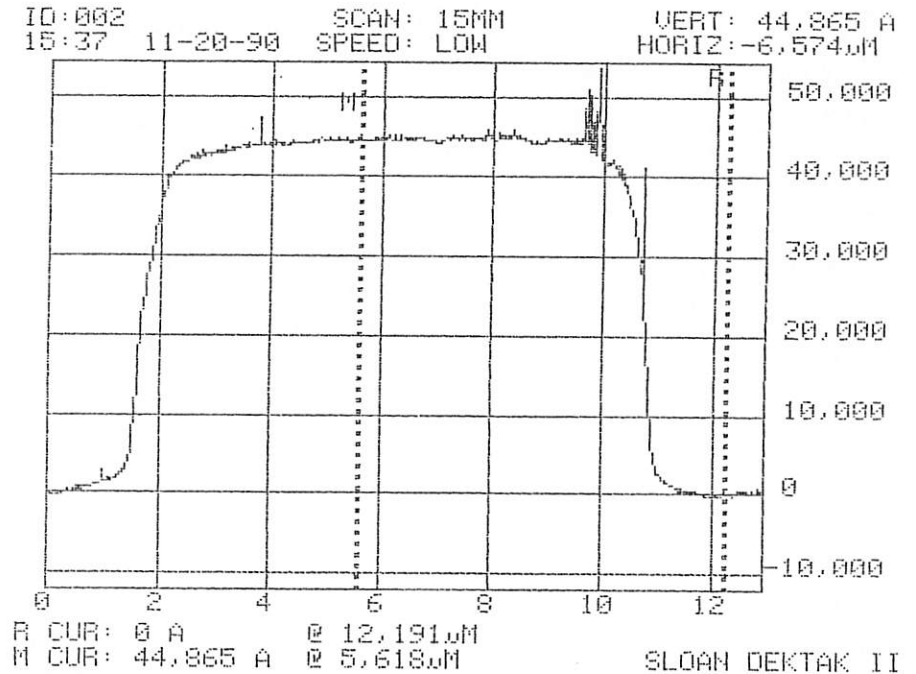
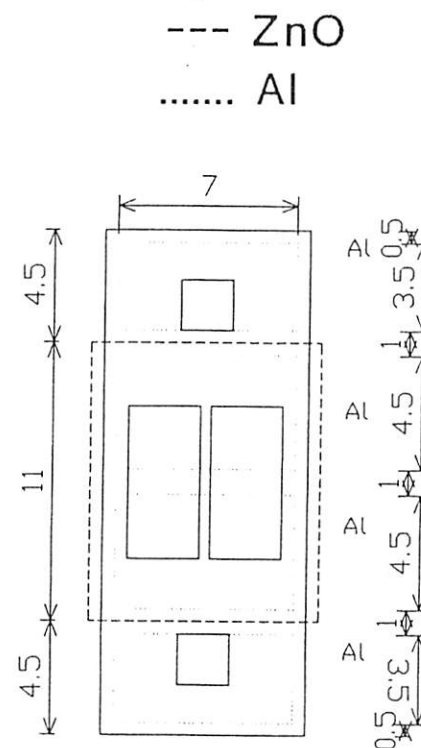
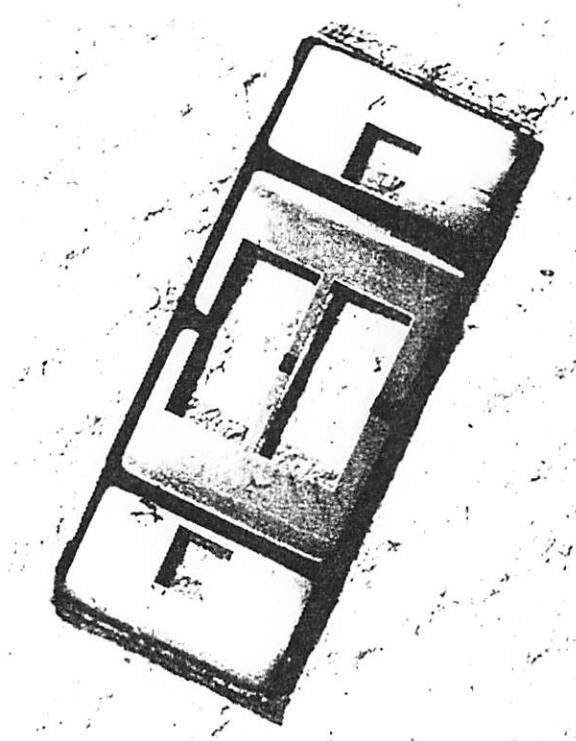
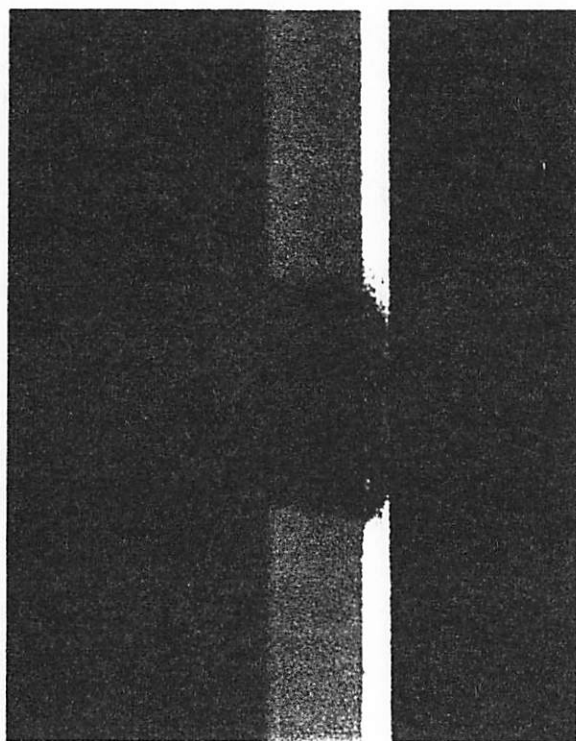


Abbildung 12

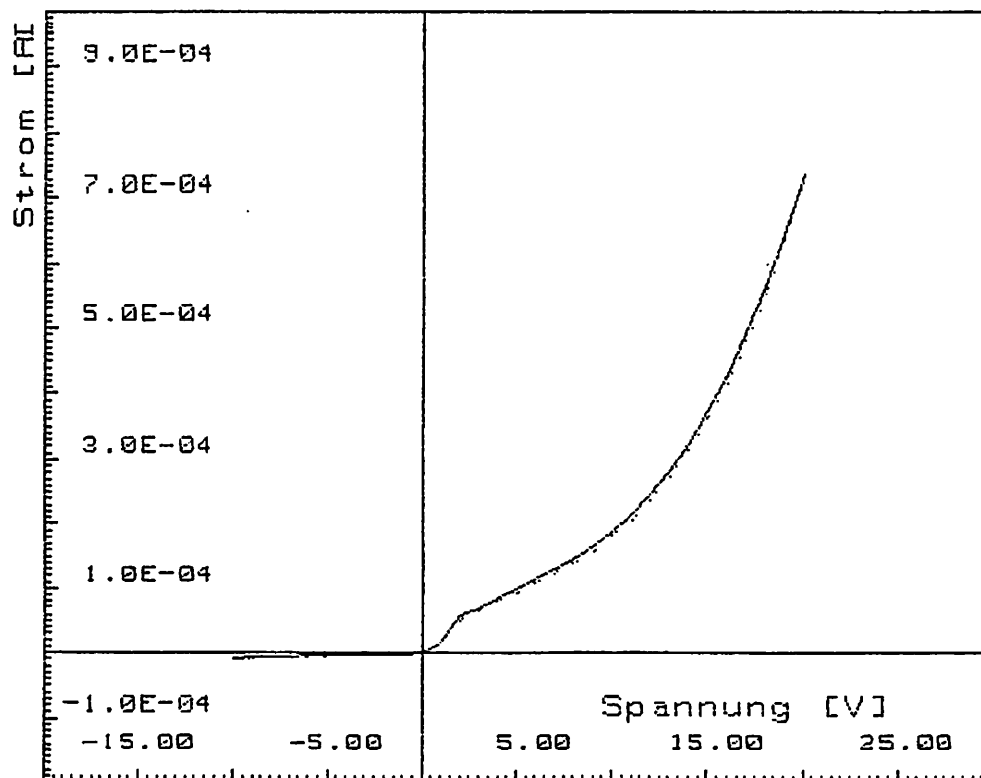
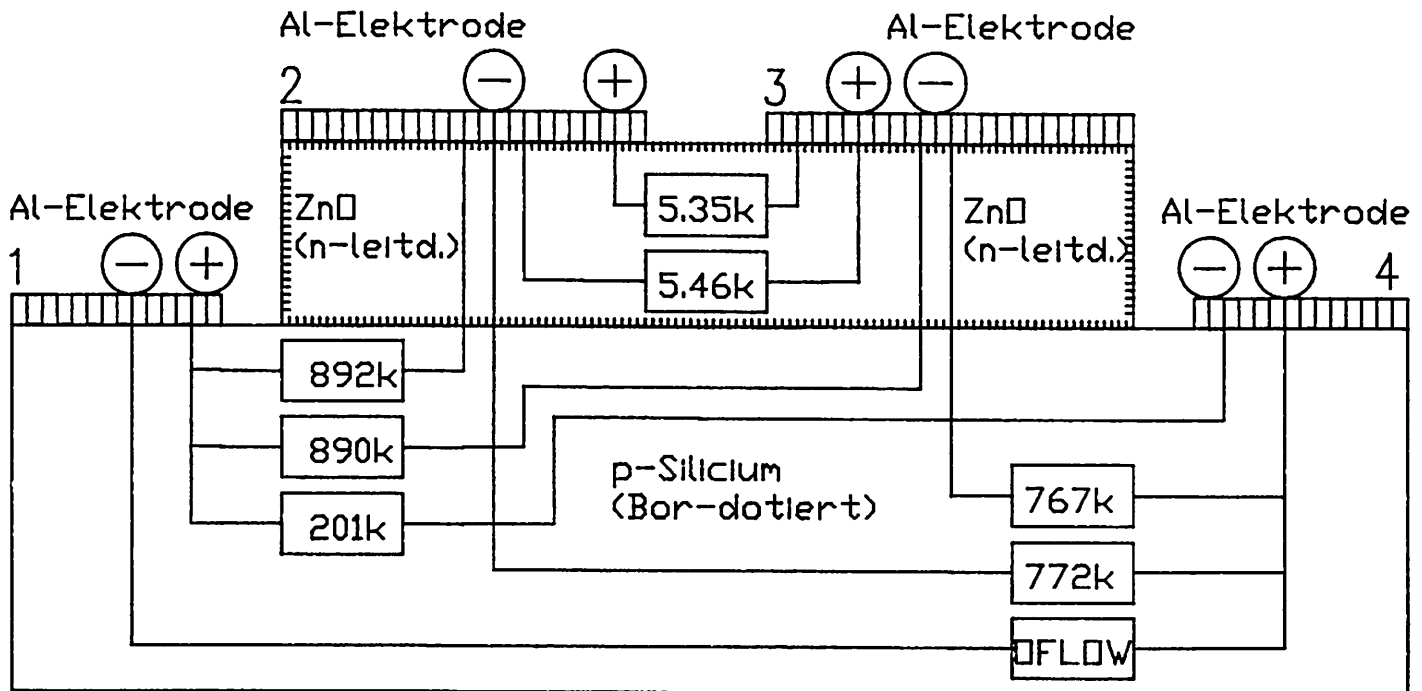
Probe FAS2-3/1 Nr.1

Sensor mit Sputterschicht ZnO (Dicke 4,5 µm)  
und Aluminium-Aufdampfelektroden

Schwingbalken 0,4 mm breit, 6 mm lang



Probe FAS2-3/1 Nr. 2



Probenbezeichnung: FAS2-3/1 Nr.2 Dot1 auf ZnO(2) - Dot2 auf Si(1)

Datum: 15 Jan 1991 Uhrzeit: 18:27:50