

Archiv-Ex:

FZR-31

Februar 1994

*L. Bischoff, J. Teichert, E. Hesse,
T. Geßner, B. Löbner und U. Breng*

Anwendung des feinfokussierten
Ionenstrahles zur Fertigung
mikromechanischer Bauelemente

Projektstudie

ANWENDUNG DES FEINFOKUSSierten IONENSTRAHLES ZUR FERTIGUNG MIKROMECHANISCHER BAUELEMENTE

von:

Dr. L. Bischoff, Dr. J. Teichert und Dipl. Phys. E. Hesse

Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung
PF 510119, D-01314 Dresden

Prof. Dr. T. Geßner, Dr. B. Löbner und Dipl. Ing. U. Breng

Technische Universität Chemnitz - Zwickau
Zentrum für Mikrotechnologien
PSF 964, D-09009 Chemnitz

Dieses Projekt wird vom Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert.

Förderkennzeichen: 4 - 7541.83 - FZR / 319

Projektlaufzeit: 01.04.1993 - 31.12.1995

INHALT:

1. Einleitung

2. Zielstellung

3. Ionenfeinstrahltechnik

- 3.1. Einleitung
- 3.2. Aufbau einer Ionenfeinstrahlanlage
 - 3.2.1. Ionenquellen
 - 3.2.2. Ionenoptische Säule und Peripherie
- 3.3. Anwendungen
 - 3.3.1. Strukturierung durch Ionenzerstäuben
 - 3.3.2. Ionenstrahlgestütztes Abscheiden
 - 3.3.3. Schreibende Ionenimplantation
 - 3.3.4. Ionenfeinstrahlolithographie
 - 3.3.5. Oberflächenanalytik
- 3.4. Literatur

4. Mikromechaniktechnologien

- 4.1. Einordnung und Probleme
- 4.2. Technologische Abläufe
- 4.3. Literatur

5. Anwendung der Ionenfeinstrahltechnik in der Mikromechaniktechnologie

- 5.1. Strukturierung in Ätzgruben
- 5.2. Leitbahnen über schräge Kanten
- 5.3. Strukturierung von schrägen Kanten
- 5.4. Feinabstimmung von Resonanzbauelementen

6. Zusammenfassung und Ausblick

1. EINLEITUNG

Die Ionenfeinstrahltechnik hat sich in den letzten Jahren von der Laborforschung beginnend zu einem festen Bestandteil der Mikrostrukturierungstechnologie entwickelt. Für die Reparatur photo- oder röntgenlithographischer Schablonen im Submikrometerbereich sind Ionenmikrostrahlanlagen bereits nicht mehr wegzudenken. Auch auf Gebieten, wie der Mikroanalytik, der Schaltkreismodifikation oder auch der Mikrostrahlimplantation, vor allem im Bereich der Forschung und Entwicklung wird zunehmend die Ionenfeinstrahltechnik eingesetzt. Auch für die Anwendung in der Mikromechanik gibt es Applikationsbeispiele. Die Mikromechanik selbst hat auch eine rasante Entwicklung genommen. Ein Grund dafür ist das hohe Niveau der Siliciummikroelektroniktechnologie sowie das naheliegende Übertragen dieser Technik auf die Fertigung mikromechanischer Bauelemente. Ein weiterer Schritt war die Kombination mikroelektronischer und mikromechanischer Komponenten zur Mikrosystemtechnik. Sensoren und Aktuatoren oder auch Anwendungen in der Medizin seien hier als Beispiele genannt.

Ziel dieser Arbeit soll nun eine systematische Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten der Ionenfeinstrahltechnik in der Mikromechaniktechnologie sein. Ausgehend vom momentanen Stand der Technik soll ein neues Niveau durch die Kombination dieser beiden modernen aufstrebenden Technologien erreicht werden.

2. ZIELSTELLUNG

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele dieses Projektes können in folgenden Hauptpunkten zusammengefaßt werden:

1. Die technische Verbesserung und Anpassung der Ionenmikrostrahlanlage IMSA -100 für den Einsatz in der Mikromechaniktechnologie ist die Grundlage für die Realisierung dieses Projektes.
2. Erfolgversprechende Anwendungen, z.B.:
 - Erzeugung von Mikrostrukturen in Ätzgruben ,
 - Realisierung von Leitbahnen zwischen Grubenboden und höher liegenden Rahmenstrukturen über schräge Kanten durch Cobaltsiliciddrähte (Ionenstrahlsynthese),
 - Feinabstimmung von Resonanzbauelementen (Frequenz, Bandbreite),
 - Ionensputtern als Alternative zum Naßätzen in Mikrobereichenwerden systematisch hinsichtlich ihrer Parameter sowie der technologischen Verwertbarkeit untersucht und mit anderen Verfahren verglichen.
3. Ausgehend von einer entworfenen Zielstruktur werden für die genannten Anwendungsfälle technologische Realisierungsvarianten erarbeitet.
4. Die Nutzung der Ionenfeinstrahlbearbeitung für reale mikromechanische Bauelemente wird an ausgewählten Demonstratoren getestet.
5. Aus den gewonnenen Ergebnissen wird ein Angebotskatalog zum Einsatz der Ionenmikrostrahltechnik in der Mikromechanik entwickelt.

3. IONENFEINSTRALHTECHNIK

3.1. EINLEITUNG

Die Ionenfeinstrahltechnik hat sich in den letzten 15 Jahren stürmisch entwickelt. Nach der Entdeckung des Wirkprinzips der Flüssigmetallionenquellen in den sechziger Jahren wurden zehn Jahre später bereits die ersten Ionenmikrostrahlanlagen bekannt. Parameter wie Ionensondendurchmesser von 50 - 1000 nm, Stromdichten bis 10 A/cm² bei Energien im Bereich von 20 - 200 keV sowie der Einsatz vielfältigster Ionensorten spiegeln sich in einem breiten Anwendungsspektrum in der Mikroelektronik- sowie der Mikromechaniktechnologie als auch in der Analytik wieder.

3.2 AUFBAU EINER IONENFEINSTRALHLANLAGE

3.2.1 Ionenquellen

In Ionenmikrostrahlanlagen werden fast ausschließlich Flüssigmetallionenquellen (liquid metal ion source = LMIS) eingesetzt. Für andere Quellenarten, wie die Gasphasenfeldionisationsquelle zur Emission leichter Edelgase soll hiermit auf die Literatur verwiesen werden [1,2].

Flüssigmetallionenquellen zeichnen sich durch einen hohen Richtstrahlwert (specific brightness) von $> 10^6$ A/cm²sr sowie einer kleinen Energieunschärfe von 5 - 10 eV (von Ionenmasse und Emissionsstrom abhängig) aus [3]. Das Wirkprinzip dieser Quellen beruht auf dem Gleichgewicht einer elektrostatischen Kraft und der Oberflächenspannung an einer mit flüssigem Metall oder einer Legierung benetzten Emitternadel, was zur Ausbildung eines speziell geformten Flüssigkeitskonus (Taylor-Konus) führt. Dazu kann die Nadel direkt oder indirekt beheizt werden. Wird nun die Feldstärke zwischen der Nadel und einer gegenüberliegenden Elektrode (Extraktor) weiter erhöht, kommt es zur Ionenemission. Die Verhältnisse an der Nadelspitze sind schematisch in Abb. 3.1 nach Ref. [3] dargestellt.

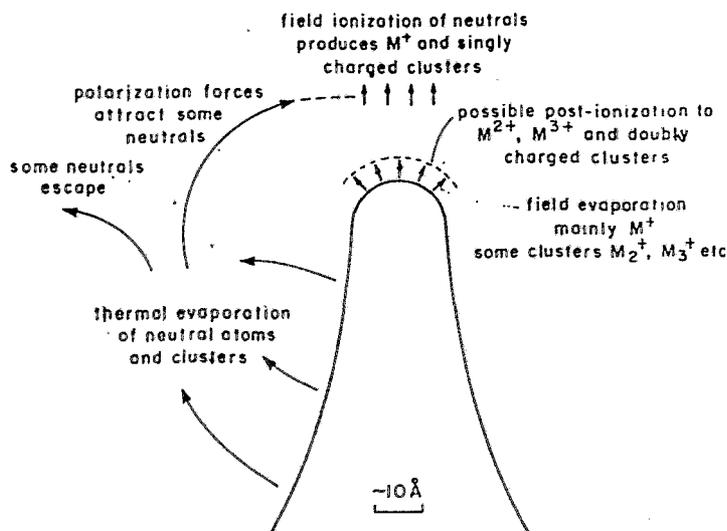


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Emitternadelspitze einer Flüssigmetallionenquelle

3.2.2 Ionenoptische Säule und Peripherie

Das Kernstück einer Ionenmikrostrahlanlage ist neben der Ionenquelle die ionenoptische Säule, die alle elektrostatischen Elemente, wie Linsen, Blenden, Stigmatoren, Ablensysteme, Austaster, Korrekturplatten oder Massenseparatoren zur Abbildung des Quellpunktes auf die Targetebene enthält. Die erreichbare Auflösung wird dabei gegeben durch [4]:

$$d = \sqrt{(Md_q)^2 + d_s^2 + d_c^2} \quad (1)$$

- mit : d Strahldurchmesser
M Vergrößerungsverhältnis der ionenoptischen Säule
 d_q virtuelle Quellengröße (bei einer Ga - Quelle ca. 40 - 50 nm)
 d_s sphärische Aberration
 d_c axiale chromatische Aberration

Die ersten zwei Terme in Gl. (1) sind durch eine optimierte Geometrie sowie die Güte der ionenoptischen Linsen (ideale Linsen gibt es nicht) festgelegt. Der axiale chromatische Fehler der Abbildung ist proportional zu $\Delta E/E$, d.h. dem Verhältnis aus Energieunschärfe der Quelle und der erreichten Endenergie. Da die Energieunschärfe der Quelle aus dem Ionenbildungsmechanismus resultiert und nicht beliebig verkleinert werden kann (typischer Wert einer LMIS 5 - 10 eV), erreicht man eine Verringerung dieses Faktors nur durch die Erhöhung der Gesamtenergie. Diesem sind aber aus hochspannungstechnischen Gründen auch Grenzen gesetzt. Hier muß entsprechend der Anwendungsaufgabe ein vertretbarer Kompromiß gefunden werden.

Die berechneten Werte für die numerische Apertur (von der Ionenoptik akzeptierter Halbwinkel) sowie für die entsprechende Stromdichte als Funktion der Ionenenergie für einen Sondendurchmesser von 100 nm sind in Abb.3.2 dargestellt. Abb.3.3 zeigt das Blockschema der Ionenmikrostrahlanlage IMSA -100 aus dem Forschungszentrum Rossendorf e.V.

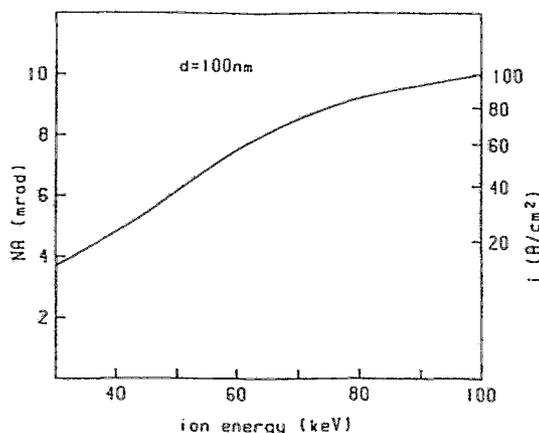


Abb.3.2: Berechnete numerische Apertur und Ionenstromdichte als Funktion der Ionenenergie

Neben der ionenoptischen Säule sind eine Vielzahl peripherer Systeme für den Betrieb der Anlage erforderlich. Die wesentlichsten sollen hier kurz anhand des o.g. Gerätes beschrieben werden, sind aber mit einigen Variationen für die meisten Mikrostrahlanlagen typisch.

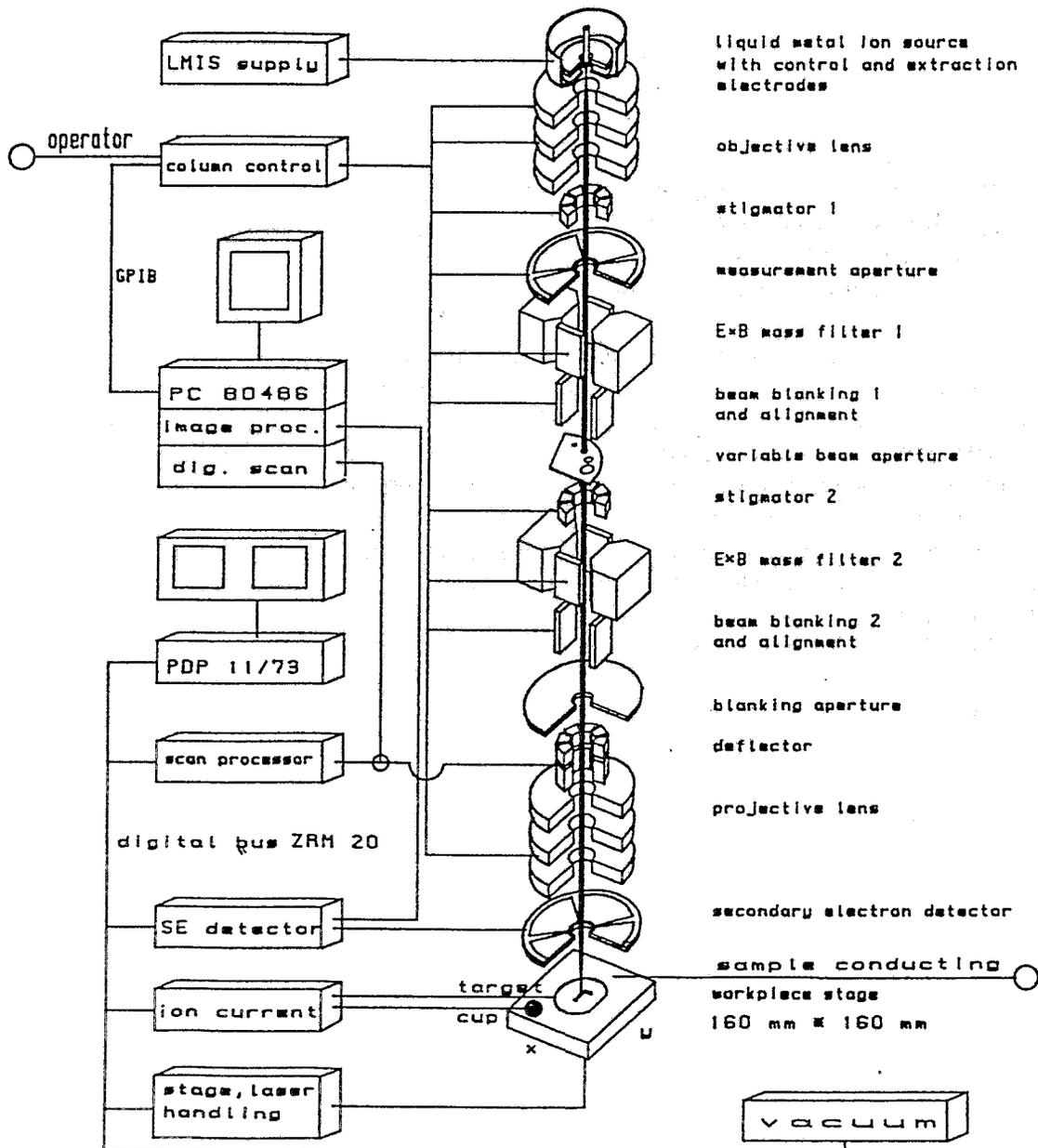


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der Ionenmikrostrahlanlage IMSA -100 (FZ Rossendorf e.V.)

i) Vakuum- und Objektsystem: Das Vakuumsystem besteht aus drei getrennten Rezipienten. In der ionenoptischen Säule muß auf Grund der großen Empfindlichkeit der Flüssigmetallionenquelle, speziell gegenüber Kohlenwasserstoffen, ein ölfreies Vakuum mit einem Druck von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ Pa realisiert werden. Um keine Vibrationen mechanischer Vakuumpumpen auf die Ionenoptik zu übertragen und somit eine Verschlechterung der Auflösung zu erhalten, werden hier Ionengetterpumpen sowie Titanverdampferpumpen verwendet. Ein weiterer wichtiger Teil des Systems ist die Probenkammer. Sie ist durch eine Druckstufe von der ionenoptischen Säule getrennt. In diesem Raum befindet sich ein hochpräzises, durch ein LASER-Interferometer gesteuertes Tischsystem, das es erlaubt, jeden Punkt auf der Probe mit hoher Genauigkeit reproduzierbar zu finden sowie Bearbeitungen, die größer als der Ablenkbereich des Ionenstrahles sind, durchzuführen. Der letzte Teil ist die Probenschleuse. Durch sie werden die zu bearbeitenden Proben in die Probenkammer gebracht, ohne das Gesamtgerät belüften zu müssen.

ii) Detektions - und Abbildungssystem: Zur genauen Orientierung auf der Probe, aber auch zur Oberflächenanalyse, werden die ionenstrahlinduzierten Sekundärelektronen oder auch Sekundärionen durch einen Detektor erfaßt und mit der Ablenkbewegung des Ionenstrahles synchronisiert. Das entstehende Bild kann nun im on-line Mode auf dem Monitor dargestellt oder aber auch in einem Bildspeicher abgelegt und weiter verarbeitet werden (Glättung, Histogramme usw.). Letzteres Verfahren hat den Vorteil, daß nur wenige Scanbewegungen auf der Probe notwendig sind, und so diese wenig durch die erosive Wirkung des Ionenstrahles geschädigt wird (Sputtern). Will man Bilder von isolierenden Probenstrukturen gewinnen, d.h. Sekundärelektronen messen, muß die starke Aufladung der Probenoberfläche durch die positiven Ionen verhindert werden. Hierzu werden niederenergetische Elektronenstrahler eingesetzt, die im alternativ gepulsten Mode zum Detektionssystem arbeiten. Als Sensoren werden Halbleiterdetektoren, Channeltron-Elektronenvervielfacher, Everhard -Thornley - Systeme (Szintillator - Lichtleiter - SEV Anordnungen) sowie zunehmend Mikrokanalplatten verschiedener Konfiguration genutzt. Durch die gleichzeitige Messung der Bildinformation aus verschiedenen Winkeln zur Probenorientierung und geeigneter Kombination der Einzelbilder kann sowohl eine Material- als auch eine topographieabhängige Abbildung der Probenoberfläche erreicht werden, siehe Abb. 3.4 a und 3.4 b. Das Detektionssystem der IMSA -100 ist schematisch in Abb. 3.5 dargestellt.

iii) Computersteuerung und Versorgungseinheiten: Um den Ionenstrahl mit der geforderten Auflösung von kleiner $1 \mu\text{m}$ auf die Probe zu fokussieren, sind für die ionenoptischen elektrostatischen Elemente Spannungsversorgungen hoher Stabilität ($< 10^{-5}$) und geringer Restwelligkeit erforderlich. Die entsprechend genaue Einstellung der Versorgungseinheiten erfolgt über spezielle Interfacemodule über einen Computer, der auch die Konstanz aller eingestellten Parameter während des Betriebes überwacht. Eine weitere wichtige Aufgabe des Computers ist die Steuerung des Ablenssystems. Einmal müssen momentaner Strahlort einem Bildpunkt zugeordnet werden (Bildspeicher) und andererseits auch beliebig entworfene Strukturen mit dem Ionenstrahl auf der Probe in entsprechender Größe (Skalierung) und Bestrahlungszeit (Dosis) nachvollzogen werden.

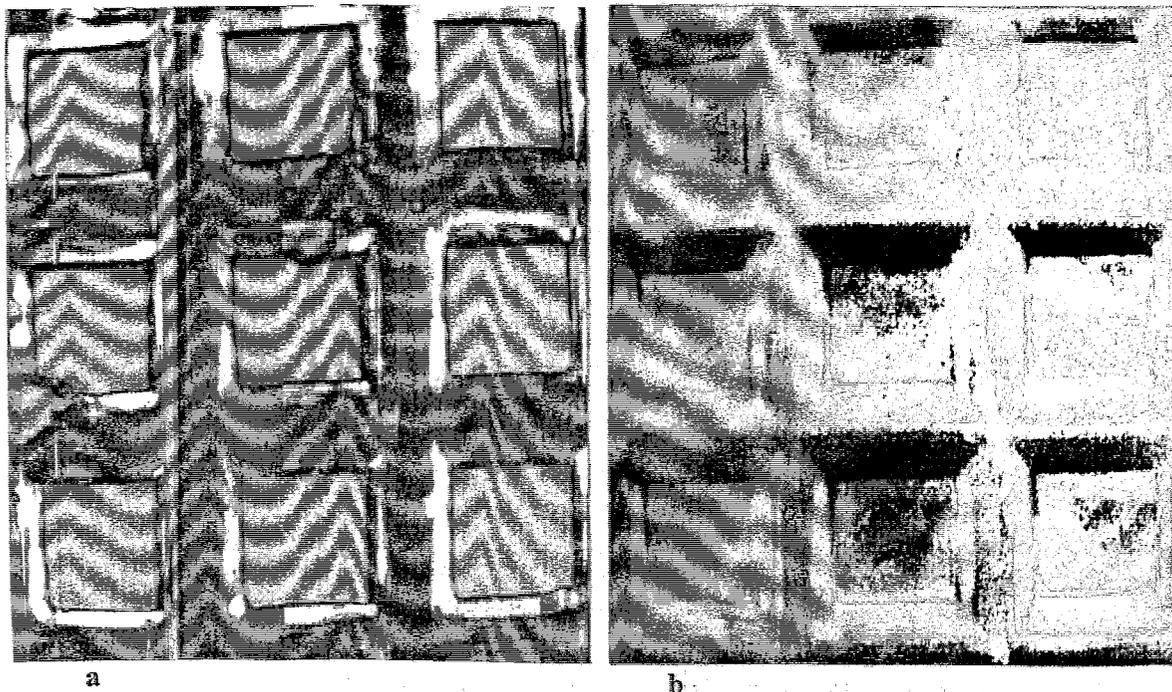


Abb.3.4: Sekundärelektronenabbildung eines Al-Gitters (Stegbreite: 25 μm), aufgenommen mit 4-Segment-Halbleiterdetektor, IMSA-100 a) Materialkontrast, b) Topographiekontrast

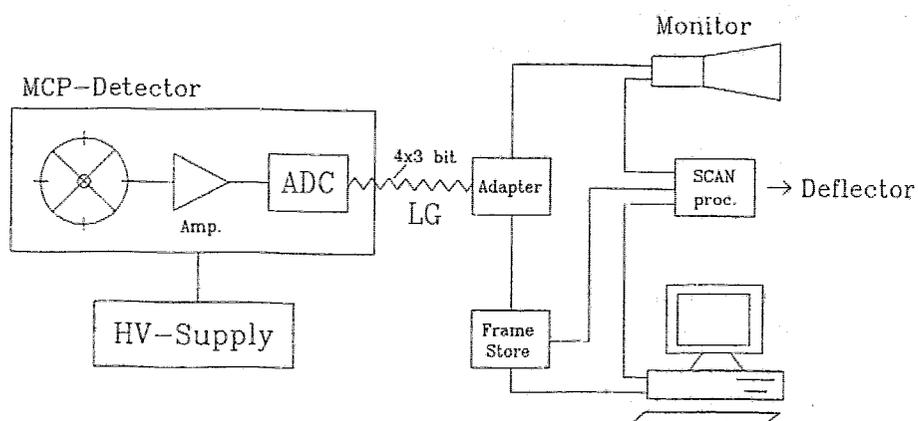


Abb. 3.5: Schematische Darstellung des Detektionssystems der IMSA - 100

3.3 ANWENDUNGEN

3.3.1. Strukturierung durch Ionenzerstäuben

Beim Ionenzerstäuben (Sputtern) werden durch einen physikalischen Stoßprozeß Atome, Ionen und Cluster durch den einfallenden Ionenstrahl aus der Probenoberfläche herausgeschlagen. Dieser Vorgang hängt von der Zusammensetzung der Probe sowie der Masse und Energie der Inzidenzen ab. Das Verhältnis von herausgelösten Atomen zu einfallenden Ionen wird als Sputterausbeute $Y(E)$ (Yield) bezeichnet und kann nach Sigmund [5] berechnet werden durch:

$$Y(E) = \frac{0.042}{U_0} \alpha \left(\frac{M_2}{M_1} \right) S_n(E) \quad (2)$$

mit: U_0 - Oberflächenbindungsenergie (nach [5] 7.81 eV)
 $\alpha(M_2/M_1)$ von Targetatommasse (2) und Ionenmasse (1) abhängige numerische Funktion
 $S_n(E)$ nuklearer Bremsquerschnitt

Die Funktion $\alpha(M_2/M_1)$ ist in Abb. 3.6 dargestellt. Der nukleare Bremsquerschnitt berechnet sich zu:

$$S_n(E) = \frac{4\pi a Z_1 Z_2 e^2 M_1}{M_1 + M_2} s_n(\epsilon) \frac{10^{10}}{4\pi \epsilon_0 e} \quad (3)$$

mit: $a = 0.8853 a_0 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{-1/2}$ wobei $a_0 = 0.53 \text{ \AA}$ der Bohrsche Radius ist,
 $Z_{1,2}$ Kernladungszahlen von Inzidenz- bzw. Targetteilchen,
 $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ Elementarladung,
 $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ Dielektrizitätskonstante.

Die universelle normierte Funktion $s_n(\epsilon)$ zeigt Abb. 3.7, wobei sich das Argument berechnet zu:

$$\epsilon = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \frac{aE}{Z_1 Z_2 e^2} \frac{4\pi \epsilon_0 e}{10^{10}} \quad (4)$$

E ist hierbei die Ionenenergie. Die letzten Terme in den Gleichungen (3) und (4) dienen der Umrechnung und Anpassung der Maßeinheiten im SI -System.

Unter Verwendung dieses Formalismus wurde der Sputterkoeffizient als Funktion der Energie und der Ionenmasse für ein Si - Target bei senkrechtem Einfall der Ionen berechnet, Abb.3.8. Es ist zu sehen, daß sich das Maximum der Sputterausbeute mit wachsender Ionenmasse zu höheren Energien verschiebt, die Sputterausbeute aber auch selbst ansteigt.

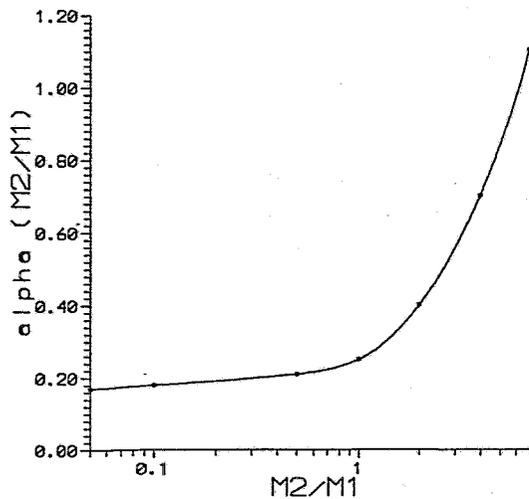


Abb. 3.6: Darstellung der Funktion $\alpha(M_2/M_1)$

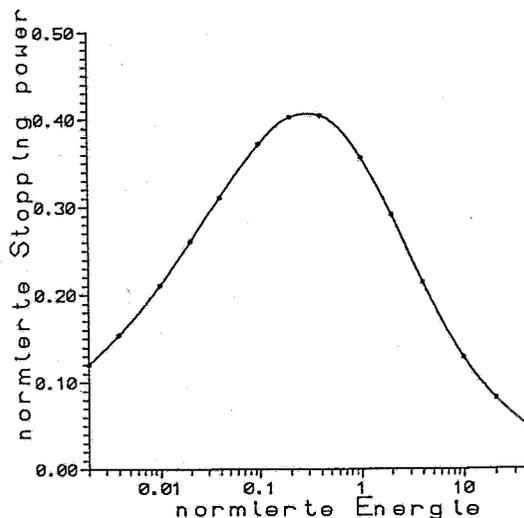
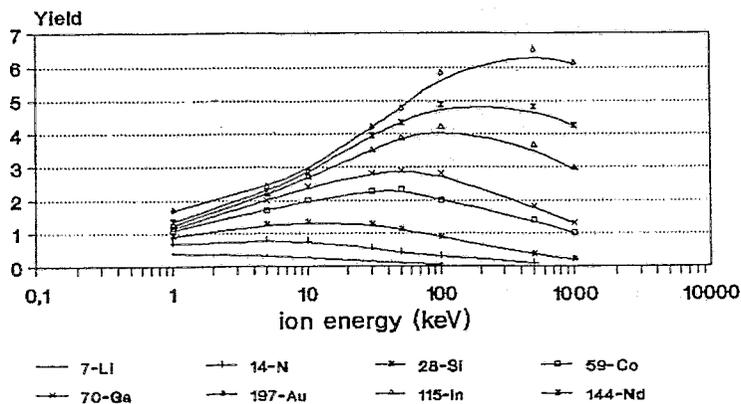


Abb. 3.7: Darstellung der Funktion $s_n(\epsilon)$



target: Si

Abb. 3.8: Abhängigkeit des Sputterkoeffizienten von Ionenmasse und Energie

Für die weiteren Betrachtungen ist nun aber das durch einen Ionenstrahl mit bekannten Parametern (Ionenmasse, Energie, Strom, Bestrahlungszeit und abgerasterte Fläche) abgetragene Volumen von Interesse und kann bestimmt werden aus:

$$V = dA = \frac{Y(E) It}{N_T e} \quad (5)$$

mit : d Sputtertiefe
 A Scanfeldgröße
 I Ionenstrahlstrom
 t Bestrahlungszeit
 N_T Targetatomkonzentration

Die Größe $I t / A e$ wird als Dosis D bezeichnet. Damit kann mit (5) die Sputtertiefe formuliert werden gemäß:

$$d = \frac{Y(E) D}{N_T} \quad (6)$$

Ersetzt man nun den Ionenstrahlstrom I in Gl (5) durch die Stromdichte des Strahles $j = I/A_0$, wobei die Fläche des Fokus A_0 klein gegen die Scanfläche A ist, erhält man für ein abgetragenes Volumen pro Zeiteinheit:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Y(E) j A}{N_T e} \quad (7)$$

Diese Funktion ist für einen 30 kV Ga-Strahl und ein Si-Target bei senkrechter Inzidenz in Abb. 3.9 dargestellt. Dabei wurden Redepositionseffekte von bereits abgesputtertem Material nicht berücksichtigt. In dieser Darstellung zeigt sich die bedeutende Rolle des Parameters Stromdichte für den Sputterprozeß. Die Abhängigkeit der Stromdichte von Strahlstrom und -durchmesser ist in Abb. 3.10 gezeigt.

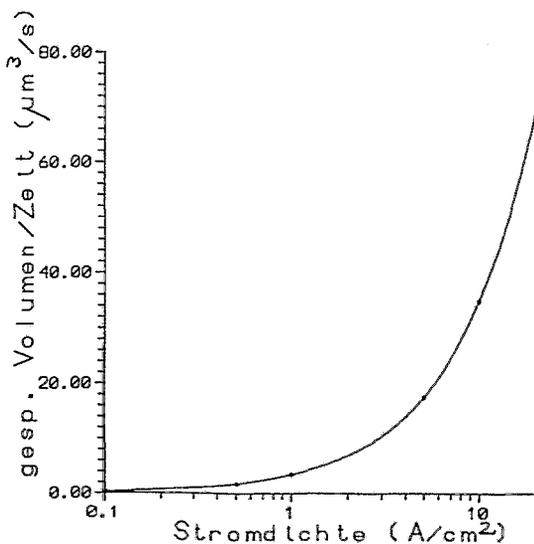


Abb. 3.9: Abhängigkeit des abgesputterten Probenvolumens von der Ionenstromdichte

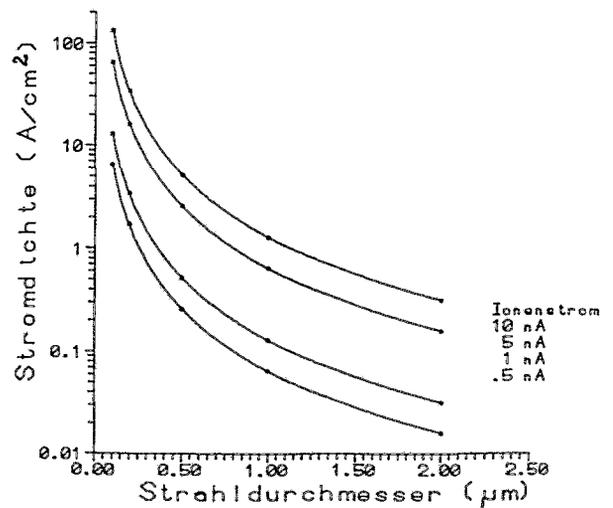


Abb. 3.10: Einfluß des Ionenstromes und des Strahldurchmessers auf die Ionenstromdichte

Für eine genaue Bestimmung der Ionendosis und damit der abgetragenen Sputtervolumina ist es wichtig, den richtigen Ionenstrom zu kennen. Dieser kann mittels eines Faraday-Zylinders mit Sekundärelektronenunterdrückung (z.B. negativ vorgespanntes Metallgitter) gemessen werden. Ist dies nicht möglich, kann der Strom auch auf der Probe oder an einer Blende gemessen und dann hinsichtlich des Sekundärelektronenanteils, der dort ausgelöst wird und zum Meßstrom beiträgt, korrigiert werden. Die je Primärion erzeugte Anzahl von Sekundärelektronen kann nach Schwarz [6] abgeschätzt werden:

$$\delta = -\frac{B\lambda}{E_d} \frac{dE}{dx} \quad (8)$$

wobei B die Austrittswahrscheinlichkeit ist und mit ≈ 0.5 angegeben wird und λ die Oberflächendicke, aus der Elektronen emittiert werden und 1.33 nm betragen soll. E_d ist die Oberflächenbindungsenergie, die für Metalle mit 60 eV und für Isolatoren mit 5 eV angegeben wird. dE/dx ist der elektronische Bremsquerschnitt und kann z.B. aus TRIM-Rechnungen gewonnen werden [7]. Die Funktion $\delta = f(E)$ für Co-Ionen auf einem Si-Target ist in Abb. 3.11 dargestellt. Mit Kenntnis der Sekundärelektronenbildungsrate δ und der Ionenladung Q kann nun der gemessene Strom I_{mess} in den wahren Ionenstrom umgerechnet werden.

$$I_{Ion} = \frac{I_{mess}}{Q + \delta} \quad (9)$$

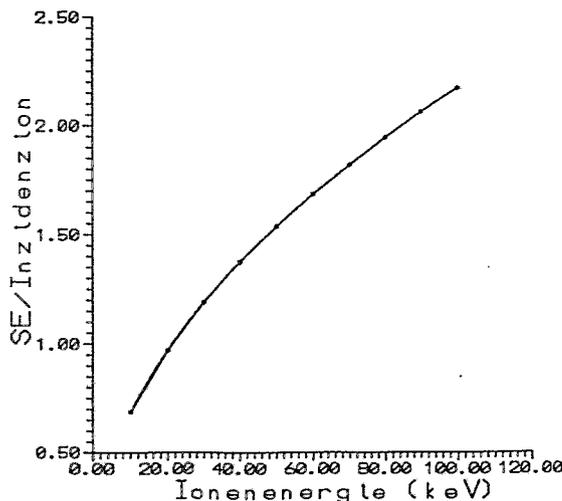


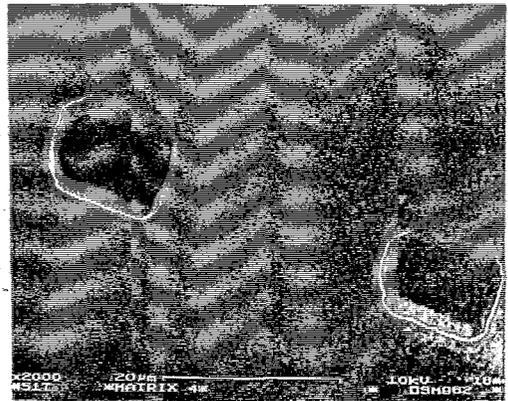
Abb. 3.11: Sekundärelektronenbildungsrate als Funktion der Energie für Co-Ionen auf Si-Target

Nach diesen theoretischen und meßtechnischen Betrachtungen sollen nun noch einige praktische Aspekte diskutiert und einige Beispiele vorgestellt werden.

Strukturierungen durch Sputtern mit dem Ionenfeinstrahl an Proben, die ein großes Aspektverhältnis (Verhältnis von Strukturhöhe zu Strukturbreite) aufweisen, z.B. in der Mikromechanik, werden stark durch redeponiertes Material an den Strukturkanten beeinflusst (Redeposition). Dadurch wird die Steilheit der Kanten verschlechtert bzw. es werden bereits strukturierte Gebiete teilweise wieder zugesetzt. Mit einer geeigneten "Frässtrategie", wobei schmale Wände neben Strukturkanten belassen werden bis der Sputtervorgang beendet ist und erst dann entfernt werden, können Redeponierungseffekte minimiert werden [8]. Auch sind Anwendungen bekannt, wo dieser Effekt zur Durchkontaktierung einer Sandwichstruktur eingesetzt wurde [9]. Ein breites bereits industriell genutztes Anwendungsgebiet des Ionenfeinstrahlsputterns ist die Retusche auf photo- und röntgenlithographischen Masken in der Mikroelektroniktechnologie. Eine umfangreiche Darstellung dieses Gebietes ist bei Prewett and Mair [10] zu finden.

Als abschließendes Beispiel für die vielfältigen Anwendungen des Ionenfeinstrahlsputterns sei hier die Erzeugung von Gruben und Öffnungen in einer 2 μm dicken Si-Membran, auf dem Grund einer durch anisotropes Ätzen hergestellten Grube in $\langle 111 \rangle$ Si, gezeigt [11], Abb. 3.12.

Abb. 3.12: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Grube und einer Öffnung (linke Struktur) in einer Si-Membran



3.3.2. Ionenstrahlgestütztes Abscheiden

Wird durch ein Düsensystem ein organisches oder metallorganisches Gas auf die Probenoberfläche geleitet und mit dem Ionenstrahl in Wechselwirkung gebracht, kommt es unter bestimmten Bedingungen zur Abscheidung einer Schicht. Nach Harriott und Vasile [12] müssen folgende Forderungen für eine praktisch nutzbare Schicht erfüllt sein:

- i) die Schichtbildung muß durch das Ionenstrahlprofil begrenzt sein,
- ii) die Schicht muß decken und gut haften,
- iii) die Schicht muß gegen chemische und physikalische Reinigung resistent sein,
- iv) die Abscheidung muß gegenüber dem Sputtervorgang überwiegen,
- v) das Gas muß einen ausreichenden Dampfdruck haben und gut abpumpbar sein,
- vi) die Abscheiderate sollte eine einfache Funktion der Ionendosis sein (Prozeßkontrolle),
- vii) kleiner Restdruck im Rezipienten (Kontamination, Hochspannungsüberschläge).

Das Prinzip der Schichtabscheidung beruht auf dem Aufbrechen chemischer Bindungen von auf der Probenoberfläche adsorbierten Molekülen (vornehmlich eine Monolage) durch einen Energieübertrag, ausgelöst durch den fokussierten Ionenstrahl. In Frage kommen dabei der direkte Stoß der Inzidenzen, gesputterte Ionen oder Atome, thermische Effekte oder aber auch Sekundärelektronen. Radikale mit niedrigem Dampfdruck (Metalle, Kohlenstoff u.a.) werden an der Probenoberfläche fixiert, die flüchtigen Molekülanteile mit dem Restgas abgepumpt.

Wichtige eingesetzte Verbindungen sind Styrene C_8H_8 zur Abscheidung von Kohlenstoff [10,12], Trimethylaluminium $Al(CH_3)_3$ für Al-Schichten [13] oder Wolframhexacarbonyl $W(CO)_6$ zur Abscheidung von Wolfram [10]. Für den Abscheidungsprozeß ist es sehr wichtig, das Verhältnis von Gasstromdichte zu Ionenstromdichte für jede Gasart zu optimieren und während der Abscheidung zu kontrollieren. Nur so ist es möglich, den zur Schichtabscheidung konkurrierenden Sputtereffekt zu minimieren und eine Schicht aufwachsen zu lassen [14]. Mit anderen Worten ist die Nettoabscheiderate (d.h. abgeschiedene Atome / Inzidenzion) die Differenz aus der absoluten Abscheiderate und dem Sputterkoeffizienten. Für ein weitergehendes Befassen mit der Theorie der ionenstrahlgestützten Abscheidung soll hier auf die Literatur, z.B. [10, 15, 16], verwiesen werden. Als ein Beispiel ist in Abb. 3.13 eine elektronenmikroskopische Aufnahme einer durch ionenstrahlgestützte Abscheidung erzeugten $0.6 \mu m$ breiten Kohlenstofflinie gezeigt [10].

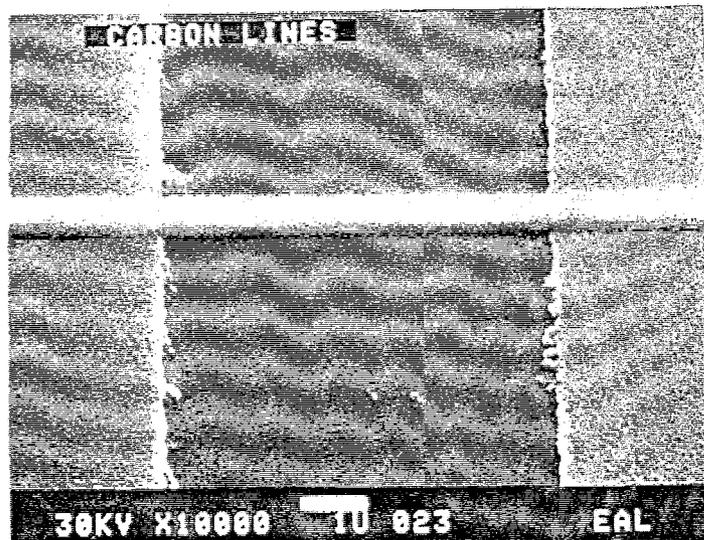


Abb. 3.13: SEM einer $0,6 \mu m$ breiten C- Linie, erzeugt durch ionenstrahlgestützte Abscheidung

3.3.3. Schreibende Ionenimplantation

Die schreibende Ionenimplantation mit dem Feinstrahl bietet gegenüber der klassischen großflächigen Implantation den entscheidenden Vorteil, daß keinerlei Maskierungsverfahren sowie lithographische Strukturierungen erforderlich sind, sowie Dosis und Energie innerhalb einer Struktur im μm - bis sub- μm -Bereich variiert werden können. Der Nachteil besteht in der relativ geringen Produktivität, da die Implantation seriell erfolgt, d.h. Pixel für Pixel nacheinander bestrahlt wird. Voraussetzung für die schreibende Implantation ist die Verfügbarkeit geeigneter Ionenquellen sowie ein Massenseparationssystem, um die gewünschten Ionen mit nutzbaren Stromstärken auf das Target zu bringen.

Die Ionenmikrostrahlanlage IMSA-100 verfügt über ein hochauflösendes Doppel - E x B - Filtersystem [17,18], wodurch alle benötigten Ionen isotopenrein implantiert werden können. Abb. 3.14 zeigt das Massenspektrum einer Co-Nd Legierungs-Flüssigmetallionenquelle, gemessen in der ionenoptischen Säule dieser Anlage [19].

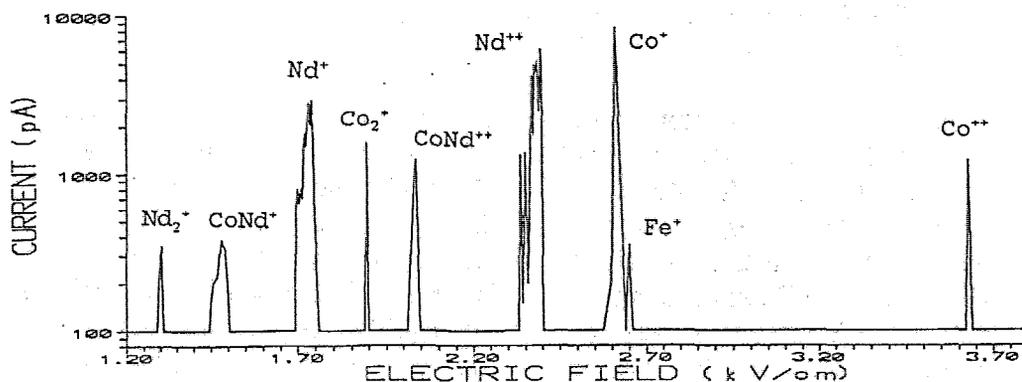


Abb. 3.14: Massenspektrum einer Co-Nd Legierungs-Flüssigmetallionenquelle

Das Implantationsprofil $N(x)$ berechnet sich für Dosen $D < 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ nach [20] zu:

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right) \quad (10)$$

Hierbei ist R_p die projizierte Reichweite der Verteilung und ΔR_p deren Streuung. Das Maximum der Verteilung befindet sich am Ort $x = R_p$, wo die Exponentialfunktion eins wird. Die Verteilung $N(x)$ sowie deren Momente können für alle Ionen in Abhängigkeit von der Energie in allen üblichen Substraten leicht mittels TRIM- Rechnungen [6] erhalten werden.

Für Dosen $D > 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ muß die sputternde Wirkung des Ionenstrahles berücksichtigt werden. Nach Krimmel [21] ergibt sich für das Implantationsprofil:

$$N(x) = \frac{N_T}{2Y} \left(\operatorname{erf} \frac{x-R_p+DY/N_T}{\sqrt{2}\Delta R_p} - \operatorname{erf} \frac{x-R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right) \quad (11)$$

Y ist hierbei der Sputterkoeffizient und N_T die Targetatomkonzentration. Für sehr hohe Implantationsdosen wird die erste Fehlerfunktion in Gl. (11) ≈ 1 , es ergibt sich ein Sättigungsprofil, dessen Form sich mit wachsender Dosis nicht mehr verändert aber mit einer konstanten Geschwindigkeit $v = Y J / e N_T$ in Richtung Probeninneres wandert (J - Ionenstromdichte). Das Maximum dieser Verteilung befindet sich an der Oberfläche und beträgt dann näherungsweise $N_{\max} = N_T / Y$. Ein Beispiel für eine derartige Verteilung ist in Abb. 3.15 gezeigt [22].

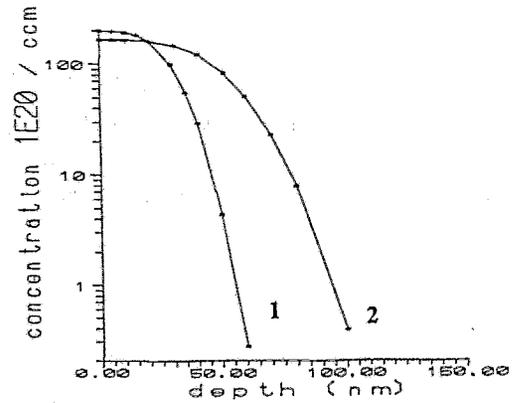


Abb. 3.15: Co^+ (30 keV) und Co^{++} (60 keV) implantiert in Si, $D = 5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-2}$

Im folgenden soll an einige Beispielen die Anwendung der Feinstrahlimplantation gezeigt werden. Die Möglichkeit der Dotierung mit B, P, Ga, As, Si oder Be aus Legierungs- oder reinen Flüssigmetallionenquellen für Silicium oder GaAs wurde in vielerlei Hinsicht zur Erzeugung bzw. Modifizierung von Halbleiterbauelementen oder Quantenstrukturen vor allem im Forschungs- und Entwicklungsbereich der sub- μm -Technologie genutzt [10,23]. Ein sehr modernes Gebiet ist die Erzeugung von Metallsiliciden mittels Hochdosisimplantation in Si-Proben und nachfolgender Ausheilung (Ionenstrahlsynthese). Diese werden als oberflächennahe Leitbahnen oder vergrabene leitfähige Strukturen für mikroelektronische Bauelemente genutzt [24], können aber auch in der Mikromechanik Anwendung finden. Durch den Einsatz der Ionenfeinstrahlimplantation wurden so erstmals maskenfrei CoSi_2 -Drähte hergestellt und untersucht [22,25]. Abb. 3.16 zeigt eine SEM-Aufnahme eines derartigen Drahtes ($3 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-2} \text{Co}^{++}$, 60 keV, Implantationstemperatur 400°C) auf $\langle 111 \rangle$ -Si nach der Ausheilung (600°C , 30 min und 1000°C , 30 min in N_2 -Atmosphäre). In Abb. 3.17 ist die Abhängigkeit des Ausbreitungswiderstandes (spreading resistance) von der Dosis im as-implanted Zustand sowie nach dem ersten Ausheilschritt zu sehen. Die Implantation wurde hier bei Raumtemperatur durchgeführt, was einer Implantation in amorphes oder Poly-Silicium entspricht, da die Amorphisierungs-dosis um Größenordnungen überschritten wird. Dies ist besonders bedeutsam, da so auch Leitbahnen in isolierenden Schichten hergestellt werden können.

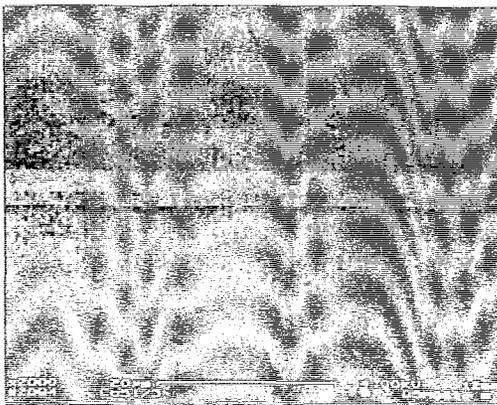


Abb. 3.16: SEM-Aufnahme eines CoSi_2 -Drahtes auf Si

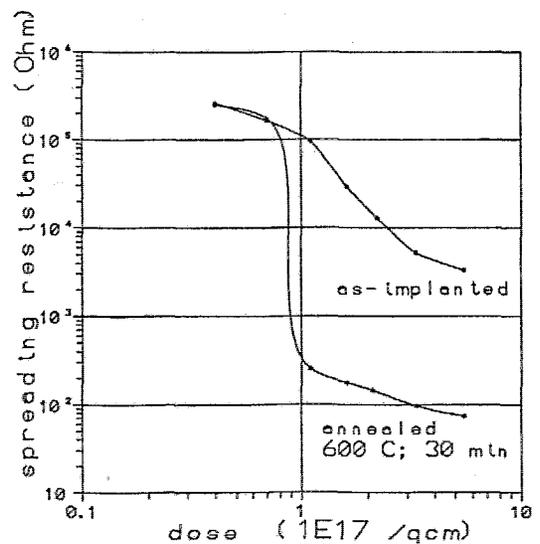


Abb. 3.17: Abhängigkeit des Ausbreitungswiderstandes von der Dosis

Als letztes Anwendungsbeispiel soll hier die Ga - Implantation in Silicium (Akzeptor) genannt werden. Analog zur Hochdosis-Implantation mit Bor in n-Si kann so eine stoppende Struktur für naßchemische Ätzprozesse erzeugt werden [26,27]. So können durch den schreibenden Ionenmikrostrahl auf das Substrat übertragene Mikrostrukturen durch anisotrope Ätztechniken verstärkt (modifiziert) werden, was besonders für die Mikromechaniktechnologie von Interesse ist.

3.3.4. Ionenfeinstrahlolithographie

Unter einem lithographischen Prozeß in der Mikroelektronik versteht man die Belichtung und die nachfolgende Entwicklung einer Lackschicht (Resist), um eine Struktur auf die Probenoberfläche zu übertragen. Die Belichtung kann nun mittels optisch sichtbaren bis ultravioletten Lichts, Röntgenstrahlen, Elektronen oder Ionen erfolgen. Während die erreichbare Auflösung bei optischer Strahlung von der Wellenlänge begrenzt wird und z.Z. etwa 0.25 μm erreicht werden, wurde mit Teilchenstrahlung bereits das 100 nm - Niveau im Labormaßstab weit unterboten [28]. Elektronenstrahlbelichtungsanlagen sind momentan am weitesten entwickelt und werden auch kommerziell eingesetzt. Als störendes Moment tritt aber der sogenannte Proximity-Effekt auf (Verbreiterung des Strahles im Festkörper durch Mehrfachstreuung), wodurch die Auflösung letztendlich begrenzt wird. Dieser Effekt ist bei den wesentlich schwereren Ionen nicht zu beobachten. Die Entwicklung von Gasfeldionenquellen [1,2], die für leichte Ionen (H^+ , He^+) Stromdichten von bis zu 100 A/cm^2 erwarten lassen, kann Ionenmikrostrahlssysteme zum echten Konkurrenten für Elektronenstrahlgeräte hinsichtlich der Produktivität (Schreibgeschwindigkeit) machen. Die komplizierte Handhabung dieser Quellen (Kühlung des Emitters unter den Verflüssigungspunkt des Arbeitsgases) hat auch die Entwicklung von Flüssigmetallionenquellen für leichte Elemente befördert. Diese gestatten neben ihrer kleineren Energiebreite und damit besseren Auflösung (Gl. 1) auch eine größere Eindringtiefe im Resist, was für den Kontrast günstig ist. So wurden z.B. Untersuchungen zur Ionenfeinstrahlolithographie mit Be^{++} [29] oder Li^+ [30] auf PMMA Resist (Polymethylmetacrylat) beschrieben. Für die Diskussion anderer Ionenlithographieverfahren, wie die Ionenformstrahl- oder Projektionslithographie soll hier auf die Literatur verwiesen werden [10,23,28]. Abschließend kann man sagen, daß die Ionenstrahlolithographie zum jetzigen Zeitpunkt noch Gegenstand der Forschung ist, aber gute Aussichten hat, einen Platz in der Nanometertechnologie zukünftig einzunehmen.

3.3.5. Oberflächenanalytik

Die Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) ist ein Standardverfahren hoher Auflösung, das fokussierte Ionenstrahlen zum Abspüttern von Oberflächenatomen (-ionen) einsetzt, die dann in einem Massenspektrometer analysiert werden [31]. Somit kann die Zusammensetzung von Probenoberflächen in Mikrobereichen bestimmt werden. Ein weiteres wichtiges Verfahren ist die Rasterionenmikroskopie (SIM). Hier wird analog dem Rasterelektronenmikroskop die Oberfläche durch Abrastern und Aufnehmen der Sekundärionen abgebildet. Durch das Messen der Ionen an Stelle der Sekundär- oder Rückstreuelektronen beim REM wird die

hierbei zur dreidimensionalen Oberflächenanalyse genutzt werden (Messen - Sputtern - Messen usw.). Soll er aber unterdrückt werden, muß das Bild nach wenigen Rasterzyklen gespeichert und dann im Rechner verarbeitet werden. So erweist sich der fokussierte Ionenstrahl neben seinen Eigenschaften zur Strukturierung auch als nützliches Gerät zur Analyse, die z.T. sogar in-situ durchgeführt werden kann.

3.4. LITERATUR

- [1] J. Orloff, Rev. Sci. Instrum. **64** (5) (1993) 1105
- [2] R. Mühle, Rev. Sci. Instrum. **63** (5) (1992) 3040
- [3] L.W. Swanson and A.E. Bell in: The Physics and Technology of Ion Sources, ed. I.G. Brown John Wiley & Sons, New York 1989
- [4] L. Bischoff, E. Hesse, D. Janssen, F.K. Naehring, F. Nötzold, G. Schmidt and J. Teichert, Microelectronic Engineering **13** (1991) 367
- [5] P. Sigmund, Phys. Rev., **184** (2) (1969) 383
- [6] S.A. Schwarz, J. Appl. Phys. **68** (5) (1990) 2382
- [7] J.F. Ziegler and J.P. Biersack, The Stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, New York 1985
- [8] A. Heuberger, Mikromechanik, Springer-Verlag Berlin 1989
- [9] J. Melngailis et al., J. Vac. Sci. Technol. **B4** (1) (1986) 17
- [10] P.D. Prewett and G.L.R. Mair, Focused Ion Beams from Liquid Metal Ion Sources, Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England 1991
- [11] L. Bischoff, E. Hesse, G. Hofmann, F.K. Naehring, W. Probst, B. Schmidt and J. Teichert, Microelectronic Engineering **21** (1993) 197
- [12] L.R. Harriott and M.J. Vasile, J. Vac. Sci. Technol. **B6** (3) (1988) 1035
- [13] K. Gamo et al., Jap. J. Appl. Phys. **23** (5) (1984) L 293
- [14] L. Bischoff, T. Chudoba und F.K. Naehring, "Ionenstrahlgestützte Abscheidung von Kohlenstoff", 14. Arbeitstagung "Ionenimplantation" Eisenach 09. - 14. 04. 1990
- [15] P.G. Plauner et al., J. Vac. Sci. Technol. **B7** (4) (1989) 609
- [16] H.O. Funsten, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. **B72** (1992) 183
- [17] J. Teichert and D. Janssen, Optik **91** (1) (1992) 46
- [18] J. Teichert and M. A. Tiunov, Meas. Sci. and Technol. **4** (1993) 754
- [19] E. Hesse, L. Bischoff and J. Teichert, J. Phys. D: Appl. Phys. (im Druck)
- [20] H. Ryssel und I. Ruge, Ionenimplantation, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig 1978
- [21] E.F. Krimmel and H. Pfeleiderer, Radiation Effects **19** (1973) 83
- [22] L. Bischoff, E. Hesse, D. Panknin, W. Skorupa and J. Teichert, Proc. Int. Conf. on Microfab., Microcircuit Engineering '93, Maastricht, The Netherlands, 20. - 22. 09. 1993
- [23] J. Melngailis, J. Vac. Sci. Technol. **B5** (2) (1986) 469
- [24] K. Rademacher, S. Mantl, K. Kohlhof and W. Jäger, J. Appl. Phys. **68** (1990) 3001
- [25] J. Teichert, L. Bischoff, E. Hesse, D. Panknin and W. Skorupa, Proc. 1993 MRS Fall Meeting, Boston, USA, Nov. 29 - Dec. 03 (1993)
- [26] P.H. LaMarche, R. Levi-Setti and Y.L. Wang, J. Vac. Sci. and Technol. **B1** (1983) 1056
- [27] W. Chen, P. Chen, A. Madhukar, R. Viswanathan and J. So, Mat. Res. Soc. Symp. Vol. **279** (1993) 599
- [28] J. Melngailis, Proc. 8th Int. Conf. on Ion Beam Modification of Materials, Heidelberg, Sept. 7-11 1992
- [29] S. Matsui, Y. Kojima and Y. Ochiai, Appl. Phys. Lett. **53** (1988) 868
- [30] E. Hesse, J. Teichert and F.K. Naehring, Proc. Int. Conf. on Microfab., Microcircuit Engineering '93, Maastricht, The Netherlands, 20. - 22. Sept. 1993
- [31] R. Levi-Setti, Y.L. Wang and G. Crow, J. Phys. Colloq. Suppl. **45** (12) (1984) C9-197
- [32] P.D. Prewett, Vacuum **34** (1984) 931

4. MIKROMECHANIKTECHNOLOGIEN

4.1. EINORDNUNG UND PROBLEME

Die Mikromechanik als ein wichtiger Vertreter der modernen Mikrotechnologien baut in entscheidendem Maße auf den für die Mikroelektronik entwickelten Technologien und Materialien auf [1]. Die dafür sehr weit entwickelten und in hohem Maße beherrschten Verfahrensschritte sind die Grundlage für den fortschreitenden Erfolg der Mikromechanik.

Zur Herstellung mikromechanischer Strukturen und Elemente werden zu diesen Verfahren noch weitere hinzugefügt, die der Herausbildung dreidimensionaler Strukturen dienen. Hier sind insbesondere die Silicium-Tiefenätztechnik, die Doppelseitenlithografie und die Aufbau- und Verbindungstechnik zu nennen. Für die Sensorik und Aktorik ist aber auch auf den Einsatz verschiedenartigster Werkstoffe hinzuweisen, die für die Erzielung der gewünschten Effekte unumgänglich notwendig sind, aber meistens für die normale Mikroelektronik ungebräuchlich sind.

Aus dem bisher Gesagten ergeben sich auch zugleich die Problemfelder, auf denen nach neuen, angepaßten Lösungen gesucht werden muß, um die Herstellung und den Einsatz mikromechanischer Elemente erfolgreich voranzutreiben.

Zunächst hat man es im Unterschied zur Mikroelektronik mit stark zerklüfteten Substratoberflächen zu tun, die durch die verschiedenen Silicium-Tiefenätzschritte herausgebildet werden. Stufenhöhen bzw. Niveauunterschiede von wenigen Mikrometern bis zu hunderten von Mikrometern sind hier durchaus üblich. Das hat für fast alle Verfahrensschritte mehr oder weniger einschneidende Folgen. Das reicht von der Erzielung einer ausreichenden Kantenbedeckung bei Sputterbeschichtungen oder dem Fotolackauftrag bis hin zur Schärftiefenproblematik beim Strukturübertragungsprozeß in der Fotolithografie. Aber auch die Handlingprozesse der einzelnen Substratwafer, die oftmals durch Vakuumgreifer ausgeführt werden, sind durch die zerklüfteten Oberflächen betroffen.

In einer ganzen Reihe von Anwendungsfällen muß man freistehende Strukturelemente erzeugen oder Substrate bis zur Perforation durchätzen. Hier tritt dann neben die problematische Handlingprozedur noch die erhöhte mechanische Bruchneigung, die zu vermehrten Ausfällen bis hin zur völligen Unbrauchbarkeit der Wafer führen kann. Auf derartige dünneätzte Strukturen haben dann auch eventuell vorhandene thermisch-mechanische Schichtspannungen einen gravierenden Einfluß.

Für die Wirkungsweise vieler Sensor- und Aktorelemente ist die Erzeugung von Hohlräumen nötig. Das können Druckkammern für Drucksensoren, Strömungskanäle für Durchflußmengenmesser und Ventile sein oder aber auch nur Kapselungen für mechanisch bewegliche Teile. Diese Hohlräume werden vorrangig durch ein Zusammenfügen von vorgefertigten Einzelteilen ausgebildet. Für einfache Elemente werden dabei nur zwei Teile miteinander verbunden, es gibt aber auch Beispiele mit drei oder gar fünf Teilen, die übereinander gestapelt und verbunden werden müssen. Bei der Kleinheit der Elemente, besonders aber unter dem Gesichtspunkt höherer Stückzahlen, möchte man natürlich zu einer Simultanbearbeitung mehrerer Elemente kommen. Das bedeutet dann eine Aufbau- und Verbindungstechnik auf Waferebene, wie sie durch die Verfahren des Anodic Bonding oder des Silicon

Fusion Bonding repräsentiert werden. Das sind Verfahren, die für die Mikrosystemtechnik entwickelt worden sind, um den genannten Forderungen gerecht zu werden.

Zuletzt soll noch einmal an die breite Werkstoffpalette erinnert werden, die für die verschiedensten Sensoren und Aktoren zum Einsatz kommt. Hier liegt insbesondere dann ein Konfliktpotential verborgen, wenn Sensoren und Aktoren mit Mikroelektronik auf einem Chip integriert werden oder wenn auf den gleichen Ausrüstungen mikromechanische und mikroelektronische Bauelemente hergestellt werden müssen, da es dann leicht zu Kontaminationen kommt, die meist die sichere Funktionsweise der Mikroelektronik beeinträchtigen.

4.2. TECHNOLOGISCHE ABLÄUFE

Das Ziel mikromechanischer Technologieabläufe besteht in der Herausbildung mehr oder weniger beweglicher Elemente, die in wenigstens einer Dimension so klein sind, daß sie mit den üblichen feinmechanischen Fertigungsabläufen nicht mehr hergestellt werden können. An drei Beispielen, die zugleich typische Vertreter mikromechanischer Technologien darstellen, sollen die Herstellungsschritte detaillierter erläutert werden.

Zuerst wird die Herstellung einer beweglichen Siliciumplatte mit naßchemischer Tiefenätztechnik (bulk micromechanics) und unter Nutzung einer Ätzstoppvariante betrachtet. Ausgangsmaterial für diese Prozeßfolge ist beidseitig poliertes Silicium, meist mit (100)-Orientierung. Wie Abb. 4.1 zeigt, wird zunächst auf das p-Silicium-Ausgangsmaterial eine n-Epitaxieschicht aufgewachsen, deren Dicke gleich der Dicke der zu erzeugenden beweglichen Platte ist. Danach werden zunächst Maskierungsschichten ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) auf beide Seiten der Siliciumwafer aufgebracht, die bei den folgenden Ätzschritten als Maske dienen. An dieser Stelle des Prozeßablaufs werden mit der Doppelseitenlithografie zueinander justierte Strukturen auf Ober- und Unterseite der Siliciumwafer erzeugt und durch einen Ätzprozeß in die Maskierungsschichten übertragen. Um beim folgenden Tiefenätzprozeß einen Ätzstopp an der Grenzfläche Epitaxieschicht/Substrat zu erreichen, muß man dabei eine elektrische Vorspannung an die Probe anlegen. Dazu dient die auf der Oberseite der Wafer erzeugte Metallschicht. Mit der hier betrachteten Variante des elektrochemischen Ätzstopps erzielt man sehr reproduzierbare Dickenwerte über einen ganzen Wafer, allerdings unter Inkaufnahme höherer Prozeßkosten (Epitaxie, Einzelscheibenbearbeitung in Ätzzelle). Der andere Weg, über eine Ätzung nach Zeit die Dicke der beweglichen Teile festzulegen, ist zwar technologisch einfacher und damit billiger, führt aber auch zu größeren Streuungen in der Enddicke der Einzelelemente. Aufgrund der Kristallorientierung des Siliciums ergeben sich bei (100)-Orientierung der Wafer an den Seiten (111)-Flächen, welche die eingätzte Grube begrenzen. Das setzt stillschweigend ein üblicherweise verwendetes orientierungsabhängiges Ätzmittel für Silicium voraus, z.B. KOH- oder EDP-Ätzlösung. In einem weiteren Schritt werden dann die schon früher definierten Durchbrüche von der Oberseite der Wafer her geätzt. Dazu ist jedoch die Kontaktierungsschicht für das elektrochemische Ätzen auf der Oberseite der Wafer zu entfernen und die Unterseite durch eine Maskierungsschicht vor dem Ätzangriff zu schützen. Abschließend kann dann, je nach Einsatzfall, das entstandene Siliciumteil noch mit einer Passivierungs- oder Metallschicht überzogen werden.

Eine andere technologische Möglichkeit, bewegliche, einkristalline Siliciumstrukturen zu erzeugen, besteht in der gezielten Verknüpfung von anisotropen und isotropen Ätzschritten. Diese Technologie kann man im Unterschied zur vorher beschriebenen Volumen-Mikromechanik als Oberflächen-Mikromechanik bezeichnen, da die beweglichen Elemente zwar im einkristallinen Silicium, aber vorrangig an dessen Oberfläche erzeugt werden.

Im Abb. 4.2 ist ein schematischer Ablauf hierfür dargestellt [2]. Nach Aufbringen einer Ätzmaske werden in einem ersten anisotropen Ätzschritt Gruben von einigen Mikrometern Tiefe mit senkrechten Seitenwänden erzeugt. Nach Aufbringen einer weiteren Maskierungsschicht erfolgt ein RIE-Ätzprozeß analog zum bekannten Spacer-Ätzen. Dabei werden die Böden der vorher erzeugten Gruben freigelegt, während deren Seitenwände und die Oberfläche der Wafer noch mit einer Maskierungsschicht bedeckt sind. Eine isotrope Ätzung entfernt dann als nächster Verfahrensschritt Siliciummaterial um den Grubenboden herum. Wenn sich dann die um die Grubenböden entstehenden Hohlräume berühren (s. Abb. 4.2.e), ist ein freitragendes, bewegliches Siliciumteil entstanden.

Als drittes Beispiel eines technologischen Ablaufs zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen soll das LIGA-Verfahren kurz beschrieben werden. Dieses ganz wesentlich am Kernforschungszentrum in Karlsruhe entwickelte Verfahren nutzt die Lithografie mit Synchrotronstrahlung, die Galvanoformung und die Abformtechnik mit Kunststoffen [3]. Das LIGA-Verfahren bringt eine Erweiterung der Werkstoffpalette mit sich, die eine sinnvolle Ergänzung zur Silicium-Mikromechanik darstellt. Andererseits ist die Erzeugung beweglicher Elemente aber zunächst auf Metalle beschränkt, da sie durch Galvanoformung hergestellt werden müssen. Einen Ausweg könnte hier die Nutzung der Metallstrukturen als Komplementärstrukturen bringen, die dann mit einem Isolator ergänzt werden müßten. Nach Auflösen des Metalls bliebe zum Schluß dessen komplementäres Isolatorabbild stehen.

Ein Herstellungsablauf des LIGA-Verfahrens ist im Abb. 4.3 dargestellt. Er beginnt mit dem Aufbringen von dünnen Metallschichten, die die Haftfestigkeit der Strukturen sichern und als Startschicht für die spätere galvanische Abscheidung dienen. Sie können am Schluß der Bearbeitungsfolge für den elektrischen Anschluß genutzt werden. Darauf folgt eine fotolithografische Strukturierung dieser Zwischenschichten. Der nächste Schritt ist das Aufbringen einer mehrere Mikrometer dicken Opferschicht aus Titan, die ebenfalls strukturiert wird. Jetzt folgt ein für das LIGA-Verfahren charakteristischer Prozeßschritt, das Auftragen eines Resists, z.B. PMMA, mit einer Schichtdicke von mehreren hundert Mikrometern und dessen Belichtung mit Synchrotronstrahlung. Durch die Dicke des Resists, hier gibt es Angaben bis zu 700 μm [4], wird die Höhe der zu erzeugenden Mikrostrukturen bestimmt. Zur präzisen Strukturübertragung der in der Absorbermaske enthaltenen Layout-Informationen in einen derartig dicken Resist ist nur eine energiereiche und hochparallele Röntgenstrahlung geeignet. Nach dem Entfernen der bestrahlten Resistgebiete stehen die Proben zum galvanischen Auffüllen der resistfreien Gebiete bereit. Dies ist der zweite charakteristische Prozeßschritt des LIGA-Verfahrens, die Erzeugung der Mikrostruktur durch Galvanoformung aus einem Metall. Zuletzt werden noch der Resist und die Opferschicht entfernt und die entstandene Mikrostruktur kann komplettiert werden.

4.3 LITERATUR

- [1] Heuberger, A.: Mikromechanik, Springer-Verlag Berlin 1989
- [2] Projektkonzept zum Sonderforschungsbereich "Mikromechanische Sensor- und Aktor-arrays" an der TU Chemnitz-Zwickau, November 1993
- [3] LIGA - Bewegliche Mikrostrukturen, Prospekt Kernforschungszentrum Karlsruhe
- [4] Menz, W.: Die LIGA-Technik und ihr Potential für die industrielle Anwendung, 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 23./24.09.1993

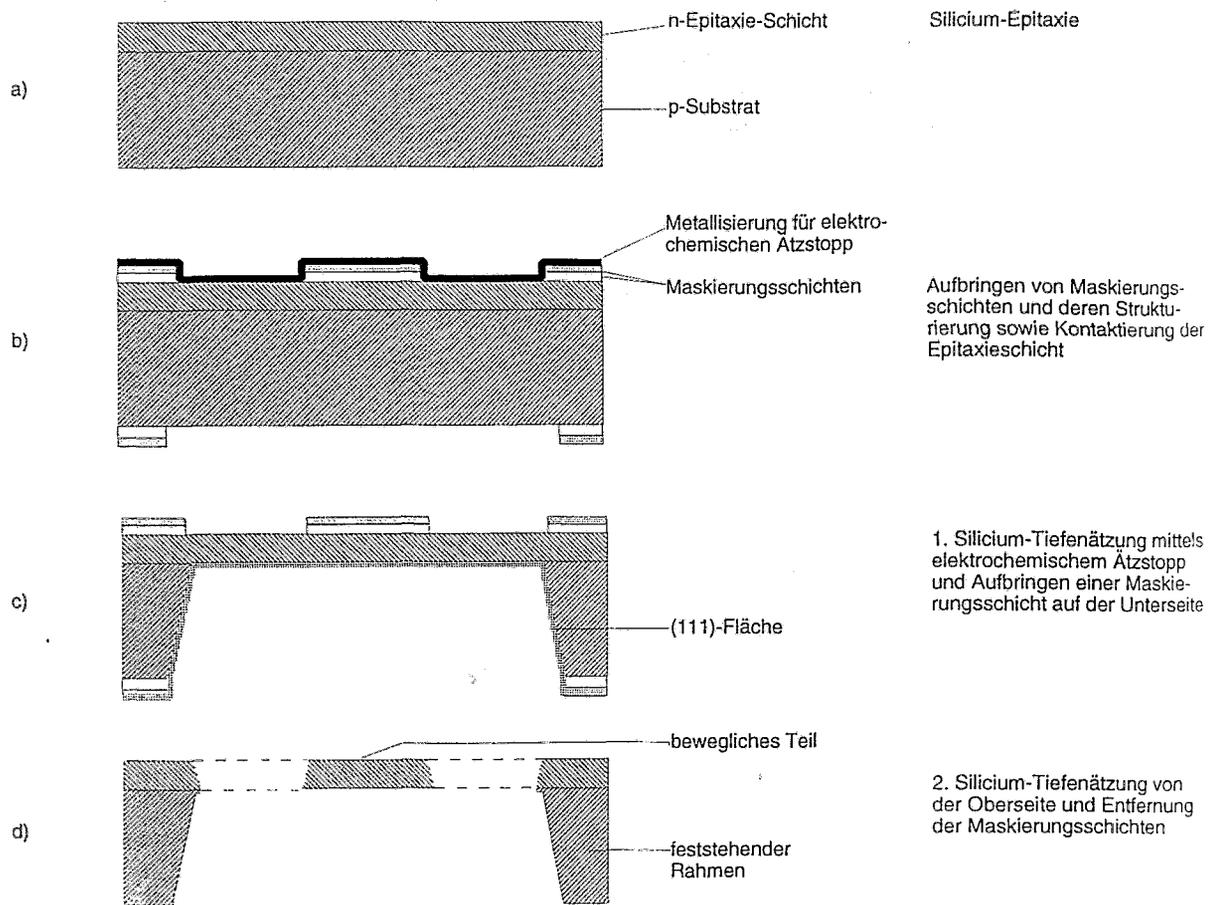


Abb. 4.1: Fertigungsschritte zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen mit naßchemischer Silicium-Tiefenätztechnik (bulk micromechanics)

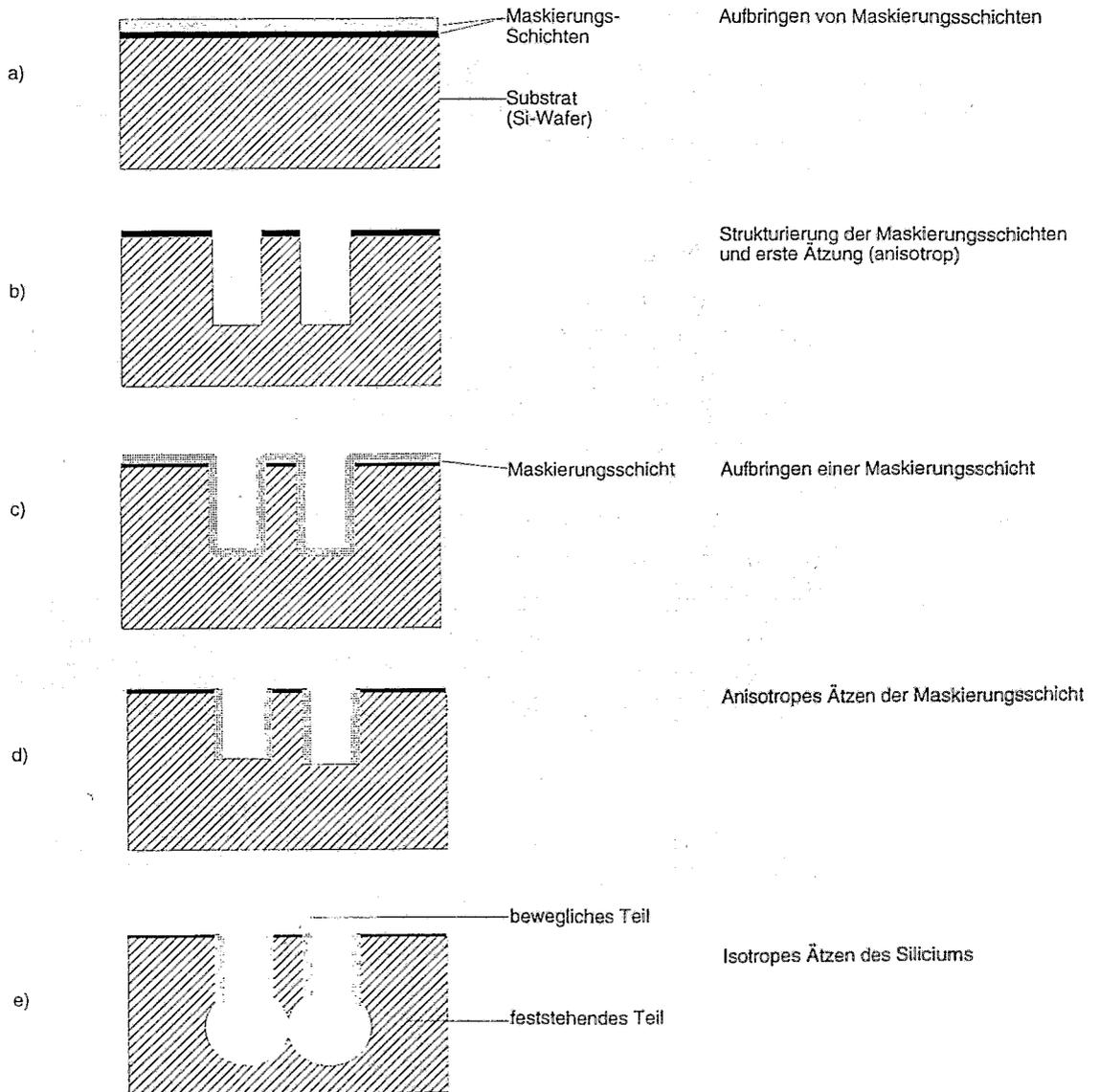


Abb. 4.2: Fertigungsschritte zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen in Silicium-Oberflächen-Mikromechanik

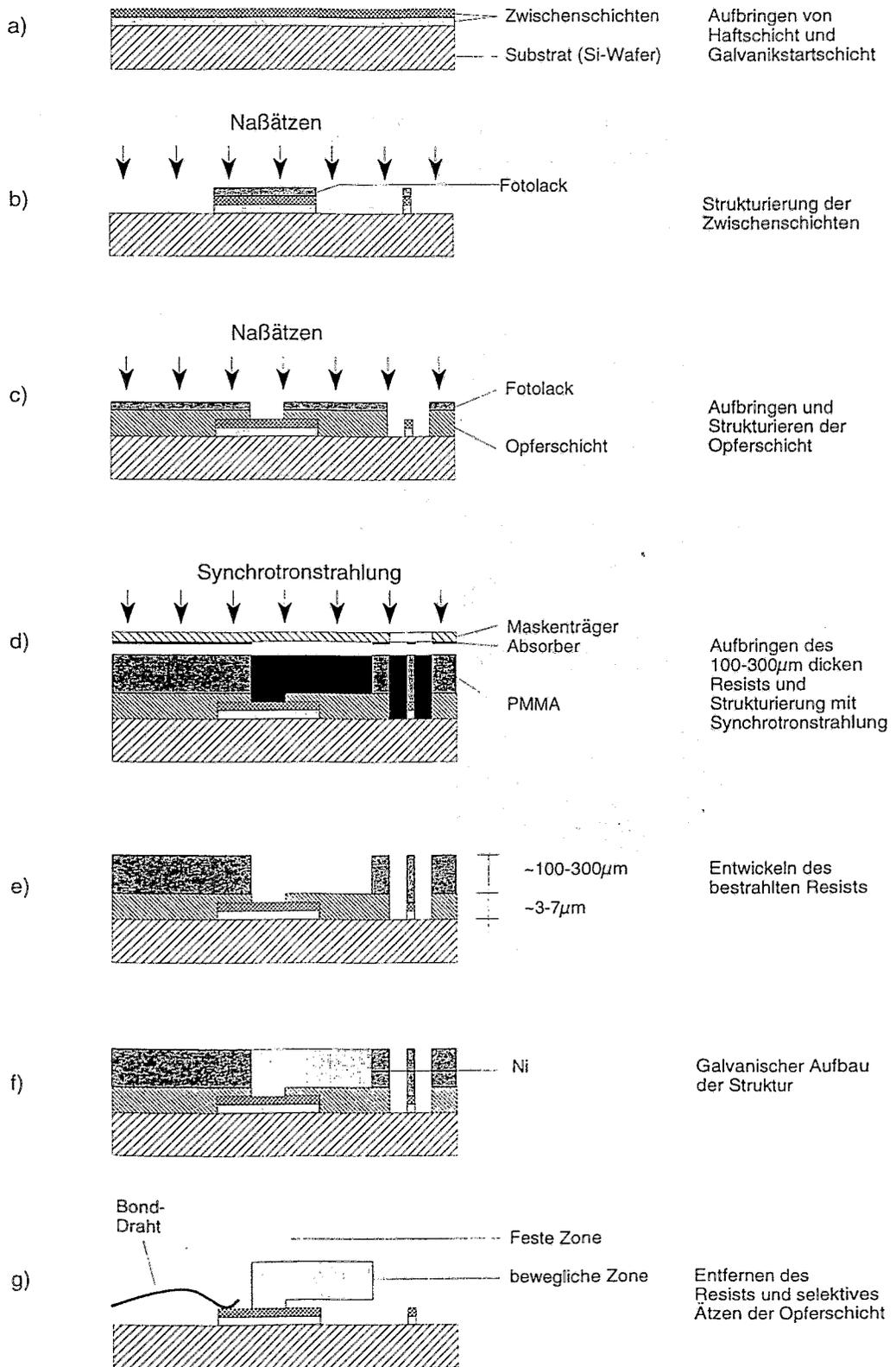


Abb. 4.3: Fertigungsschritte zur Herstellung beweglicher Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren

5. ANWENDUNG DER IONENFEINSTRALTECHNIK IN DER MIKROMECHANIKTECHNOLOGIE

In diesem Abschnitt sollen Überlegungen ausgeführt werden, wie die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Technologien sinnvoll miteinander kombiniert werden können. Es werden Ideen der Mikrostrahlanwendung dargelegt sowie Aspekte der notwendigen Untersuchungen diskutiert. Die Applikationen sollen sich hauptsächlich auf die folgenden Schwerpunkte konzentrieren.

5.1. STRUKTURIERUNG IN ÄTZGRUBEN

In herausgeätzten Grubenbereichen von einigen zehn μm Tiefe kann mit normalen lithographischen Verfahren keine weitere Strukturübertragung realisiert werden, da ein homogenes Aufbringen eines Resists von typischerweise 1...2 μm Dicke auf dem Grubenboden sowie den schrägen Kanten nicht möglich ist. Hier kann das Sputtern mit dem Ionenfeinstrahl als Alternative zur Lithographie einschließlich nachfolgendem Ätzprozeß angesehen werden. So können beliebige Figuren auf dem Grubenboden in Form von definierten Vertiefungen oder aber auch als Öffnungen, wenn die Substratrestdicke (Grubenboden bis Scheibenseite) hinreichend klein ist, erzeugt werden (vgl. Abb. 3.12). Im zweiten Falle kann durch ein "Ausschneiden" der Struktur mittels eines frei programmierbaren Ionenstrahls gegenüber dem flächenhaften Sputtern ein großer Effektivitätsgewinn erzielt werden. Für quadratische Strukturen einer Kantenlänge l wurde die erforderliche Sputterzeit für beide Verfahren in Abb. 5.1 verglichen.

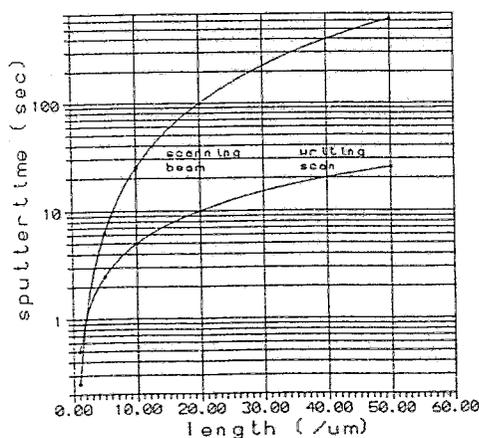


Abb. 5.1: Vergleich der Sputterzeiten für das Rasterverfahren sowie den "schreibenden" Ionenstrahl beim Öffnen quadratischer Strukturen der Kantenlänge l (Strahldurchmesser: 500 nm)

Die Schwerpunkte der Untersuchung der Strukturierung in Ätzgruben mittels des fokussierten Ionenstrahles liegen einmal in der Ermittlung der erreichbaren Kantenschärfen und Rauigkeiten sowie der Sputterkoeffizienten für verschiedene Materialien als auch in der Optimierung der Sputtertechnologie hinsichtlich des Einflusses des redeponierten Materials.

5.2. LEITBAHNEN ÜBER SCHRÄGE KANTEN

Ein Problem bei mikromechanischen Bauelementen auf Siliciumbasis ist oft die Kontaktierung von Elektroden, die sich innerhalb von tiefgeätzten Gruben befinden. Der Kontakt vom Boden einer anisotrop geätzten Grube (Kantenwinkel $\langle 111 \rangle$ Si: 54.73°) zur Chipoberfläche wird momentan z.B. durch eine großflächige Diffusion von Dotanden hoher Konzentration realisiert, wodurch aber nur ein Potential geschaltet werden kann.

Die Erzeugung von leitfähigen Siliziddrähten (siehe Abschnitt 3) durch eine schreibende Kobalt - Hochdosisimplantation, wobei der Fokus des Ionenmikrostrahles über die schräge Kante nachgeführt wird, sowie nachfolgender Temperung (Ionenstrahlsynthese) wird als erfolgversprechende Lösung untersucht. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Kleinheit der elektrischen Verbindungen, der guten Leitfähigkeit der Silizide sowie der flexiblen Anzahl der Leitbahnen. Als offene Fragen müssen in diesem Zusammenhang betrachtet werden:

- Welcher Isolationswiderstand bzw. welche Spannungsfestigkeit besteht zwischen dem Draht und dem Silicium - Bulkmaterial,
- Können Silizidleitbahnen mit ausreichender Leitfähigkeit in amorphen oder Polysilicium-Schichten isolierend erzeugt werden,
- Welche Abhängigkeit der Silizideigenschaften von der Implantationstemperatur existiert,
- Welche Eigenschaften hat das Interface zwischen dem Draht und implantierten oder aufgedampften Kontakten und welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Technologie,
- Welche Geometrie der Leitbahn ist für eine entsprechende Strombelastung erforderlich,
- Welche Deckungsgenauigkeiten zwischen vorgefertigter Struktur und Silizid - Leitbahn sind erreichbar.

5.3. STRUKTURIERUNG AN SCHRÄGEN KANTEN

Sind schräge Kanten großflächig metallisch bedampft, mit SiO_2 oder Si_3N_4 beschichtet oder aber implantiert oder diffundiert kann eine Strukturierung dieser Gebiete nachträglich notwendig werden. Mit dem Ionenmikrostrahl kann nun eine Trennung in Einzelgebiete durch die Erzeugung von gesputterten Gräben mit nachgeführtem Fokus an der schrägen Kante realisiert werden. Schwerpunkt dieser Untersuchungen bilden die zur Ätzgrubenkante waagerechte und senkrechte Trennung von beschichteten Gebieten in Teilbereiche und die elektrische / elektronische Bewertung der auf diese Weise erzeugten Strukturen.

5.4. FEINABSTIMMUNG VON RESONANZBAUELEMENTEN

Mikromechanische Bauelemente, z.B. Beschleunigungssensoren oder Lichtmodulatoren nutzen die Auslenkung eines Biegebalken/Massesystems zur Signalgewinnung bzw. Lichtablenkung. Die Eigenfrequenz (i.a. auch die Bandbreite) eines solchen Systems ist eine Funktion der Masse gemäß: $\omega_1 \propto 1/\sqrt{m}$. Mittels Sputtern oder Abtrennen von Hilfsmassen mit dem Ionenmikrostrahl kann nun durch Masseverringern der Resonator abgestimmt werden. Da aber die Biegebalken- Massesysteme Dimensionen bis etwa 10 mm in Länge und Breite und bis rund 500 μm in der Dicke aufweisen können, muß im Vorfeld untersucht werden, bis zu welchen Abmessungen die Ionenmikrostrahltechnologie überhaupt effektiv eingesetzt werden kann. Darauf aufbauend könnte die Feinabstimmung eines entsprechenden Resonators demonstriert werden. Dazu werden die Ergebnisse der Sputteruntersuchungen aus Punkt 5.1 "Strukturierung in Ätzgruben" mit einbezogen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem Projekt "Anwendung des feinfokussierten Ionenstrahles zur Fertigung mikromechanischer Bauelemente" sollen zwei entwickelte Technologien miteinander kombiniert werden mit dem Ziel, eine neue Qualität bei bestimmten mikromechanischen Komponenten zu erreichen. Hierbei können die Vorteile der Ionenfeinstrahltechnik, wie die hohe Flexibilität in Dosis und Energie auf einem Chip, die Bearbeitbarkeit von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis, die völlige Kompatibilität zur Mikroelektroniktechnologie sowie die hohe Auflösung in der Mikromechanik zur Geltung gebracht werden. Der wesentliche Punkt aber ist die Realisierung von Strukturen, die mit anderen Verfahren nicht herstellbar sind, z.B. Leitbahnen und Trennung von Strukturen über schräge Kanten. Der Nachteil der Ionenmikrostrahltechnik besteht in der relativ geringen Produktivität, resultierend aus dem Verfahren der Einzelpunktbelichtung. Im Rahmen der Forschung und Entwicklung spielt dies aber eine untergeordnete Rolle. Für die konkrete Fertigung von mikromechanischen Bauelementen kann dieser Nachteil durch eine optimierte Technologie sowie die kleinstmögliche Anzahl von Mikrostrahl-Prozessschritten minimiert werden. Aussagen zum sinnvollen Einsatz der Ionenmikrostrahltechnik für die untersuchten Anwendungsfälle sollen folglich das Projekt abrunden.