



KfK 5262
November 1993

Entwicklung eines subtraktiven Strukturierungsverfahrens zur Herstellung von Röntgenzwischenmasken für das LIGA-Verfahren

K. Kadel, G. Stern, R. Broßardt, W. Schomburg
Institut für Mikrostrukturtechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Institut für Mikrostrukturtechnik

KfK 5262

**Entwicklung eines subtraktiven Strukturierungsverfahrens
zur Herstellung von Röntgenzwischenmasken
für das LIGA-Verfahren**

K. Kadel*, G. Stern, R. Broßardt, W. Schomburg

*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe
genehmigte Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0303-4003

Entwicklung eines subtraktiven Strukturierungsverfahrens zur Herstellung von Röntgenzwischenmasken für das LIGA-Verfahren

Zusammenfassung

Die Herstellung von Mikrostrukturen nach dem LIGA-Verfahren erfolgt durch einen Schattenwurf mit hochenergetischer Synchrotronstrahlung und benötigt daher spezielle Röntgenmasken. Diese Röntgenmasken bestehen aus einer dünnen, für Röntgenstrahlen transparenten Metallfolie, die auf einen Trägerrahmen aufgespannt wird und auf der die Absorberstrukturen, normalerweise Gold, aufgebracht sind.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur Herstellung von Absorberstrukturen aus Wolfram entwickelt. Durch Magnetronzerstäubung wird eine einige Mikrometer dicke Wolframschicht haftfest und spannungsarm auf eine Titanschicht aufgebracht und durch reaktives Ionenätzen strukturiert. Die Titanschicht wird dann zusammen mit den Wolframstrukturen auf einen Trägerrahmen übertragen. Die Vorteile dieser subtraktiven Strukturierung einer Wolframschicht liegen in der guten Haftung auch kleinster Absorberstrukturen auf der Maskenträgerfolie sowie der homogenen Absorberdicke unabhängig von der Strukturbreite über den gesamten Bereich der Maske. Da der Schichtaufbau und die Strukturierung unter Vakuumbedingungen erfolgen, kann eine geringere Defektdichte erreicht werden. Mit dem subtraktiven Verfahren wurden Absorberstrukturen mit nur 0,5 µm Breite hergestellt, die 2 mm lang und 2,5 µm hoch sind.

Wichtig für die Herstellung von Röntgenmasken mit geringen Lagetoleranzen der Absorberstrukturen ist die Fertigung von Wolframschichten mit geringen inneren Spannungen. Die Herstellung spannungsarmer Wolframschichten mit isotroper Spannungsverteilung wurde durch die Rotation der Substrate beim Beschichtungsvorgang erreicht.

Die inneren Spannungen der aufgesputterten Wolframabsorberschichten erwiesen sich als langzeitbeständig und temperaturstabil. Argon aus dem Sputterprozeß konnte in diesen Schichten nicht nachgewiesen werden. Die Dichte der Wolframschichten wurde gravimetrisch bestimmt und lag zwischen 18,1 und 18,6 g/cm³.

Die Herstellung von senkrechten Absorberstrukturen durch reaktives Ionenätzen konnte sowohl mit CF₄ als auch mit SF₆ als Ätzgas realisiert werden. Durch die Zugabe von Sauerstoff zu den Ätzgasen wird die Selektivität der Ätzung von Wolfram zu Titan erhöht und es konnte auf eine zusätzliche Ätzstoppschicht verzichtet werden. Als Maskierungsmaterial für den reaktiven Strukturierungsprozeß wurde Nickel verwendet, das sich besonders bei der Ätzung mit SF₆ im Bereich hoher Generatorleistungen durch geringe Abtragsraten auszeichnet.

Development of a Subtractive Patterning Technique for Fabrication of First X-ray Masks Used in the LIGA Process

Abstract

In the LIGA process microstructures are fabricated by proximity printing with high energy synchrotron radiation so that special X-ray masks are required. These X-ray masks consist of a thin metal foil which is transparent to X-rays and clamped onto a carrier frame. Absorber patterns, normally made of gold, are applied onto this metal foil.

The work described here has been the development of a technique for fabrication of absorber patterns made of tungsten. Highly adhesive low stress tungsten layers of several micrometer thickness have been made by magnetron sputtering and subsequently patterned by reactive ion etching. Then the titanium layer together with the tungsten patterns is transferred to a carrier frame. The advantages of the subtractive patterning process of a tungsten film includes good adhesion, even of tiny absorber patterns, on the mask carrier foil and the homogeneous thickness of absorber independent of the line width across the whole mask area. As the film is deposited and patterned under vacuum conditions, less defect density can be achieved. Using the subtractive process absorber patterns of only 0.5 μm width have been fabricated which are 2 mm long and 2.5 μm in height.

To achieve X-ray masks with small distortions of the absorber patterns tungsten films with little internal stresses must be prepared. Low stress tungsten films with isotropic stress distribution have been manufactured by rotation of the substrates during film application.

The internal stresses of the tungsten absorber films sputtered onto the carrier frame have been found to be stable over extended periods and during annealing. No argon from the sputtering process has been detected in the films. The density of the tungsten films was determined by gravimetry and attained values between 18.1 and 18.6 g/cm^3 .

Vertical absorber structures have been prepared by reactive ion etching with both CF_4 and SF_6 as etching gases. The addition of oxygen to the etching gases improves the selectivity of etching from tungsten to titanium so that there is no need for an additional etch stopping film. Nickel has been used as masking material in reactive patterning; it excels by minimum removal rates, especially in SF_6 etching in the range of high generator powers.

Liste der verwendeten Symbole	1
1 Einleitung	3
2 Grundlagen	8
2.1 Anforderungen an LIGA-Röntgenmasken	8
2.2 Stand der Technik zur Herstellung von Röntgenzwischenmasken	10
2.2.1 Aufbau der Röntgenmasken.....	10
2.2.2 Herstellung der Trägerfolie	11
2.2.3 Absorberstrukturierung durch additiven Prozeß	12
2.2.4 Grenzen additiver Absorberstrukturierung	12
2.3 Subtraktiver Prozeß.....	13
2.3.1 Auswahl des Absorbermaterials für den subtraktiven Prozeß.....	14
2.3.2 Auswahl der Maskierungsschicht.....	17
2.3.3 Strukturierung der Maskierungsschicht.....	18
2.3.4 Übersicht über die Maskenherstellung mit dem subtraktiven Verfahren	20
3 Versuchsdurchführung	22
3.1 Schichtaufbau.....	22
3.1.1 Beschreibung der Sputteranlage.....	22
3.1.2 Messung der inneren Spannungen	24
3.1.2.1 Durchführung der Messungen	25
3.1.2.2 Meßbereich	26
3.1.2.3 Reproduzierbarkeit der Messung.....	26
3.1.2.4 Einfluß der Meßtemperatur	26
3.1.3 Messung der Schichtdicken	27
3.1.3.1 Tastschnittgerät.....	27
3.1.3.2 Röntgenfluoreszenz	28
3.2 Strukturierung der Schichten.....	29
3.2.1 Beschreibung der RIE-Anlage.....	29
3.2.2 Konditionierung der Anlage.....	29
3.3 Messen der Verzüge	30
4 Experimenteller Teil	32
4.1 Herstellung der Absorberschicht	32
4.1.1 Theoretische Betrachtung der Beeinflussung des Gefüges der Wolframschichten durch die Betriebsparameter	33
4.1.1.1 Substrattemperatur	33
4.1.1.2 Sputterdruck.....	34
4.1.1.3 Biasspannung	35
4.1.1.4 Sputterleistung.....	35
4.1.1.5 Magnetfeld	36

4.1.1.6	Substratoberfläche.....	36
4.1.1.7	Beschichtungsrate	36
4.1.2	Aufbau der Absorberschicht durch statische Beschichtung.....	37
4.1.2.1	Schichtdickengleichmäßigkeit.....	38
4.1.2.2	Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen	39
4.1.2.2.1	Einfluß der Schichtdicke	39
4.1.2.2.2	Einfluß des Sputterdruckes.....	41
4.1.2.2.3	Einfluß der Biasspannung	41
4.1.2.2.4	Einfluß der Sputterleistung	42
4.1.2.2.5	Einfluß des Magnetabstandes	43
4.1.2.2.6	Einfluß der Beschichtungstemperatur.....	43
4.1.2.2.7	Einfluß der Schichtdickenverteilung	44
4.1.2.3	Diskussion der bei statischer Beschichtung erhaltenen inneren Spannungen.....	44
4.1.3	Aufbau der Absorberschicht durch dynamische Beschichtung	45
4.1.3.1	Schichtdickengleichmäßigkeit.....	46
4.1.3.2	Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen bei der Beschichtung von Siliziumwafern	46
4.1.3.2.1	Einfluß der Biasspannung	46
4.1.3.2.2	Einfluß des Magnetabstandes	47
4.1.3.2.3	Einfluß des Sputterdruckes.....	47
4.1.3.3	Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen auf Abhebewafern.....	49
4.1.3.3.1	Einfluß des Magnetabstandes	49
4.1.3.3.2	Einfluß des Sputterdruckes.....	49
4.1.3.4	Diskussion der bei dynamischer Beschichtung erhaltenen inneren Spannungen.....	50
4.1.4	Aufbau der Absorberschicht durch quasistatische Beschichtung	50
4.1.4.1	Schichtdickengleichmäßigkeit.....	51
4.1.4.2	Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen bei der Beschichtung von Siliziumwafern	51
4.1.4.2.1	Einfluß der Rotation.....	51
4.1.4.2.2	Einfluß des Sputterdruckes.....	52
4.1.4.3	Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen bei der Beschichtung von Abhebewafern	53
4.1.4.3.1	Einfluß des Sputterdruckes.....	53
4.1.4.3.2	Einfluß der Sputterleistung	53
4.1.4.4	Diskussion der bei quasistatischer Beschichtung erhaltenen inneren Spannungen.....	54
4.1.4.5	Homogenität der inneren Spannungen bei der quasistatischen Beschichtung	55
4.1.5	Vergleich der verschiedenen Beschichtungsarten.....	56
4.1.6	Eigenschaften der aufgesputterten Wolframschichten	57

4.1.6.1	Standzeitverhalten der aufgesputterten Schichten	59
4.1.6.2	Temperaturbeständigkeit	59
4.1.6.3	Dichte.....	61
4.1.6.4	Argongehalt.....	61
4.2	Herstellung der Maskierungsschicht	62
4.3	Strukturierung der Resiststruktur.....	62
4.3.1	Elektronenstrahlolithographie	63
4.3.2	Optische Lithographie	63
4.4	Strukturierung der Maskierungsschicht.....	63
4.5	Strukturierung der Absorberschicht.....	65
4.5.2	Ergebnisse der Strukturierung mit CF ₄	68
4.5.2.1	Einfluß der Generatorleistung.....	69
4.5.2.2	Einfluß des Drucks.....	69
4.5.2.3	Einfluß des Gasflusses	70
4.5.2.4	Einfluß des Elektrodenmaterials	71
4.5.2.5	Optimaler Arbeitspunkt für CF ₄	71
4.5.3	Verwendung von SF ₆ als Ätzgas	71
4.5.3.1	Einfluß der Generatorleistung.....	71
4.5.3.2	Einfluß des Druckes.....	72
4.5.3.3	Einfluß des Gasflusses	73
4.5.3.4	Einfluß des Elektrodenmaterials	73
4.5.3.5	Optimaler Arbeitspunkt für SF ₆	73
4.5.4	Ätzstopp auf der Titanmembran	74
4.5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse bei der Strukturierung der Absorberschicht mit CF ₄ und SF ₆	76
4.6	Eigenschaften der subtraktiv hergestellten Röntgenmasken	78
	Verzüge	79
5	Ausblick	83
6	Zusammenfassung und Diskussion	85
7	Literaturverzeichnis	88

Liste der verwendeten Symbole

α_{Si}	: Thermischer Ausdehnungskoeffizient von Silizium
α_W	: Thermischer Ausdehnungskoeffizient von Wolfram
α	: Winkel zwischen Substratnormale und Sputterquelle
a	: Fitparameter
b	: Fitparameter
β	: Winkel der Kristallite
c	: Fitparameter
d_f	: Dicke des aufgesputterten Filmes
D_G	: Grenzdosis
D_O	: Oberflächendosis
D_p	: absorbierte Dosis
d_s	: Dicke des Substrates
D_S	: Schädigungsdosis
d_{TS}	: Abstand zwischen Target und Substrat
d_W	: Dicke der aufgesputterten Wolframschicht
$\Delta\alpha$: Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten
$\Delta\sigma_W$: Spannungsänderung in der Wolframschicht
ΔT	: Temperaturunterschied
ϵ_{th}	: Thermische Dehnung
ϵ_{Si}	: Dehnung des Siliziumwafers
ϵ_W	: Dehnung der Wolframschicht
E	: Energie
E_S	: Elastizitätsmodul des Substrates
E_W	: Elastizitätsmodul der aufgesputterten Wolframschicht
f	: Gasfluß beim reaktiven Ionenätzen
F	: Bestrahlungsfläche
I	: Strahlstrom
λ_c	: charakteristische Wellenlänge der Synchrotronstrahlung
M	: Magnetabstand vom Target
ν	: Querkontraktionszahl
p	: Sputterdruck
p_e	: Gasdruck beim reaktiven Ionenätzen
p_B	: Basisdruck
P	: Sputterleistung (eingespeiste Generatorleistung beim Aufputtern)
P_{HF}	: eingespeiste Generatorleistung beim reaktiven Ionenätzen
R	: Radius
R_x	: Krümmungsradius der Oberfläche in X_W -Richtung

- R_y : Krümmungsradius der Oberfläche in Y_W -Richtung
- S_x : innere Spannung in X-Richtung (parallel zum Flat)
- S_y : innere Spannung in Y-Richtung (senkrecht zum Flat)
- T : Transition Zone
- T_r : reduzierte Temperatur
- T_S : Substrattemperatur bei der Beschichtung
- T_m : Schmelztemperatur des Beschichtungsmaterials
- X_W : Meßrichtung über das Waferzentrum, parallel zum Flat
- Y_W : Meßrichtung über das Waferzentrum, senkrecht zum Flat
- U_B : Biasspannung

1 Einleitung

Für die Herstellung von Mikrostrukturen mit extremer Strukturhöhe und großem Aspektverhältnis wird am Kernforschungszentrum Karlsruhe im Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) eine Basistechnologie der Mikrofertigung entwickelt [Bec85]. Mit dieser Technologie lassen sich Mikrostrukturen mit weitgehend frei wählbarer lateraler Form aus zahlreichen Metallen, Kunststoffen und Keramik herstellen. Die minimalen lateralen Abmessungen dieser Strukturen liegen im Mikrometerbereich, wobei Strukturgenauigkeiten im Submikrometerbereich erzielt werden. Die maximal erzielbaren Strukturhöhen liegen bei mehreren hundert Mikrometern. Als wesentliche Strukturierungsmethoden werden die Lithographie mit Synchrotronstrahlung, die Galvanoformung und die Abformung mit Kunststoffen eingesetzt (LIGA-Verfahren). Mit dem LIGA-Verfahren werden mikromechanische [Wal92, Rap93], mikrooptische und mikrofluidische Aktoren [Moh90] und Sensoren [Bur90] hergestellt. Zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich z. B. in der Faseroptik [Göt92, Rog92], der Meß- und Regelungstechnik [Kow90], der Umwelttechnik und der Medizintechnik [Ble90]. Das LIGA-Verfahren kann deshalb einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung der Mikrosystemtechnik leisten, bei der mehrere in einem System zusammenwirkenden Mikrosensoren und Aktoren mehr leisten als die Summe der Einzelkomponenten [Men93].

An den Entwicklungsarbeiten zum LIGA-Verfahren beteiligt sich seit 1986 die Steag AG, die seit Mai 1989 alleiniger KfK-Lizenznehmer für das LIGA-Verfahren ist. Für den Bau einer Pilotfertigungsanlage für LIGA-Produkte wurde im Oktober 1990 die Firma MicroParts, Gesellschaft für Mikrostrukturtechnik mbH gegründet, ein gemeinsames Tochterunternehmen der Firmen Hoesch AG, Hüls AG, Rheinmetall GmbH, Steag AG, und VEW AG.

Bei der Herstellung von Produkten nach dem LIGA-Verfahren werden folgende Prozessschritte durchlaufen: Über eine Maske wird ein strahlenempfindlicher Resist (Polymer) mit der Röntgenstrahlung aus einem Synchrotron bestrahlt. Auf der Maske sind auf einer für Röntgenstrahlen transparenten Membran Absorberstrukturen aufgebracht. Die bestrahlten Bereiche des Resists können dann mit einem geeigneten Entwickler selektiv gegenüber den unbestrahlten Bereichen herausgelöst werden. Auf diese Weise werden Mikrostrukturen aus Kunststoff erzeugt. Für die Herstellung metallischer Mikrostrukturen wird in die Zwischenräume zwischen den unbestrahlten Resiststrukturen galvanisch Metall abgeschieden. Die nach dem Auflösen des unbestrahlten Resists verbleibenden metallischen Mikrostrukturen oder die Resiststrukturen können bereits das Endprodukt des Fertigungsprozesses darstellen. Für die preiswerte Massenproduktion werden metallische Mikrostrukturen als Abformwerk-

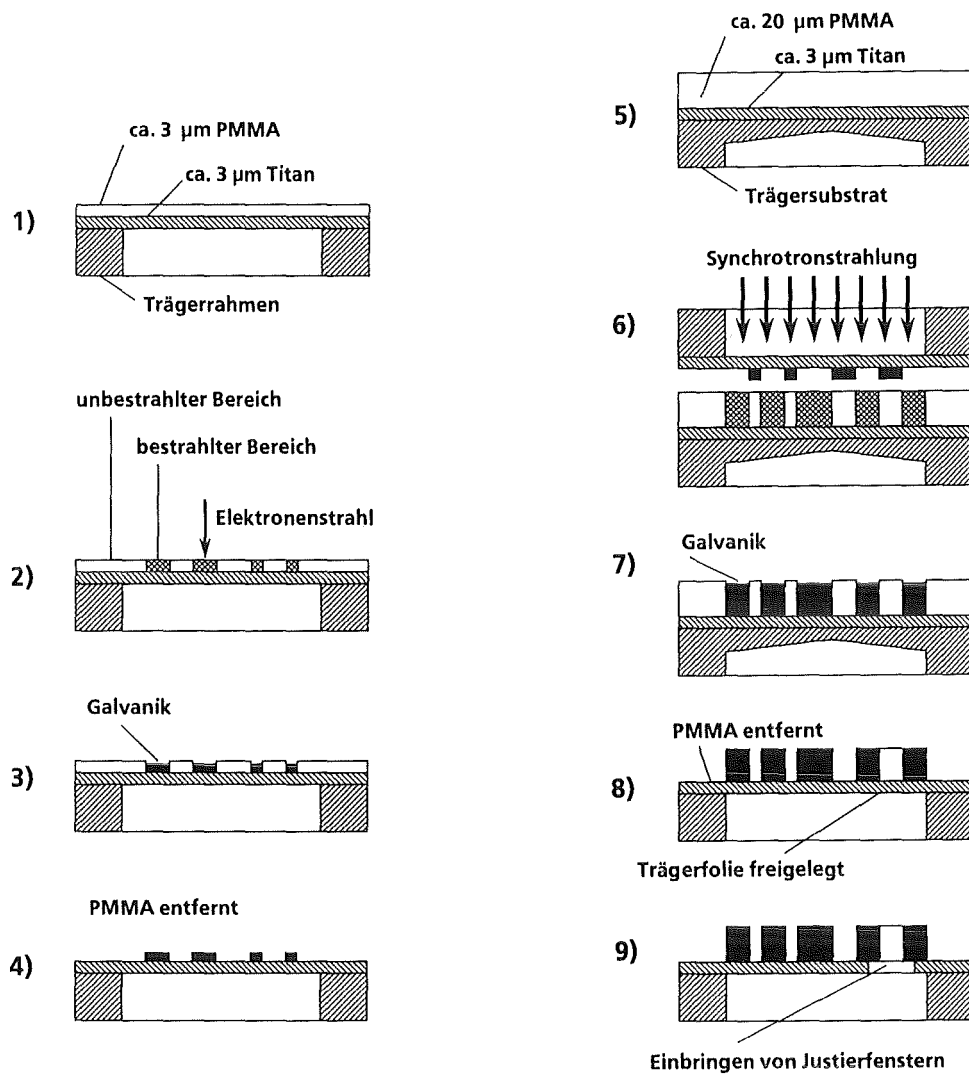
zeuge für den Spritzguß, den Reaktionsguß oder das Vakuum-Warmumformverfahren verwendet [Har90, Vol87].

Aus der Notwendigkeit, mehrere hundert Mikrometer dicke Resistschichten zu strukturieren, ergeben sich für die im LIGA-Verfahren eingesetzte Maskentechnik wesentlich andere Anforderungen als in der IC-Fertigung, in der die Resistdicken im Bereich von einem Mikrometer liegen. Da die Übertragung der Struktur der Maske in die Resistschicht durch einen Schattenwurf mit sehr paralleler und sehr energiereicher Synchrotronstrahlung geschieht, besteht die zu übertragende Struktur aus einem für diese Röntgenstrahlung gut absorbierenden Material, meist Gold.

Die notwendige Dicke der Goldabsorber der für den LIGA-Prozeß verwendeten Röntgenmaske hängt sowohl von der zu bestrahlenden Resistdicke als auch vom Spektrum der zum Bestrahlungsvorgang verwendeten Synchrotronstrahlung ab. Wie in Kapitel 2 erklärt werden wird, werden dickere Resistschichten mit Röntgenlicht bestrahlt, dessen Spektrum einen größeren Anteil kurzer Wellenlängen enthält. Für die Absorption kürzerer Wellenlängen werden dickere Absorber benötigt. Deshalb nimmt die notwendige Absorberdicke mit der zu bestrahlenden Resistdicke zu. In der Regel werden Absorberdicken zwischen 10 μm und 15 μm benötigt.

Für die Herstellung der Absorberstrukturen wird zuerst eine Resistschicht strukturiert, die etwas höher ist als die benötigte Absorberhöhe, und als Form für den galvanischen Aufbau der Absorberstrukturen dient.

Da die Strukturierung von Resistschichten von ca. 20 μm für die Herstellung von Röntgenmasken in der erforderlichen Qualität bisher nur durch die Strukturierung mit Synchrotronstrahlung möglich ist, wird zuerst eine sogenannte **Zwischenmaske** mit Absorberhöhen von ca. 2,5 μm hergestellt. In der Abbildung 1.1 ist dieser Prozeß am Beispiel der direkten Strukturierung der Resistschicht durch Elektronenstrahlolithographie dargestellt (Abb. 1.1-1 bis 1.1-4). Eine ca. 3 μm dünne PMMA-Schicht wird auf einer etwa gleich dünnen Titanfolie mit einem Elektronenstrahlschreiber bestrahlt. Die bestrahlten Bereiche werden in einem Entwickler aufgelöst und die so entstehenden Lücken galvanisch mit Gold aufgefüllt. Die Absorberstruktur auf der Zwischenmaske wird dann mit Synchrotronstrahlung in eine ca. 20 μm dicke Resistschicht übertragen (Abb. 1.1-6). Nach der Entwicklung dient die so entstandene Resiststruktur als Form für eine Goldabscheidung. Für viele Anwendungen muß die Röntgenmaske vor der Bestrahlung relativ zur Probe ausgerichtet werden. Damit dies möglich ist, werden Justierfenster angebracht, indem die Titanträgerfolie an einigen Stellen mit Flußsäure entfernt wird (Abb. 1.1-9). Die so hergestellten Masken mit ausreichend dicken Absorberstrukturen für den LIGA-Prozeß werden als **Arbeitsmasken** bezeichnet.



Herstellungsprozeß der Zwischenmaske:

- 1) Beschichtung des Substrates mit Resist (durch Aufschleudern von PMMA)
- 2) Strukturierung des Resists durch direkte Elektronenstrahlolithographie
- 3) Galvanische Abscheidung der Absorberstruktur in den belichteten Bereichen, die durch einen Entwickler entfernt wurden
- 4) Entfernen des Resists nach der Herstellung der Absorberstruktur

Herstellungsprozeß der Arbeitsmaske:

- 5) Beschichtung des massiven Trägersubstrates mit ca. 20 μm Resist (durch Aufpressen von PMMA)
- 6) Umkopieren der Absorberstruktur der Zwischenmaske in den Resist der Arbeitsmaske mittels Synchrotronstrahlung
- 7) Galvanische Abscheidung der Absorberstruktur in den belichteten Bereichen, die durch einen Entwickler entfernt wurden
- 8) Entfernen des Resists nach der Herstellung der Absorberstruktur
- 9) Einbringen von Justierfenstern in die Trägerfolie für die Ausrichtung der Maske beim Bestrahlungsvorgang

Abb. 1.1: Wesentliche Prozeßschritte zur Herstellung von Röntgenmasken für das LIGA-Verfahren

Die Absorberstrukturen auf den Röntgenmasken sollten möglichst spannungsarm sein, da innere Spannungen zu Verzügen der Maske führen, die auf die Produkte

übertragen werden. Weiterhin sollte die Homogenität und die Dicke der abgedruckten Absorberschichten im mikroskopischen wie im makroskopischen Bereich sehr gleichmäßig sein, damit ein homogener Röntgenkontrast entsteht. Die Absorberstrukturen müssen sehr gut auf dem Trägermaterial der Masken haften, da die Kontaktflächen oft nur wenige Quadratmikrometer betragen [Men93]. Um Mikrostrukturen mit wohl definierten lateralen Abmessungen fertigen zu können, werden möglichst steile Absorberwände benötigt.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Röntgenzwischenmasken mit Absorberstrukturen von homogener Dicke, möglichst vertikalem Profil der Absorberwände, guter Haftung zum Substrat und geringen Maskenverzügen, mit dem die beim bisher eingesetzten Verfahren der galvanischen Herstellung von Absorberstrukturen auftretenden Schwierigkeiten mit der Homogenität und der Haftung der Absorberstrukturen überwunden werden können.

Dieses Ziel wurde durch die Entwicklung eines subtraktiven Strukturierungsverfahrens erreicht. Darunter versteht man das Herausarbeiten der Strukturen aus einer vorher ganzflächig aufgetragenen Schicht. Der Prozeßablauf, mit dem die oben angesprochenen Probleme überwunden wurden, ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

Auf einer mit einer Trennschicht aus Kohlenstoff versehenen Siliziumscheibe (Wafer) wird eine 2-3 μm dicke Titanschicht abgeschieden, die später als Trägerfolie dient. Darauf wird eine ca. 2,5 μm dicke Absorberschicht und eine dünne Maskierungsschicht aufgesputtert, ohne daß die Probe aus dem Vakuum der Sputteranlage entfernt werden muß. Die primäre Strukturierung erfolgt durch eine dünne hochauflösende Resistschicht, die im Anschluß an die Sputterprozesse aufgebracht und strukturiert wird.

Die Strukturübertragung von der Resistschicht in die Maskierungsschicht erfolgt durch einen Trockenätzprozeß, die anschließende Strukturierung der Absorberschicht durch reaktives Ionenätzen mit der strukturierten Maskierungsschicht als Abdeckung. Da die Titanschicht, die Absorberschicht und die Maskierungsschicht nacheinander hergestellt werden können, ohne daß die Substrate die Sputteranlage verlassen müssen, ist eine geringe Defektdichte erreichbar. Die Beschichtung durch Magnetronspütern führt zu einer haftfesten Verbindung von Absorbern und Titanträgerfolie und zu einer guten Gleichmäßigkeit der Schichtdicken.

Für die Herstellung von Röntgenmasken mit möglichst kleinen Verzügen sind Absorberschichten mit geringen inneren Spannungen Voraussetzung. Für die Erzeugung spannungsarmer homogener Absorberschichten waren umfangreiche Entwicklungsarbeiten erforderlich.

Für die Strukturierung der Absorberschicht wurden verschiedene Prozeßgase erprobt und ein Verfahren entwickelt, mit dem sich Absorber mit den benötigten steilen Wänden herstellen lassen.

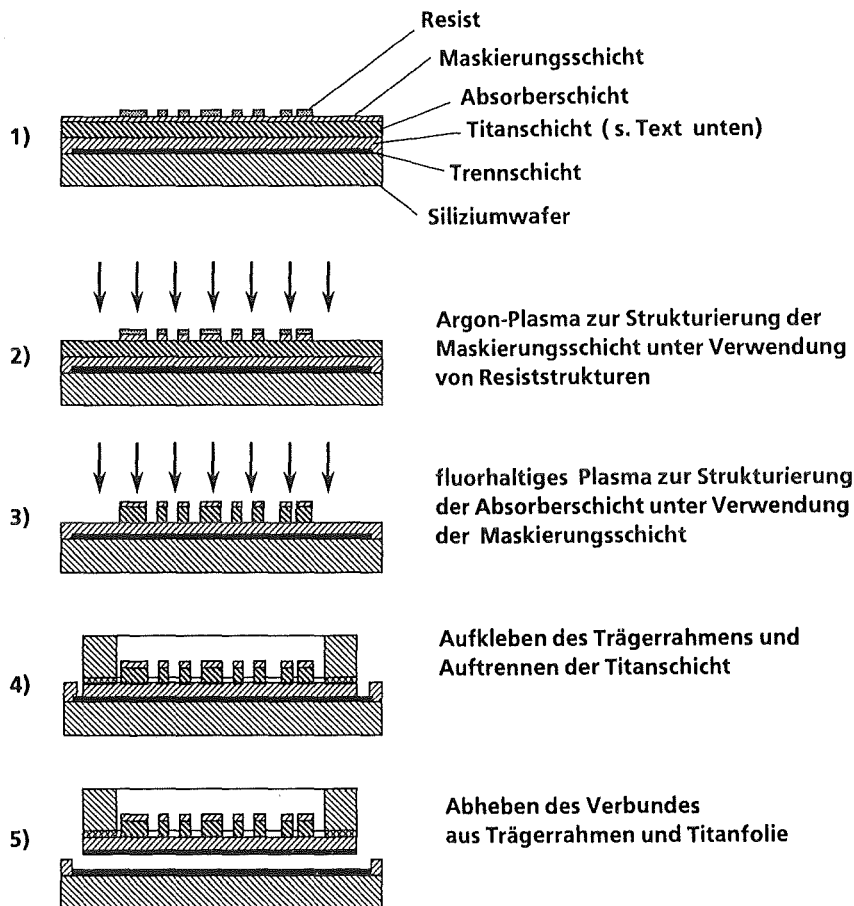


Abb. 1.2: Subtraktiver Prozeß zur Herstellung von Röntgenmasken:

- 1) Auf einer Siliziumscheibe (Wafer) werden eine Trennschicht, eine ca. 3 μm dünne Titanschicht, eine Schicht aus dem Absorbermaterial, eine Maskierungsschicht und eine Resist-schicht aufgebracht. Die Resist-schicht wird fotolithografisch strukturiert.
- 2) Mit einem Argonplasma wird die Struktur des Resists in die Maskierungsschicht übertragen.
- 3) Durch reaktives Ionenätzen mit einem fluorhaltigen Plasma wird das Absorbermaterial entsprechend der lateralen Form der Maskierungsschicht abgetragen.
- 4) Um die Absorberstrukturen herum wird ein Rahmen auf die Titanschicht aufgeklebt und die Titanschicht um den Rahmen herum entfernt.
- 5) Rahmen und Titanfolie mit den Absorberstrukturen werden mechanisch vom Wafer getrennt.

Die Eigenschaften der Röntgenmasken wurden eingehend untersucht. Es wurde festgestellt, daß die inneren Spannungen, die Dichte und die Verzüge den Anforderungen für Röntgenzwischenmasken für das LIGA-Verfahren sehr gut gerecht werden. Die Erprobung der subtraktiv strukturierten Absorberschichten wurde durch Umkopieren der Strukturen in mehr als 30 μm dicke Resist-schichten zur Herstellung von Arbeitsmasken für die Röntgentiefenlithographie demonstriert.

2 Grundlagen

2.1 Anforderungen an LIGA-Röntgenmasken

Abbildung 2.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau zur Strukturierung eines Resists durch Röntgentiefenlithographie. Die Synchrotronstrahlung tritt zunächst durch einen Vorabsorber, mit dem das Spektrum der Röntgenstrahlung für den Bestrahlungsvorgang angepaßt wird (siehe unten). Die Synchrotronstrahlung tritt dann durch eine Röntgenmaske hindurch, die aus einer dünnen Folie besteht, auf der Absorberstrukturen angebracht sind. Auf der Probe wird ein röntgenempfindlicher Resist im nicht abgeschatteten Bereich bestrahlt. Der Schattenwurf der Absorberstrukturen auf der Maske definiert dabei die bestrahlten bzw. unbestrahlten Resistbereiche. Durch Auflösen der bestrahlten Resistbereiche in einem Entwickler entstehen dann Resiststrukturen auf der Probe.

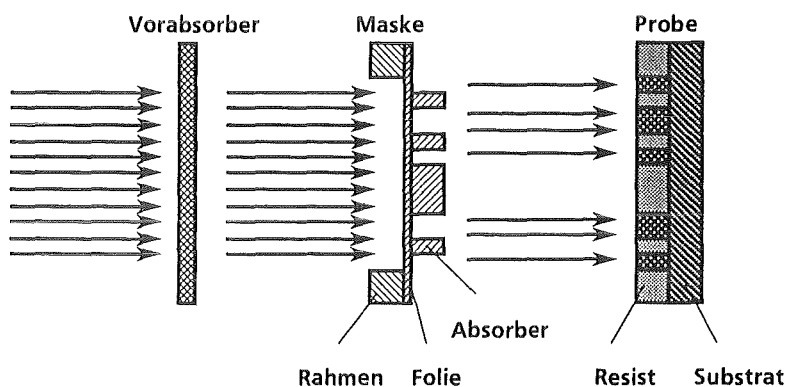


Abb. 2.1: Prinzipieller Aufbau zur Strukturierung dicker Resistschichten durch Röntgentiefenlithographie

Grundvoraussetzung für die Erzeugung hoher Resiststrukturen mit scharfen Strukturkanten und senkrechten Seitenwänden ist ein ausgeprägter Unterschied an abgelagerter Bestrahlungsdosis zwischen den bestrahlten und den unbestrahlten Resistbereichen. Bei der Bestrahlung dicker Resistschichten nimmt die absorbierte Dosis von der Resistoberfläche aus betrachtet mit zunehmender Resisttiefe stark ab. In der Abbildung 2.2 ist zur Illustration dieses Zusammenhangs dargestellt, wieviel Energie der Röntgenstrahlung in einem Probekörper aus PMMA absorbiert würde, wenn er sich an der angegebenen Position im Strahlengang befinden würde.

Damit die Resiststrukturen bis auf den Boden durchentwickelt werden können, muß dort eine gewisse Grenzdosis abgelagert werden. Gleichzeitig darf an der Oberfläche eine bestimmte Dosis (Oberflächendosis) nicht überschritten werden, da es sonst zum Aufschäumen des Resists kommt und Vernetzungsreaktionen auftreten können.

Für die Dosisablagerung in der Tiefe des Resists ist der kurzwellige Anteil des Synchrotronspektrums entscheidend. Der langwellige Anteil der Synchrotronstrahlung wird fast vollständig an der Oberfläche des Resists absorbiert. Da eine bestimmte Oberflächendosis nicht überschritten werden darf, wird ein Großteil der langwelligen Strahlung mit geeigneten Vorabsorbern herausgefiltert. Bei der Berechnung der optimalen Dicke der Vorabsorber wird der Einfluß der Maskenträgerfolie auf das Bestrahlungsspektrum mit berücksichtigt [Mai89].

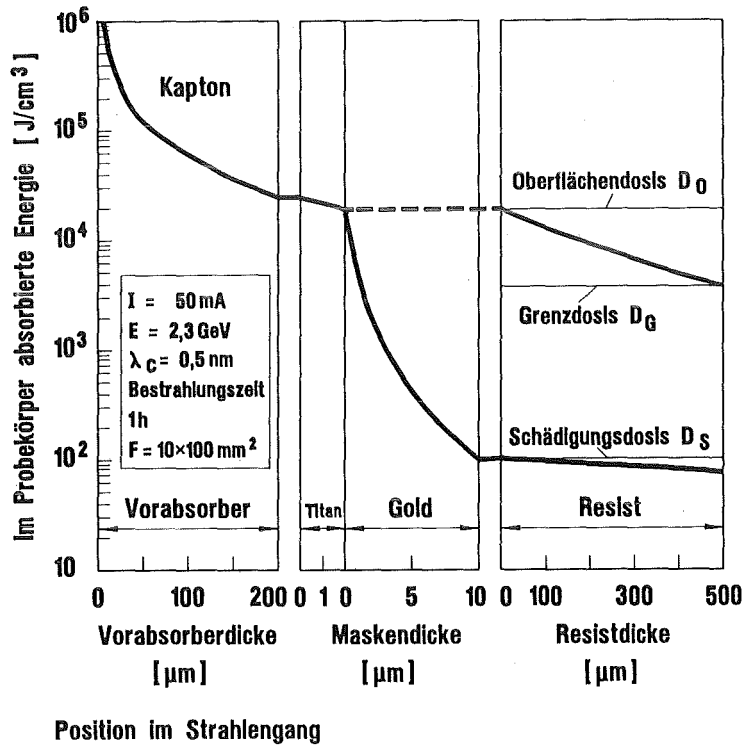


Abb. 2.2: Verlauf der in einem gedachten Probekörper aus PMMA von 1 µm Dicke absorbierten Röntgenenergie in Abhängigkeit von der Position des Probekörpers im Strahlengang [Scho90]

Um einen Entwicklerangriff an den Resistbereichen, die durch Absorberstrukturen abgeschattet werden, zu vermeiden, darf die sogenannte Schädigungsdosis D_S des Resists nicht überschritten werden. Deshalb müssen die Absorber eine gewisse Mindesthöhe aufweisen. Je dicker der zu bestrahlende Resist ist, desto mehr muß das Spektrum der Synchrotronstrahlung durch den Vorabsorber zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben werden, damit am Boden des Resists genug und an der Oberfläche nicht zu viel Dosis abgelagert wird (siehe Abb. 2.2). In Folge dessen werden für einen dickeren Resist auch höhere Absorber auf der Maske benötigt. Daher benötigen Masken, die für das LIGA-Verfahren eingesetzt werden sollen, besonders hohe Absorberstrukturen aus einem gut absorbierenden Material. Die Trägermembran sollte aus einem für Röntgenstrahlung möglichst transparenten Material bestehen, also einer dünnen Folie mit geringer Dichte und geringer Ordnungszahl.

Für PMMA-Resistsysteme, die derzeit eingesetzt werden, ist im bestrahlten Bereich die Ablagerung einer Grenzdosis D_G von 4 kJ/cm^3 in der Tiefe des Resists erforderlich, gleichzeitig dürfen in der Oberfläche des Resists 20 kJ/cm^3 nicht überschritten werden. Daneben darf in der Oberfläche des Resists, in den von den Absorberstrukturen abgeschatteten Bereichen, eine Dosis von 100 J/cm^3 (Schädigungsdosis D_S) nicht überschritten werden. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die auf die Probe einzustrahlende Energie (Bestrahlungsaufwand) und die notwendige Absorberhöhe in Abhängigkeit von dem zur Bestrahlung verwendeten Spektrum. Daraus errechnet sich zum Beispiel für die Strukturierung einer $500 \text{ }\mu\text{m}$ dicken PMMA-Resistschicht bei einem Spektrum, dessen charakteristische Wellenlänge¹ $0,499 \text{ nm}$ beträgt (ELSA, bei $2,3 \text{ GeV}$) und bei Verwendung einer $2 \text{ }\mu\text{m}$ dicken Titanträgerfolie eine notwendige Golddicke für das Absorbermaterial von ca. $9 \text{ }\mu\text{m}$.

Masken mit diesem Aufbau werden als Arbeitsmasken bezeichnet und durch Umkopieren mit Hilfe der Röntgenlithographie unter Verwendung von Zwischenmasken hergestellt.

2.2 Stand der Technik zur Herstellung von Röntgenzwischenmasken

2.2.1 Aufbau der Röntgenmasken

Wie schon aus der Abbildung 2.1 ersichtlich ist, bestehen Röntgenmasken für das LIGA-Verfahren aus den Komponenten Absorber, Trägerfolie und Rahmen. In Abbildung 2.3 ist die Geometrie der derzeit eingesetzten Röntgenmasken in der Aufsicht dargestellt.

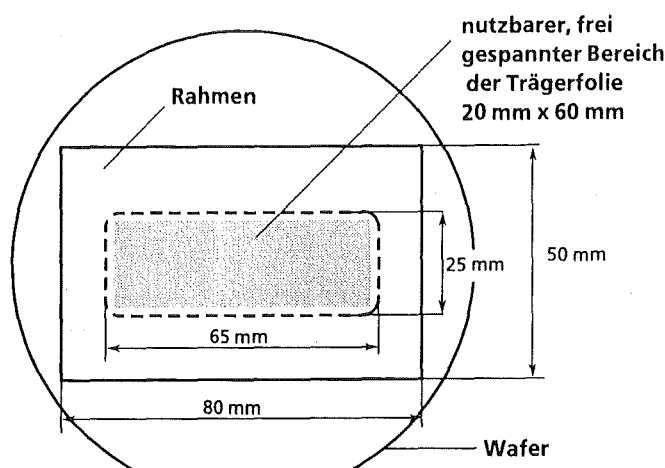


Abb. 2.3: Geometrie der derzeit eingesetzten Röntgenmasken im Vergleich zu einem 100 mm Wafer. Der nutzbare Fensterbereich beträgt $20 \times 60 \text{ mm}$, die Außenmaße des Trägerrahmens $50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$.

¹: Die charakteristische Wellenlänge λ_c ist so definiert, daß die integral abgestrahlte Leistung oberhalb und unterhalb λ_c gleich groß ist.

2.2.2 Herstellung der Trägerfolie

Als Maskenträgerfolien wurden im IMT Metallfolien aus Titan entwickelt. Zur Herstellung der Trägerfolie wird Titan durch einen PVD-Prozeß als dünne Schicht auf ein geeignetes Substrat aufgebracht und dann auf den Trägerrahmen der Röntgenmaske übertragen ([Scho90b] siehe Abb. 2.4).

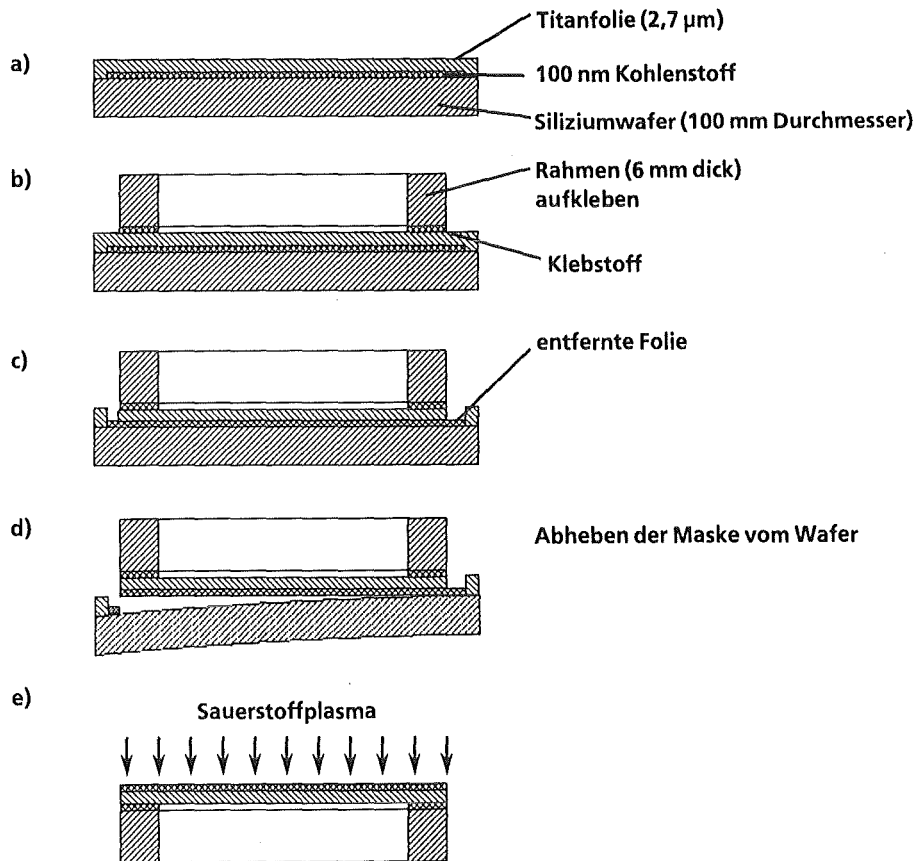


Abb. 2.4: Verfahrensschritte zur Herstellung einer freitragenden Trägerfolie mittels Übertragungstechnik.
a) Beschichtung eines Wafers mit einer Trennschicht aus Kohlenstoff und der Titanfolie.
b) Aufkleben eines Rahmens auf die Titanfolie.
c) Entfernen der Folie um den Rahmen herum.
d) Abheben von Folie und Rahmen vom Wafer
e) Entfernen des Kohlenstoffs mit einem Sauerstoffplasma.

Zunächst wird als Trennschicht auf eine Siliziumscheibe (Wafer) eine locker haftende, (ca. 100 nm) dünne Kohlenstoffschicht aufgebracht. Ein ca. 3 mm breiter Randbereich bleibt dabei unbeschichtet. Auf diese wird eine ca. 2,7 µm dünne Titanfolie aufgebracht (vgl. Abb. 2.4a). Mit einem Temperschritt wird in der Titanfolie eine innere Zugspannung von ca. 200 N/mm² eingestellt. Wafer mit diesem Schichtaufbau werden im folgenden als Abhebewafer (AHW) bezeichnet. Auf die Titanfolie wird ein 6 mm dicker Rahmen aufgeklebt (Abb. 2.4c). Der Verbund von Folie und Rahmen wird von dem Wafer abgelöst (Abb. 2.4d) und die auf der Trägerfolie zurückbleibende Kohlenstoffschicht in einem Sauerstoffplasma entfernt (Abb. 2.4e).

2.2.3 Absorberstrukturierung durch additiven Prozeß

Die Strukturierung der Absorberschichten erfolgt bisher durch galvanischen Aufbau. Dazu wird zuerst eine Resistschicht strukturiert, die etwas höher ist als die notwendige Galvanikdicke. Danach wird in die Zwischenräume die Absorberstruktur als Komplementärstruktur galvanisch abgeschieden (additiver Prozeß).

Für die verschiedenen Anforderungen, die von den LIGA-Mikrostrukturen an die Masken gestellt werden, wurden verschiedene Herstellungsverfahren entwickelt. Je nach den benötigten kritischen Dimensionen können die Resiststrukturen für die additive Absorberfertigung durch optische Kontaktkopie mit einer Chrom-Glas-Maske, durch Direktschreiben mit einem Elektronenstrahlschreiber [Hei92] oder durch reaktives Ionenätzen mit einem Sauerstoffplasma [Kad87] hergestellt werden.

Eine maßgenaue Übertragung der auf der Zwischenmaske vorhandenen Absorberstrukturen auf die Arbeitsmaske erfordert ein möglichst senkrechtes Profil der Absorberstrukturen auf der Zwischenmaske.

2.2.4 Grenzen additiver Absorberstrukturierung

Bei der Absorberherstellung durch galvanische Abscheidung von Gold in Polymerstrukturen (additiver Absorberaufbau) sind Defekte aufgrund von verschiedenen Ursachen möglich (siehe Abbildung 2.5). Wenn sich z.B. ein Partikel aus dem Luftstaub zwischen den Resiststrukturen absetzt, kann der Absorberaufbau nur unvollständig stattfinden. Resistreste, die beim Entwicklungsvorgang womöglich nicht vollständig aufgelöst werden, oder ungleichmäßige Leitfähigkeit der Galvanikstartschicht, können zu einem ungleichmäßigen Start der Galvanik und unterschiedlich hohen Absorberstrukturen auf der Maske führen. Ungleichmäßig dicke Absorberstrukturen sind auch durch inhomogene Feldverteilungen im Elektrolyten denkbar, die sowohl durch die Geometrie des Substrates, der Anordnung der Mikrostrukturen, als auch durch die für den Galvanikprozeß notwendigen Anlagen und Verschaltungen hervorgerufen werden [Mah88,Har88]. Durch ungleichmäßig verlaufende Abscheidung können ebenfalls Dickenvariationen bei der Absorberherstellung auftreten, so daß lokal die notwendige Golddicke nicht erreicht wird. Es kann auch vorkommen, daß der Elektrolyt in Bereiche unterhalb der Resiststruktur eindringt, so daß die galvanisierten Absorberstrukturen einen Saum am Fuß aufweisen. Dieser Effekt wird als Unterplattierung bezeichnet [Mah88].

Die hier beschriebenen Defektursachen können im Prinzip auch bei der galvanischen Metallabscheidung für die Herstellung von Mikrostrukturen auftreten. Sie stören aber nicht so sehr wie bei der Herstellung von Absorbern für Röntgenmasken, da die Form der Absorberstrukturen im Schattenwurf auf alle mit einer Maske herge-

stellten Proben übertragen wird. Eine Weiterentwicklung oder die Suche nach Alternativen für den Galvanikprozeß ist deshalb sinnvoll, obwohl er sich bei der Fertigung von Mikrostrukturen gut bewährt hat.

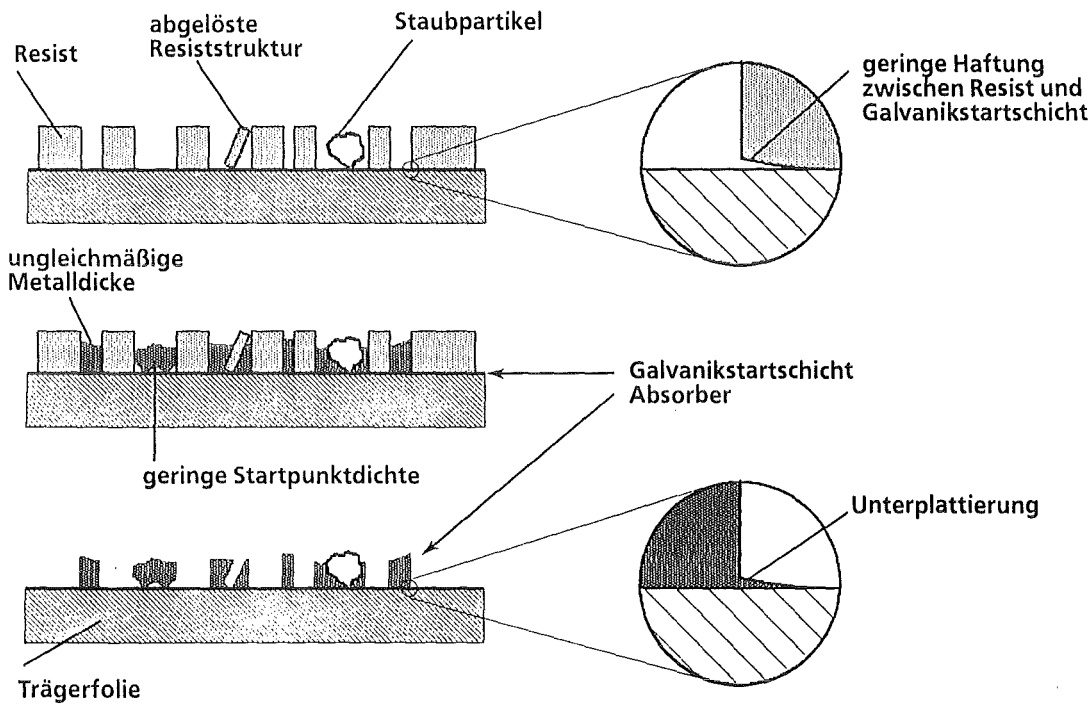


Abb. 2.5 Mögliche Probleme beim additiven Absorberaufbau

Die erreichbare Strukturtreue ist daher bei der Fertigung der Masken von größter Wichtigkeit, besonders bei der Fertigung von Zwischenmasken, da sie bei der vergleichsweise geringen Galvanikhöhe von ca. 2 μm einen größeren Einfluß auf die Funktion des Absorbers haben als z. B. bei der Arbeitsmaske. Deshalb wurde für die Herstellung von Zwischenmasken ein alternatives Verfahren zur Absorberstrukturierung untersucht.

2.3 Subtraktiver Prozeß

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die subtraktive Strukturierung der Absorberschicht von Zwischenmasken für das LIGA-Verfahren erprobt. Mit der Bezeichnung "subtraktiver Prozeß" ist das Herausarbeiten der Absorberstrukturen aus einer homogenen Schicht gemeint. Die Schicht kann dabei durch Magnetronspütern mit homogener Dicke und guter Haftung auf dem Substrat hergestellt und durch reaktives Ionenätzen mit einem Plasma strukturiert werden (Abb. 2.6).

Als inhärente Vorteile der subtraktiven Absorberstrukturierung ergeben sich ein homogener Röntgenkontrast über die gesamte Maske unabhängig von den Struktur-

breiten und eine gute Haftung der Absorberstrukturen auf der Trägerfolie. Ein weiterer Vorteil ist eine geringere Defektdichte, da das Absorbermaterial unmittelbar nach der Herstellung der Maskenträgerfolie aufgebracht werden kann, ohne daß die Probe das Vakuum verlassen muß. Deshalb können keine Staubpartikel aus der Luft in die Absorberschicht eingebaut werden.

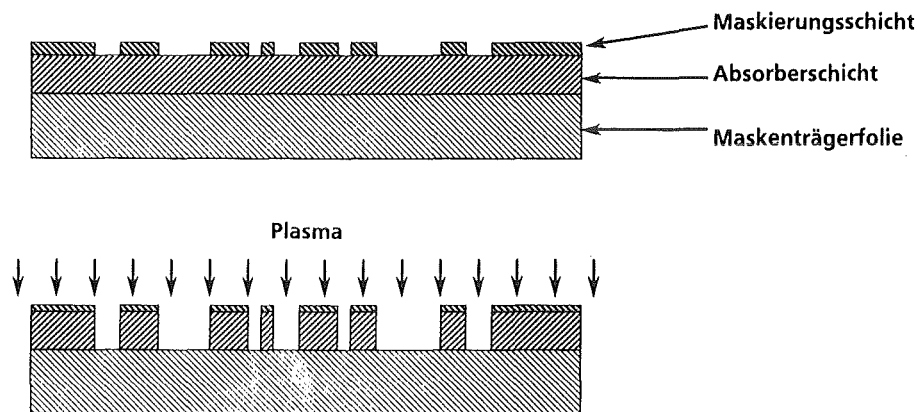


Abb. 2.6 Prinzip der Absorberherstellung durch subtraktive Strukturierung
a) Aufbau der Absorberschicht durch Magnetronspütern
b) Strukturierung der Absorberschicht durch reaktives Ionenätzen

2.3.1 Auswahl des Absorbermaterials für den subtraktiven Prozeß

Auswahlkriterien für ein Absorbermaterial sind eine möglichst hohe Röntgenabsorption, Ungiftigkeit, Verfügbarkeit und reaktive Ätzbarkeit mit fluorhaltigen Gasen, die in der vorhandenen Anlage des IMT eingesetzt werden können, sowie die Prozeßkompatibilität mit den bisher eingesetzten Standardprozessen zur Herstellung von Justierfenstern [Scho91]. Wichtig für eine gute Röntgenabsorption eines Materials ist eine hohe Dichte und eine hohe Ordnungszahl. In Tabelle 2.1 sind die Eigenschaften aller Materialien aufgeführt, die aufgrund der hohen Ordnungszahl in Frage kommen. Zum Vergleich sind die Daten der Titanträgerfolie dargestellt.

Aufgrund der geringen Dichte (im Vergleich der in Tabelle 2.1 aufgeführten Materialien) sind die Materialien Hafnium, Blei, Wismut und Thallium wenig geeignet. Ein weiteres Argument gegen den Einsatz eines Materials ist seine Giftigkeit. Daher erscheinen sowohl Thallium (giftig) als auch Uran (giftig, giftige Oxide) ungeeignet. Die Verwendung von chlorhaltigen Gasen führt zu Korrosion an der vorhandenen Ionenätzanlage. Damit scheidet die reaktive Strukturierung von Gold aus, da im Gegensatz zu Chlor (AuCl_2) für Fluor keine gasförmigen Goldverbindungen bekannt sind. Da für die Elemente der Platingruppe Unsicherheit über das Entstehen gas-

förmiger Reaktionsprodukte beim Beschuß mit fluorhaltigen Molekülonen besteht, müßten für die Entwicklung eines reaktiven Ionenätz-Prozesses (RIE-Prozeß) an diesen Materialien erst noch Grundlagenuntersuchungen durchgeführt werden, die den Rahmen der vorliegenden Arbeit gesprengt hätten. Außerdem sind die Materialien aus der Platingruppe sehr teuer. Als mögliche Materialien für die Herstellung von Absorberstrukturen bleiben damit noch Wolfram und Tantal übrig.

Ordnungszahl	Symbol	Element	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [N/mm ²]	Querkontraktionszahl	α_{th} [10 ⁻⁶ /K]
22	Ti	Titan	4,5	105000	0,361	8,35
72	Hf	Hafnium	13,29	141000	0,26	6,0
73	Ta	Tantal	16,6	185000	0,342	6,5
74	W	Wolfram	19,32	408000	0,28	4,5
75	Re	Rhenium	21,0	466000	0,26	6,6
76	Os	Osmium	22,48	559000	0,25	4,57
77	Ir	Iridium	22,42	528000	0,26	6,8
78	Pt	Platin	21,45	170000	0,39	9,0
79	Au	Gold	19,3	77900	0,42	14,1
80	Hg	Quecksilber	13,55			
81	Tl	Thallium	11,85	79000	0,45	30,0
82	Pb	Blei	11,34	16000	0,44	29,1
83	Bi	Wismut	9,85	34000	0,33	13,4
92	U	Uran	18,95	175000	0,365	13,4

Tabelle 2.1: Daten der möglichen Materialien für den Einsatz als Absorbermaterial. Zusätzlich dargestellt sind Werte für den E-Modul, die Querkontraktionszahl und den thermischen Ausdehnungskoeffizient, die den Verzug beeinflussen. Zum Vergleich sind die Daten der Titanträgerfolie dargestellt.

Ein Vorteil von Wolfram ist der höhere Absorptionskoeffizient gegenüber Tantal in dem zur Bestrahlung relevanten Wellenlängenbereich. Bei der Verwendung von Wolfram ist also eine geringere Schichtdicke zu strukturieren. Abbildung 2.7 zeigt den linearen Absorptionskoeffizient für die Materialien Wolfram, Tantal und Gold aufgetragen über der Wellenlänge sowie die charakteristischen Wellenlängen (λ_c) bei unterschiedlichen Energien des Speicherringes.

Bei der Herstellung von Arbeitsmasken durch Röntgenlithographie mit Zwischenmasken, müssen nur ca. 20µm dicke PMMA-Schichten strukturiert werden. Deshalb wird in diesem Fall die Bestrahlung bei der für diese Resistdicke optimalen Energie von 1,9 GeV ($\lambda_c = 0,89$ nm) durchgeführt. Für dieses Röntgenspektrum ist die Absorption von Wolfram größer als die von Gold. Daher brauchen beim subtraktiven Verfahren nur 2 µm hohe Wolframabsorber strukturiert zu werden, während es beim

additiven Verfahren notwendig ist, erst eine ca. 3,5 μm hohe Resistschicht zu strukturieren und diese dann 2,5 μm hoch mit Gold aufzugalvanisieren.

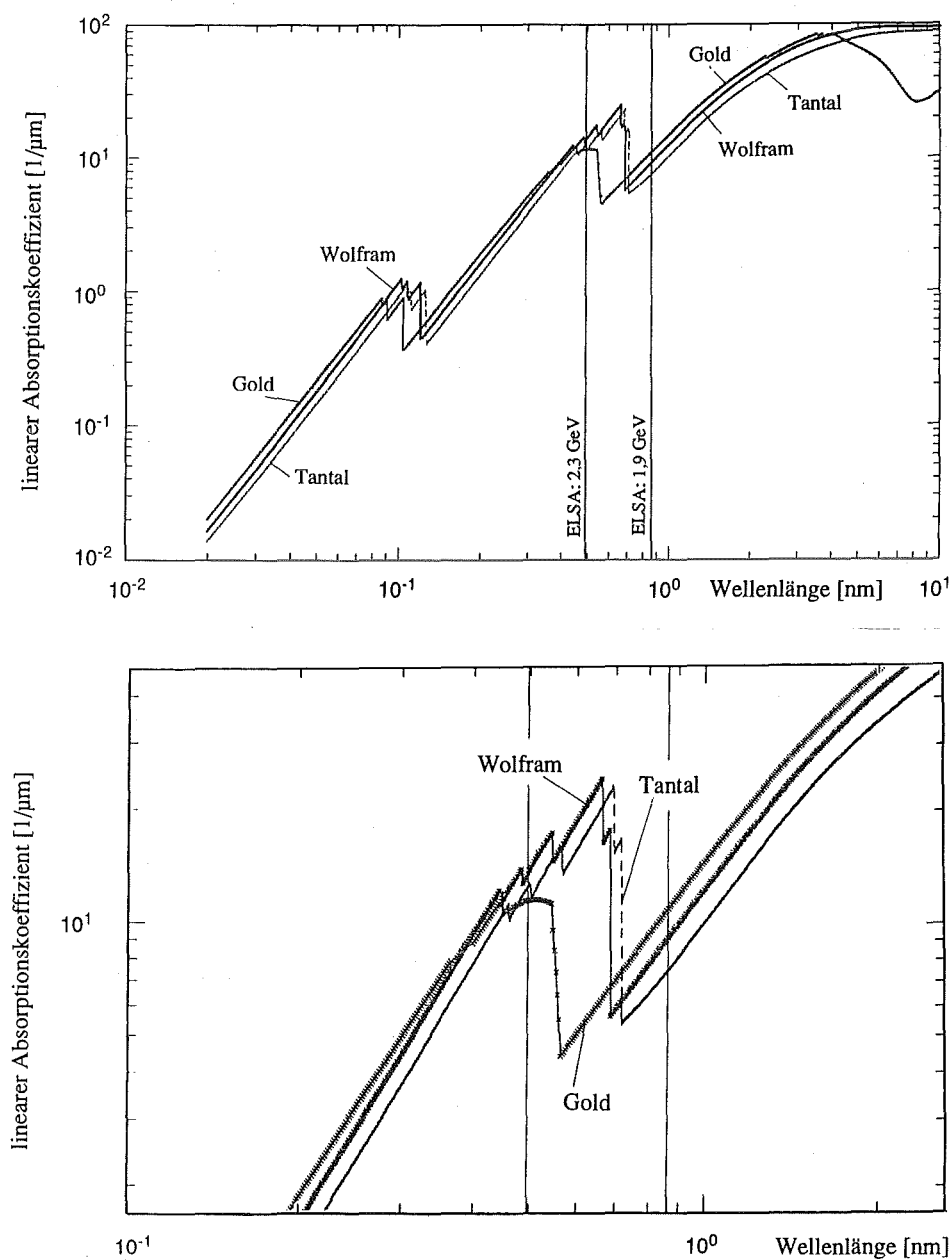


Abb. 2.7: Vergleich der Absorptionskoeffizienten von Wolfram, Tantal und Gold (oben) sowie vergrößerte Darstellung im Bereich der verwendeten charakteristischen Wellenlängen

Durch eine weitere Senkung der Energie (1,7 GeV, $\lambda_C = 1,19$ nm) ist eine Verringerung der notwendigen Absorberdicke möglich (ca. 1,5 μm). Dies würde aber einen fast vierfach höheren Bestrahlungsaufwand bedeuten, da die Senkung der Energie die charakteristische Wellenlänge erhöht, so daß eine längere Bestrahlungszeit benötigt wird, um die notwendige Dosis in der Tiefe des Resists zu erreichen.

Bei dem derzeit eingesetzten Verfahren zur Herstellung von Justierfenstern in Röntgenmasken wird ein Teil der Maskenträgerfolie aus Titan mit Flußsäure selektiv gegen die Goldabsorber aufgelöst [Scho91]. Wenn dieses Herstellungsverfahren unverändert beibehalten werden soll, darf das neue Absorbermaterial genauso wie Gold nicht von Flußsäure angegriffen werden. Da Wolfram in Flußsäure beständig ist, Tantal aber nicht, und aufgrund der höheren Absorptionswerte wurde Wolfram als Absorbermaterial ausgewählt.

2.3.2 Auswahl der Maskierungsschicht

Da bei der Maskenherstellung zur primären Mustererzeugung auf jeden Fall ein Resist strukturiert werden muß, liegt der Gedanke nahe, für die Absorberstrukturierung beim subtraktiven Verfahren einen ausreichend dicken Resist direkt als Maskierungsschicht zu benutzen, jedoch wiesen alle untersuchten Resists im fluorhaltigen Plasma (CF_4) 3-5 fach höhere Abtragsraten als die zu strukturierende Wolframschicht auf (siehe Abb. 2.8a). Deshalb wären Resistdicken im Bereich von 6 bis 10 μm erforderlich. Weder durch Fotolithographie noch mit Elektronenstrahlolithographie können in so dicken Resistschichten Strukturen mit kritischen Dimensionen von weniger als einem Mikrometer erzeugt werden. Als Maskierungsschicht kommen für einen solchen Prozeß daher nur metallische Materialien in Frage. Für den Einsatz in fluorhaltigen Plasmen erwiesen sich wegen der geringen Abtragsrate besonders aufgesputterte Schichten aus Aluminium, Chrom, Kupfer und Nickel als geeignet.

Für die subtraktive Strukturierung ist das Verhältnis der Abtragsraten (Selektivität) der Absorberschicht zur Maskierungsschicht von entscheidender Bedeutung. Bei der Verwendung von CF_4 als Ätzgas wurden je nach Ätzbedingungen für Kupfer Selektivitäten von knapp 5:1 bis 8:1 und für Nickel 6:1 bis 7:1 ermittelt. Die senkrechte Strukturierung einer 2.5 μm dicken Wolframschicht konnte mittels CF_4 und einer Nickelmaskierungsschicht realisiert werden (siehe Kap 4.5). Die dafür notwendige minimale Nickelschichtdicke betrug 360 nm.

Bei der Verwendung von SF_6 als Ätzgas (siehe Kap 4.5) wurden mit Nickel als Maskierungsmaterial bei den zur senkrechten Strukturierung der Wolframschicht benötigten Ätzparametern sehr gute Selektivitäten erzielt (bis 20:1 bei $P_{\text{HF}} = 200 \text{ W}$). Als notwendige Nickelschichtdicke wurden bei der Strukturierung mit SF_6 150 nm ermittelt. Daher wurde Nickel als Maskierungsmaterial ausgewählt.

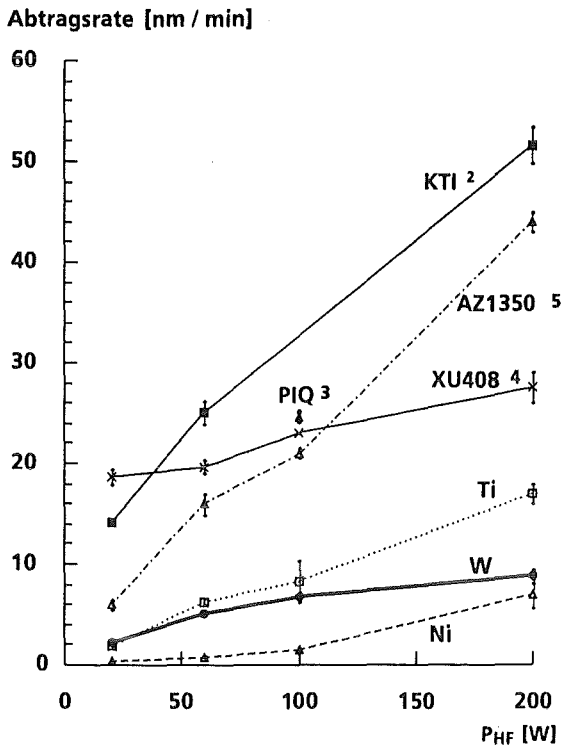


Abb. 2.8a: Abtragsraten organischer und metallischer Maskierungsmaterialien beim reaktiven Ionenätzen mit CF_4 als Ätzgas in Abhängigkeit von der ins Plasma eingespeisten Generatorleistung P_{HF} .

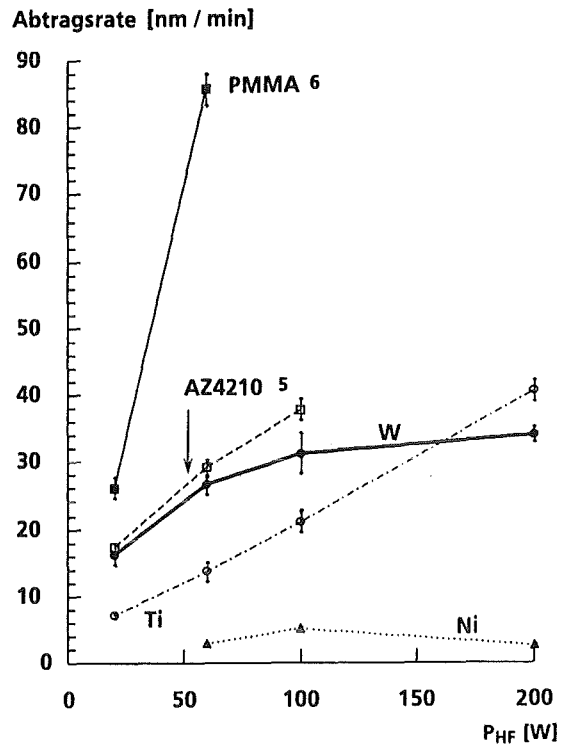


Abb. 2.8b: Abtragsraten organischer und metallischer Maskierungsmaterialien beim reaktiven Ionenätzen mit SF_6 als Ätzgas in Abhängigkeit von der ins Plasma eingespeisten Generatorleistung P_{HF} .

2.3.3 Strukturierung der Maskierungsschicht

Die Strukturierung der metallischen Maskierungsschicht kann durch den gerichteten Beschuß mit Ionen aus einem Argonplasma (Sputterätzen) erfolgen. Hierzu wird zwischen Probe und Argonplasma eine elektrische Spannungsdifferenz erzeugt, die die Ionen des Plasmas zur Probe hin beschleunigen. Die Ionen treffen großteils senkrecht auf die Probe auf und zerstäuben dabei das Material der Maskierungsschicht. Resiststrukturen auf der Maskierungsschicht sorgen für einen lokalen Materialabtrag. Beim Zerstäuben eines Materials mit einem gerichteten Teilchenstrom zeigt sich bis auf wenige Ausnahmen ein charakteristisches Verhalten der Abtragsrate in Abhängigkeit vom Einfallswinkel auf die Probe. Die größten Abtragsraten treten bei schrägem Einfall der Ionen auf [Som76, Mel76] (siehe Abb. 2.9a). Deshalb entsteht an einer Strukturkante, die einem Sputterätzprozeß ausgesetzt wird, zu-

²: KTI = Elektronenstrahlresist der Fa. KTI Chemicals
³: PIQ = Polyimid der Fa. Hitachi Chemicals
⁴: XU408 = Fotosensitives Polyimid der Fa. Ciba Geigy
⁵: AZ1350 und AZ4210 = Fotoresist der Fa. Hoechst
⁶: PMMA = Polymethylmethacrylat

nächst eine Fase, deren Winkel zur Substratnormalen dem Winkel des maximalen Abtrags entspricht.

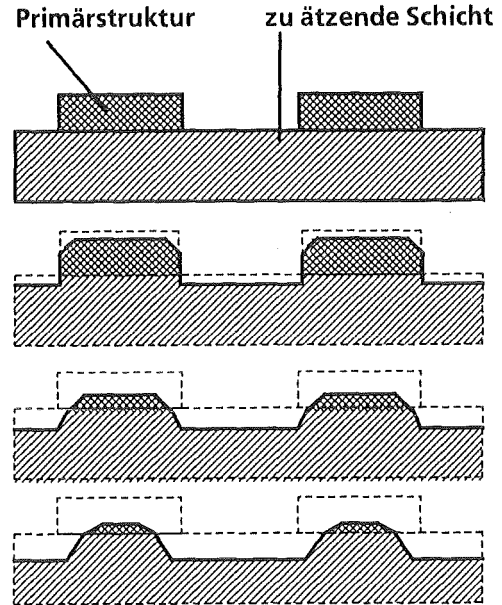
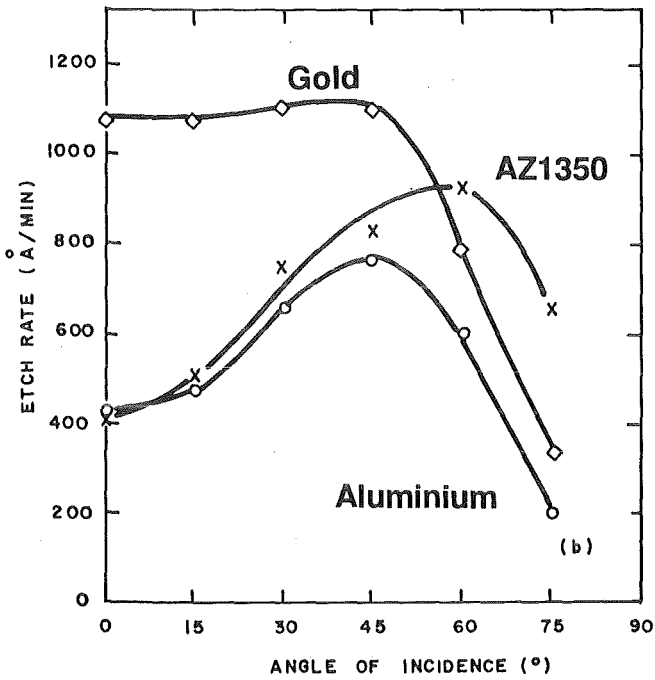


Abb. 2.9a: Abtragsrate verschiedener Materialien in Abhängigkeit des Einfallswinkels des Argonstrahls. (Quelle: [Mel76])

Abb. 2.9b Entstehung schräger Kanten beim Sputterätzen (Quelle: [Mel76]).

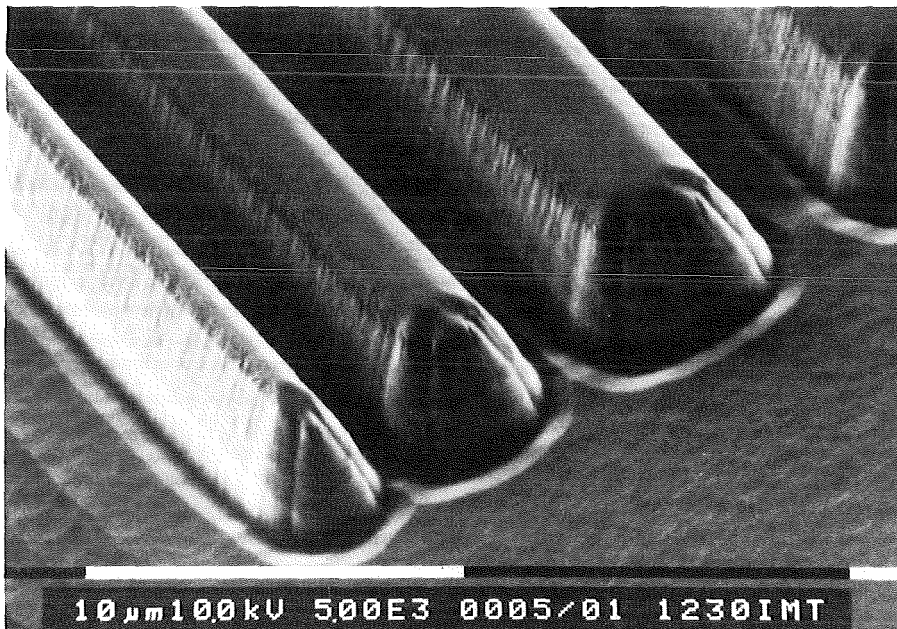


Abb. 2.9c: Dargestellt ist eine 1,5 µm dicke Nickelschicht, die durch Sputterätzen mittels Resistabdeckung strukturiert wurde.

Bei der Strukturierung der Maskierungsschicht durch Sputterätzen ergeben sich für die oben genannten Metalle auf Grund dieser Winkelabhängigkeit der Abtragsrate

schräge Kanten, verbunden mit einer lateralen Erosion der Maskierungsschicht (siehe Abb. 2.9b). Die zum Strukturrand abnehmende Dicke der Maskierungsschicht führt dann zu Abweichungen von der vorgesehenen Strukturform beim reaktiven Ionenätzen der Absorber. Typischerweise werden beim Sputterätzen für Nickel Winkel der Strukturwände zur Substratnormalen von etwa 70 Grad ermittelt (siehe Abb. 2.9c). Das Sputterätzen für eine genaue Übertragung einer Resiststruktur in eine Metallstruktur ist deshalb nur dann geeignet, wenn die Metallschicht relativ dünn ist.

2.3.4 Übersicht über die Maskenherstellung mit dem subtraktiven Verfahren

In Abbildung 2.10 ist die Maskenherstellung mit dem subtraktiven Strukturierungsprozeß dargestellt. Auf einem Siliziumwafer wird zuerst eine Kohlenstofftrennschicht aufgebracht (Abb. 2.10a). Auf diese wird eine ca. 2-3 µm dicke Titanschicht und die ca. 2-2,5 µm dicke Wolframschicht aufgesputtert. Darauf wird eine ca. 150 nm dünne Maskierungsschicht aus Nickel aufgebracht. Auf die Nickelschicht wird dann ein ca. 500 nm dünner Resist aufgeschleudert, der fotolithografisch strukturiert wird.

Durch Sputterätzen mit einem Argonplasma wird die Struktur des Resists in die Nickelschicht übertragen (Abb. 2.10b). Die strukturierte Nickelschicht dient dann als Maskierung beim reaktiven Ionenätzen der Absorberstrukturen aus Wolfram mit einem fluorhaltigen Plasma (Abb. 2.10c). Nach der Absorberstrukturierung wird ein Rahmen auf die Trägermembran aufgeklebt und der Verbund aus Rahmen und Trägerfolie, nach dem Auftrennen der Titanschicht im Außenbereich der Maske (Abb. 2.10d), vom Wafer abgehoben (Abb. 2.10e).

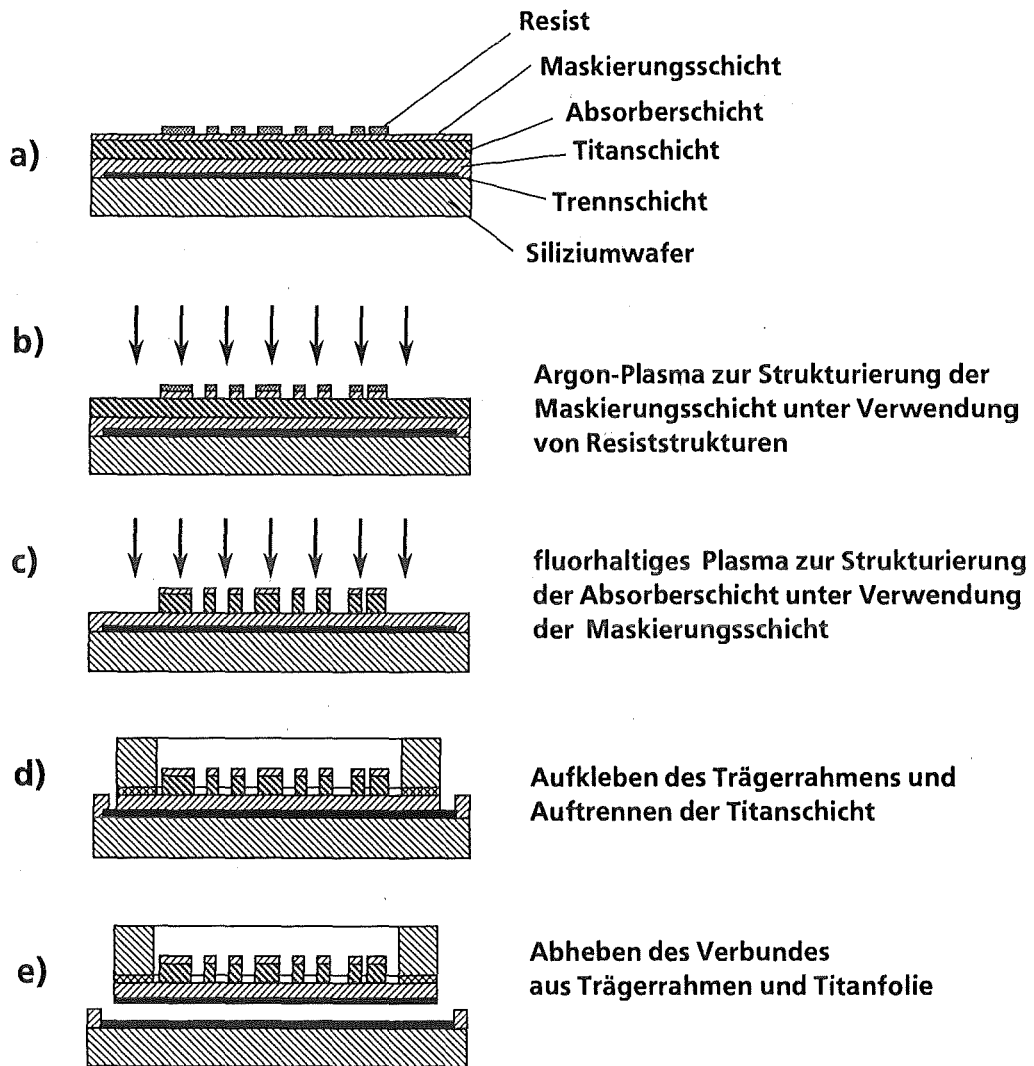


Abb. 2.10: Prozeß zur subtraktiven Strukturierung von Röntgenmasken

3 Versuchsdurchführung

3.1 Schichtaufbau

3.1.1 Beschreibung der Sputteranlage

Die Herstellung der für den subtraktiven Strukturierungsprozeß benötigten Schichten erfolgte in der in Abbildung 3.1 schematisch dargestellten Sputteranlage. Bei dieser Maschine handelt es sich um eine Planar-Magnetron-Anlage mit senkrecht angeordneten Kathoden (Z700 QP1, Leybold Heraeus). Die Kathoden sind elektrisch isoliert in die Rezipientenwand eingebaut und werden beim Beschichtungsvorgang wassergekühlt. Zum Beschichten kann eine Gleichstrom (DC-Sputtern) - oder Hochfrequenzentladung (HF-Sputtern) verwendet werden. Die Erzeugung einer Substratvorspannung (Bias) erfolgt beim DC-Sputtern durch gleichzeitiges Anlegen einer Hochfrequenzspannung oder einer durch ein externes Netzgerät erzeugten Gleichspannung an dem Substrathalter. Das in der Magnetron-Anlage verwendete Magnetfeld wird von Permanentmagneten erzeugt, die außerhalb des Rezipienten auf der Rückseite des Targets angebracht sind. Das Magnetfeld wurde durch die Veränderung des Abstandes der Magnete vom Target variiert. Die Einstellung des Druckes beim Beschichtungsvorgang ergibt sich durch den eingestellten Gasfluß, da die Saugleistung der Vakuumpumpe nicht über ein Drosselventil gesteuert wird. Für alle Beschichtungsprozesse wurde Argon verwendet, in dem die Konzentration anderer Gase unter 10^{-6} lag.

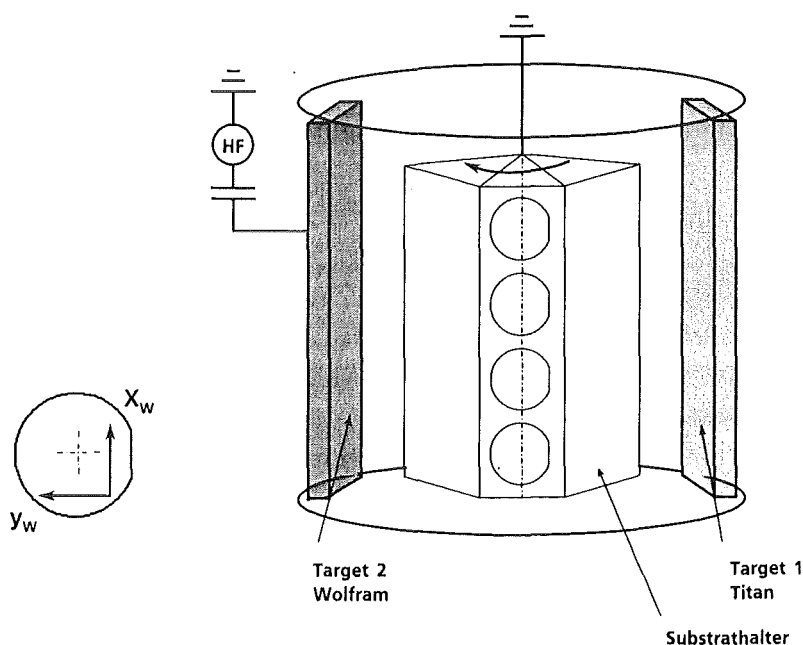


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der zum Schichtaufbau verwendeten Sputteranlage sowie die Einbau- lage der Wafer bei den Beschichtungsprozessen. Auf der linken Seite sind die Meßrichtungen zur Bestimmung der inneren Spannungen dargestellt.

Für das Aufbringen der Schichten beim Sputtervorgang wird zwischen drei verschiedenen Verfahren unterschieden. Bei der **statischen** Beschichtung werden die Wafer auf dem Substrathalter montiert, vor das Target gefahren und während des Beschichtungsvorgangs nicht bewegt. Beim **dynamischen** Sputtern rotiert der Substrathalter und die Beschichtung findet nur während des Vorbeifahrens am Target statt. Die Einbaulage der Wafer beim Beschichtungsvorgang und die Definition des im folgenden verwendeten Koordinatensystems kann aus der Abbildung 3.1 entnommen werden. Die mit Y_W gekennzeichnete Richtung verläuft senkrecht zum Waferflat, die mit X_W gekennzeichnete Richtung parallel zum Waferflat. Bei der dynamischen Beschichtung stimmt die Drehrichtung mit der Y_W -Richtung überein.

Bei der sogenannten **quasistatischen** Beschichtung steht der Wafer vor dem Target und rotiert beim Beschichtungsvorgang um seinen Mittelpunkt (siehe auch Kap. 4.1.4).

Konditionierung der Anlage und der Substrate

Die Hauptquelle von gasförmigen Verunreinigungen stellt das Restgas dar, das sich nach dem Abpumpvorgang noch in der Kammer befindet. Dabei handelt es sich hauptsächlich um H_2O [Wai78]. Weitere mögliche Gasquellen sind:

- Desorption von den Wänden der Anlage
- Desorption von der Targetoberfläche (adsorbiertes Gas vom Belüftungsvorgang beim Probenwechsel)
- Gas aus dem Target
- Rückströmung von Pumpenfluiden
- Lecks
- Verunreinigungen im Gas selbst.

Da auch Spurengase, die sich in der Anlage befinden, die Schichteigenschaften beeinflussen können, wurde vor dem Beschichtungsprozeß solange abgepumpt, bis ein Basisdruck von $< 5 \times 10^{-6}$ hPa erreicht wurde. Zur Unterstützung dieses Vorganges wurde die Sputteranlage mittels der eingebauten Strahlungsheizung ausgeheizt.

Zur Reinigung des Targets wurde dieses vor dem Beschichtungsvorgang "Eingesputtert", d.h. es wurde Targetmaterial auf eine Blende abgeschieden, die vor die eigentlich zu beschichtenden Substrate gefahren wurde. Durch das Einsputtern wird die Oxidhaut des Targets beseitigt und für ein thermisches Gleichgewicht des Targets während des eigentlichen Beschichtungsvorgangs gesorgt. Weiterhin verbessert sich durch die Absorption von Gasteilchen in der auf der Blende abgeschiedenen Schicht (Gettern) der Basisdruck vor der Beschichtung der Substrate. Das Einsputtern erfolgt mit steigender Leistung in mehreren Schritten (mind. 10 Minuten). Zur Reinigung der zu beschichtenden Substratoberflächen wurde vor dem eigent-

lichen Beschichtungsvorgang eine Hochfrequenzspannung an den Substrathalter angelegt, so daß die Oberflächen der Substrate durch die entstehende Glimmentladung zunächst angeätzt wurden.

3.1.2 Messung der inneren Spannungen

Eine Möglichkeit, die inneren Spannungen einer dünnen Schicht zu ermitteln, besteht darin, die Durchbiegung eines elastischen Substrates mit der bekannten Dicke d_s und bekanntem Elastizitäts-Modul E_s vor und nach dem Beschichtungsvorgang zu messen. Die innere Spannung S_x der aufgetragenen Schicht mit der Dicke d_f läßt sich aus dem Krümmungsradius R_x des durchgebogenen Verbundes berechnen. Nach [Fli89] gilt die folgende Formel:

$$(3.1) \quad S_x = \frac{1}{6R_x} \cdot \frac{E_s}{1-\nu} \cdot \frac{d_s^2}{d_f}$$

ν = Querkontraktionszahl des Substrates ($\nu_{(Si)}=0,222$) [Kin88]

E_s = Elastizitätsmodul des Substrates ($E_{(Si)}=160000 \text{ N/mm}^2$) [Kin88]

S_x = Spannung der aufgetragenen Schicht in X_W -Richtung (parallel zum Waferflat)

R_x = Krümmungsradius der Oberfläche in X_W -Richtung

Diese Formel kann verwendet werden, wenn die aufgetragene Schicht mit der Dicke d_f dünn ist gegenüber dem verwendeten Trägersubstrat, wenn die inneren Spannungen keine große laterale Richtungsabhängigkeit zeigen und die Dicke des Trägersubstrates klein ist im Vergleich zu seinem Durchmesser. In diesem Fall gehen nur der Elastizitätsmodul E_s und die Querkontraktionszahl ν des Trägersubstrates in die Berechnungen der inneren Spannungen der aufgetragenen Schicht ein. Es ist deshalb nicht notwendig für die Messung die Materialeigenschaften der aufgetragenen Schicht bereits zu kennen. Wird als Substrat ein Wafer verwendet, so kann die Waferkrümmung sehr einfach mit einem Tastschnittgerät ermittelt werden. Jeweils vor und nach der Beschichtung des Wafers wird dessen Oberflächenprofil entlang einer Linie gemessen, die über das Waferzentrum verläuft. Anisotropien in der Spannung der aufgetragenen dünnen Schicht können festgestellt werden, wenn das Oberflächenprofil des Wafers in verschiedenen Richtungen aufgenommen wird.

Die mit Gleichung (3.1) ermittelten Werte für die inneren Spannungen in der aufgetragenen Schicht sind dann korrekt, wenn die inneren Spannungen überall in der Schicht gleich groß sind. Dies ist bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Schichten nicht der Fall. Die festgestellten Spannungen sind lateral anisotrop (Kap. 4.1.2) und weisen einen großen Gradienten über die Schichtdicke auf (Kap. 4.1.2.2.1). Um aber die Spannungen der hergestellten Schichten auf einfache Weise miteinander vergleichen zu können, werden die mit Gleichung (3.1) berechneten

inneren Spannungen als Maß für die Größe der tatsächlichen Spannungen verwendet. In Kapitel 4.6 wird auf diesen Aspekt noch einmal näher eingegangen.

3.1.2.1 Durchführung der Messungen

Vor dem Beschichtungsvorgang wurde das Oberflächenprofil des Wafers anhand von sieben Wertepaaren (Höhenmessung als Funktion des Meßortes) dokumentiert. Je eine Messung erfolgt dabei senkrecht zum Waferflat (im folgenden mit Y_W -Richtung bezeichnet), die andere parallel zum Waferflat (X_W -Richtung, siehe auch Abbildung 3.1). Die Ausrichtung des Wafers auf dem Meßtisch erfolgte durch Einhalten eines gleichmäßigen Abstandes der Waferkanten zu dem kreisrunden drehbaren Oberteil des Meßtisches.

Nach der Beschichtung wurde dieser Vorgang wiederholt und die durch den Beschichtungsvorgang hervorgerufene Durchbiegung durch Differenzenbildung der sieben Wertepaare ermittelt. Da die Biegelinie des Verbundes aus Trägermaterial und aufgebrachtener Schicht einen parabolischen Verlauf zeigten, wurde an diese Wertepaare eine Parabel angepaßt (siehe auch Abbildung 3.2), indem durch lineare Regression diejenigen Koeffizienten a , b und c berechnet wurden, für die die Parabel den ermittelten Wertepaaren am nächsten kam:

$$(3.2) \quad y = ax^2 + bx + c$$

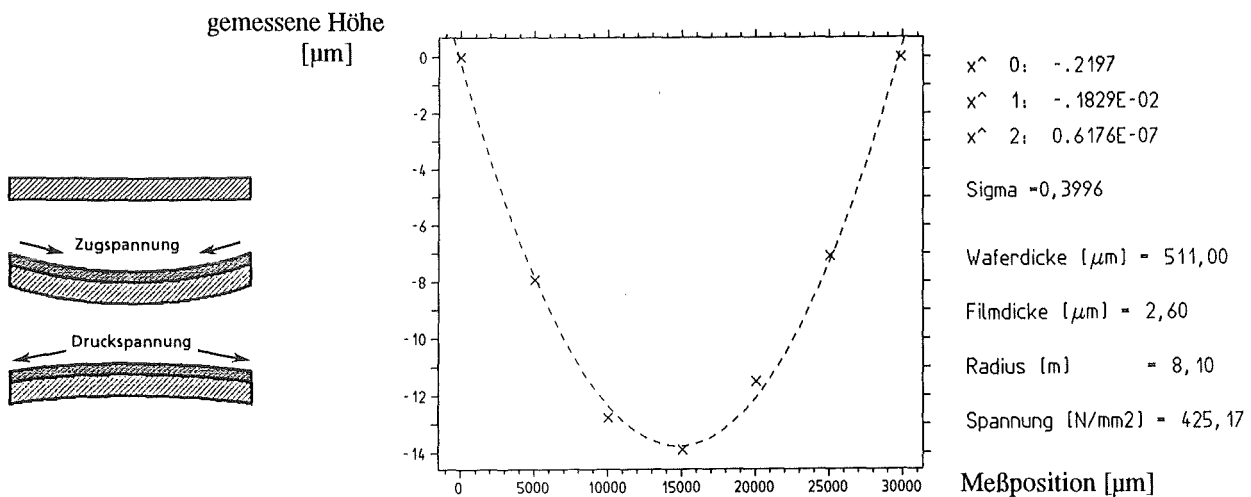


Abb. 3.2: Beispiel der durch die Beschichtung hervorgerufenen Waferdurchbiegung

Eigentlich wird laut Formel (3.1) eine kreisförmige Krümmung der Waferoberfläche erwartet. Da die Länge des gemessenen Profils aber klein ist im Vergleich zum ermittelten Krümmungsradius, stimmt die Kurve eines Kreises mit dem Radius $R=1/2a$ sehr gut mit dem Krümmungsradius der Parabel überein. Der für Formel (3.1) benötigte Krümmungsradius ergibt sich demnach aus dem Kehrwert der zweiten Ablei-

tung der Parabel (siehe [Bro91]), die durch lineare Regression aus den sieben Meßwerten berechnet wird .

$$(3.3) \quad R = \frac{1}{2a}$$

3.1.2.2 Meßbereich

Die Ermittlung der inneren Spannungen aus der Durchbiegung des Verbundes ist nach Formel (3.1) nur eine Funktion der elastischen Konstante des Trägermaterials, der Durchbiegung und der beteiligten Schichtdicken. Die maximale Scanlänge des verwendeten Tastschnittgerätes beträgt 30 mm, der Maximalhub der Meßnadel liegt bei 60 µm, der minimal auflösbare Meßhub liegt bei 50 nm. Bei der Verwendung von 625 µm dicken Wafern ergibt sich eine maximal meßbare Spannung von 2600 N/mm², die minimal noch auflösbaren Spannungsänderungen liegen bei 2,1 N/mm².

3.1.2.3 Reproduzierbarkeit der Messung

Da das verwendete Tastschnittgerät auf dem Meßtisch über keinen mechanischen Anschlag verfügt, der die wiederholte Messung von Wafern ohne Abweichungen erlaubt, wurde untersucht, wie groß die Fehler durch die nicht genau reproduzierbare Waferposition werden können.

Ermittelt wurde dieser Einfluß durch fünfmaliges Messen der beiden Richtungen bei mehreren Wafern, wobei für jede Messung die Wafer aus dem Gerät entnommen und neu ausgerichtet wurden. Die dabei festgestellten mittleren Abweichungen für die berechneten Spannungen liegen zwischen 1,3 und 3 %, die maximalen Abweichung liegen unter 5%.

3.1.2.4 Einfluß der Meßtemperatur

Der Verbund aus Siliziumwafer und aufgebrachtener Schicht verhält sich aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten wie ein Bimetall. Für die korrekte Ermittlung der inneren Spannung in der aufgetragenen Schicht ist daher die Einhaltung der gleichen Meßtemperatur vor und nach der Beschichtung notwendig. Da sich die Beschichtungsoptimierung auf Grund der geringen Verfügbarkeit der Sputteranlage über mehrere Monate erstreckten und daher trotz der vorhandenen Klimatisierung nicht von einer stets gleichbleibenden Meßtemperatur ausgegangen werden konnte, wurden die Meßfehler, die sich aus einer Temperaturänderung ergeben, ermittelt.

Da der verwendete Siliziumwafer (625 µm) dick ist gegenüber einer 2,5 µm dünnen Wolframschicht gilt für die Dehnung des Wafers ϵ_{Si} und der Wolframschicht ϵ_W :

$$(3.4) \quad \varepsilon_{Si} = \alpha_{Si} \cdot \Delta T = \varepsilon_w$$

Die Wolframschicht würde sich ohne den vorhandenen Siliziumwafer um

$$(3.5) \quad \varepsilon' = \alpha_w \cdot \Delta T$$

dehnen. Die Differenz von ε' und ε_{Si} wird in der aufgetragenen Wolframschicht als Spannungsänderung wirksam:

$$(3.6) \quad \varepsilon_{Si} - \varepsilon' = (\alpha_{Si} - \alpha_w) \cdot \Delta T = \frac{\Delta \sigma_w}{E_w}$$

Die Spannungsänderung in der Wolframschicht ergibt sich nach diesem einfachen Modell bei 10 Grad Temperaturerhöhung zu

$$(3.7) \quad \Delta \sigma_w = (\alpha_{Si} - \alpha_w) \cdot \frac{E_w}{(1 - \nu_w)} \cdot \Delta T = 10,7 \frac{N}{mm^2}$$

$$\alpha_{Si} = 2,62 \cdot 10^{-6} / K$$

$$\alpha_w = 4,5 \cdot 10^{-6} / K$$

$$\nu_w = 0,28$$

$$E_w = 409500 \text{ N/mm}^2 \quad [\text{Kin88}]$$

Zur experimentellen Überprüfung dieses recht einfachen Modells wurden mehrere Wafer mit unterschiedlichen Schichtdicken bei jeweils 23, 30 und 35 °C Meßtemperatur vermessen. Dazu wurde auf den Schlitten des Tastschnittgerätes eine dünne Heizplatte mit Temperaturregelung unter den auszuwertenden Wafer gelegt. Nach dem Einschwingen der Temperatur (45 Minuten) wurde die zu dieser Temperatur gehörende Durchbiegung aufgenommen und daraus die Änderung der inneren Spannung ermittelt. Bei einer Erhöhung der Temperatur um 10 °C ergibt sich je nach dem Vorhandensein von Zug- oder Druckspannungen eine Abnahme oder Zunahme der inneren Spannungen im Bereich von 6 bis 7 N/mm², die damit noch etwas geringer ausfallen als die mit dem Modellansatz ermittelten.

Der Temperatureinfluß auf die Ermittlung der inneren Spannungen kann damit im Vergleich zu den gemessenen Spannungen (einige 100 N/mm²) vernachlässigt werden.

3.1.3 Messung der Schichtdicken

3.1.3.1 Tastschnittgerät

Zur Bestimmung der inneren Spannungen der aufgesputterten Wolframschichten ist die Kenntnis der aufgetragenen Schichtdicke notwendig (siehe Formel (3.1)). Eine einfache aber nicht zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung der Wolframschichtdicke ist die lokale Auflösung dieser Schicht durch eine 30%ige Lösung von Wasserstoffsuperoxyd (H₂O₂) in Wasser und die Vermessung der erzeugten Stufe mittels Tastschnittgerät. Wasserstoffsuperoxyd ist die einzige Chemikalie, die in der

Literatur gefunden wurde [Ull67], mit der Wolfram bei Raumtemperatur aufgelöst werden kann ohne eine darunterliegende Titanschicht anzugreifen.

Auf die Wolframschicht wurde der Resist AZ4210 aufgebracht und fotolithographisch strukturiert. Die Resiststrukturen dienten dann als Maskierungsschicht bei der Wolframätzung mit H_2O_2 . Nach der Resistentfernung entstanden viele Meßstufen in der Wolframschicht, so daß eine Schichtdickenverteilung gemessen werden konnte.

3.1.3.2 Röntgenfluoreszenz

Als schnelle zerstörungsfreie Meßmethode zur Bestimmung der Wolframschichtdicken und zur Prozeßkontrolle wurde ein Röntgenfluoreszenz-Meßgerät verwendet (Fischerscope® X1500, Fa. Helmut Fischer GmbH & CO.). Bei diesem Verfahren fällt das Licht einer Röntgenquelle auf den Meßfleck der zu untersuchenden Schicht. Dabei werden sowohl die Atome der aufgetragenen Schicht (hier Wolfram) als auch die des Trägermaterials (hier Silizium) angeregt und senden daraufhin charakteristische Röntgenstrahlung aus. Gemessen wird die Intensität (Zählrate) der charakteristischen Röntgenstrahlung des Schichtwerkstoffes, die mit der Schichtdicke korreliert ist.

Um den Zusammenhang von gemessener Zählrate zur vorhandenen Schichtdicke zu gewinnen muß das Gerät anhand von Eichproben kalibriert werden. Die maximal mit diesem Verfahren meßbare Schichtdicke ist dann erreicht, wenn eine weitere Zunahme der Schichtdicke keine Zunahme der Zählrate ergibt. Die maximal reproduzierbar zu messende Wolframschichtdicke liegt laut Herstellerangaben bei $7\ \mu\text{m}$. Für die Kalibrierung wurden daher unterschiedlich dicke Wolframschichten auf Siliziumwafern hergestellt und deren Dicke im Rasterelektronenmikroskop vermessen. Abbildung 3.3 zeigt die ermittelte Kennlinie für den Schichtaufbau Wolfram auf Silizium.

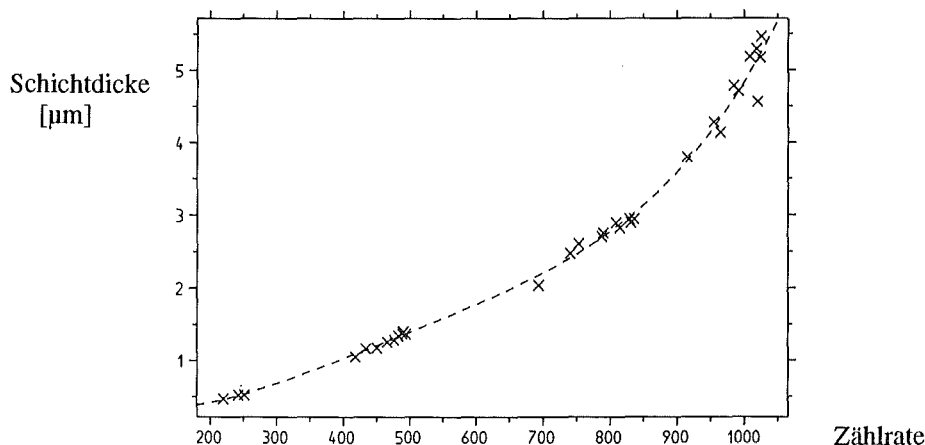


Abb.3.3: Kennlinie für die Messung von Wolfram auf Silizium

Da es sich bei der Röntgenfluoreszenz um einen statistischen Prozeß handelt, wurden die Meßzeiten solange erhöht, bis die Abweichungen für die ermittelten Zählraten bei Wiederholungsmessungen an einer Meßstelle unter 1 % fielen. Hierfür wurden Meßzeiten von 300 Sekunden benötigt. Meßfehler, die sich auf Grund unterschiedlicher Warmlaufzeiten des Gerätes ergeben, wurden zu $\pm 2,2$ % ermittelt.

3.2 Strukturierung der Schichten

3.2.1 Beschreibung der RIE-Anlage

Alle Untersuchungen zur reaktiven Strukturierung der Wolframschichten wurden mit der im IMT vorhandenen Ionenätzanlage Z401S (Leybold Heraeus) durchgeführt. Dieses Trockenätzsystem besteht aus einem Vakuumrezipienten, in dem zwei unterschiedlich große Elektroden in Form eines Plattenkondensators angebracht sind, von denen die untere, kleinere Elektrode als Substrathalter dient und zur Pobenbeladung ausgeschleust werden kann. Bei allen Versuchen bestand die obere Elektrode aus Aluminium, als Materialien für die untere Elektrode wurden Aluminium und Graphit eingesetzt. Der Betriebsdruck kann durch ein Drosselventil im Ansaugstutzen der Turbomolekularpumpe geregelt werden und ist damit weitgehend unabhängig vom Gasdurchfluß einstellbar. Es können bis zu sechs verschiedene Gase gleichzeitig als Prozeßgase verwendet werden. Eingesetzt wurden Reinstgase, deren Restgasgehalt aus Tabelle 3.1 zu entnehmen ist.

Gas	Restgasanteil
Argon	$< 10^{-6}$
CF ₄	$< 10^{-5}$
SF ₆	$< 2 \times 10^{-5}$
O ₂	$< 2 \times 10^{-5}$

Tabelle 3.1: Von den Herstellern spezifizierete Restgasanteile für die in der RIE-Anlage verwendeten Gase

Der Gastransport zur Anlage erfolgt durch ein Reinstgassystem aus Edelstahl mit einer Gesamtleckrate $< 10^{-9}$ hPa l / s.

3.2.2 Konditionierung der Anlage

Um den Einfluß von Spurengasen auf den Ätzprozeß zu minimieren wurden alle Ätzversuche erst dann gestartet, wenn der Kammerdruck nach dem Einschleusen der Substrate besser war als 10^{-5} hPa. Da die Ätzprozesse temperaturabhängiges Verhalten zeigen, wurde die Elektrodentemperatur beim reaktiven Ionenätzen vor dem

Prozeßstart jeweils auf Raumtemperatur (23°C) eingestellt, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

3.3 Messen der Verzüge

Die inneren Spannungen in der Absorberschicht, die aus dem Herstellungsprozeß resultieren, führen zu Positionsänderungen des Absorber-Trägerfolien-Verbundes (vgl. Abb. 3.4). Diese Verzüge wurden durch Vergleich der CAD-Daten von Teststrukturen mit den Positionsdaten auf der hergestellten Maske ermittelt.

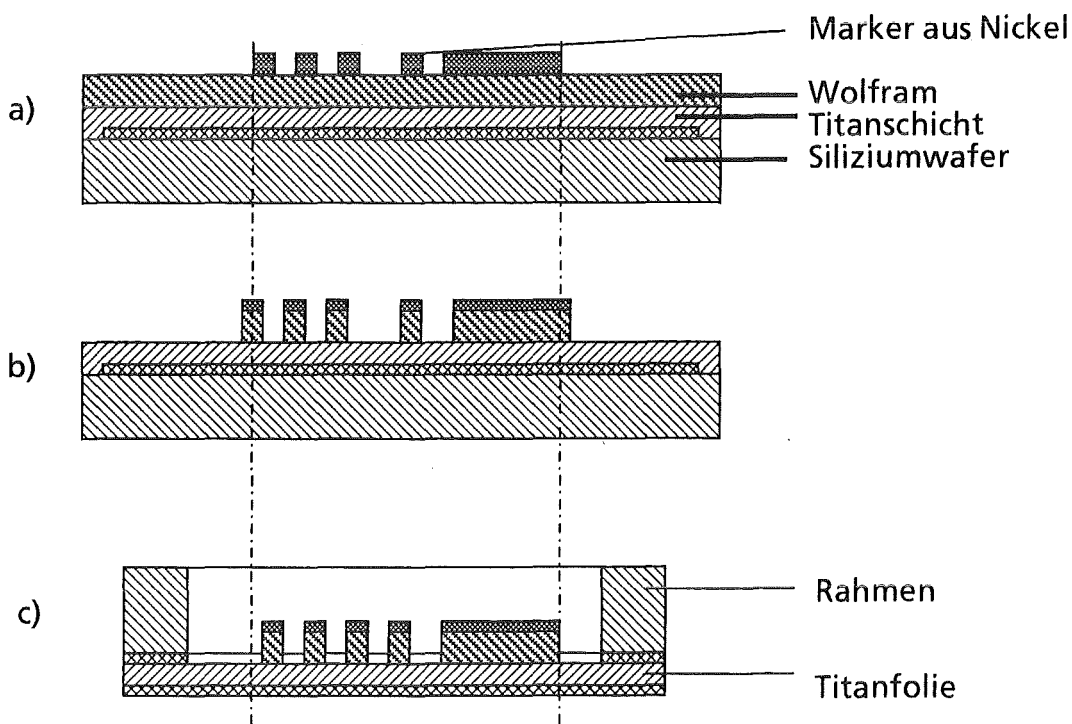


Abb. 3.4: Durch den Herstellungsprozeß bedingte Maskenverzüge:
a) Auf einer unter Zugspannung stehenden Titanschicht wurde eine Wolframschicht mit inneren Zugspannungen aufgesputtert. Auf der Wolframschicht wurden galvanisch Marker hergestellt (vgl. Kap 5).
b) Nach dem reaktiven Ionenätzen der Wolframschicht relaxieren die inneren Spannungen teilweise, so daß sich Positionsänderungen für die Marker ergeben.
c) Durch die Übertragung der Titanfolie auf einen Rahmen kommt es zu weiteren Positionsveränderungen.

Für die Ermittlung der beim Herstellungsprozeß auftretenden Maskenverzüge wurde ein Elektronenstrahlschreiber (ESS) eingesetzt (Leica EBPG 5). Der ESS verfügt über eine Software, mit deren Hilfe spezielle Teststrukturen (Marker) auf den Proben und auf dem Probenhalter gesucht, erkannt und deren Lage vermessen werden kann. Die Markerstrukturen sind quadratische Erhöhungen oder Vertiefungen mit einer Kantenlänge von ca. 20 µm, die auf den Proben angebracht werden. Die Posi-

tionsbestimmung kann laut den Herstellerangaben auf 20 nm genau durchgeführt werden.

Für den Meßvorgang werden Elektronen mit einer Energie von 50 keV auf die Probe beschleunigt. Ein Teil dieser Elektronen wird von der Probenoberfläche zurückgestreut und zusammen mit den ausgelösten Sekundärelektronen in vier Detektoren registriert. Wenn der Elektronenstrahl über die Probe geführt wird und dabei auf einen Marker trifft, verändert sich der Anteil der zurückgestreuten Elektronen. Daraus wird die Lage der Strukturkanten ermittelt. Als Markerposition wird das Symmetriezentrum der quadratischen Marker berechnet und ausgegeben.

Nach der Übertragung der Titanträgerfolie befinden sich die Marker auf der Rahmeninnenseite. Masken mit diesem Aufbau können aus technischen Gründen nicht so in den Elektronenstrahlschreiber eingebaut werden, daß die Marker auf der dem Elektronenstrahl zugewandten Seite zu liegen kommen. In diesen Fällen wurde die Markerposition durch die Titanträgerfolie hindurch bestimmt.

Für die Realisierung der Verzugsmessungen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit die Herstellungskonzepte für die Marker untersucht und die notwendige Software entwickelt, durch die die beim wiederholten Einbau der Proben auftretenden Lageveränderungen der Maske kompensiert werden können [Hei90]. Die Wiederholgenauigkeit der Positionsbestimmung durch die Titanträgerfolie wurde in diesem Zusammenhang zu 60 nm bestimmt.

4 Experimenteller Teil

4.1 Herstellung der Absorberschicht

Durch die Wahl der Beschichtungsparameter läßt sich in gewissem Umfang die Gefügestruktur und damit auch die Schichteigenschaften einer aufgesputterten Schicht gezielt beeinflussen. In der Tabelle 4.1 sind die wichtigsten Einflußgrößen und der Parameterbereich, der mit der vorhandenen Maschine abgedeckt werden kann, dargestellt.

Einflußgröße	untersuchter / möglicher Parameterbereich	hauptsächlicher Einfluß auf:
• Basisdruck p_B	$<5 \times 10^{-6}$ hPa	innere Spannung
• Entladungsparameter: - Sputterleistung P Entladungsspannung Entladungsstrom - Magnetabstand M	0.3 - 3.5 kW 300 - 400 V 3 - 7 A 0 - 9 mm	innere Spannung Anisotropie innere Spannung
- Biasspannung U_B	0 - 100 V	Haftfestigkeit innere Spannung
- Sputterdruck p $\equiv f$ (Ar-Gasfluß)	0.4 - 3 Pa 50 - 300 sccm	innere Spannung
• Beschichtungsart	- statisch - dynamisch - quasistatisch	Anisotropie
• Substrat - Substrattemperatur - Substratmaterial	300 - 500 K - Siliziumwafer - Abhebewafer	innere Spannung innere Spannung

Tabelle 4.1: Parameterbereich der vorhandenen Sputteranlage für die Herstellung der Absorberschicht sowie hauptsächlichlicher Einfluß der Parameter auf die Eigenschaften der hergestellten Schicht

Die in der Tabelle 4.1 aufgeführten Parameter haben einen starken Einfluß auf z. B. optische, elektrische oder mechanische Eigenschaften der aufgesputterten Schichten. Von wesentlichem Interesse für die Herstellung von Röntgenmasken sind die inneren mechanischen Spannungen der Wolframschichten, da diese das Ausmaß der auftretenden Absorberverzüge mitbestimmen. Die beim Herstellungsprozeß entstehenden inneren Spannungen sind eng mit dem beim Schichtwachstum entstehenden Materialgefüge korreliert. Daher wird zuerst auf die Zusammenhänge beim Schichtwachstum eingegangen.

4.1.1 Theoretische Betrachtung der Beeinflussung des Gefüges der Wolframschichten durch die Betriebsparameter

4.1.1.1 Substrattemperatur

Bei der Untersuchung von Aufdampfschichten wurden von Movchan und Demchisin grundlegende Zusammenhänge zwischen der sich ausbildenden Gefügestruktur in Abhängigkeit der bei der Beschichtung wirkenden Temperatur T_S erkannt und durch das sogenannte Dreizonenmodell beschrieben [Mov69]. Die Untersuchungen zeigten, daß die Schichteigenschaften praktisch aller aufgedampften Metalle von der "reduzierten" Temperatur T_r abhängen, d. h. dem Verhältnis der bei der Beschichtung vorherrschenden Temperatur T_S bezogen auf den Schmelzpunkt T_M des Beschichtungsmaterials ($T_r = T_S/T_M$). Für die Verhältnisse beim Sputtern wurde das Modell von Thornton [Tho74] um eine Übergangszone T (Transition Zone) erweitert (siehe auch Abb. 4.1a) und der Einfluß des Sputtergasdrucks als weiterer Parameter eingeführt.

Die besondere Bedeutung der Substrattemperatur auf das sich ausbildende Gefüge erkennt man bei einer genaueren Betrachtung des Kondensationsvorgangs der Teilchen beim Aufbau der Schichten. Dieser Vorgang vollzieht sich in drei Schritten [Kie87]:

- 1) Beim Auftreffen eines zerstäubten Teilchens wird kinetische Energie auf die Substratoberfläche übertragen und das Atom lagert sich lose gebunden an. In diesem Zustand wird es als Adatom bezeichnet.
- 2) Es folgt die Diffusion des Adatoms auf der Oberfläche bis es einen niederenergetischen Platz einnimmt oder die Oberfläche durch Zerstäubungseffekte oder Desorption wieder verläßt.
- 3) Durch Diffusion des kondensierten Adatoms innerhalb des Gitters (Volumendiffusion) können weitere Platzwechsel erfolgen.

Für kleine Werte von T_S/T_M ergibt sich die sogenannte **Zone 1** (vgl. Abb. 4.1). Das Adatom weist eine relativ geringe Beweglichkeit auf, es ergeben sich stengelförmige Kristallite mit kuppenförmigen Enden (dendritische Struktur). Das sich ausbildende Gefüge ist porös. Die Durchmesser der Kristallite werden mit zunehmender Substrattemperatur größer, da sich Adatome wegen ihrer zunehmenden Beweglichkeit mehr an vorhandene Kristallisationskeime anlagern statt neue Kristallisationskeime zu bilden. Die in der Zone 1 auftretenden Schichtstrukturen lassen sich unter der Annahme vernachlässigbarer Oberflächendiffusion durch einfache Abschattungseffekte erklären, da hohe Stellen in der aufwachsenden Schicht mehr Materialfluß erhalten als tiefliegende Stellen, besonders wenn der ankommende Materialstrom nicht senkrecht auf das Substrat auftrifft. Offene Korngrenzen entstehen dann aus

den Wachstumsfronten, die von den Fußpunkten an erhabenen Stellen ausgehen [Tho89].

In der **Zone 2** ist die Oberflächenbeweglichkeit so groß, daß stengelförmige Strukturen mit hoher Packungsdichte und Schichtoberflächen mit geringer Rauigkeit entstehen (Kolumnarstruktur), dabei nehmen die Stengeldurchmesser mit steigender Temperatur zu. In der Zone 2 beginnen die Körner mit steigender Temperatur sich durch die gesamte Schichtdicke auszubilden. Dieser Prozeß wurde von Grovenor als "Granulare Epitaxie" bezeichnet [Gro89], da der Durchmesser dieser Körner mit dem Schichtwachstum kaum zunimmt.

In der **Zone 3** übt die Volumendiffusion den dominierenden Einfluß auf die Gefügestruktur aus. Die hohen Temperaturen erlauben ein extensives Kornwachstum schon beim Schichtaufbau. Für diese rekristallisierte Struktur ist eine geringe Fehlerdichte und eine glatte Schichtoberfläche charakteristisch .

Beim Sputtern entsteht zwischen Zone 1 und Zone 2 eine sogenannte Übergangszone (**Zone T**). Dort bildet sich ein faserförmiges, dicht gepacktes Gefüges mit glatter Oberfläche aus. Diese Zone entsteht bei kleinen T_S/T_M auf glatten Substraten, wenn der ankommende Materialstrom großteils senkrecht auf das Substrat trifft, so daß Abschattungseffekte minimal sind. In dem Bereich $T_S/T_M < 0,5$ entstehen Gefüge mit Nano-, Mikro- oder Makrosäulen und mit Nano-, Mikro- oder Makro-Hohlräumen [Kie87]. Weiterhin enthält die Zone T einige große Körner zwischen den gleichachsigen kleinen Körnern, die für die Zone 1 charakteristisch sind (bimodale Korngrößenverteilung) [Gro89]. Allgemein führt eine ansteigende Substrattemperatur zu einer Erhöhung der Korngröße in der aufgetragenen Schicht und umgekehrt.

4.1.1.2 Sputterdruck

In der Abbildung 4.1a. ist der Einfluß des Gasdrucks auf die Gefügestruktur dargestellt. Mit steigendem Gasdruck nimmt die Energie der aufgestäubten Teilchen ab, da diese durch vermehrte Stoßprozesse im Gas Energie abgeben. Daher ist die Oberflächenbeweglichkeit der kondensierten Atome geringer. Die Grenze zwischen Zone 1 und der Übergangszone verschiebt sich dadurch mit zunehmendem Druck zu höheren Temperaturen. Weiterhin nehmen mit zunehmendem Sputterdruck die Teilchendichte und der Entladungstrom zu [Tho78].

Eine generelle Erscheinung bei der Schichtherstellung durch Sputtern ist das Auftreten von Druckspannungen in den Schichten, wenn der Schichtaufbau bei niedrigen Gasdrücken in der Sputteranlage erfolgt. Die Ausbildung einer Druckspannung in den aufgesputterten Schichten wird auf eine Materialverdichtung durch auftreffende Teilchen erklärt ("atomic peening" siehe auch [Heu70]). Dieser Druck, bei dem

ein Übergang von Druck- zu Zugspannungen auftritt, ist abhängig vom Beschichtungsmaterial. Für diese Abhängigkeit wird ein Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie der gesputterten Atome und reflektierter Neutralteilchen vermutet [Hof77]. Letztere entstehen dadurch, daß die auf die Targetoberfläche beschleunigten Ar^+ -Ionen dort neutralisiert und mit fast unveränderter Energie reflektiert werden. Dieser Effekt nimmt mit abnehmender Masse des Targetmaterials ab [Tho77].

Durch Erhöhung des Druckes über eine gewisse Grenze können Zugspannungen erhalten werden, da die mittlere Energie sowohl der gesputterten Atome wie auch der Neutralteilchen durch die vermehrten Stoßprozesse vermindert wird.

4.1.1.3 Biasspannung

Abbildung 4.1b zeigt den Einfluß einer Biasspannung, die am zu beschichtenden Substrat angelegt wurde, auf das entstehende Gefüge. Durch das Bombardement mit energiereichen Teilchen wird die Oberflächenbeweglichkeit der kondensierten Atome erhöht. Auf diese Weise können dichte, belastbare Gefügestrukturen der Zone T bei hochschmelzenden Materialien auch bei niedrigen Beschichtungstemperaturen erhalten werden. Da durch den Beschuß Punktdefekte auf dem Substrat erzeugt werden, erhöht sich auch die Keimdichte.

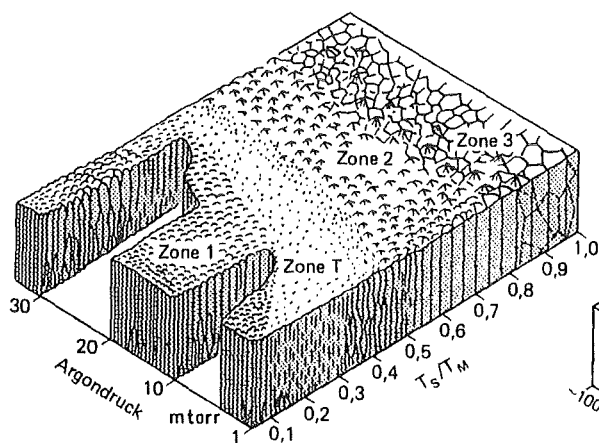


Abb. 4.1.a: Einfluß des Sputterdruckes auf das Gefüge (Quelle: [Tho74])

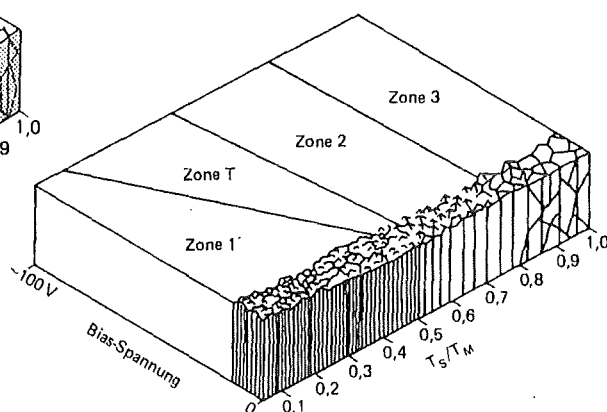


Abb. 4.1b: Einfluß der Biasspannung auf das Gefüge (Quelle: [Kin87])

4.1.1.4 Sputterleistung

Mit steigender elektrischer Leistung, die für die Erzeugung des Plasmas aufgewandt wird (Sputterleistung), steigen sowohl der Entladungsstrom als auch die Entladungs-

spannung an. Damit erhöhen sich die Abscheiderate und die Energie der auftreffenden Atome. Die maximal einsetzbare Sputterleistung wird durch die Wärmeleitung in den Targets begrenzt. Eine zu hohe Leistungsdichte führt zum Aufschmelzen des Targets. Durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen dem Target und der Kühlplatte, (im allgemeinen aus Kupfer), wird die maximal erreichbare Leistung durch die sich ausbildenden thermischen Spannungen an der Verbindung zwischen Target und Kühlplatte begrenzt.

4.1.1.5 Magnetfeld

Bei dem eingesetzten Planar-Magnetron werden die Elektronenbahnen durch ein Magnetfeld auf einen engen Raumbereich eingegrenzt und die mittlere Länge der Elektronenbahnen verlängert. Dadurch wird eine hohe Elektronen- und Ionendichte erreicht. Das Plasma entsteht dabei im wesentlichen innerhalb eines Schlauches vor der Kathode (siehe auch Abb. 4.2a). Das Substrat liegt bei dieser Anordnung im praktisch feldfreien Raum außerhalb des Plasmas.

Durch die Änderung der Magnetfeldstärke kann die Plasmaimpedanz verändert werden, d.h. es verändert sich das Strom-Spannungsverhältnis bei der Entladung. Damit kann auf die Energie der abgestäubten Teilchen und die Beschichtungsrate Einfluß genommen werden.

4.1.1.6 Substratoberfläche

In Abhängigkeit von Substrat, Substrattemperatur, der Beschichtungsrate und Material können die aufgebrachten Schichten amorph, polykristallin oder auch einkristallin aufwachsen. Bei der Beschichtung von einkristallinen Substraten wird oft ein orientiertes Schichtwachstum beobachtet (Epitaxie).

Die Rauheit der Substratoberfläche ist der Grund für Abschattungseffekte der diffus auf die Substratoberfläche auftreffenden Atome [Tho89]. Unter großen Auftreffwinkeln entstehen Poren in der abgeschiedenen Schicht. Weiterhin beeinflusst der Zustand der Substratoberfläche durch adsorbierte Gase oder Verunreinigungen die Haftung und die sich ausbildenden inneren Spannungen.

4.1.1.7 Beschichtungsrate

Die Beschichtungsrate werden im wesentlichen durch die Ionenstromdichte am Target bestimmt, dabei ist die Ionenenergie von geringerem Einfluß. Die Beschichtungsrate sind daher proportional zu der eingespeisten Sputterleistung [Wai78]. Die Einflußfaktoren sind:

- die Leistungsdichte in der Erosionszone des Targets
- die Größe der Erosionszone

- der Target -Substrat Abstand
- der Sputterdruck

Für die Erzielung von maximalen Beschichtungsraten sollte das Substrat so nah wie möglich am Target sein, jedoch noch außerhalb des Plasmas. Typische minimale Abstände bei Planar Magnetron-Anlagen sind 5 - 7 cm (6,5 cm an der verwendeten Anlage). Mit zunehmender Sputterleistung steigen die Beschichtungsraten an, da die Anzahl der ausgelösten Targetatome pro einfallendem Ion mit der Entladespannung zunimmt und die Anzahl der einfallenden Ionen mit dem Entladestrom ansteigt. Der Einfluß des Drucks auf die Depositionsrate ist gering. Die Depositionsraten verändern sich in dem Druckbereich der vorhandenen Maschine (0,4 Pa bis 3 Pa) um weniger als 5%. Mit zunehmendem Druck fällt die Plasmaimpedanz, womit die Entladungsspannung sinkt. Ab einem gewissen Druck treten dann vermehrt Streuprozesse auf, die zu einem Materialverlust durch Streuung zur Seite führen, wodurch die Depositionsrate mit steigendem Druck ein Maximum durchläuft und dann wieder abfällt [Wai78].

Hohe Beschichtungsraten führen bei gut gekühlten Substraten zur Ausbildung kleinerer Kristallkörner. Diese Beobachtung läßt sich dadurch erklären, daß Adatome sich bei erhöhter Depositionsrate auf der Substratoberfläche nicht so weit bewegen können bevor sie sich an andere Adatome anlagern und einen Kristallisationskeim bilden [Cho69]. Eine hohe Beschichtungsrate hat deshalb eine ähnliche Auswirkung wie eine geringe Beschichtungstemperatur, bei der die laterale Beweglichkeit der Adatome relativ zur Depositionsrate ebenfalls verringert ist.

4.1.2 Aufbau der Absorberschicht durch statische Beschichtung

Die effektivste Methode zur Herstellung einer dicken Absorberschicht ist die statische Beschichtung, da dieses Verfahren die wenigste Zeit in Anspruch nimmt. Bei diesem Verfahren werden die Wafer auf dem Substrathalter montiert und zum Beschichtungsvorgang vor das entsprechende Target gefahren. Das Waferflatt lag bei allen Versuchen parallel zur langen Seite des Targets. Die Drehrichtung des Substrathalters entspricht daher der Y_W -Richtung des Wafers (vgl. Abb. 3.1). Die Prozeßzeit bei diesem Herstellungsverfahren ergibt sich aus der Zeit zum Konditionieren der Sputteranlage und der Substrate sowie der reinen Beschichtungszeit und der für den Substratwechsel benötigten Zeit. Typischerweise ergeben sich für die Herstellung der Absorberschicht Beschichtungszeiten von 18 Minuten (Dicke der Wolframschicht $d_W = 2,5 \mu\text{m}$).

4.1.2.1 Schichtdickengleichmäßigkeit

Als Folge der magnetunterstützten Entladung bilden sich in Abhängigkeit der Magnetpositionen auf dem Target V-förmige Gruben aus [Wai78] (vgl. Abb. 4.2a). Der aus diesen Bereichen herausgeschlagene Materialstrom genügt dabei einer Cosinusverteilung [Weh70]. Bei den verwendeten Targets der Dimension 488 mm x 87,5 mm entwickeln sich im Laufe der Zeit zwei Gräben in einem Abstand von etwa 38 mm parallel zur langen Seite des Targets (siehe Abb. 4.2c). Die ermittelte Schichtdickenverteilung bei der statischen Beschichtung entlang der X_W -Richtung des Wafers ergibt sich so aus der Überlagerung der beiden Linienquellen des Targets. Für die Y_W -Richtung wirken diese wie Punktquellen. Der Abstand zwischen den Substraten und dem Target betrug bei der statischen Beschichtung 65 mm.

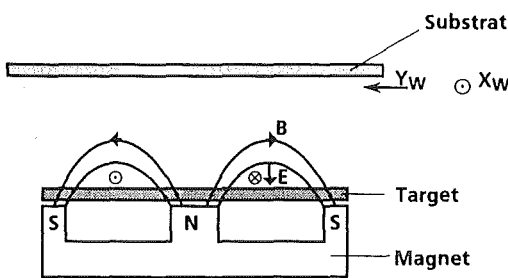


Abb. 4.2a: Magnetfeldwirkung beim Planar-Magnetron

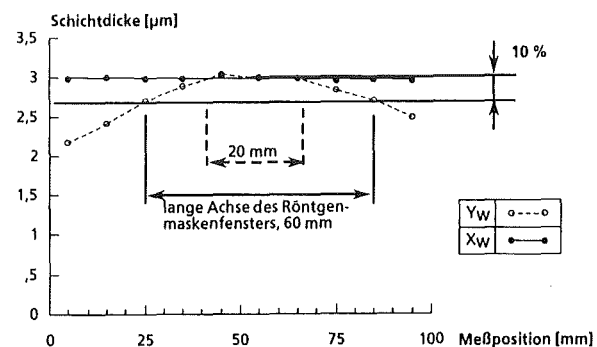


Abb. 4.2b: Schichtdickenverteilung beim statischen Beschichten in Abhängigkeit der Meßrichtung sowie Länge (60 mm) und Breite (20 mm) der derzeit verwendeten Nutzfläche der Maskenträgerfolie.

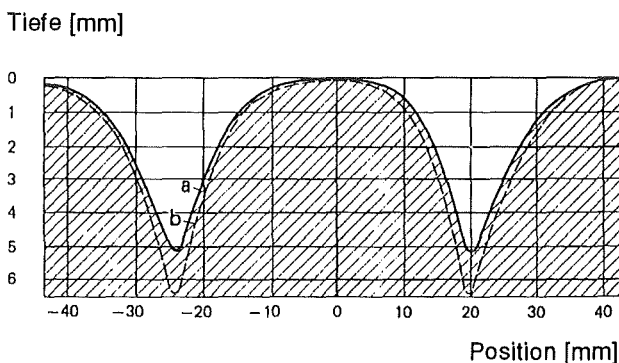


Abb. 4.2c: Erosionsprofil eines Targets das im eingesetzten Maschinentyp verwendet wird (a) und extrapoliertes Profil bei Durcherosion (b) (Quelle: Leybold-Heraeus GmbH)

In der Abbildung 4.2b sind die bei diesem Verfahren erzielbaren Schichtdickenverteilungen entlang der beiden Meßrichtungen aufgetragen. In der Y_W -Richtung, dargestellt durch offene Symbole, können über die gesamte Waferbreite (100 mm) Abweichungen in der Dicke der aufgesputterten Schicht je nach Sputterdruck von bis zu 25 % auftreten. Für die X_W -Richtung, dargestellt durch die gefüllten Markierungen, liegen die ermittelten Schichtdickenabweichungen unter ± 1 %.

Weiterhin sind in der Abbildung 4.2b die Länge (60 mm) und Breite (20 mm) der derzeit verwendeten Nutzfläche der Röntgenmasken dargestellt. (siehe auch Kap.

2.2). Wird beim Übertragungsverfahren die lange Seite des Rahmens parallel zum Waferflat ausgerichtet, so liegen die Schichtdickenschwankungen im freigespannten Bereich der Trägerfolie unter 4 %. Die mit der statischen Beschichtung erreichbare Homogenität der Schichtdicke reicht daher für die Absorberherstellung aus, wenn die nutzbare Fläche der Röntgenmasken das derzeit übliche Maß nicht überschreitet.

4.1.2.2 Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen

Die in den folgenden Diagrammen dargestellten Symbole kennzeichnen den Mittelwert der Spannungen von vier Wafern, die bei den Versuchen jeweils beschichtet wurden. Die Meßwerte der X_W -Richtung (vgl. Abb. 3.1) sind gefüllt dargestellt, die Meßwerte der Y_W -Richtung sind durch ungefüllte Markierungen dargestellt. Die X_W -Richtung verläuft parallel zur langen Achse des Targets, die Y_W -Richtung senkrecht dazu. Der Unterschied zwischen den beiden Meßrichtungen in den einzelnen Versuchsserien ist in der Abbildung durch entsprechend kleinere, ungefüllte Symbole dargestellt und wird im folgenden als Spannungsanisotropie bezeichnet.

4.1.2.2.1 Einfluß der Schichtdicke

In der Abbildung 4.3a ist der Einfluß einer zunehmenden Schichtdicke bei unterschiedlichen Sputterdrücken p auf die inneren Spannungen der abgeschiedenen Wolframschichten dargestellt, wenn diese auf Siliziumwafer abgeschieden werden. Die Substrate waren bei dieser Beschichtungsserie geerdet, die Sputterleistung lag konstant bei 2 kW. Alle Versuche wurden mit der maximal möglichen Beschichtungstemperatur durchgeführt, die beim Beschichtungsvorgang konstant gehalten werden kann (220 °C). Man erkennt, daß bei allen Versuchen in den mit Y_W bezeichneten Meßrichtungen höhere Druckspannungen ermittelt wurden als für die X_W -Richtungen. Der Gradient der inneren Spannung über der Schichtdicke nimmt mit zunehmendem Sputterdruck ab. Die Anisotropie der inneren Spannungen zwischen der Y_W - und der X_W -Richtung ist nur bei einem Sputterdruck von 2 Pa deutlich von der Schichtdicke abhängig. Die maximalen Schichtdickenabweichungen in Y_W -Richtung betragen 18 %. Für die Berechnung der inneren Spannungen wurde deshalb ein mittlerer Wert eingesetzt.

Abbildung 4.4 zeigt die sich in Abhängigkeit der Waferposition ändernde Textur der Wolframschicht für die Y_W -Richtung und die zum Rand des Wafers abnehmende Schichtdicke, die sich mit den in Abbildung 4.3a dargestellten Parametern ergibt ($p = 0,4$ Pa). In Richtung des Waferrandes neigen sich die Kristallite immer mehr zur Wafermitte. Die Kristallite sind in Richtung der Teilchenquelle (Target) orientiert und bilden mit der Substratnormalen den Winkel β . Dieser Winkel β ist kleiner als der

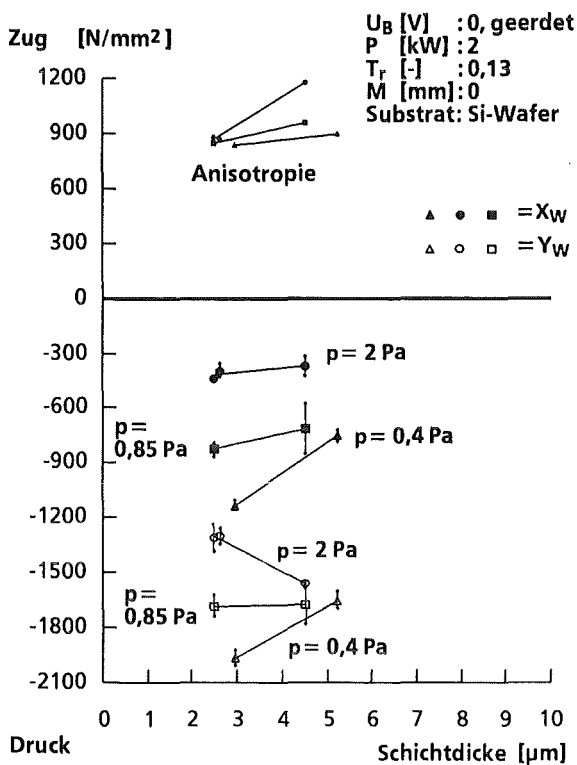


Abb. 4.3a: Einfluß der Schichtdicke auf die inneren Spannungen bei der Beschichtung von Wolfram auf Siliziumwafer

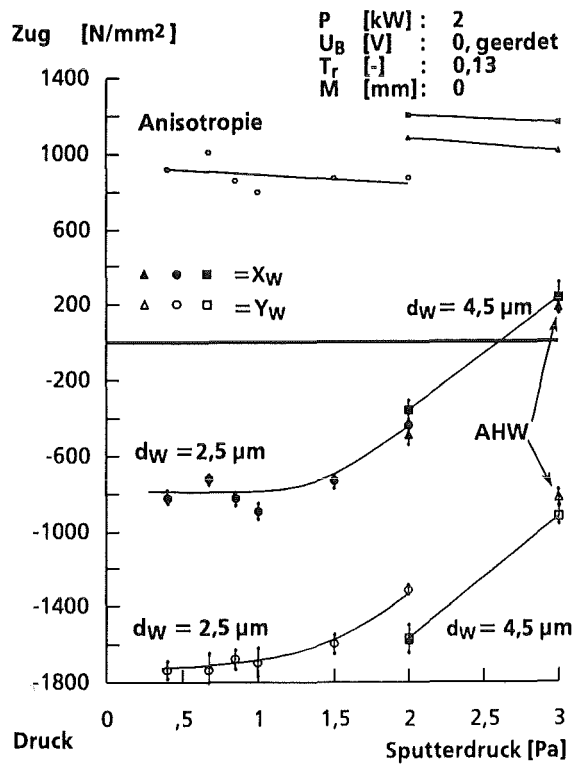


Abb. 4.3b: Einfluß des Sputterdruckes auf die inneren Spannungen bei der Beschichtung von Wolfram auf Siliziumwafer (runde und rechteckige Symbole) und Abhebewafer (dreieckige Symbole)

Winkel α , der sich zwischen der Substratnormalen und dem Quellpunkt des Teilchenstrahls ergibt. Dieser Zusammenhang wurde von Dirks und Leamy [Dir77] mit "Tangenten-Regel" bezeichnet und lautet:

$$(4.1) \quad 2 \tan \beta = \tan \alpha$$

Bei vielen Quellen gilt die Vektorsumme der Quellen als Bezugspunkt [Dir77].

Bei einem Abstand zwischen Substrat und Target von 65 mm ergibt sich für die in Abb. 4.4a und c angegebenen Positionen ein Winkel für α von 26 - 28°. Für β ergeben sich aus den Aufnahmen in Abbildung 4.4 Werte zwischen 13° und 14°, was sehr gut mit der Tangenten-Regel übereinstimmt. Der Ursprung des sich ausbildenden Neigungswinkels liegt in Selbstabschattungseffekten beim Schichtwachstum, wenn der Schichtaufbau bei einer kleinen reduzierten Temperatur T_r erfolgt [Hen74, Tho89] (siehe Kap. 4.1.1).

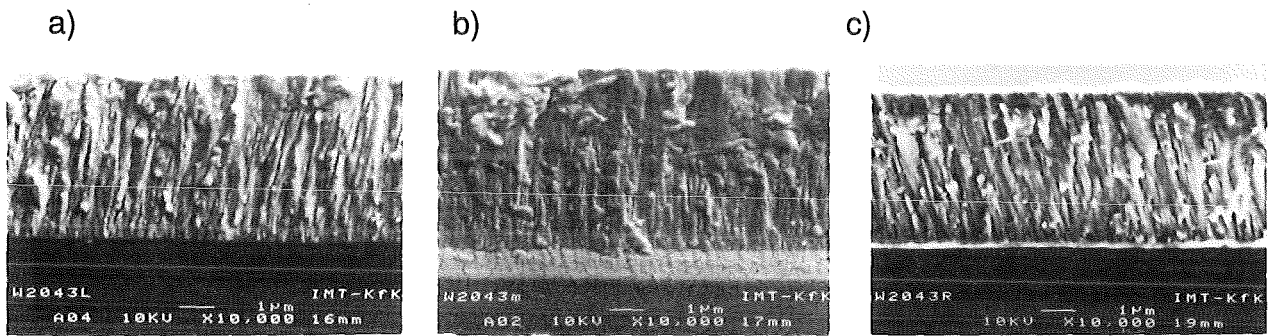
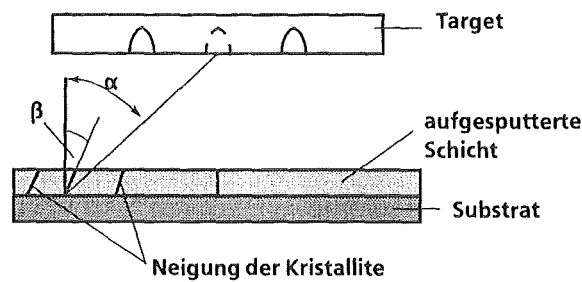


Abb. 4.4: Ausrichtung der Kristallite einer auf einen Siliziumwafer aufgesputterten Wolframschicht sowie Dicke d der Schicht und Winkel β der Kristallite zur Substratnormalen in Abhängigkeit der Position auf dem Wafer: a) Abstand vom Waferrand 15 mm, $d = 4,8 \mu\text{m}$, $\beta = 13^\circ$. b) Wafermitte, $d = 5,5 \mu\text{m}$, $\beta = 0^\circ$. c) Abstand vom Waferrand 85 mm, $d = 4,7 \mu\text{m}$, $\beta = 14^\circ$.

4.1.2.2 Einfluß des Sputterdruckes

Wie aus der Abbildung 4.3b erkennbar ist, vermindern sich bei der statischen Beschichtung die inneren Druckspannungen mit zunehmendem Sputterdruck. Abbildung 4.3b zeigt, daß bei dem maximalen Sputterdruck der vorhandenen Maschine ein Übergang von Druckspannungen zu Zugspannungen für die X_W -Richtung erreicht werden kann. Für die Abscheidung von $4,5 \mu\text{m}$ dicken Wolframschichten auf die für den Maskenprozeß vorgesehenen Abhebewafer (AHW), dargestellt durch dreieckige Symbole, werden vergleichbare Spannungen ermittelt. Generell zeigen sich bei der Erhöhung des Sputterdrucks in der Y_W -Richtung jeweils größere Druckspannungen. Die Schichtdickenabweichungen über die gesamte Waferbreite erreichen bei dem maximal möglichen Sputterdruck (3 Pa) Werte von 25 % (vgl. Abb. 4.2b). Die Anisotropie der inneren Spannungen zwischen der X_W - und der Y_W -Richtung wird durch die Änderung des Sputterdruckes aber nicht wesentlich beeinflusst. Es ist deshalb nicht möglich, allein durch die Veränderung des Sputterdruckes p die innere Spannung in X_W - und Y_W -Richtung gleichzeitig zu verringern.

4.1.2.3 Einfluß der Biasspannung

In der Abbildung 4.3c ist der Einfluß eines variierenden Substratpotentials (Biasspannung) auf die inneren Spannungen der Wolframschichten bei der Abscheidung

auf Siliziumwafer dargestellt. Für die X_W -Richtungen werden bei kleinem Sputterdruck (0,4 Pa) und geerdetem Substrat die geringsten inneren Spannungen ermittelt, allerdings weist die Y_W -Richtung gleichzeitig sehr hohe Druckspannungen auf. Mit steigender Biasspannung zeigt sich bei kleinem Sputterdruck (0,4 Pa) eine Zunahme der Druckspannungen in der X_W -Richtung. Dadurch läßt sich die Anisotropie in den abgeschiedenen Wolframschichten vermindern. Bei einer Abscheidung unter wesentlich höherem Druck (2 Pa) unter Verwendung einer Biasspannung verschlechtert sich die Anisotropie in den abgeschiedenen Wolframschichten wieder.

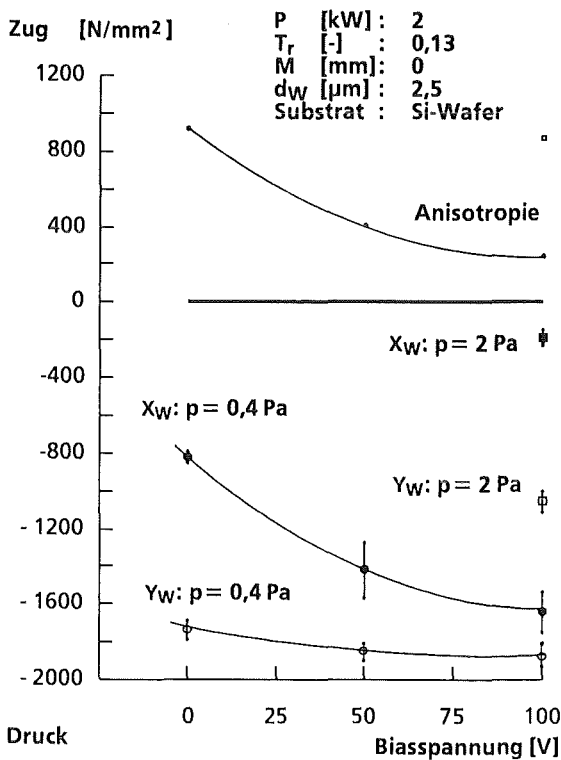


Abb. 4.3c: Einfluß einer angelegten Biasspannung bei der Beschichtung von Wolfram auf Siliziumwafer

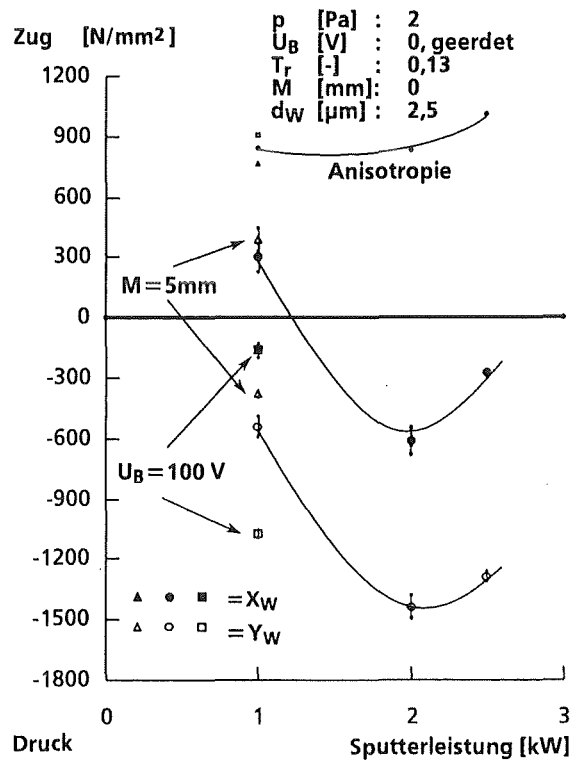


Abb. 4.3d: Einfluß der Sputterleistung auf die inneren Spannungen bei der Beschichtung von Wolfram auf Siliziumwafer

4.1.2.2.4 Einfluß der Sputterleistung

Die oben beschriebenen Versuche wurden alle bei einer ins Plasma eingespeisten elektrischen Leistung (Sputterleistung P) von 2 kW durchgeführt. Abbildung 4.3d zeigt den Einfluß der Sputterleistung auf Höhe und Anisotropie der inneren Spannungen. Eine Erhöhung der Leistung erhöht auch die Spannungsinhomogenitäten, eine Verminderung der Leistung auf 1 kW führte zu einer Verringerung der Druckspannungen bis zum Übergang in den Zugspannungsbereich für die X_W -Richtung. Eine Verbesserung hinsichtlich der Anisotropie konnte durch die Verminderung der Leistung nicht erreicht werden. Eine weitere Erniedrigung der eingespeisten Leistung wurde auf Grund der damit abnehmenden Depositionsraten und der damit verbundenen Erhöhung der Prozeßzeiten nicht untersucht.

4.1.2.2.5 Einfluß des Magnetabstandes

Bei der statischen Beschichtung führt die Änderung des Abstandes der Magnete vom Target ($M = 5 \text{ mm}$, vgl. Kapitel 3.1.1) nur zu geringen Verbesserungen bezüglich der Anisotropie (dreieckige Symbole in Abbildung 4.3d). Gleichzeitig verschieben sich die ermittelten Spannungen in Richtung Zugspannung.

4.1.2.2.6 Einfluß der Beschichtungstemperatur

In der zur Verfügung stehenden Sputteranlage liegen die höchsten Substrattemperaturen, die während der gesamten Beschichtung noch konstant gehalten werden können, im Bereich zwischen 200 und 220 °C. Dies bedeutet, daß eine Beschichtung mit Wolfram bei einer maximalen reduzierten Temperatur T_r von etwa 0,13 erfolgen kann ($T_r = T_S / T_M$, siehe Kap. 4.1.1).

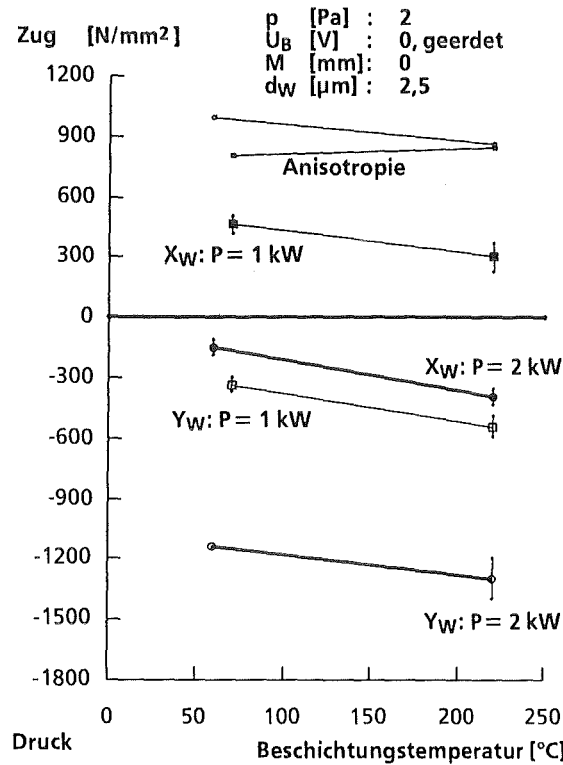


Abb. 4.3e Temperatureinfluß beim statischen Beschichten von Wolfram auf Siliziumwafer

Eine Einschränkung der maximalen Beschichtungstemperatur ergibt sich auch aus der Verwendung von Titan als Trägerfolie, da der Spannungszustand der Titanfolie durch erhöhte Temperaturen beeinflusst wird. Die Zugspannungen in der Titanschicht werden bei der Herstellung durch einen Temperschritt bei 450°C (30 min.) eingestellt. Ein weiteres Aufheizen des Membranmaterials auf erhöhte Temperaturen würde die eingestellten Zugspannungen weiter erhöhen. Als maximale Beschichtungstemperatur wurde daher 220°C untersucht. In Abbildung 4.3e ist der Einfluß

unterschiedlicher Beschichtungstemperaturen bei verschiedenen Sputterleistungen dargestellt.

Die dargestellte Steigung für die beiden Leistungsbereiche entspricht dem Anteil der inneren Spannungen, der sich beim Abkühlprozeß auf Grund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Wolfram und Silizium einstellt. Beim Abkühlvorgang auf Raumtemperatur ergibt sich durch die Temperaturdifferenz nach Gleichung (3.7) ein thermischer Anteil der inneren Spannungen von 214 N/mm^2 .

Ein wesentlicher Einfluß der Beschichtungstemperatur auf die Anisotropie der inneren Spannungen konnte nicht festgestellt werden.

4.1.2.2.7 Einfluß der Schichtdickenverteilung

Wie aus der Abbildung 4.2b zu entnehmen ist, ergeben sich in der Y_W -Richtung, in der die höheren Druckspannungen ermittelt werden, Schichtdickenabweichungen bis zu 25%. Um den Einfluß der zum Waferrand abnehmenden Schichtdicke auf die Anisotropie der inneren Spannungen zu ermitteln, wurden rechteckförmige Waferbruchstücke mit den Dimensionen $30 \times 100 \text{ mm}$ beschichtet. Bei der Beschichtung wurden die Schmalseiten dieser Substrate parallel zur kurzen Seite des Targets ausgerichtet, um eine möglichst homogen Beschichtung zu ermöglichen. Mit diesen Substraten konnten maximale Schichtdickenabweichungen von kleiner 3 % in beiden Meßrichtungen erreicht werden. Trotz der homogenen Beschichtung zeigten sich bezüglich der Anisotropie der inneren Spannungen keine Verbesserungen.

4.1.2.3 Diskussion der bei statischer Beschichtung erhaltenen inneren Spannungen

Bei der statischen Beschichtung von Siliziumwafern und den für den Maskenprozeß vorgesehenen Abhebewafern mit Wolfram ergeben sich bei der Variation der Beschichtungsparameter anisotrope innere Spannungen, mit denen die Wolframschichten auf den Substraten aufwachsen. Es konnte kein Parameterbereich gefunden werden, mit dem spannungsarme Wolframschichten mit gleichzeitig homogener Spannungsverteilung hergestellt werden konnten. Beide Substratarten verhalten sich aber ähnlich was die ermittelten inneren Spannungen der auf diese Substrate abgeschiedenen Wolframschichten betrifft.

Generell zeigen sich bei der statischen Beschichtung in der Y_W -Richtung (senkrecht zur langen Achse des Targets) höhere Druckspannungen (ca. 900 N/mm^2). In dieser Richtung treten bei Verwendung einer rechteckförmigen Kathode prinzipbedingt auch die größten Schichtdickenabweichungen auf. Die zum Waferrand abnehmende Schichtdicke war nicht die Ursache für die ermittelte Anisotropie der inneren Span-

nungen, da rechteckförmige Waferbruchstücke, die aufgrund ihrer geringen Größe auch in der Y_W -Richtung mit nahezu homogener Dicke beschichtet wurden, vergleichbare anisotrope Spannungsverteilungen aufwiesen.

Durch Anlegen einer Biasspannung kann die Anisotropie bei kleinen Drücken verringert werden. Bei dem zur Erzielung von geringen inneren Spannungen notwendigen hohen Sputterdruck verliert diese Maßnahme an Wirksamkeit. Als Grund für die generell anisotropen inneren Spannungen, die bei der statischen Beschichtung erhalten werden, wird die inhomogene Beschichtungsrate und Winkelverteilung der auf die Substrate auftreffenden Teilchen vermutet. Durch die begrenzte Substrattemperatur kann ein Spannungsausgleich in der aufwachsenden Schicht durch Oberflächendiffusion nur in geringem Umfang wirksam werden.

Weitere Untersuchungen zur Herstellung von spannungsarmen Wolframschichten wurden durch dynamische Beschichtung durchgeführt, da bei diesem Verfahren eine homogenere Beschichtung erzielt werden kann.

4.1.3 Aufbau der Absorberschicht durch dynamische Beschichtung

Für die Herstellung von Schichten mit homogenerer Dicke wird das dynamische Beschichtungsverfahren verwendet. Dazu rotiert der Substrathalter und die Wafer werden nur während des Vorbeifahrens am Target beschichtet. Dadurch ergeben sich entsprechend höhere Prozeßzeiten als bei der statischen Beschichtung. Die Verhältnisse bei diesem Vorgang sind in der Abbildung 4.5 dargestellt.

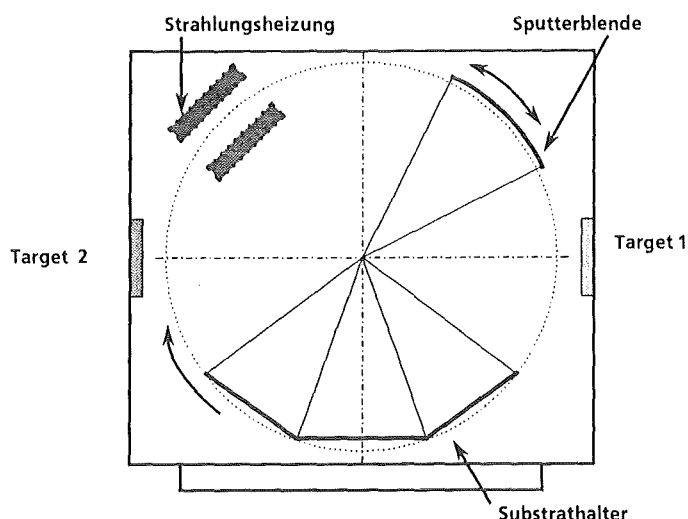


Abb. 4.5: Schematische Aufsicht auf die Sputteranlage beim dynamischen Beschichten

Zur Verkürzung der Prozeßzeit wurde für den Beschichtungsvorgang beim Passieren des Targets eine langsamere Geschwindigkeit verwendet als für den Rest des Drehweges. Dadurch ergeben sich relativ kürzere Prozeßzeiten durch hohe Be-

schichtungsrate bei homogenen Schichtdickenverteilungen als bei konstanter Drehgeschwindigkeit. Auf diese Weise ergeben sich für eine dynamische Beschichtung zur Herstellung der Absorberschicht Prozeßzeiten von ca. 45 Minuten (Dicke der Wolframschicht $d_W = 2,5 \mu\text{m}$).

4.1.3.1 Schichtdickengleichmäßigkeit

Die beim dynamischen Sputtern ermittelten Schichtdickenunterschiede liegen für die Beschichtung von Wafern mit 100 mm Durchmesser für beide Meßrichtungen unter 5%.

4.1.3.2 Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen bei der Beschichtung von Siliziumwafern

Für die Optimierung der inneren Spannungen und deren Anisotropie bei der dynamischen Beschichtung wurde der Einfluß der Biasspannung, der Schichtdicke, des Magnetabstandes und des verwendeten Substrates untersucht. Die Sputterleistung betrug bei allen Versuchen 2 kW, die Beschichtungstemperatur betrug 220°C. Die Beschichtungen von Abhebewafern zeigten ähnliches Verhalten wie die Beschichtungen von Siliziumwafern. Deshalb wurden zunächst weitere Beschichtungsversuche auf Siliziumwafern durchgeführt, um den Arbeitsaufwand für die Herstellung der Abhebewafer möglichst gering zu halten.

Die in den folgenden Diagrammen dargestellten Symbole kennzeichnen den gemittelten Spannungswert der bei jeweils einem Parametersatz beschichteten Wafer. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen vom Mittelwert an.

4.1.3.2.1 Einfluß der Biasspannung

Abbildung 4.6a zeigt den Einfluß einer an den Substraten angelegten Biasspannung auf die inneren Spannungen der auf Siliziumwafer abgeschiedenen Wolframschichten. Die geringsten inneren Spannungen ergeben sich wie bei der statischen Beschichtung bei geerdetem Substrat, die Anisotropie war bei einer Biasspannung von 15 Volt am geringsten.

Genauso wie beim statischen Beschichten werden in der Y_W -Richtung, die mit der Drehrichtung zusammenfällt, bei allen Versuchen die höheren Druckspannungen erzielt. Mit zunehmender Biasspannung nehmen die Druckspannungen in den abgeschiedenen Wolframschichten zu. Es fällt auf, daß die laterale Anisotropie der inneren Spannungen der Wolframschichten beim dynamischen Sputtern kleiner ist (ca. 200 N/mm²) als beim statischen Sputtern (ca. 900 N/mm²).

4.1.3.2.2 Einfluß des Magnetabstandes

In der verwendeten Magnetronspalteranlage läßt sich der Magnetabstand vom Target von der Normalposition um maximal neun Millimeter erhöhen (vgl. Kap.3.1.1). Abbildung 4.6b zeigt den Einfluß eines vergrößerten Magnetabstandes auf die inneren Spannungen bei der Abscheidung von Wolfram auf Siliziumwafer. Mit der Zunahme des Magnetabstandes verringern sich die inneren Spannungen in der Y_W -Richtung (Drehrichtung) nahezu linear. In der X_W -Richtung ist der Spannungsabfall bis zu einem Magnetabstand von fünf Millimetern vergleichbar der Y_W -Richtung. Bei einer weiteren Erhöhung des Magnetabstandes verstärkt sich der Abfall der Zugspannungen in der X_W -Richtung bis zum Übergang in den Druckspannungsbereich. Mit einem Magnetabstand von fünf Millimetern wurde die geringste Anisotropie erreicht (65 N/mm²).

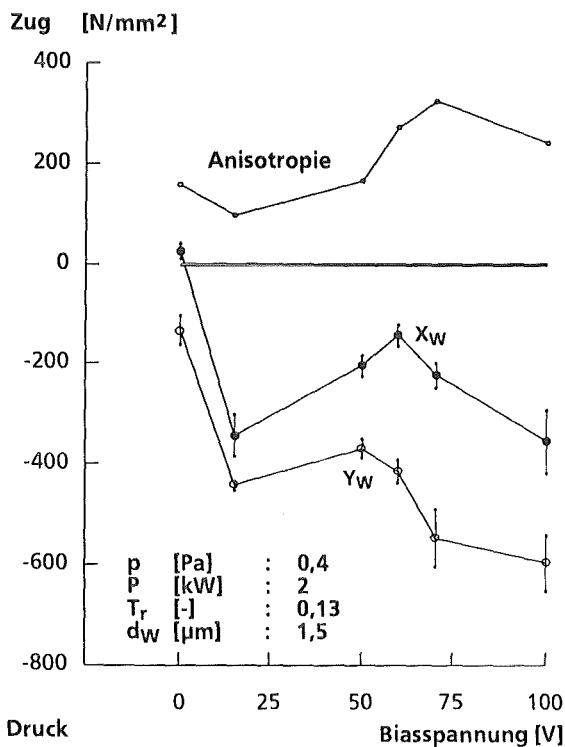


Abb. 4.6a: Einfluß der Biasspannung auf die inneren Spannungen bei der dynamischen Beschichtung von Wolfram auf Siliziumwafer

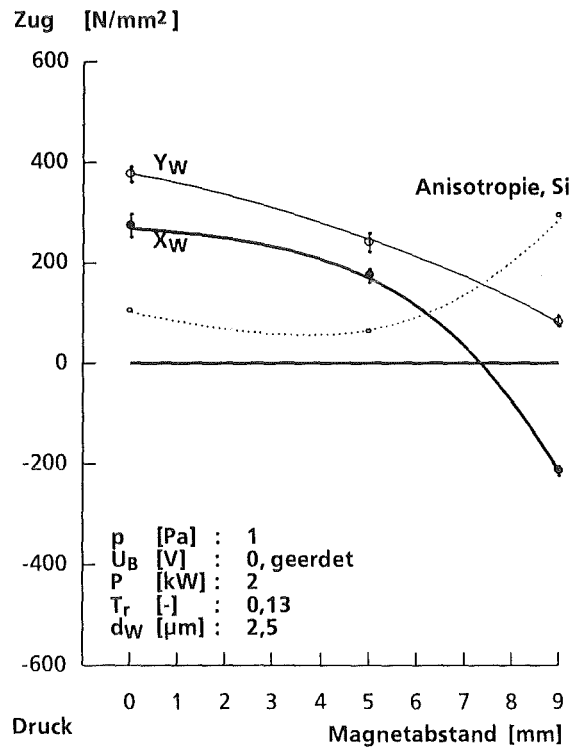


Abb. 4.6b: Einfluß des geänderten Magnetabstandes auf die inneren Spannungen bei der Beschichtung von Wolfram auf Siliziumwafer

4.1.3.2.3 Einfluß des Sputterdruckes

In der Abbildung 4.6c ist der Einfluß des Sputterdruckes auf Anisotropie und innere Spannung dargestellt. Bei einer Versuchsserie wurde eine Biasspannung von 15 V angelegt, bei einer weiteren wurde die Biasspannung auf 75 V erhöht und der Abstand der Magnete vom Target um 5 mm vergrößert.

Durch Erhöhung des Sputterdruckes erfolgte bei beiden Versuchsreihen ein Übergang von Druckspannungen zu Zugspannungen. Für den Fall einer am Substrat angelegten Biasspannung von 15 V und minimalem Magnetabstand vom Target nimmt die Anisotropie mit steigendem Sputterdruck zu.

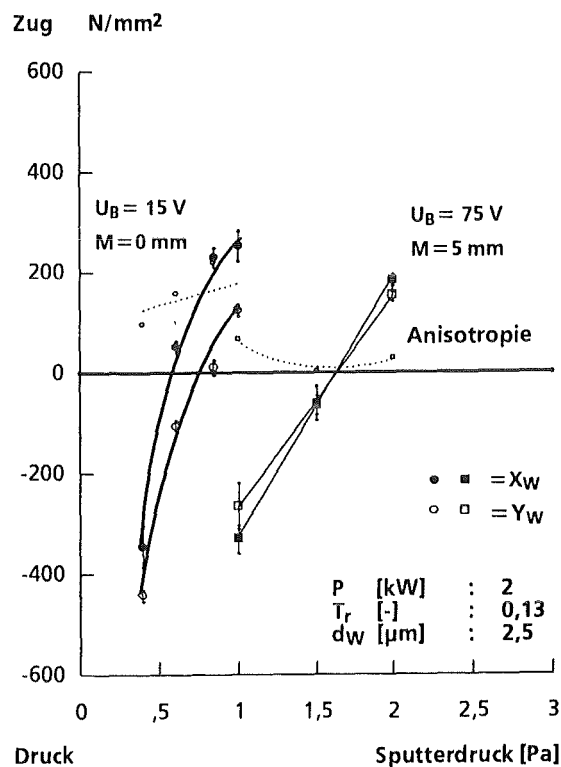


Abb. 4.6c: Einfluß des Sputterdruckes auf die inneren Spannungen bei einer Biasspannung von $U_B=15$ V und minimalem Magnetabstand ($M= 0$ mm) sowie $U_B=75$ V und $M=5$ mm.

Bei der Wolframabscheidung, bei der zusätzlich zu einer erhöhten Biasspannung von 75 V auch der Magnetabstand um 5 mm erhöht wurde, ergibt sich ein anderes Bild. Mit diesem Parametersatz wurden bei einem Sputterdruck von 1 Pa in der X_W -Richtung die höheren Spannungen erzielt als in der Y_W -Richtung. Mit steigendem Sputterdruck werden in der anderen Meßrichtung die höheren Spannungen gemessen. Die Anisotropie wird bei diesem Parametersatz bei einem Druck von ca. 1,5 Pa gleich Null. Der Übergangsdruck von Druckspannungen auf Zugspannungen liegt bei 1,7 Pa.

4.1.3.3 Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen auf Abhebewafern

4.1.3.3.1 Einfluß des Magnetabstandes

Durch die Änderungen des Magnetabstandes zum Target ergab sich für die Abscheidung auf Abhebewafer (siehe Abb. 4.6d) kein wesentlicher Einfluß auf die laterale Anisotropie der inneren Spannungen. Mit der Erhöhung des Magnetabstandes nimmt die Anisotropie zwischen den beiden Meßrichtungen zu. Die inneren Spannungen verschieben sich mit der Erhöhung des Magnetabstandes in beiden Meßrichtungen in Richtung Druckspannung.

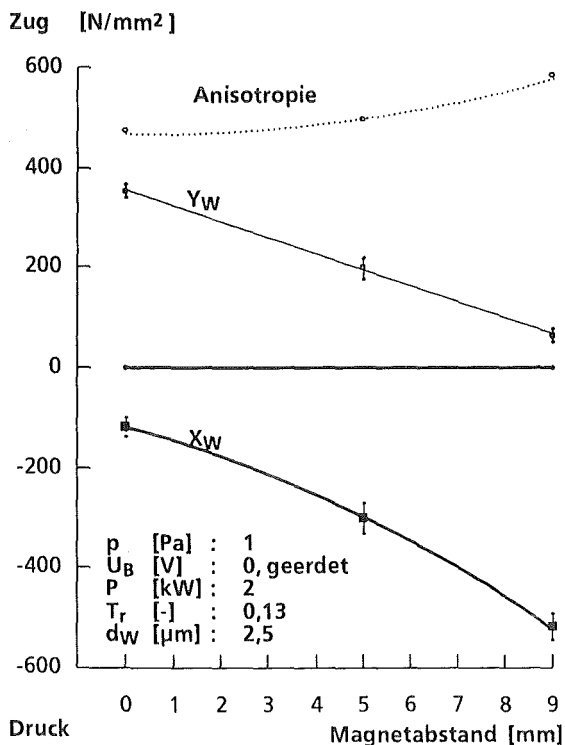


Abb. 4.6d: Einfluß des geänderten Magnetabstandes auf die inneren Spannungen und Anisotropie der auf Abhebewafern aufgesputterten Schichten

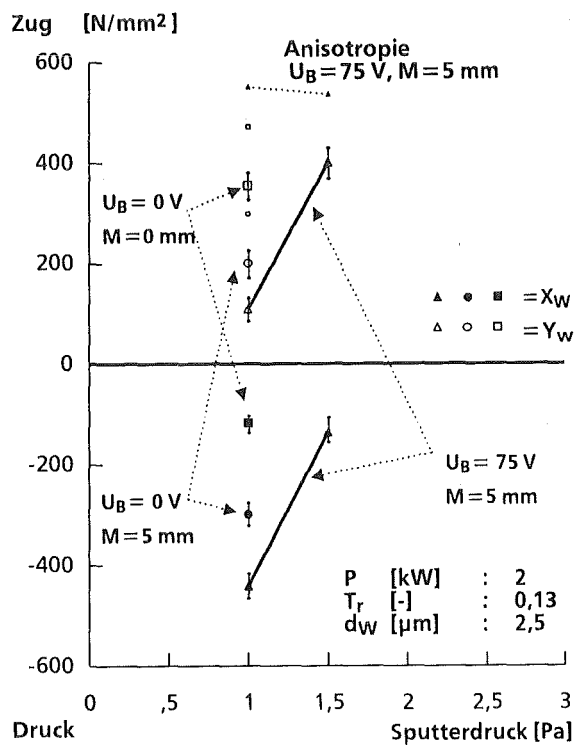


Abb. 4.6e: Einfluß des Sputterdruckes auf die inneren Spannungen von Wolframschichten. Die geringste Anisotropie ergibt sich bei geerdetem Substrat und erhöhtem Magnetabstand (M= 5 mm).

4.1.3.3.2 Einfluß des Sputterdruckes

Bei dem Versuch, die guten Ergebnisse der dynamischen Abscheidung auf Siliziumwafern auf die für den Maskenprozeß vorgesehene Abhebewafer zu übertragen, zeigte sich, daß sich auf Abhebewafern gänzlich andere Spannungen ausbilden. Abbildung 4.6e zeigt die Verhältnisse bei der Beschichtung von Abhebewafern. Für die gleichen Parameter (U_B=75 V Bias, M=5mm), mit dem die Abscheidung von Wolfram auf Siliziumwafern spannungsarm und isotrop möglich ist, zeigen die Beschichtungsversuche auf Abhebewafern gänzlich andere Ergebnisse. Die Anisotro-

pie konnte durch Erhöhung des Sputterdrucks nur in geringem Umfang beeinflusst werden.

4.1.3.4 Diskussion der bei dynamischer Beschichtung erhaltenen inneren Spannungen

Durch die Variation des Magnetabstandes wurde der Anisotropieeffekt für die Abscheidung von Wolfram auf Siliziumwafern bei der dynamischen Beschichtung verringert. Durch die Anpassung des Sputterdruckes in Zusammenhang mit einer Biasspannung von 75 V wurden isotrope spannungsarme Wolframschichten auf Siliziumwafern hergestellt.

Die bei der Beschichtung von Abhebewafern auftretende Anisotropie konnte weder durch Änderungen des Magnetfeldes noch durch entsprechende Anpassung des Sputterdruckes in Zusammenhang mit einer Biasspannung wesentlich verkleinert werden. Die Anisotropie bei der Parametervariation betrug nahezu konstant etwa 500 N/mm^2 . Für die Herstellung von spannungsarmen Wolframschichten auf Abhebewafern mit homogenen Spannungen wurde daher ein neuer Ansatz verfolgt.

4.1.4 Aufbau der Absorberschicht durch quasistatische Beschichtung

Für die quasistatische Beschichtung wurde ein Spezialhalter eingesetzt, der in der Sputteranlage fest eingebaut wurde und einen Wafer aufnehmen kann. Zur Erzielung homogener Spannungsverteilung rotiert der Wafer während der Beschichtung um seinen Mittelpunkt. Der Antrieb des Waferhalters erfolgt von außen mittels eines Getriebemotors und einer biegsamen Welle (siehe Abb. 4.7). Die Drehgeschwindigkeit ist eine Funktion der angelegten Spannung des Netzteils. Die Kontrolle der Drehgeschwindigkeit erfolgte über die Kontrolle des Motorstromes.

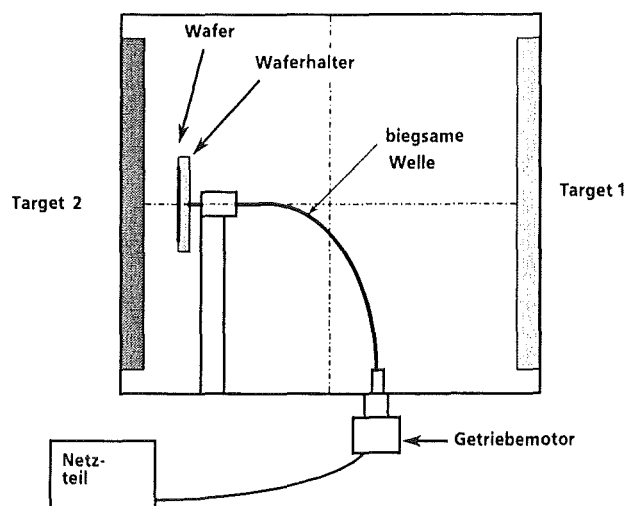


Abb. 4.7: Quasistatische Beschichtung

Die Einbaulage des Spezialhalters wurde so gewählt, daß der normale Substrathalter noch rotieren konnte. Der Abstand des Spezialhalters und damit des zu beschichtenden Substrates zum Target ist daher größer als bei der Verwendung des normalen Substrathalters (90 mm statt 65 mm). Bedingt durch den Aufbau ist der Spezialhalter geerdet, so daß das Anlegen einer Biasspannung bei der Beschichtung und zum Reinigen der Substrate entfallen mußte.

4.1.4.1 Schichtdickengleichmäßigkeit

Abbildung 4.8 zeigt die ermittelten Schichtdickenverteilungen, die sich beim quasistatischen Sputtern auf Wafer mit 100 mm Durchmesser ergeben. Ermittelt wurden maximale Abweichungen von bis zu 10 %. Wird nur der Durchmesserbereich betrachtet, der der Nutzfläche der zur Zeit verwendeten Röntgenmaske entspricht, so liegen die maximalen Schichtdickenunterschiede unter 6 %.

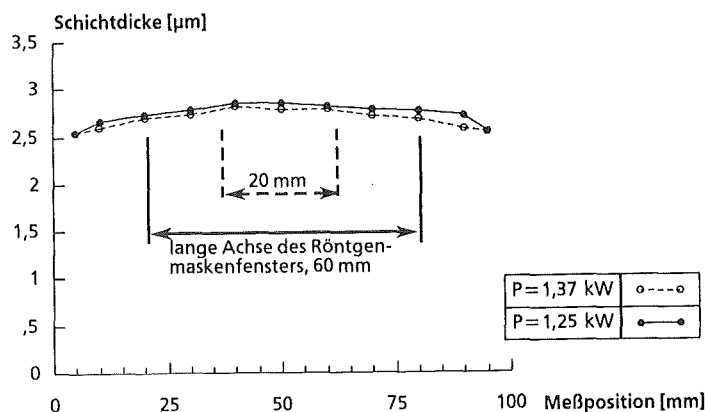


Abb. 4.8: Schichtdickenverteilung bei der quasistatischen Beschichtung

4.1.4.2 Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen bei der Beschichtung von Siliziumwafern

Die Versuche zur quasistatischen Beschichtung wurden analog zur statischen Beschichtung mit standardmäßigem Magnetabstand ($M=0$ mm) durchgeführt. Die in den folgenden Diagrammen dargestellten Symbole kennzeichnen den Mittelwert der inneren Spannungen, die in der X_W - und Y_W -Richtung des Wafers ermittelt wurden. Bei allen Messungen lagen die Unterschiede der Spannungswerte in diesen Meßrichtungen unterhalb 5 %.

4.1.4.2.1 Einfluß der Rotation

Durch den Rotationsvorgang verbessert sich die Homogenität der Schichtdicke im Vergleich zur statischen Beschichtung. Die gleichmäßige Beschichtung führt zu iso-

tropen Spannungsverteilungen. Abbildung 4.9a zeigt den Einfluß der rotierenden Beschichtung auf Siliziumwafern (dreieckige Symbole) im Vergleich zur statischen Beschichtung bei 65 mm (runde Symbole) und 90 mm Abstand (quadratische Symbole) zwischen Substrat und Target. Bei der statischen Beschichtung nimmt mit zunehmendem Substratabstand die Anisotropie der inneren Spannungen zu. Deshalb läßt sich folgern, daß die Verminderung der Anisotropie bei der quasistatischen Beschichtung nicht auf den vergrößerten Abstand zwischen Target und Substrat sondern auf die Rotation des Substrates zurückzuführen ist. Ein direkter Übergang von Druckspannungen zu Zugspannungen, allein durch die Rotation des Substrates wie von Thornton beschrieben [Tho89], wurde nicht gefunden.

4.1.4.2.2 Einfluß des Sputterdruckes

Mit dem steigenden Sputterdruck wurde auch bei der quasistatischen Beschichtung auf Siliziumwafer ein Übergang von Druckspannungen zu Zugspannungen erreicht (Abb. 4.9a). Der Sputterdruck für die spannungsarme Beschichtung der Siliziumwafer wurde zu 2,5 Pa ermittelt.

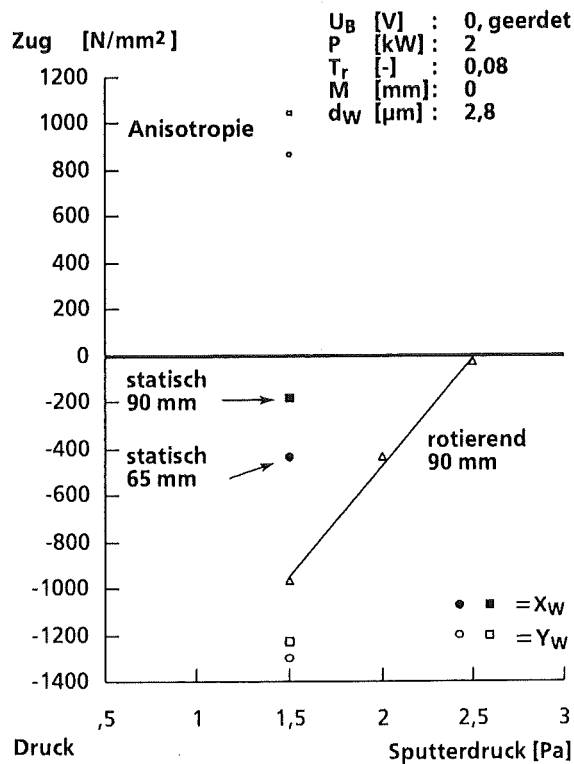


Abb. 4.9a: Einfluß der Rotation und des Sputterdruckes auf die inneren Spannungen der Wolframschicht bei der quasistatischen Beschichtung auf Siliziumwafer

4.1.4.3 Parametervariation zur Einstellung der inneren Spannungen bei der Beschichtung von Abhebewafern

4.1.4.3.1 Einfluß des Sputterdruckes

Für die quasistatische Beschichtung von Abhebewafern konnte selbst mit dem maximal möglichen Sputterdruck von 3 Pa kein Übergang zu Zugspannungen erreicht werden (Abb. 4.9b). Bei einem Sputterdruck von 1 Pa wurden so hohe Druckspannungen erzeugt, daß der Verbund aus Titanmembran und Wolframschicht Falten warf. Die auf Abhebewafer abgeschiedenen Wolframschichten wiesen wesentlich höhere Druckspannungen auf, als die auf Siliziumwafer abgeschiedenen.

4.1.4.3.2 Einfluß der Sputterleistung

Bei der quasistatischen Beschichtung auf Abhebewafer konnte die Erzeugung von Wolframschichten mit Zugspannungen allein durch die Variation des Sputterdruckes nicht erreicht werden. Abbildung 4.9c zeigt, daß spannungsarme Wolframschichten durch quasistatisches Sputtern hergestellt wurden, indem die Sputterleistung variiert wurde.

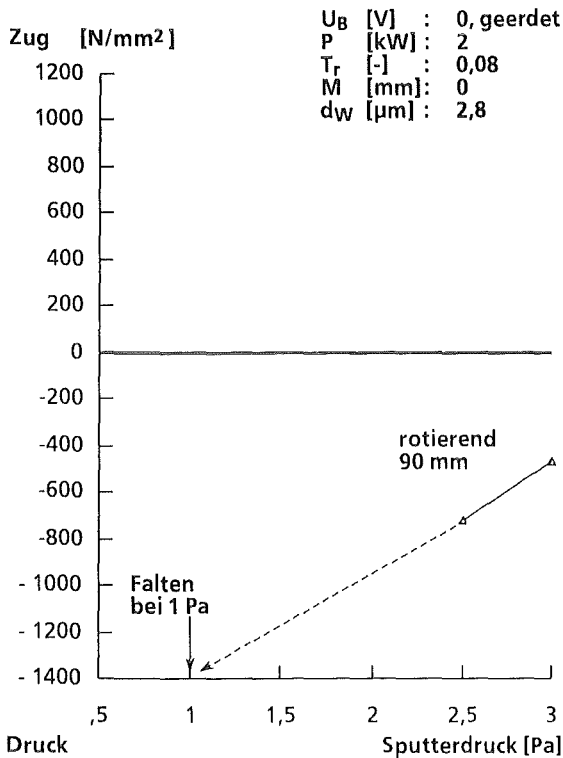


Abb. 4.9b: Einfluß des Sputterdruckes auf die inneren Spannungen bei der Beschichtung von Wolfram auf Abhebewafer

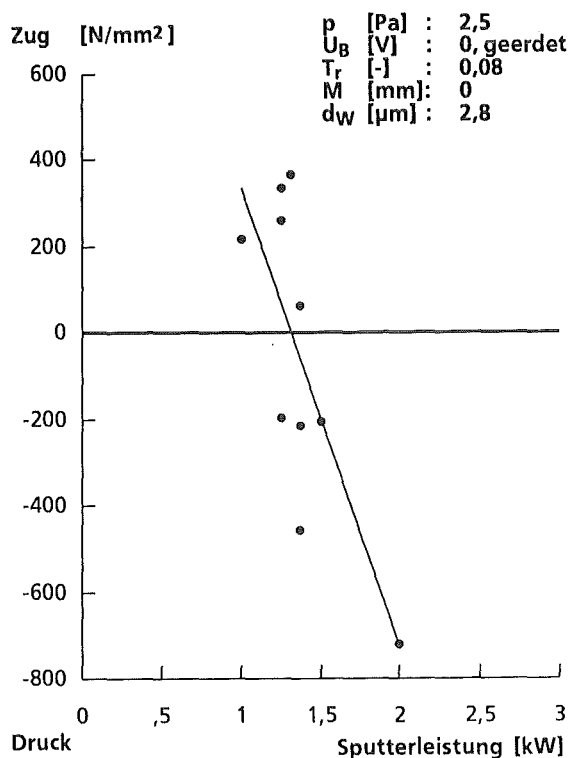


Abb. 4.9c: Einfluß der Sputterleistung auf die inneren Spannungen bei der Beschichtung von Wolfram auf Abhebewafer

Für diese Versuche wurde nicht der Maximaldruck der Maschine verwendet, da die bei maximalem Sputterdruck hergestellten Wolframschichten bereits matte Ober-

flächen ohne metallischen Glanz aufwiesen. Dieser Verlust an Reflektivität mit steigendem Druck zeigt nach Thornton [Tho89] den Übergang von der Zone T zur Zone 1, in der ein poröses Gefüge erhalten wird, das auch zu geringerer Röntgenabsorption führt [Ito91].

Der Übergang von Druckspannungen zu Zugspannungen liegt im Leistungsbereich zwischen 1,25 und 1,37 kW. Mehrfache Beschichtungsversuche bei diesen Leistungen zeigten allerdings Schwankungen der inneren Spannungen in dem Übergangsbereich. Abbildung 4.9d zeigt die Ergebnisse der Leistungsvariation (Abb. 4.9c) aufgetragen über dem Entladestrom des Plasmas. Man erkennt einen schärferen Übergang vom Druckspannungsbereich in den Zugspannungsbereich mit sinkendem Entladungsstrom im Bereich zwischen 4,1 und 4,3 A. Dies ist ein Hinweis darauf, daß sich die inneren Spannungen in diesem Fall besser über die Kontrolle des Entladungstromes als der Sputterleistung einstellen lassen.

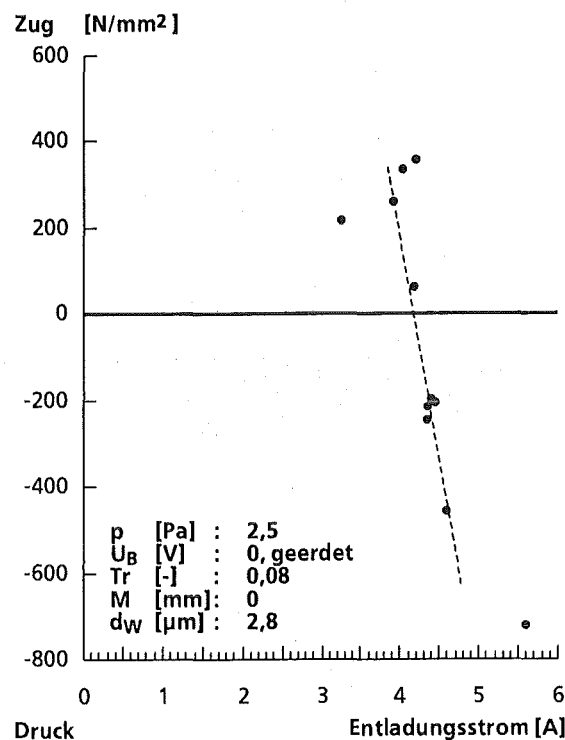


Abb. 4.9d: Abhängigkeit der inneren Spannungen vom Entladungsstrom bei der Beschichtung von Wolfram auf Abhebewafer

4.1.4.4 Diskussion der bei quasistatischer Beschichtung erhaltenen inneren Spannungen

Durch die Rotation der Substrate konnten sowohl für die Beschichtung von Siliziumwafern als auch der für den Maskenprozeß vorgesehenen Abhebewafer homogene Schichtdicken und geringe innere Spannungen erzielt werden. Die Einstellung von

Zugspannungen bei der Beschichtung von Abhebewafern erfordert eine Absenkung der Sputterleistung. Für die reproduzierbare Herstellung von Wolframschichten in diesem Parameterbereich ist eine genaue Kontrolle der Sputterparameter, besonders des Entladungsstromes notwendig. Verbesserungen bezüglich der Reproduzierbarkeit bei der quasistatischen Beschichtung sind durch Anlegen einer Biasspannung zu erwarten. Dies würde vergleichbare Startbedingungen vor der Beschichtung durch das Anätzen der Substrate ermöglichen. Durch das Anlegen einer Biasspannung bei der Beschichtung soll auch ein weniger steiler Übergang der inneren Spannungen zwischen Zug- und Druckspannungsbereich erzielt werden können [Ben84].

4.1.4.5 Homogenität der inneren Spannungen bei der quasistatischen Beschichtung

Wie aus der Abbildung 4.8 hervorgeht, ergeben sich bei der quasistatischen Beschichtung Schichtdickenabweichungen über den beschichteten Wafer. Daher wurde untersucht, inwieweit sich dadurch Änderungen der inneren Spannungen in der abgeschiedenen Wolframschicht in Abhängigkeit des Abstandes vom Waferzentrum ergeben. Die Ermittlung der radialen und tangentialen Spannungsverteilung erfolgte mittels Tastschnittgerät durch jeweils mehrere 5 mm lange Messungen senkrecht und parallel zur Waferachse (siehe Abb. 4.10a). Um deutliche Spannungsunterschiede messen zu können wurde ein Wafer mit relativ hoher Druckspannung ausgewählt.

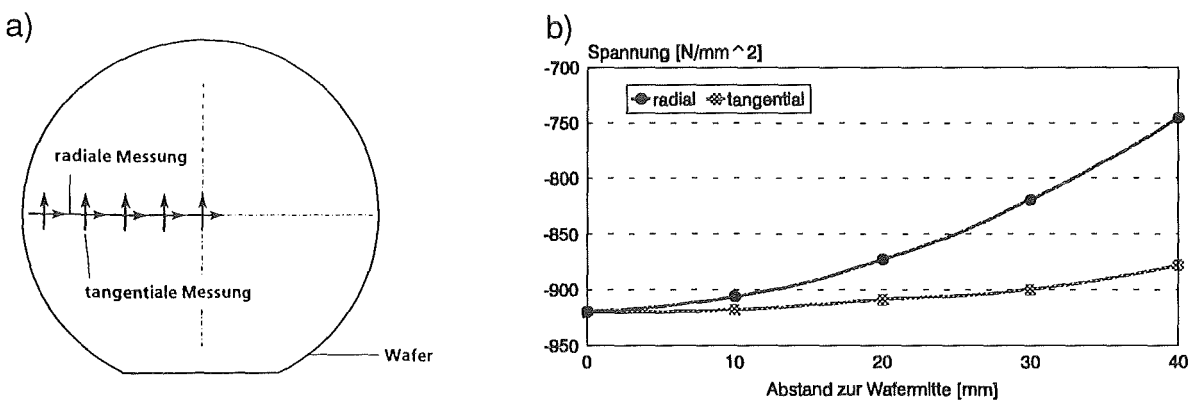


Abb. 4.10: a) Darstellung der Meßrichtungen zur Ermittlung der radialen und tangentialen Spannungen
b) Verlauf der radialen und tangentialen Spannung.

Die in Abbildung 4.10b dargestellten Spannungen wurden unter Berücksichtigung der sich zum Wafertrand hin ändernden Schichtdicke in Abhängigkeit der Meßposition ermittelt (siehe Kap. 3.1.3). In dem Durchmesserbereich, der der Nutzfläche der Röntgenmaske entspricht (Membranbereich nach dem Abheben), wurden Änderungen der radialen Spannungen von < 4 % ermittelt. Die Abweichung der tangentialen

Spannungen bezogen auf die radialen Spannungen liegen in diesem Bereich unter 8%.

4.1.5 Vergleich der verschiedenen Beschichtungsarten

In der nachfolgenden Tabelle sind die wesentlichen Ergebnisse dargestellt, die bei der Herstellung der Absorberschicht mit den verschiedenen Verfahren erzielt wurden. Sowohl beim statischen als auch beim dynamischen Sputtern auf die für den Maskenprozeß vorgesehenen Abhebewafer zeigte sich eine höhere Anisotropie der inneren Spannungen in der aufgetragenen Wolframschicht.

Beschichtung	statisch	dynamisch	quasistatisch
Anisotropie [N/mm ²]			
auf Siliziumwafer			
- durchschnittlich	ca. 900	ca. 200	-
- minimal	ca. 250	ca. 65	-
auf Abhebewafer			
- durchschnittlich	ca. 1100	ca. 500	-
- minimal	ca. 1000	ca. 300	-
Schichtdickenänderung [%]			
- Nutzfläche der Röntgenmaske ⁽²⁾	< 4	< 3	< 4
- X _W -Richtung 100 mm Wafer	< 3	< 3	< 10
- Y _W -Richtung 100 mm Wafer	< 25	< 5	< 10
Sputterzeit für 2,5 µm [min]			
U _B = 0V, p = 1,5 Pa, P = 2 kW	17,5	45	26
U _B = 0V, p = 2,5 Pa, P = 1,3 kW			41

Tabelle 4.2: Vergleich der Anisotropie, der Schichtdickenänderung und der Sputterzeit bei den verschiedenen Verfahren zur Herstellung der Wolframabsorberschicht
(2): Lange Seite der Röntgenmaske parallel zur X_W-Richtung des Wafers !

Die auftretende laterale Anisotropie in den inneren Spannungen der Wolframschichten sowohl bei der dynamischen als auch bei der statischen Beschichtung kann mit dem Einfluß des Einfallswinkels beim Materialeintrag auf die Substrate in Zusammenhang mit dem Beschuß der aufwachsenden Schicht mit reflektierten neutralen Gasatomen erklärt werden [Hof83], wenn man den postulierten "atomic peening" Effekt [Heu70] als Ursache für den Übergang von Zugspannungen zu Druckspannungen sieht. Druckspannungen sollen nach diesem Modell durch den Einbau von

Gasatomen oder von Sputtermaterial auf Zwischengitterplätze entstehen (Dehnung der Elementarzellen).

Die Wahrscheinlichkeit der Reflektion und der Anteil der ursprünglichen Ionenenergie nehmen beide mit dem Verhältnis von Targetmaterialmasse zu Ionenmasse zu. Dies kann die Massenabhängigkeit des Übergangsdruckes erklären. Für Targetmaterialien mit hoher Atommasse (Wolfram) relativ zum Sputtergas können die reflektierten Argonatome nahezu die Energie der einfallenden Ar^+ -Ionen erreichen (einige hundert eV). Dies bedeutet, daß die Atome genügend Energie besitzen um in die aufwachsende Schicht einzudringen und damit in die aufwachsende Schicht eingebaut zu werden. Die kinetische Energie der ausgelösten Targetatome steigt ebenfalls mit der Massenzahl des Targetmaterials. Ermittelt wurden zwischen 6 eV für Aluminium bis zu 20 eV für Wolfram [Tho89].

Da Energie und Fluß der rückgestreuten neutralen Gasatome und des Sputtermaterials eine Funktion des Emissionswinkels vom Target sind, erklären die geometrischen Unterschiede die verschiedenen Ergebnisse, die mit unterschiedlichen Kathodengeometrien erzielt werden [Hof82]. Externe Beschichtungen unter Verwendung einer rechteckigen Magnetronkathode (Fa. Doduco) wiesen bei ähnlichen Parametern ebenfalls lateral anisotrope innere Spannungen in den abgeschiedenen Wolframschichten auf.

Die auftretende Anisotropie stellt damit ein maschinenbedingtes Problem bei der Beschichtung hochschmelzender Materialien unter der Verwendung rechteckförmiger Magnetronkathoden dar, besonders wenn die Beschichtung bei kleinen Substrattemperaturen stattfindet.

Die Homogenität der Schichtdicke ist für alle Beschichtungsarten im Bereich der derzeit genutzten Folienfläche ausreichend. Wenn einmal die gesamte Folienfläche genutzt werden soll erscheint die statische Beschichtung wegen der Abweichungen bis 25 % als ungeeignet.

Die Beschichtungsdauer ist beim dynamischen und quasistatischen Verfahren relativ hoch. Dies fällt aber im Vergleich zu den für die Substratmontage, Evakuierung und Konditionierung der Anlage benötigten Zeiten nicht ins Gewicht.

Die gewünschten inneren Spannungen der Wolframschichten konnten auf Abhebewafern nur durch quasistatische Beschichtung erreicht werden.

4.1.6 Eigenschaften der aufgesputterten Wolframschichten

Von wesentlichem Interesse für die Herstellung von Röntgenmasken ist die Klärung der Frage, ob sich durch Erholungseffekte oder Alterung der Schichten die durch

den Herstellungsprozeß eingebrachten Spannungen ändern. Bei Änderungen der inneren Spannungen in der Absorberschicht sind Form- und Positionsänderungen auf der Röntgenmaske zu befürchten.

Das Gefüge von Sputterschichten unterscheidet sich in der Korngröße, in der Leerstellen- und der Versetzungsdichte um Größenordnungen von dem in erschmolzenen Materialien vorliegenden Struktur [Gro89]. Daher können Erholungsvorgänge und Spannungsänderungen bei aufgesputterten Schichten mit hohem Schmelzpunkt schon durch Erwärmen bei relativ niedrigen Temperaturen einsetzen (200°C/1h) [Ito91b].

Weiterhin können bei der Herstellung von Wolframschichten zwei verschiedene Modifikationen oder Mischungen entstehen. In der Tabelle 4.3 sind typische Eigenschaften dieser Modifikationen dargestellt. Die β -Phase erweist sich dabei als nicht alterungsbeständig, unter Lufteinfluß entwickeln sich Druckspannungen. Schichten aus der Mischphase oder aus purer α -Phase zeigten keinen Alterungseffekt [Gos87].

	α -Wolfram	β -Wolfram
Größe der Elementarzelle [nm]	0,316	0,504
theor. Dichte ⁷ [g/cm ³]	19,4	19,0 - 19,1
Kristallgitter	krz	W ₃ W
Korngrößen [nm]	150 - 250 groß	5 - 10 klein
elektrischer Widerstand [$\mu\Omega$ cm]	30 - 40	100 - 300
typische innere Spannung	Druck	Zug
Übergangstemperatur $\beta \Rightarrow \alpha$ Phase [°C]		100-200
Temperaturbereich für die Entstehung von $\alpha+\beta$ Phase [°C]		520 - 625
Temperatur für die Entstehung reiner α -Phase [°C]		>625
Verhalten	stabil	metastabil, unbeständig bei Lufteinfluß

Tabelle 4.3 Vergleich der beiden in dünnen Schichten vorliegenden Wolfram-Modifikationen. Quellen: [Pet73], [Mor74], [Gos87]

⁷: Berechnet aus der Größe der Elementarzellen

Das Auftreten der verschiedenen Phasen kann durch die Prozeßparameter beeinflusst werden. Spuren von Sauerstoff begünstigen die Ausbildung der metastabilen β -Phase [Pet73] und erfordern daher einen niedrigen Basisdruck vor dem Beginn der Beschichtung. Für die Ausbildung der einzelnen Phasen wurde auch ein Schichtdickeneinfluß nachgewiesen [Shi81]. Metastabiles β -Wolfram wurde nur in Schichten nachgewiesen, die dünner als zwei Mikrometer waren.

4.1.6.1 Standzeitverhalten der aufgesputterten Schichten

Zur Ermittlung der Alterung wurde die Spannung der Wolframschichten mehrere Monate nach der Herstellung nochmals nachgemessen. Die Lagerung der beschichteten Wafer erfolgte an Luft. Die Kontrolle quasistatisch beschichteter Abhebewafer 5 Monate nach der Beschichtung zeigte innerhalb der Meßgenauigkeit keine Änderung der inneren Spannungen (max. 3%).

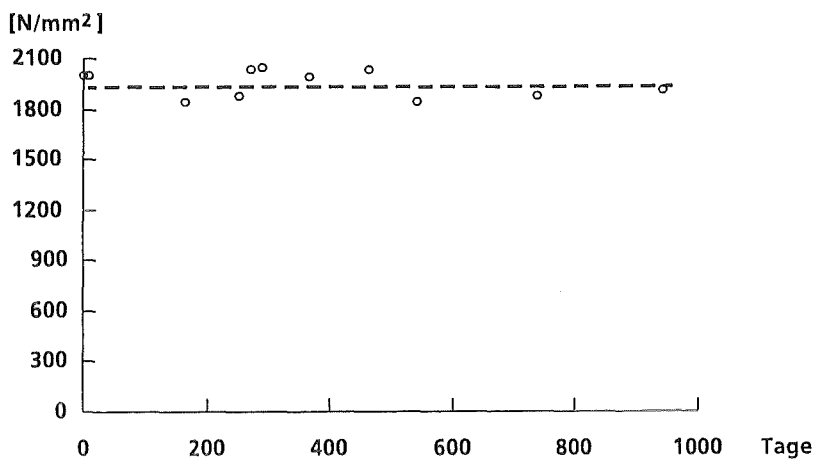


Abb. 4.11: Änderung der inneren Spannung einer 0,6 μm dicken Wolframschicht in einem Zeitraum von 31 Monaten.

Abbildung 4.11 zeigt die ermittelten Spannungen einer 0,6 μm dicken Wolframschicht mit hohen Druckspannungen (dynamische Beschichtung) in einem Zeitraum von 31 Monaten. Es ist keine signifikante Änderung der Spannungen festzustellen.

4.1.6.2 Temperaturbeständigkeit

Der in der Tabelle 4.3 angegebene Temperaturbereich für den Übergang von der β -Phase zur α -Phase fällt in den Temperaturbereich, der bei der Strukturierung der Wolframschichten (Tempern des Resists, reaktives Ionenätzen) auftritt [Kad87]. Untersucht wurde daher der Einfluß verschiedener Temperschritte auf die inneren Spannungen. Die verschiedenen Versuchsreihen und die Ergebnisse sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

In dem Temperaturbereich der primären Strukturerzeugung (<200°C) zeigten sich keine Änderungen der Spannungen in den Wolframschichten. Mehrstündiges Ausheizen bei 400 °C führte zu reproduzierbaren Verfärbungen der Wolframschichten. Wolfram beginnt bei Vorhandensein von Sauerstoff ab 400°C zu oxidieren. EDX-Untersuchungen der blauen Schichten, die sich auf der Wolframoberfläche gebildet hatten, zeigten einen hohen Sauerstoffgehalt. Laut Ullman [Ull67] handelt es sich bei der blauen Schicht um das Wolframoxid W_2O_5 , bei der brauen um WO_2 . Die Dicke der blauen Oxidschicht wurde anhand von REM-Aufnahmen zu ca. 200 nm ermittelt.

Da vermutet wurde, daß der Spannungsabfall der Wolframschichten mit Zugspannungen nach einstündigem Tempern bei 400 °C auf eine beginnende Oxidbildung aufgrund nicht ausreichender Vakuumverhältnisse zurückzuführen war, wurden weitere Versuche in einem Vakuumofen unter Hochvakuumbedingungen durchgeführt. Bei einem mehrstündigen Tempern bei 300 °C wurden sowohl bei Wolframschichten mit Zug- als auch mit Druckspannungen keine Änderungen der inneren Spannungen im Rahmen der Meßgenauigkeit ermittelt. Der in Tabelle 4.4 dargestellte Tempersschritt mit einem Abhebewafer ohne Wolframschicht führte aber schon zu einer Erhöhung der inneren Zugspannungen in der Titanfolie um 150 N/mm^2 auf 350 N/mm^2 . Dies bedeutet eine Erhöhung um 65% gegenüber der in der Titanmembran bei der Herstellung eingestellten Spannung .

Substrat	Prozeß	Ergebnis / Spannungsänderung
Si-W (+)	200°C / 1 h(1)	< ± 5%
Si-W (+)	200°C / 6 h(1)	< ± 5%
Si-W (+)	400°C / 1 h(1)	Braunfärbung, Spannungsabfall um ca. 40 N/mm^2
Si-W (+)	400°C / 10 h(1)	Lila-blaue Verfärbung der Wolframschicht, sowie Spannungsabfall um ca. 180 N/mm^2
AHW-W (+,-)		Blaufärbung, Ti-W Verbund zerplatzt beim Abkühlen
Si-W (+,-)	300°C / 3 h(2)	< ± 5%
AHW		Steigerung der Zugspannung um 150 N/mm^2

Tabelle 4.4: Ergebnisse verschiedener Temperprozesse mit Wolframschichten auf Siliziumwafern (Si-W) und Abhebewafern (AHW-W) bzw. mit einem Abhebewafer ohne Wolframschicht (AHW).

(+): Wolframschicht mit Zugspannung, (-): Wolframschicht mit Druckspannung

(1): Vakuumofen mit Drehschieberpumpe, Basisdruck ca. 10^{-1} hPa (VT 5050, Leybold Heraeus)

(2): Vakuumofen mit Turbomolekularpumpe, Basisdruck $< 3 \times 10^{-4} \text{ hPa}$ (Fa. GERO)

Die durch Magnetronspütern hergestellten Wolframschichten erwiesen sich als alterungsbeständig und temperaturstabil, wenn der Temperprozeß unter entsprechend guten Vakuumbedingungen erfolgte. Die beobachteten Spannungsänderungen beim Tempern in einem Vakuum von ca. 10^{-1} hPa sind demnach auf die Oxidbildung auf dem Wolfram zurückzuführen. Spannungsänderungen durch die Temperprozesse, die auf einen Phasenübergang hinweisen, wurden nicht beobachtet.

Widerstandsmessungen (Vier-Punkt-Messungen) an den aufgesputterten Schichten ergaben in Abhängigkeit der verwendeten Sputterparameter Werte im Bereich von 7,8 - 14,4 $\mu\Omega\text{cm}$ und deuten damit ebenfalls auf das Vorhandensein der α -Phase hin (vgl. Tabelle 4.3).

4.1.6.3 Dichte

Die Röntgenabsorption wird neben der Ordnungszahl im wesentlichen durch die Dichte beeinflusst. Bei der Berechnung der für die Röntgenmasken notwendigen Absorberdicke wird in der Regel von einem Literaturwert ausgegangen (siehe Kap. 2.1) [Mai89]. Die Dichte von aufgesputterten Materialien kann sich jedoch aufgrund von eingebautem Sputtergas und der durch den Beschichtungsprozeß verursachten hohen Zahl von Gitterdefekten von dem Wert unterscheiden, der für Halbzeuge erzielt wird [Gro89].

Daher wurde die Dichte einiger aufgesputterter Wolframschichten gravimetrisch bestimmt, um den Fehler abzuschätzen, der bei der Berechnung der benötigten Absorberdicke gemacht wird, wenn nicht die tatsächliche Dichte des aufgesputterten Wolframs berücksichtigt wird. Die Schichtdickenverteilung der Wolframschicht wurde durch jeweils 19 Meßpunkte entlang der X_W - und Y_W -Richtung über die gesamte Waferbreite mittels Tastschnittgerät bestimmt. Die Wolframschicht wurde dazu mit Wasserstoffsuperoxyd und einer fotolithographisch erzeugten Resistmaske strukturiert. Aus dem Mittelwert der Schichtdicke und der beschichteten Fläche wurde das Volumen der aufgesputterten Schicht (ca. 22 mm^3) berechnet. Die Bestimmung der Massen der aufgetragten Wolframschichten erfolgte mit Hilfe einer Analysenwaage (Mettler AT 460, Auflösung 0,01 mg) durch Wiegen der Proben nach der Beschichtung und nach dem kompletten Entfernen der Wolframschicht. Die ermittelten Wolframdichten lagen im Bereich von $18,1 - 18,85 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 5\%$) und lagen damit maximal 7% unter dem Literaturwert von $19,3 \text{ g/cm}^3$ [Kin88].

4.1.6.4 Argongehalt

Der Argongehalt der aufgesputterten Schichten wurde im Rasterelektronenmikroskop mittels Röntgenmikroanalyse (EDX) untersucht. Bei diesem Verfahren

werden durch den Elektronenbeschuß des zu untersuchenden Materials Elektronen aus den inneren Elektronenschalen herausgeschlagen. Bei dem Wiederauffüllen dieser Schalen wird eine für jedes Atom charakteristische Röntgenstrahlung emittiert. Diese Strahlung wird in einem energiedispersiven Halbleiterspektrometer ausgewertet.

Argon konnte anhand der EDX-Spektren nicht nachgewiesen werden. Der Argongehalt der Schichten liegt damit unter der Nachweisgrenze von weniger als 1% .

4.2 Herstellung der Maskierungsschicht

Als Material für die Maskierungsschicht wurde aufgrund der geringen Abtragsraten in fluorhaltigen Plasmen Nickel ausgewählt (siehe Kap. 2.3.2). Als notwendige Schichtdicken wurden für die Strukturierung mit CF_4 und SF_6 als Ätzgas ca. 360 nm bzw. 150 nm ermittelt. Das Aufbringen der Nickelschicht erfolgte durch dynamisches Sputtern um eine möglichst homogene Schichtdickenverteilung zu erreichen. Dies ist besonders wichtig, da bei der Strukturübertragung durch Sputterätzen für Metallschichten in der Regel wesentlich geringere Abtragsraten erreicht werden als für die als Abdeckung verwendeten Resiste. Um lange Überätzzeiten und den damit verbundenen Strukturverlust zu vermeiden, muß die zu strukturierende Metallschicht eine möglichst gleichförmige Schichtdicke aufweisen.

Vor der Beschichtung wurde das Target mit steigender Leistung mehrere Minuten eingesputtert und die zu beschichtenden Substrate zur Reinigung der Wolframoberflächen drei Minuten angeätzt. Die Substrattemperatur bei den Beschichtungen betrug 220°C .

Für die Herstellung einer 150 nm dicken Nickelschicht werden bei der dynamischen Beschichtung vier Umläufe benötigt ($p= 0,67 \text{ Pa}$, $P= 1,4 \text{ kW}$, $U_B= 100 \text{ V}$). Als innere Spannungen der dynamisch aufgesputterten 150 nm dicken Nickelschichten wurden $27 \text{ N/mm}^2 \pm 6 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

4.3 Strukturierung der Resiststruktur

Die Strukturierung der Primärstruktur erfolgt im Anschluß an die Herstellung der Maskierungsschicht. Für die Herstellung von Strukturen mit lateralen Abmessungen von weniger als einem Mikrometer eignen sich die direkte Elektronenstrahlithographie als auch die optische Lithographie, wenn im letzteren Fall nur geringe Schichtdicken strukturiert werden müssen.

4.3.1 Elektronenstrahlolithographie

Für die Strukturierung der dünnen Maskierungsschicht durch direkte Elektronenstrahlolithographie wurde zuerst der standardmäßig für die Herstellung von Chrom-Glasmasken und zur Zwischenmasken-Herstellung verwendete Resist KTI 950K (PMMA, Fa. Shipley) untersucht. Dieser Resist zeichnet sich durch ein sehr hohes Auflösungsvermögen bei geringer Empfindlichkeit aus (lange Schreibzeiten). Nachteilig ist die höhere Abtragsrate bei der Übertragung der Strukturen in die Maskierungsschicht mit dem Argonplasma im Vergleich zu Resisten auf Phenolharzbasis (siehe auch Kap. 4.4). Als notwendige Resistdicke werden mehr als das dreifache der zu strukturierenden Nickelschicht benötigt.

Als weiterer Elektronenstrahlresist für die Strukturierung der Maskierungsschicht wurde AZPN100 (Hoechst) untersucht. Dabei handelt es sich um einen Negativresist auf Phenolharzbasis, der bei der Elektronenstrahlolithographie eine wesentlich höhere Empfindlichkeit aufweist als KTI950K. Aufgrund dieser hohen Empfindlichkeit ergeben sich Probleme mit der direkten Elektronenstrahlolithographie bei der Herstellung von sehr schmalen Strukturen, die durch die hohe Rückstreuung des Wolframs verursacht wird [Pet73]. Die mit diesem Resist erzielbaren Selektivitäten beim Sputterätzen von Nickel sind mit den in der optischen Lithographie verwendeten Resists vergleichbar (siehe Kap. 4.4). Die notwendige Resistdicke für den Strukturierungsprozeß muß mindestens die Dicke der Nickelschicht aufweisen.

4.3.2 Optische Lithographie

Für die Strukturierung durch optische Kontaktkopie unter Verwendung einer Chrom-Glasmasken wurde als Resist AZ1350SF (Hoechst) untersucht. Mit diesem Resist konnten beim Kontaktkopieren in einer 0,5 µm dicken Resistschicht minimale Strukturbreiten von 0,4 µm realisiert werden. Mit diesem Resist wurden auch die geringsten Abtragsraten beim Sputterätzen erreicht. Als minimale Resistdicken werden dreiviertel der Nickelschichtdicke benötigt.

4.4 Strukturierung der Maskierungsschicht

Die Übertragung der Resiststruktur in die dünne Nickelschicht durch Sputterätzen mittels Argonionen erfolgte in der gleichen Ionenätzanlage wie die Strukturierung der Absorberschichten mit fluorhaltigen Ätzgasen. Dies macht einen Reinigungsschritt vor dem Start der Sputterätzung notwendig. Dazu wird in der leeren Anlage über mehrere Stunden ein Sauerstoffplasma aufrechterhalten. Beim Reinigungsschritt werden noch in der Anlage verbleibende Reste von Fluor und fluorhaltigen Verbindungen entfernt. Diese Reste führen sonst zu drastisch erhöhten Abtragsraten der Resiste gegenüber der Abtragsrate von Nickel.

	Ni	KTI950K	AZPN100	AZ1350SF
Abtragsrate [nm/min]	0,9 ± 0,08	8,3 ± 0,1	0,84 ± 0,07	0,67 ± 0,03
Selektivität (Resist / Ni)		9,2	0,93	0,74
minimale Resistdicke (150 nm Ni) [nm]		1400	260	210

Tabelle 4.5: Abtragsraten der verschiedenen Resiste im Vergleich zur Nickelschicht sowie die daraus sich ergebenden Selektivitäten und notwendigen Resistdicken zur Strukturierung.

Die Strukturierung erfolgte bei kleinen Plasmaleistungen (15 W), da bei dieser geringen Leistungsdichte (40 mW/cm²) die besten Selektivitäten zwischen Resist- und Metallschichten in der vorhandenen Maschine erreicht werden. Bei dieser Leistungsdichte ergibt sich eine Biasspannung von ca. 300 V. Der Prozeßdruck betrug jeweils 1 Pa, der Gasfluß 50 sccm. Die bei diesem Parameterbereich erzielten Selektivitäten sind in der Tabelle 4.5 dargestellt. Als gesamte Prozeßzeit ergaben sich 300 Minuten. In dieser Zeit ist eine Überätzzeit von 45 % enthalten, die sicherstellen soll, daß keine Nickelreste an ungewünschten Stellen auf den Proben zurückbleiben. Die dargestellten minimal notwendigen Resistdicken ergeben sich aus den Selektivitäten unter Berücksichtigung der Überätzzeit.

4.5 Strukturierung der Absorberschicht

Die Verwendung von Wolfram für die Herstellung hochintegrierter Schaltkreise bietet mehrere Vorteile gegenüber den Aluminiumlegierungen. Die hohe Temperaturbeständigkeit macht es geeignet für hohe Prozeßtemperaturen, die in den Fertigungsprozessen benötigt werden. Wolfram wird daher in der Mikroelektronik als Kontaktschicht, als Diffusionsbarriere und in der Verdrahtungsebene eingesetzt. Die Strukturierung von Wolfram und Wolframverbindungen durch reaktive Trockenätzprozesse (RIE) wird für die Herstellung hochintegrierter Schaltkreise benötigt und wurde daher intensiv untersucht [Sai87, Ada85, Jon89]. Das Ziel beim Einsatz von RIE-Prozessen in der Chipfertigung sind möglichst hohe Ätzraten bei ausreichender Selektivität zum Maskierungsmaterial, die durch die Verwendung von fluor- oder chorhaltigen Gasen erreicht werden [Meu90].

Für die Herstellung von Röntgenmasken ist das oberste Ziel die Profilqualität der hergestellten Absorberstrukturen, die Ätzrate ist von geringerer Bedeutung. Für die Maskenfertigung ist nur ein stark anisotroper Ätzprozeß geeignet, wobei Anisotropie im Fall der Strukturierung bedeutet, daß für die Ätzung in die Tiefe eine möglichst hohe Abtragsrate erzielt wird bei möglichst geringer Abtragsrate zur Seite.

Bei den reaktiven Trockenätzprozessen werden in einer Gasentladung Ionen erzeugt, die durch ein elektrisches Potential aus dem Plasma abgezogen und in Richtung auf die Substratoberfläche beschleunigt werden. Durch die Wechselwirkung der Ionen und chemisch aktiven Gasteilchen (Radikale) ergeben sich eine physikalische und eine chemische Komponente.

Die physikalische Komponente beim Abtrag ist wenig selektiv, da der maximale Energieübertrag nur von der Primärenergie und der Masse der Teilchen abhängt. Durch Auswahl des geeigneten Ätzgases oder einer Mischung verschiedener Gase in Abhängigkeit des abzutragenden Materials, kann die Selektivität, die im wesentlichen von der chemischen Komponente abhängt, beeinflußt werden. Bei der Verwendung von kohlenstoff- fluor-, chlor- und schwefelhaltigen Gasen können an den geätzten Oberflächen der Substrate polymerartige Filme entstehen, die die Selektivität der Ätzung (Mikromaskierung) beeinflussen können [Sai87, Fra86]. So wird z.B. oft beobachtet, daß sich an den Seitenwänden von anisotrop geätzten Mikrostrukturen eine sogenannte Seitenwandpassivierung befindet, die einen chemischen Ätzangriff an den Seitenwänden verhindert. Auf den Bereichen der Substratoberfläche, die dem Teilchenbeschuß der physikalischen Ätzkomponente ausgesetzt sind, wird die Passivierungsschicht abgetragen, so daß hier ein chemischer Materialabtrag stattfinden kann.

4.5.1 RIE- Parameter und deren Einfluß auf den Ätzprozeß

In der nachfolgenden Tabelle 4.6 sind die Einflußparameter dargestellt, mit denen das Ätzergebnis beim RIE-Prozeß beeinflusst werden kann.

Einflußgröße		untersuchter	möglicher Parameterraum
eingespeiste Generatorleistung P_{HF}	[W]	20, 60, 100, 200	15 - 600
Biasspannung U_B	[V]	100 - 700	100 - 1300
Gasdruck p_e	[Pa]	0.5, 1, 2, 3, 5, 10	0.5 - 100
Gasfluß f	[sccm]	10, 20, 30, 90	10 - 150
Gas		CF ₄ , SF ₆	
Elektrodenmaterial		Aluminium, Graphit	
Elektrodenabstand	[cm]	8,5 ; konstant	3 - 8,5
Substrattemperatur	[°C]		

Tabelle 4.6 Einflußfaktoren beim reaktiven Ionenätzen

Gas

Die ausgewählten Gase oder Gasmischungen für einen RIE-Prozeß enthalten die reaktiven Gasanteile und eventuell inerte Komponenten. Auswahlkriterien sind die möglichen reaktiven Gasteilchen und die Bereitstellung eines anisotropen Ätzmechanismus. Das gewählte Gas sollte in der Lage sein freie Radikale zu liefern, die nach der Reaktion mit der zu ätzenden Fläche Verbindungen bilden, die einen möglichst hohen Dampfdruck besitzen. Das Endprodukt des Ätzprozesses muß dabei nicht unbedingt dasjenige mit dem höchsten Dampfdruck sein [Par86].

Gasfluß

Die Gasflußrate beeinflusst den Ersatz reaktiver Teilchen die während des Ätzvorganges verbraucht wurden, sowie die Ätzgleichförmigkeit durch Beeinflussung der Druckverteilung in der Ätzkammer.

Gasdruck und HF-Leistung

Es besteht eine Wechselbeziehung zwischen Gasdruck p_e und HF-Leistung (P_{HF}). Beide beeinflussen die Entladungscharakteristik, von der die Bildungsrate freier Radikale und die Biasspannung abhängen und dadurch den resultierenden Ätzmechanismus.

Höherer Druck verstärkt die Ätzrate durch die zunehmende Bildung freier Radikale und damit den isotropen Ätzanteil. Gleichzeitig reduziert der erhöhte Druck die Biasspannung und darüber den Anteil ionenunterstützter und chemisch verstärkter Ätzmechanismen.

Höherer Druck verkürzt ebenso die mittlere freie Weglänge der Ionen. Dadurch nimmt die Streuung der Ionen im Dunkelraum zu und eine nicht mehr zu vernachlässigende Anzahl von Ionen trifft nicht mehr senkrecht auf das Substrat, wodurch wiederum die Unterätzung unterstützt wird.

Oberhalb eines gewissen Druckbereiches nimmt die Unterätzung zu. Ähnlich dem Effekt durch höheren Druck erhöht eine größere HF-Leistung die Bildungsrate von Ionen und freien Radikalen, begleitet von einer höheren Ätzrate. Mit steigender HF-Leistung steigt auch die Biasspannung an. In einem gewissen Bereich kann der Verlust an Anisotropie durch höheren Druck durch Steigerung der HF-Leistung ausgeglichen werden (siehe unten).

Substrattemperatur

Die laterale Ätzrate ist durch die Temperatur beeinflussbar, da damit die isotrope chemische Komponente der Ätzung beeinflusst werden kann. Da in der vorhandenen Maschine die Substrate zusammen mit der Elektrode ein- und ausgeschleust werden, erfolgt die Kühlung der Elektrode nicht direkt durch den Kühlmittelstrom. Die Substrattemperaturen erhöhen sich daher nach dem Prozeßstart bis zum thermischen Gleichgewicht (siehe [Kad87]). Da auch die Titanträgerfolie bei länger anhaltender Temperaturerhöhung die Spannung ändert (siehe Kap. 4.1.6.2), wurde bei der Strukturierung die maximal ins Plasma eingespeiste Leistung auf 200 W begrenzt.

Biasspannung

Die unterschiedliche Mobilität von Elektronen und Ionen führt zu einem negativen Potential an allen Oberflächen, die mit dem Plasma in Kontakt stehen. Zwischen Plasma und Elektrode liegt ein Dunkelraum (typisch 0,01 - 1 cm), dessen Ausdehnung von der Leistung, dem Druck und der verwendeten Frequenz abhängt. Durch das negative Potential der Substratelektrode werden die positiv geladenen Ionen aus dem Plasma abgezogen und im Dunkelraum auf das Substrat beschleunigt. Die Energie der Ionen wird durch die Potentialdifferenz (Biasspannung) über den Dunkelraum bestimmt, wobei die Ionen durch Stöße mit Gasatomen (abhängig vom Druck) Energie verlieren. Die Ionenenergie liegt typischerweise zwischen einigen eV und einigen hundert eV.

Die Biasspannung folgt einem exponentiellen Zusammenhang zwischen Druck p_e und eingespeister Generatorleistung P_{HF} . Nach [Bol84] gilt

$$(4.1) \quad U_B = C \cdot e^{a \cdot \frac{p_e}{P_{HF}}}$$

wobei C und a Konstanten sind. Mit zunehmendem Gasfluß fällt die Biasspannung bei der Verwendung von CF_4 und SF_6 bei konstantem P_{HF} ebenfalls ab. Mit der Zunahme der Biasspannung wird der Energieeintrag auf die Oberfläche durch die Ionen erhöht und die Oberflächenreaktionen beeinflusst. So beschreibt Grossmann die Abnahme der Fluorierung mit der Zunahme des Ionenbeschusses [Gro88].

Elektrodenmaterial

Durch das Elektrodenmaterial kann der Ablauf des Ätzprozesses in mehrfacher Weise beeinflusst werden. Bei Ätzprozessen mit einem hohen Anteil der physikalischen Komponente können Ätzartefakte auftreten, wenn sich die Abtragsraten des Elektrodenmaterials und des zu ätzenden Materials wesentlich unterscheiden. Lagert sich abgetragenes Elektrodenmaterial auf der zu ätzenden Oberfläche an, so führt diese Mikromaskierung zu "rasenartigen" Ätzoberflächen. Eine weitere Beeinflussung des Ätzprozesses durch die Elektrodenmaterialien ergibt sich durch die Möglichkeit der Beeinflussung der Ätzchemie. Durch Reaktionen mit dem Elektrodenmaterial kann der Anteil reaktiver Radikale verändert werden. Neben diesen Gesichtspunkten kann noch die Wärmeleitfähigkeit und wegen der Bedeutung der Wärmeabfuhr noch der Emissionskoeffizient der Elektroden eine Rolle spielen.

4.5.2 Ergebnisse der Strukturierung mit CF_4

Für die Ätzexperimente wurde zuerst CF_4 untersucht, da hier eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Bildung einer Seitenwandpassivierung gegeben ist. Bei Untersuchungen geätzter Wolframoberflächen mit reinem CF_4 wurde an der Oberfläche Kohlenstoff detektiert [Oer89, Bes89], der bei der Ablagerung an den Seitenwänden, die nicht dem direkten Ionenbeschuss unterliegen, ebenfalls als Schutzschicht dienen kann.

Untersucht wurden die Abtragsraten und das Profil der Ätzung, um den besten Parametersatz für die Herstellung senkrechter Absorberstrukturen zu ermitteln. Die Bestimmung der Abtragsraten erfolgte durch Ermittlung der Ätztiefen mittels Tastschnittgerät (Sloan Dektak IIA und Tencor P2) und aus der Prozeßzeit. Der Meßfehler für die Bestimmung der Ätztiefen aus jeweils fünf Messungen betrug dabei im Mittel $\pm 4 \%$.

Für die Bestimmung des Ätzprofils wurden die strukturierten Absorberschichten zusammen mit dem Wafer gebrochen und im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Die Bestimmung des Kantenwinkels erfolgte graphisch anhand der REM-Bilder. Abbildung 4.12 zeigt einen Überblick über die dabei ermittelten Profile. Bei den Ätzprofilen, die Unterätzungen aufweisen wird ein negativer Kantenwinkel angegeben. Bei den Ätzprofilen wird nach drei verschiedenen Typen unterschieden.

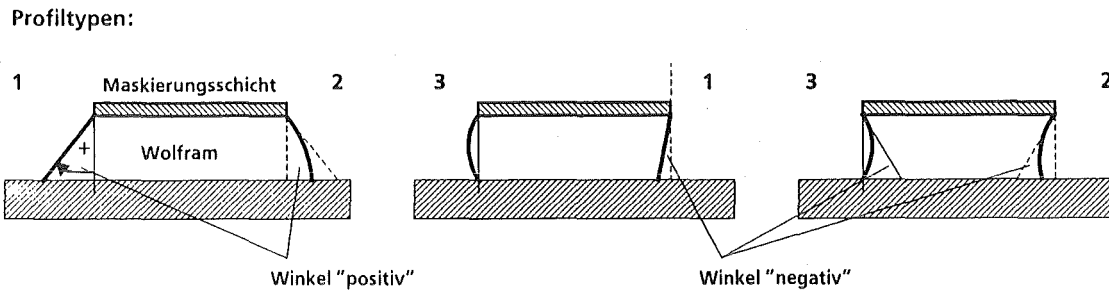


Abb. 4.12: Darstellung verschiedener Ätzprofile, die sich in Abhängigkeit der Prozeßparameter ergeben.

4.5.2.1 Einfluß der Generatorleistung

Die Erhöhung der eingespeisten Generatorleistung P_{HF} führt bei CF_4 zu einer Erhöhung der Abtragsraten für Wolfram (Abb. 4.13a). Der Anstieg wird bei der Verwendung der Graphitelektrode mit zunehmender Leistung geringer. Bei der Verwendung der Aluminiumelektrode zeigt sich ein nahezu linearer Anstieg mit zunehmender Leistung. Der Einfluß der steigenden Leistung auf das Ätzprofil zeigt in Abhängigkeit des Elektrodenmaterials unterschiedliche Ergebnisse (Abb. 4.13b). Bei Graphit verschlechterte sich die Kantensteilheit und bei hoher Leistung ($P_{HF} = 200$ W) veränderte sich der Profiltyp zu einem typischen Sputterprofil (Profiltyp 1). Bei Aluminium wurden mit steigendem P_{HF} steilere Profile erhalten, die generell vom Profiltyp 1 waren. Bei der Verwendung der Graphitelektrode wurden im gesamten Leistungsbereich durchschnittlich 7 % höhere Biasspannungen erhalten als bei dem Einsatz der Aluminiumelektrode.

4.5.2.2 Einfluß des Drucks

Die Steigerung des Druckes zeigte nur einen geringen Einfluß auf die Abtragsrate von Wolfram. Die Druckerhöhung führte zu einem leichten Abfall der Wolframätzrate, sowohl bei der Verwendung der Graphit- wie auch bei der Aluminiumelektrode (Abb. 4.13c). Ein steigender Druck führte auch zu einem Abfall der Biasspannung. Deutlicher zeigte sich der Druckeinfluß in der Wirkung auf die ermittelten Profile. Sowohl bei der Aluminium- als auch bei der Graphitelektrode nimmt mit steigendem Druck der ermittelte Profilminkel zu (Abb. 4.13d). Eine Ausnahme bildete der Ver-

sich bei 0,5 Pa unter Verwendung der Graphitelektrode. Die anderen Ergebnisse können durch die mit der Druckerhöhung zunehmenden Energieverlust und Streuung der Ionen im Dunkelraum erklärt werden, durch die die Ionen weniger gerichtet auf das Substrat treffen, wodurch der Sputtererfolg zunimmt (siehe auch Kap. 2.3.2).

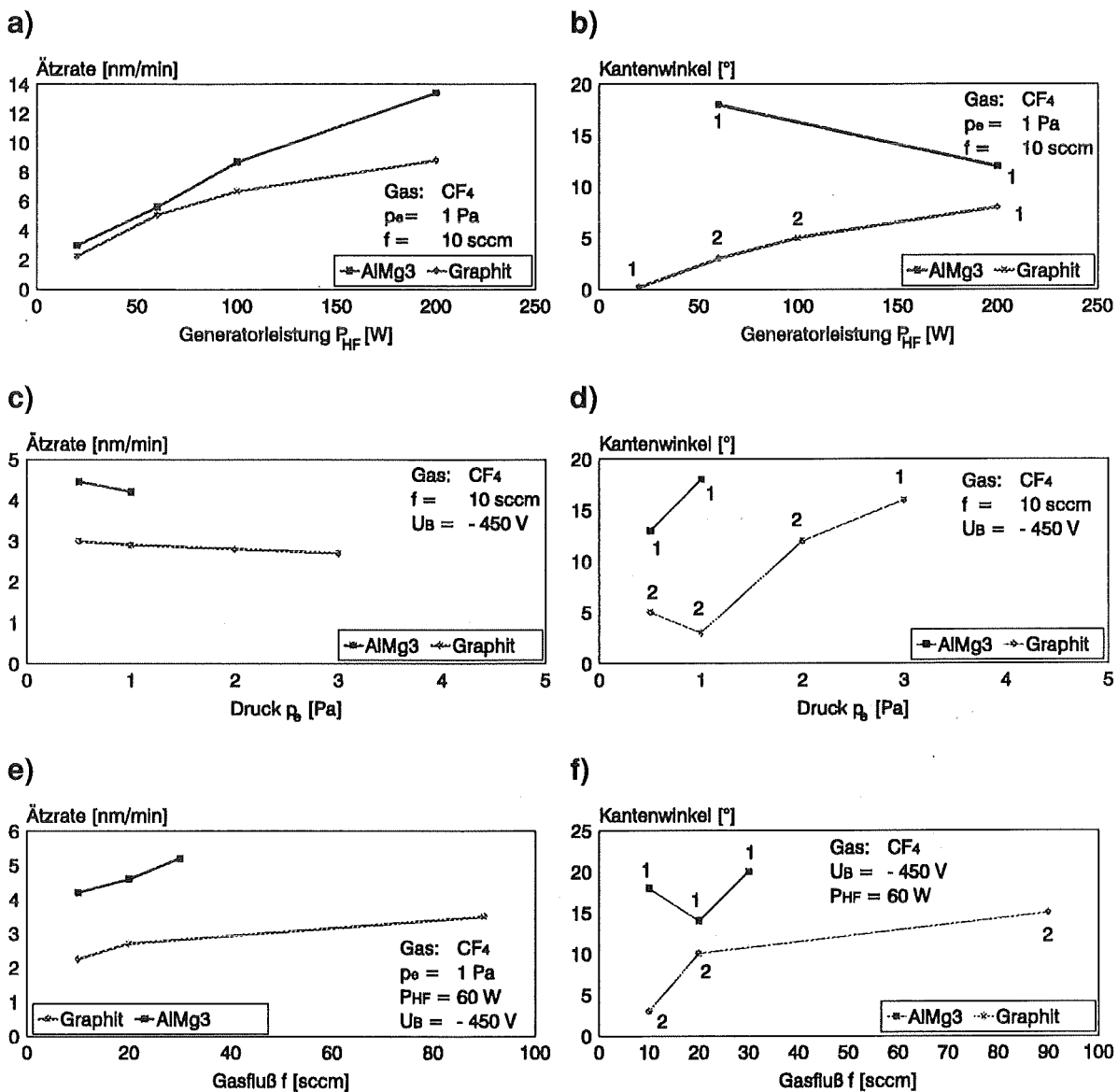


Abb. 4.13: Ermittelte Ätzraten sowie Kantenwinkel und Profiltyp für die Strukturierung von Wolfram mit CF_4 in Abhängigkeit der Generatorleistung (P_{HF}), des Drucks (p_e) im Rezipienten und des Gasflusses (f) bei der Verwendung von Aluminium und Graphit als Elektrodenmaterial.

4.5.2.3 Einfluß des Gasflusses

Die Steigerung des Gasflusses zeigte eine Erhöhung der Abtragsraten von Wolfram, unabhängig vom verwendeten Elektrodenmaterial (Abb. 4.13e). Der Profiltyp wurde bei der Graphitelektrode mit dem steigenden Gasfluß größer, bei der Alumini-

umelektrode wurde das steilste Profil bei 20 sccm erzielt (Abb. 4.13f). Bei einer weiteren Steigerung des Gasflusses wurden bogenförmige Profile erhalten (Profiltyp 2). Ein Einfluß des Gasflusses auf die Biasspannung bei der Verwendung von CF_4 wurde nicht beobachtet.

4.5.2.4 Einfluß des Elektrodenmaterials

Bei der Verwendung der Aluminiumelektrode wurden durchschnittlich 10 % höhere Generatorleistungen benötigt um die gleichen Biasspannungen wie mit der Graphitelektrode zu erhalten. Die geätzte Wolframoberfläche erscheint bei der Verwendung der Graphitelektrode glatter. Bei beiden Elektroden wurden keine Ätzrückstände beobachtet.

4.5.2.5 Optimaler Arbeitspunkt für CF_4

Die Herstellung senkrechter Absorberstrukturen konnte bei der Verwendung von CF_4 bei kleiner Generatorleistung ($P_{\text{HF}} = 20 \text{ W}$), kleinen Drücken ($p_{\text{e}} = 1 \text{ Pa}$) und kleinen Gasflüssen ($f = 10 \text{ sccm}$) unter Verwendung einer Graphitelektrode erzielt werden. Als Abtragsrate für Wolfram wurden in diesem Betriebspunkt 2,2 nm/min ermittelt.

4.5.3 Verwendung von SF_6 als Ätzgas

4.5.3.1 Einfluß der Generatorleistung

Bei der Verwendung von SF_6 als Ätzgas wurden wesentlich höhere Abtragsraten erzielt als mit CF_4 (vgl. Abb. 4.13a und 4.14a). Bei der Graphitelektrode ergaben sich je nach Leistungsbereich vier ($P_{\text{HF}}=200 \text{ W}$) bis siebenfache ($P_{\text{HF}}=20 \text{ W}$) Abtragsraten, bei der Verwendung von Aluminium als Elektrodenmaterial wurden zwischen acht ($P_{\text{HF}}=20 \text{ W}$) und dreizehnfach ($P_{\text{HF}}=200 \text{ W}$) höhere Abtragsraten für Wolfram ermittelt.

Die ermittelten Profile wiesen auf beiden Elektroden bei kleinem P_{HF} starke Unterätzungen auf, wobei die größeren Unterätzungen bei der Aluminiumelektrode auftraten (Abb. 4.14b). In diesem Leistungsbereich wird die Ätzung von der chemischen Komponente dominiert. Mit steigender Leistung und damit auch der Biasspannung wurde bei der Graphitelektrode das Profil steiler und die Seitenwände glatter. Bei der Aluminiumelektrode traten im gesamten Leistungsbereich Abscheidungen auf der Nickeloberfläche auf. Bei sehr hoher Leistung ($P_{\text{HF}}=200 \text{ W}$) sogar auf den Seitenwänden der Wolframstrukturen.

4.5.3.2 Einfluß des Druckes

Mit steigendem Druck nehmen bei der Verwendung von SF₆ und der Aluminiumelektrode die Abtragsraten stark zu (Abb. 4.14c). Auf der Graphitelektrode ist der Anstieg der Abtragsrate als Funktion des Druckes nur gering. Zur Erzielung einer konstanten Biasspannung muß mit steigendem Druck die eingespeiste Generatorleistung erhöht werden.

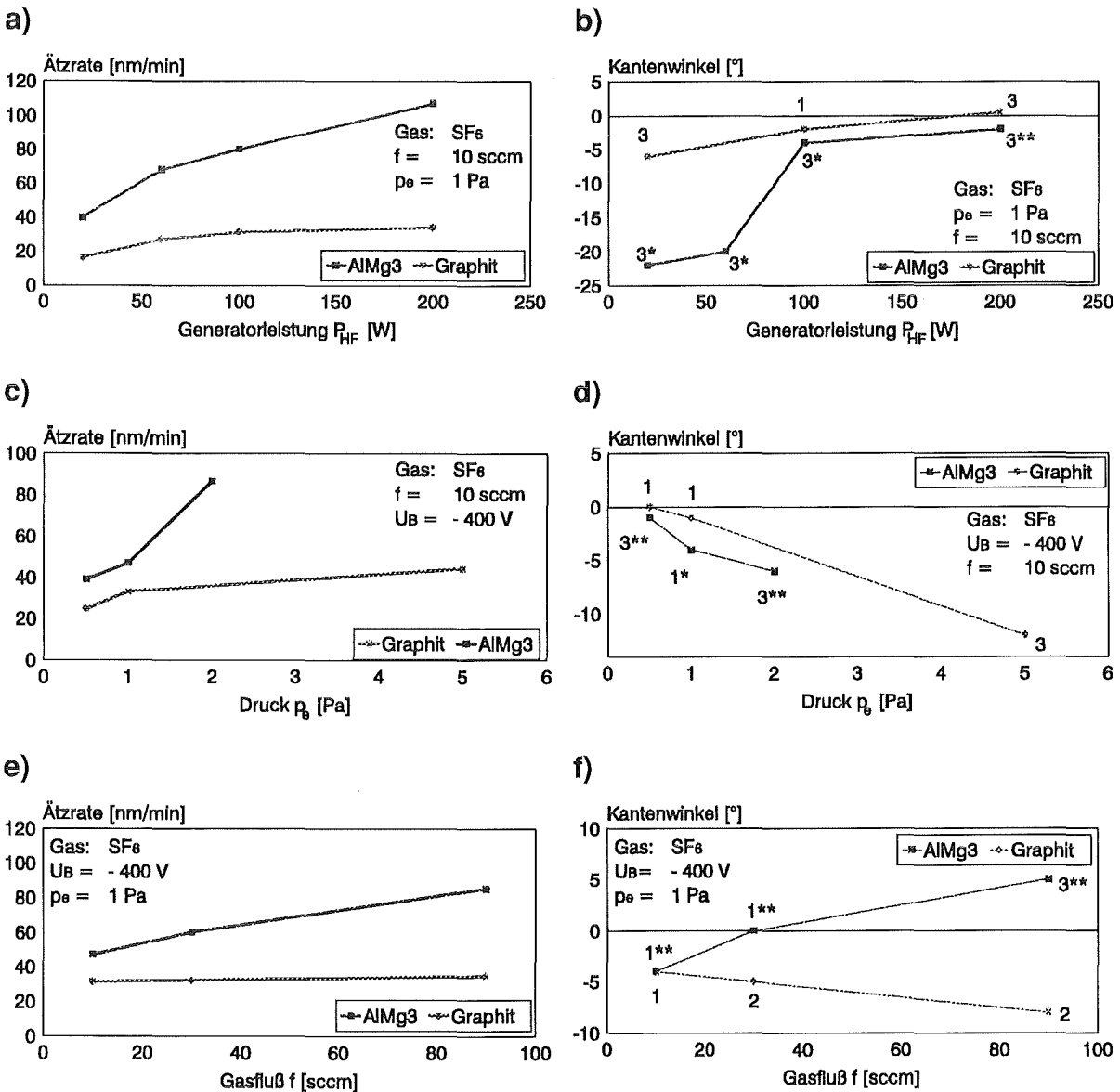


Abb. 4.14: Ermittelte Ätzzraten sowie Kantenwinkel und Profiltyp für die Strukturierung von Wolfram mit SF₆ in Abhängigkeit der Generatorleistung (P_{HF}), des Druckes (p₀) im Rezipienten und des Gasflusses (f) bei der Verwendung von Aluminium und Graphit als Elektrodenmaterial. Die mit * bezeichneten Profile wiesen Abscheidungen auf der Nickelmaskierungsschicht auf, die mit ** gekennzeichneten auch auf den Seitenwänden der Wolframstrukturen.

Mit steigendem Druck verstärkt sich die Unterätzung sowohl bei der Graphitelektrode als auch bei der Aluminiumelektrode (Abb. 4.14d). Bei letzterer wurden Abscheidungen auf den Seitenwänden der Wolframstrukturen beobachtet. Bei geringem Druck ($p_e = 0.5 \text{ Pa}$) wurden bei Verwendung der Graphitelektrode sehr glatte Seitenwände erhalten. Die Druckerhöhung verstärkt den chemischen Anteil der Ätzung und reduziert den Ionenbeschuß durch vermehrte Streuprozesse.

4.5.3.3 Einfluß des Gasflusses

Die Steigerung des Gasflusses führt zu einer wesentlichen Erhöhung der Abtragsraten auf der Aluminiumelektrode (Abb. 4.14e). Bei dieser Elektrode konnte durch die Steigerung des Gasflusses ein Übergang von einem unterätzten Profil zu einem senkrechten Profil erzielt werden (Abb. 4.14f). Die Wirkung beruht auf der Bildung eines Belags auf der Seitenwand und der Nickeloberfläche.

Beim Einsatz der Graphitelektrode führte der steigende Gasfluß zu einer stärkeren Unterätzung der ermittelten Profile. Ein erhöhter Gasfluß liefert nach Tandon [Tan89] eine größere Zahl freier Radikale. Dies führt zu einer aggressiveren Ätzung und damit zu einer gesteigerten Möglichkeit zur Ätzung unterhalb der Maskierungsschicht (Unterätzung). Die Steigerung des Gasflusses bei der Verwendung von SF_6 führte bei beiden Elektroden zu einem Abfall der Biasspannung.

4.5.3.4 Einfluß des Elektrodenmaterials

Bei der Verwendung der Aluminiumelektrode werden durchschnittlich 20 % höhere Generatorleistungen benötigt, damit die gleichen Biasspannungen wie bei der Graphitelektrode erhalten werden. Bei steigendem Druck verzögert die Verwendung der Graphitelektrode den Effekt der Unterätzung. Das Vorhandensein von Kohlenstoff unterstützt nach Tandon [Tan89] die Bildung einer ätzresistenten Passivierung an den Wolframseitenwänden und vermindert damit die Unterätzung. Abscheidungen auf der geätzten Oberfläche wurden nur beim Einsatz der Aluminiumelektrode beobachtet.

4.5.3.5 Optimaler Arbeitspunkt für SF_6

Die Herstellung senkrechter Absorberprofile bei der Verwendung von SF_6 als Ätzgas war nur im Bereich hoher Generatorleistungen ($P_{HF} = 150 - 200 \text{ W}$), kleinem Gasdruck ($p_e = 1 \text{ Pa}$), kleinen Gasflüssen ($f = 10 \text{ sccm}$) und der Verwendung der Graphitelektrode möglich.

4.5.4 Ätzstopp auf der Titanmembran

Bei der Strukturierung der Wolframabsorber sollte ein Materialabtrag der Titanfolie so weit wie möglich vermieden werden, da eine inhomogene Dicke der Membran ebenso zu Maskenverzügen führt wie innere Spannungen in der Absorberschicht. Andererseits verläuft das reaktive Ionenätzen nicht überall auf dem Substrat gleich schnell ab. Deshalb ist immer eine gewisse Überätzung notwendig, die sicherstellt, daß die Strukturierung überall auf dem Substrat abgeschlossen ist. Während dieser Überätzzeit sollte die Abtragsrate des Titans möglichst gering sein.

Wie aus den Abbildungen 4.15a und 4.15b hervorgeht, wird Titan durch die eingesetzten fluorinierten Gase ebenfalls abgetragen. Für das Ätzgas CF_4 wurden optimale Absorberprofile bei einer ins Plasma eingespeisten Generatorleistung P_{HF} von 20 Watt erzielt. Durch die Zugabe von 10 % Sauerstoff zum Arbeitsgas erhöht sich die Abtragsrate für Wolfram bei dieser Leistung um mehr als das Doppelte. Die Abtragsrate für Titan ändert sich dabei nur wenig. Damit kann durch die Sauerstoffzugabe das Verhältnis der Abtragsraten von Wolfram und Titan von 1,2 auf 2,6 gesteigert werden [Kad93].

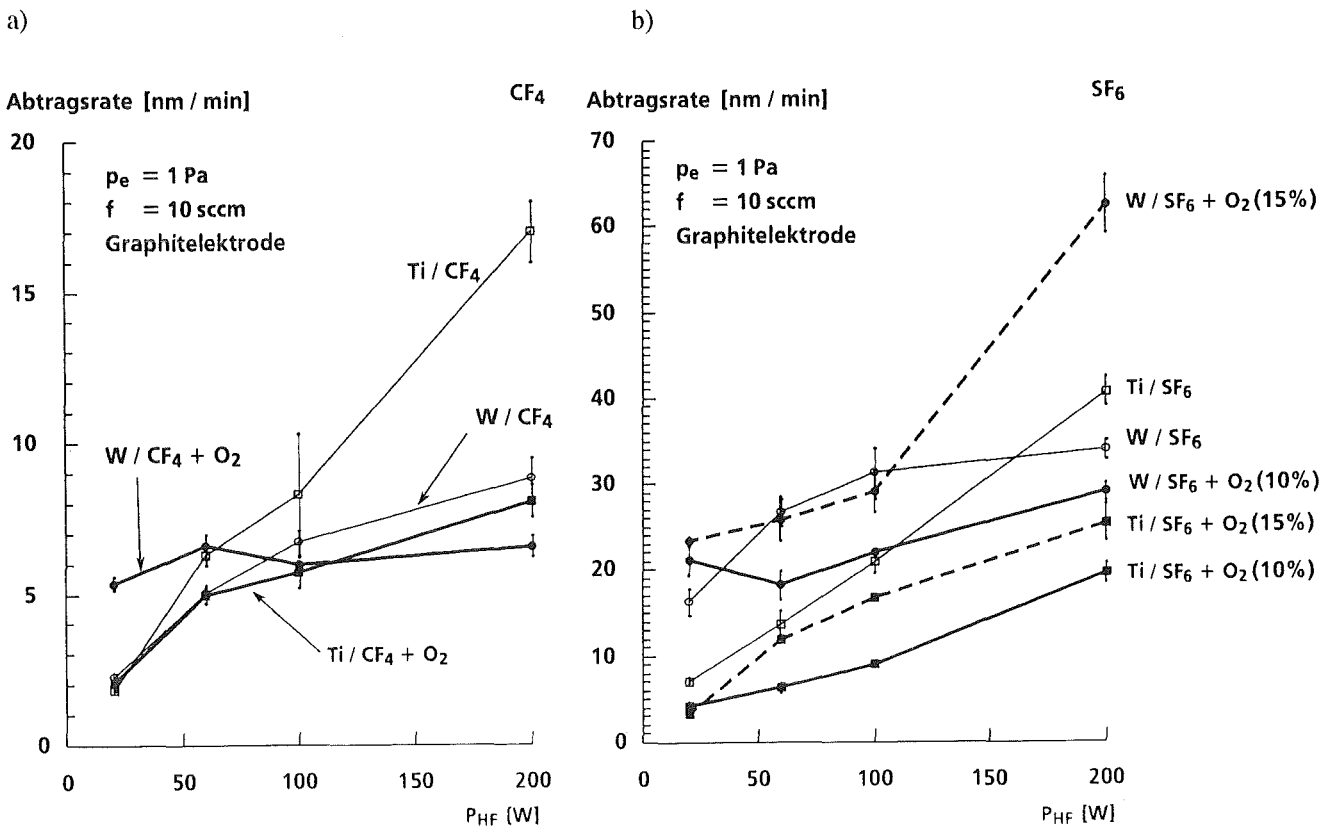


Abb. 4.15: Einfluß der Sauerstoffzugabe auf die Abtragsraten von Wolfram und Titan bei der Verwendung von CF_4 und SF_6 in Abhängigkeit der eingespeisten Plasmaleistung, wenn eine Graphitelektrode verwendet wird.

Bei der Absorberstrukturierung mit reinem SF_6 steigt in dem zur Strukturierung geeigneten Leistungsbereich ($P_{\text{HF}}=150 - 200 \text{ W}$) die Titanabtragsrate über die von Wolfram (Abb. 4.15b). Dies würde einen gezielten Ätzstopp sehr erschweren. Bei der Zugabe von 10 % Sauerstoff zu SF_6 fällt die Titanabtragsrate bis über 50 % ($P_{\text{HF}}=200 \text{ W}$). Die Wolframabtragsrate fällt um ca. 15 %. Damit steigert sich das Verhältnis der Abtragsraten von Wolfram und Titan von 0,8 auf 1,5 ($P_{\text{HF}}=200 \text{ W}$).

Durch die weitere Steigerung der Sauerstoffzugabe auf 15 % kann die Selektivität noch weiter verbessert werden. Die Wolframabtragsrate steigt in diesem Fall auf nahezu den doppelten Wert wie bei der Verwendung von reinem SF_6 ($P_{\text{HF}}=200 \text{ W}$). Die Titanabtragsrate fällt im Vergleich zu reinem SF_6 um 37% und ist damit höher als bei der Zugabe von 10% Sauerstoff. Durch die Verdopplung der Wolframabtragsrate erhöht sich das Verhältnis der Abtragsraten von Wolfram und Titan von 0,8 auf 2,5.

Interpretation der Sauerstoffzugabe

Durch die Zugabe von Sauerstoff wird die Plasmachemie geändert. Die Konzentration der Fluoratome wird erhöht, die als das Hauptätzmittel der Wolframätzung gelten. Die Steigerung der Fluorkonzentration in der Gasphase wird der Reaktion des CF_3 -Radikals mit Sauerstoff unter Bildung von F, CO, CO_2 und COF_2 zugeschrieben [Oer89].

Untersuchungen der Wolframoberfläche zeigen verschiedene Stufen der Fluorierung nach der Behandlung mit einem CF_4 Plasma. Gefunden wurden WF_4 und WF_6 . Der ätzratenbestimmende Schritt ist die Bildung gasförmiger Reaktionsprodukte aus dem relativ stabilen WF_4 auf der Oberfläche [Bes89]. Dafür werden zwei Wege diskutiert.

- Die Reaktion mit zwei weiteren Fluoratomen zu WF_6 . WF_6 ist gasförmig, die Wahrscheinlichkeit der Reaktion ist aber gering, da WF_5 als Zwischenprodukt instabil ist.
- Die Reaktion mit Sauerstoff zu WOF_4 . Die Oxidation von WF_4 zu WOF_4 scheint bei der Entfernung von WF_4 die dominante Rolle zu spielen. Daher spielt der Sauerstoff eine entscheidende Rolle bei der Ätzung der teilweise fluorierten Wolframoberflächen.

Für die Strukturierung von Wolfram mit CF_4/O_2 -Gemischen gilt WOF_4 als das dominante Ätzprodukt [Oer89]. Die Zugabe von Sauerstoff erhöht zuerst die Wolframätzrate. Eine weitere Verdünnung der Ätzgase mit Sauerstoff führt dann aber zur Oxidation der Wolframoberfläche und die Ätzrate fällt wieder ab. WOF_4 wurde auch bei der Ätzung von Wolfram mit SF_6/O_2 -Gasgemischen durch Massenspektroskopie nachgewiesen [Pic85].

Die Verwendung von der Sauerstoffzugabe beim Einsatz von CF_4 als Ätzgas zu Beginn der Ätzung führt zu unterätzten Profilen. Als Ursache wird die Beseitigung der Kohlenstoffschicht vermutet, da bei Zugabe von Sauerstoff die CO -Konzentration ansteigt [Par86]. Die Zugabe von Sauerstoff ist daher nur gegen Ende der Ätzung während der Überätzzeit sinnvoll.

Bei der Verwendung von SF_6 ist die Zugabe von Sauerstoff schon zu Beginn der Ätzung sinnvoll, wenn eine Graphitelektrode als Substratunterlage verwendet wird. Sowohl bei der Zugabe von 10% Sauerstoff als auch bei 15 % Sauerstoff können bei hoher Leistung ($P_{\text{HF}} > 150 \text{ W}$) senkrechte Profile erhalten werden. Die Seitenwände werden bei der Zugabe von 10 % Sauerstoff glatter als bei der Zugabe von 15 %. Bei der Verwendung der Aluminiumelektrode wurden bei der Zugabe von Sauerstoff jeweils unterätzte Profile ermittelt.

Das Absinken der Titanabtragsraten bei der Zugabe von Sauerstoff wird einer Oxidation der Titanoberfläche zugeschrieben, wie sie beispielsweise bei der Reaktion von Silizium mit SF_6/O_2 Gemischen oder CF_4/O_2 Gemischen auftritt [Pic85, Oer89].

4.5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse bei der Strukturierung der Absorberschicht mit CF_4 und SF_6

Durch den Einsatz von SF_6 sind gegenüber CF_4 wesentlich höhere Abtragsraten von Wolfram möglich. SF_6 liefert mehr Fluor pro Mol und ist daher der effektivere Lieferant von Fluor-Radikalen, die die primäre Spezies für die Wolframätzung darstellen. Die Druckerhöhung führt nur bei SF_6 zu höheren Abtragsraten, ein erhöhter Gasfluß sowohl bei CF_4 als auch bei SF_6 .

Die Verwendung der Graphitelektrode führte bei beiden Gasen zu einer Verminderung der Wolframätzrate. Der Kohlenstoff bindet effizient das Fluor und vermindert damit die freien Radikale bei der reaktiven Ätzung. Dies vermindert die chemische Komponente der Ätzung. Der Kohlenstoff begünstigt nach Tandon [Tan89] die Bildung von C-F (440 kJ/Bindung) und bricht die nicht bevorzugten C-C Bindungen (348 kJ/Bindung). Dadurch werden mehr Fluor-Radikale gebunden und stehen nicht mehr für die Wolframätzung zur Verfügung. Dadurch reduziert das Vorhandensein von Kohlenstoff die Ätzrate von Wolfram.

Bei der Verwendung von CF_4 zur Strukturierung der Wolframschichten wurden senkrechte Profile bei kleiner Generatorleistung ($P_{\text{HF}} = 20 \text{ W}$) niedrigen Drücken ($P_e = 1 \text{ Pa}$) und kleinen Gasflüssen ($f = 10 \text{ sccm}$) und bei Verwendung der Graphitelektrode erhalten. Die mit CF_4 strukturierten Wolframschichten zeigten in dem untersuchten Parameterbereich glattere Seitenwände ohne Unterätzung. Bei der Ver-

wendung von reinem CF_4 dominiert der physikalische Anteil der Ätzung, da in der Regel typische Sputterprofile erhalten werden.

Die Strukturierung der Absorberschichten bei der Herstellung von Röntgenmasken erfolgte in der Regel durch zeitgesteuertes Ätzen unter Berücksichtigung einer Überätzzeit von 11% bis 27 % in Abhängigkeit der Strukturgeometrie. Dies stellt besonders bei der Verwendung von CF_4 als Ätzmedium aufgrund der langen Prozeßzeiten kein Problem dar. Durch die Zugabe von Sauerstoff gegen Ende der Strukturierung wird der Ätzstopp auf der Titanträgerfolie erleichtert, die Strukturverluste können bis zu einer Überätzzeit von 20 % vernachlässigt werden.

Bei dem Einsatz von SF_6 wurden eher unterätzte Profile erhalten als bei CF_4 . Nur im Bereich hoher Generatorleistungen ($P_{HF} = 150 - 200 \text{ W}$) wurden mit SF_6 senkrechte Profile erhalten, die bei der Verwendung der Graphitelektrode im Vergleich zur Aluminiumelektrode keinerlei Abscheidungen aufwiesen.

Die Herstellung von Röntgenmasken mit SF_6 als Ätzmedium konnte sowohl mit als auch ohne Sauerstoffzugabe realisiert werden. Bei der Verwendung von reinem SF_6 als Ätzmedium ist die Überätzzeit auf ca. 7 % begrenzt. Durch die Sauerstoffzugabe konnten Überätzzeiten von 25 % ohne zusätzliche Ätzstoppschicht realisiert werden. In der Tabelle 4.7 ist ein Vergleich der Parameter dargestellt.

			CF_4	SF_6
Leistung	P_{HF}	[W]	20	150 - 200
Biasspannung	U_B	[V]	-300	-700
Druck	p_e	[Pa]	1	1
Gasfluß	f	[sccm]	10	10
Elektrode		[-]	Graphit	Graphit
Selektivität W : Ti		[-]	1,2	0,8
Selektivität W : Ti (+10%O ₂)		[-]	2,6	1,5
Ätzrate von Wolfram		[nm/min]		
reines Ätzgas			2,2	34
Zugabe von 10 % O ₂			5,3	29

Tabelle 4.7: Optimierte Parameter für die Herstellung von Röntgenmasken für die Gase CF_4 und SF_6

Für die Herstellung von Zwischenmasken ermöglicht die Verwendung von SF_6 eine wesentliche Verkürzung der Ätzzeiten. Die im Vergleich zu CF_4 rauheren Seitenwände der Absorberstrukturen spielten bei der Herstellung der Arbeitsmaske keine

Rolle, da sie bei der Herstellung der Arbeitsmaske durch Umkopieren mit Synchrotronstrahlung nicht übertragen wurden [Schu93](siehe auch Kap 5).

4.6 Eigenschaften der subtraktiv hergestellten Röntgenmasken

Um die Eignung der subtraktiv strukturierten Zwischenmasken zu untersuchen wurden deren Absorberstrukturen in Resistschichten umkopiert, die die notwendige Dicke zur Herstellung von Arbeitsmasken aufwiesen. Abbildung 4.16 zeigt die Absorberstrukturen einer mit CF_4 strukturierten Maske und das damit erzeugte Resistprofil auf der Arbeitsmaske. Mit den $2,2 \mu\text{m}$ dicken Absorberstrukturen wurden bis zu $33 \mu\text{m}$ dicke Resistschichten strukturiert, die dabei minimal übertragenen Strukturbreiten betragen $1,5 \mu\text{m}$.

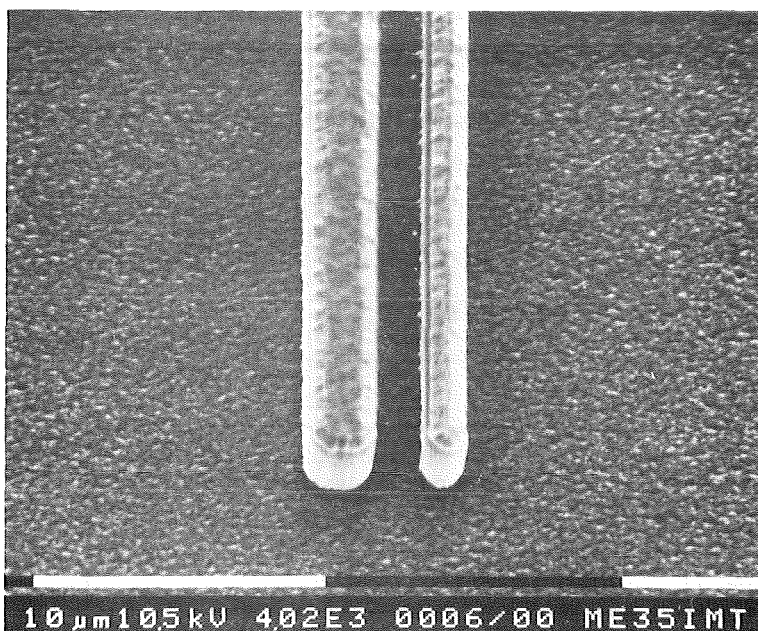
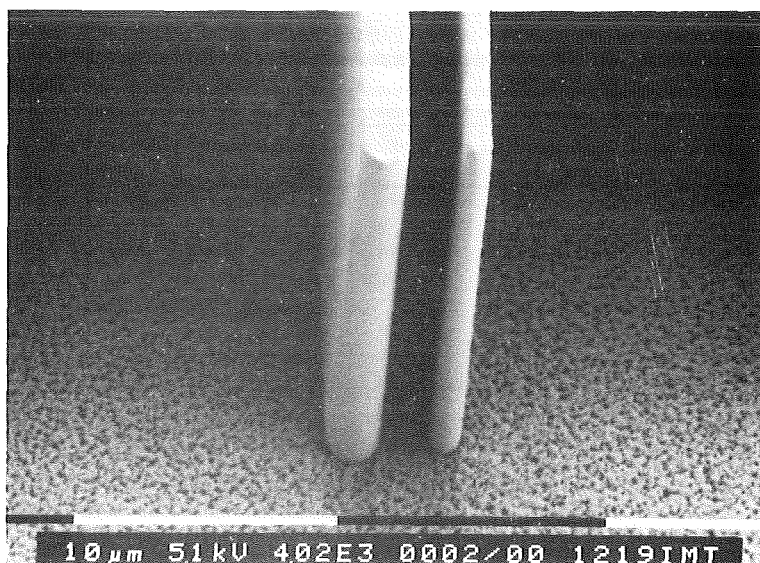


Abb. 4.16:

Mit CF_4 strukturierte Absorber einer Zwischenmaske mit $2,2 \mu\text{m}$ dicken Absorberstrukturen.



Kopie in das Resistprofil der Arbeitsmaske ($23 \mu\text{m}$ Dicke).

Abbildung 4.17 zeigt mit reinem SF₆ hergestellte Absorberstrukturen von 2,5 µm Dicke. Die minimalen Strukturbreiten liegen bei 0,5 µm. Selbst diese schmalen Strukturen mit einer Länge von 2 mm konnten haftfest auf der Trägerfolie hergestellt werden.

Die mit dem subtraktiven Verfahren hergestellten Absorberstrukturen wiesen eine homogene Dicke über die gesamte Maske unabhängig von der Strukturbreite auf. Die Absorberdicken sind auch unabhängig von der Anordnung auf der Maske. Die sich aus dem Herstellungsprozeß ergebenden Abweichungen der Absorberdicke lagen bei der derzeit verwendeten Fenstergröße der Röntgenmasken unter 4% (siehe Kap. 4.1.5). Weiterhin weisen die subtraktiv strukturierten Absorberschichten keine Strukturfehler auf, wie sie durch Unterplattierung entstehen.

Die Seitenwände der mit SF₆ strukturierten Absorberstrukturen fallen rauher aus als die mit CF₄ strukturierten (vgl. Abb. 4.16). Bei der Herstellung der Arbeitsmasken durch Umkopieren mit Synchrotronstrahlung fällt dieser Unterschied aber nicht ins Gewicht (siehe auch Kap 5).

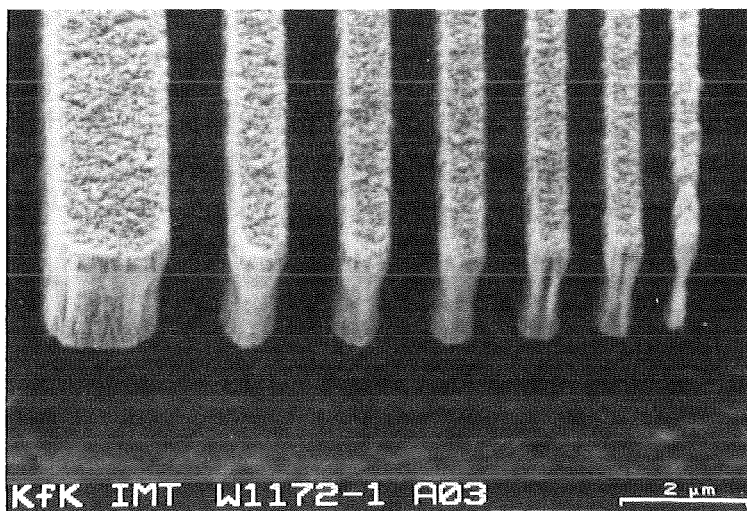


Abb. 4.17: 2,5 µm dicke Absorberstrukturen einer Zwischenmaske, die mit SF₆ strukturiert wurde.

Verzüge

Um den Einfluß der in der Absorberschicht vorhandenen inneren Spannungen auf Strukturabweichungen der Absorber zum Design zu bestimmen, wurde die Lageveränderung spezieller Meßstrukturen (Marker) nach den einzelnen Prozeßschritten bestimmt (vgl. Kap 3.3). Weiterhin wurde das Oberflächenprofil der Maskenträgerfolie auf der den Absorberstrukturen abgewandten Seite nach dem Abhebevorgang vermessen.

In der Tabelle 4.8 sind die inneren Spannungen der Wolframschichten in der X_W - bzw. Y_W -Richtung und die mittleren Maskenverzüge angegeben. Die für die inneren Spannungen angegebenen Werte wurden wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben aus der Durchbiegung der Abhebewafer vor und nach der Wolframbeschichtung berechnet. Dabei wurde wie bisher in der vorliegenden Arbeit vorläufig angenommen, daß die Durchbiegung auf eine über der Schichtdicke gleichmäßige Spannung in der aufgetragenen Schicht zurückgeht.

Substrat	WF312	WF327
innere Spannung [N/mm ²]	$\sigma_x = -135$	$\sigma_x = +215$
	$\sigma_y = -131$	$\sigma_y = +220$
ermittelte mittlere Verzüge : [nm]		
CAD - Absorberstrukturierung	172 ± 156	304 ± 248
vor - nach Absorberstrukturierung	199 ± 225	734 ± 528
CAD - abgehobene Maske	1120 ± 650	1730 ± 890

Tabelle 4.8: Ermittelte mittlere Verzüge und innere Spannungen bei verschiedenen Prozessschritten

Die in der Tabelle angegebenen Werte für die Verzüge sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Positionsveränderungen der Marker. Abbildung 4.18 zeigt die Markerpositionen, die Richtung und die relative Größe der Verzüge.

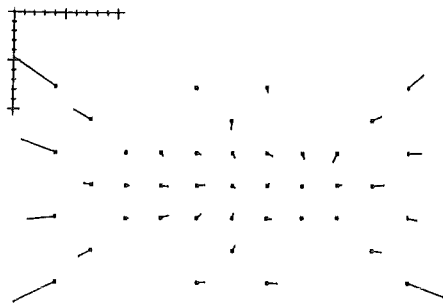
Die Verzugsmessungen wurden an zwei Designs durchgeführt auf denen 141 Marker vorhanden waren. Auf einem Design (siehe WF327) waren zusätzlich zu den Markern noch zwei große rechteckförmige Teststrukturen (12 mm x 4 mm bzw. 30 mm x 6 mm) vorhanden, die den Einfluß der inneren Spannungen auf den Verzug zeigen sollten. Abb. 4.18c und d zeigen, daß kein signifikanter Verzug in Richtung auf die Teststrukturen oder von ihnen weg festzustellen ist. Eine einfache Abschätzung einer inneren Spannungen von 215 N/mm² (WF327) an der größeren Teststruktur ergibt eine Längenänderung⁸ Δl von ca. 15 µm.

Der gemessene mittlere Verzug der Maske mit den Teststrukturen beträgt nur 1,7 µm und ist nicht auf die Teststrukturen ausgerichtet. Aus der Diskrepanz zwischen gemessenem und berechnetem Verzug muß geschlossen werden, daß die vorläufige Annahme, die Durchbiegung der Wafer gehe auf eine über die Schichtdicke gleichmäßige innere Spannung zurück, die Verhältnisse beim Schichtaufbau nur unzureichend beschreibt. Der in Kap. 4.1.2.2.1 festgestellte große Gradient der inne-

⁸: Für diese Abschätzung wurde der Widerstand der Titanträgerfolie, die sich der Deformation des Wolframs überlagert, vernachlässigt: $\Delta l = l * \delta (1-\nu) / E_W$. Werkstoffwerte wie in (3.7).

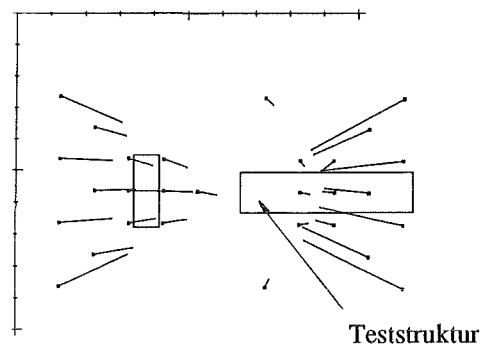
ren Spannungen über die Schichtdicke trägt offensichtlich in erheblichem Maße zur Durchbiegung des Wafers bei.

a) Vergleich vor - nach Absorberstrukturierung, WF312



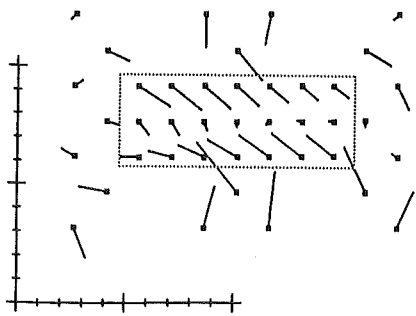
** entspricht 180 nm

c) Vergleich vor - nach Absorberstrukturierung, WF327



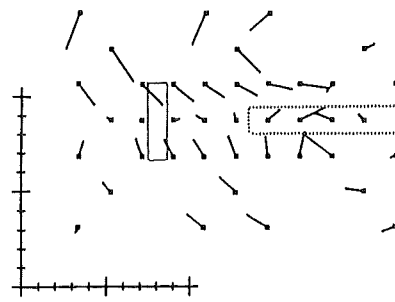
* + entspricht 600 nm

b) Vergleich CAD - abgehobene Maske, WF312



+ + entspricht 1 µm

d) Vergleich CAD - abgehobene Maske, WF327



+ + entspricht 1,6 µm

Abb. 4.18: Dargestellt sind die ermittelten Verzüge im Fall von Druckspannungen (a und b) sowie bei Zugspannungen (c und d). Die quadratischen Symbole kennzeichnen die Position der Marker vor dem nachfolgenden Prozessschritt, Größe und Richtung der ermittelten Verzüge werden durch die Richtung und die Länge der von den jeweiligen Symbolen ausgehenden Linien dargestellt. Die unterbrochene Linie in b) kennzeichnet den freigespannten Bereich der Trägerfolie

Diese Interpretation wird gestützt durch die Messung der Oberflächenprofile der Maskenträgerfolie auf der den Absorbern abgewandten Seite (vgl. Abb. 4.19). Die Maskenträgerfolie wölbt sich an den Stellen, an denen sich die Absorberstrukturen befinden, um ca. 3 µm (WF312) bis 4 µm (WF327) aus. Eine solche Wölbung wird erwartet, wenn die Absorberstrukturen unter Zugspannungen (vgl. Abb. 4.19b) stehen und keinen Gradienten der inneren Spannung über die Schichtdicke aufweisen. Bei Druckspannungen in der Wolframschicht (vgl. Abb. 4.19a) wäre somit eine Wölbung in die entgegengesetzte Richtung zu erwarten. Wie aus der Abbildung 4.19a zu entnehmen ist, führen auch Druckspannungen in der Wolframschicht zu einem Auswölben zu der dem Absorber abgewandten Seite. Als Ursache wird eine Verlagerung

der neutralen Faser nach dem Abheben der Maske vom Siliziumwafer in das Material mit dem höheren Verformungswiderstand (Wolfram) vermutet.

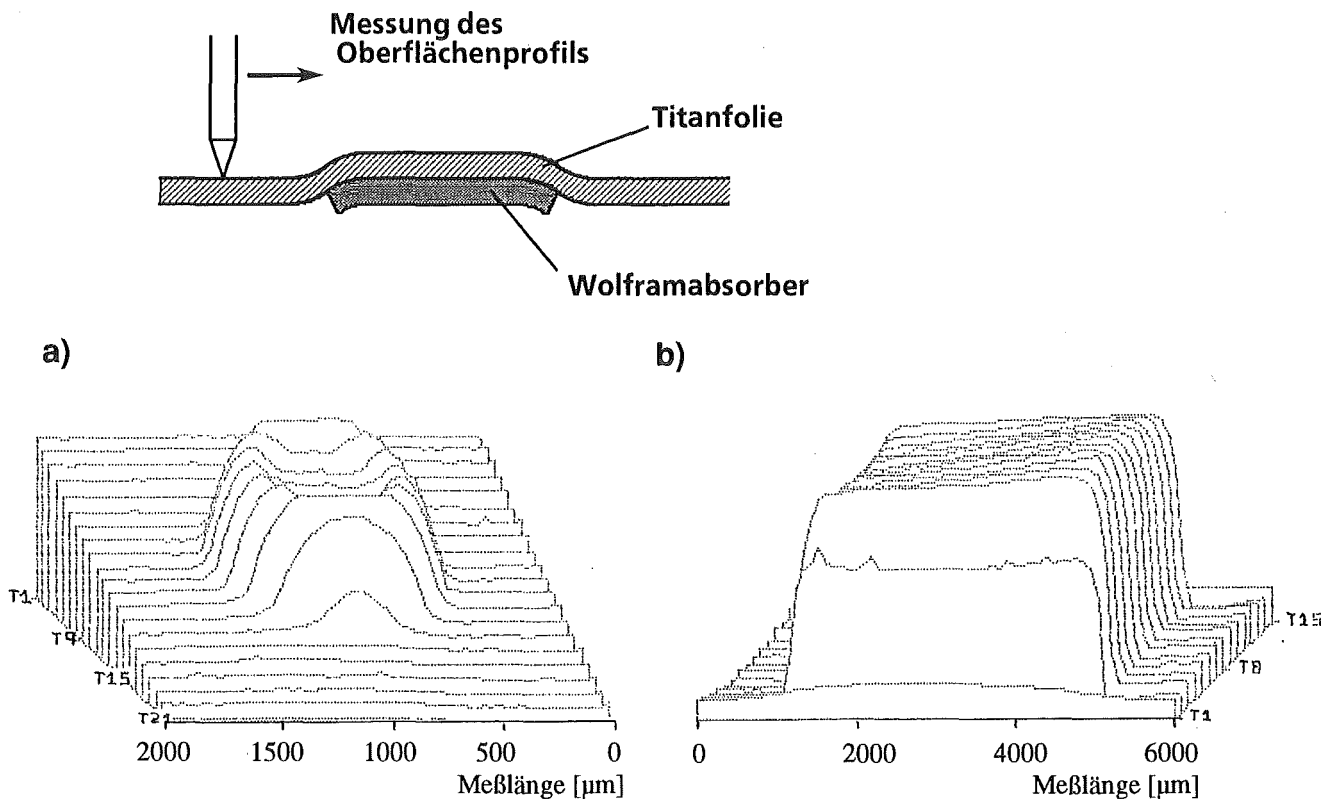


Abb. 4.19: Aufnahmen des Oberflächenprofils von Maskenträgerfolien mit dem Tastschnittgerät. Die Messungen erfolgten jeweils von der den Absorbern abgewandten Seite:
a) Absorber mit Druckspannungen (WF312), Auswölbung 4,2 µm.
b) Absorber mit Zugspannungen (WF327), Auswölbung 3,2 µm.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Kleber nach dem Aufbringen des Trägerrahmens auf die Titanträgerfolie kalt ausgehärtet. Bei dem derzeit noch eingesetzten Verfahren, bei dem der Kleber bei erhöhter Temperatur ausgehärtet wird, ergaben sich mittlere Verzüge von ca. 7 µm, die sich aus den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Abhebewafers und des Trägerrahmens ergeben [Hei90]. Die in dieser Arbeit getroffenen Vorhersagen der mittleren Verzüge bei einem kalten Aushärten des Klebstoffes wurden voll bestätigt. Die verminderten Festigkeitswerte des kalt gehärteten Klebstoffes sind für den Abhebevorgang unerheblich.

5 Ausblick

Die kleinsten Strukturbreiten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erreicht wurden, betrugen $0,5\ \mu\text{m}$. Die Strukturbreite wurde durch die fotolithografisch hergestellten Resiststrukturen begrenzt, die als Primärstrukturen dienten. Durch eine Weiterentwicklung der Resiststrukturierung durch Elektronenstrahlolithographie auf der Wolframschicht erscheint die Realisierung noch schmalere Absorberstrukturen möglich.

Nachdem im Rahmen der vorliegenden Arbeit gezeigt wurde, daß Zwischenmasken für das LIGA-Verfahren durch einen subtraktiven Prozeß hergestellt werden können, stellt sich die Frage, ob auf ähnliche Weise auch Arbeitsmasken hergestellt werden können. Hierzu werden Wolframabsorber in einer Dicke von $12,5\ \mu\text{m}$ benötigt.

Grundlegende Untersuchungen zur Strukturierbarkeit dicker Wolframschichten wurden dafür an kommerziell verfügbaren Wolframfolien ($12,5\ \mu\text{m}$, Fa. Goodfellow) durchgeführt. Für die Herstellung von Röntgenmasken wurden diese Folien auf einen Rondenrahmen aufgeklebt und freigespannt prozessiert.

Als Ätzgas für die Strukturierung kommt wegen der höheren Abtragsraten nur SF_6 in Frage. Die Verwendung von CF_4 muß aufgrund der benötigten hohen Prozeßzeit (ca. 95 h) ausgeschlossen werden.

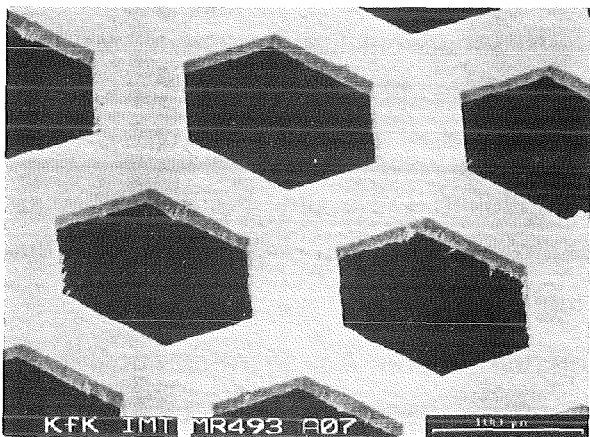
Die Strukturierung von Arbeitsmasken unter Verwendung von SF_6 als Ätzmedium benötigt eine ca. $1\ \mu\text{m}$ dicke Nickelschicht als Ätzmaske für den RIE-Prozeß. Eine so dicke Schicht läßt sich nicht mehr ohne merklichen Strukturverlust sputtern. Eine Strukturierung von Nickel durch reaktives Ionenätzen ist jedoch nicht möglich (siehe Kap. 2.3.2). Deshalb wurden für Vorversuche additive und subtraktive Strukturierungsmethoden miteinander kombiniert.

Auf den $12,5\ \mu\text{m}$ dicken Wolframfolien wurde $1\ \mu\text{m}$ Nickel in Resiststrukturen galvanisch abgeschieden, das später als Ätzmaske beim RIE-Prozeß diente. Für eine ausreichende Haftung des verwendeten Resists (AZ4210) mußte die Wolframschicht eine Minute mit einer 30%igen Lösung von Wasserstoffsuperoxyd angeätzt werden.

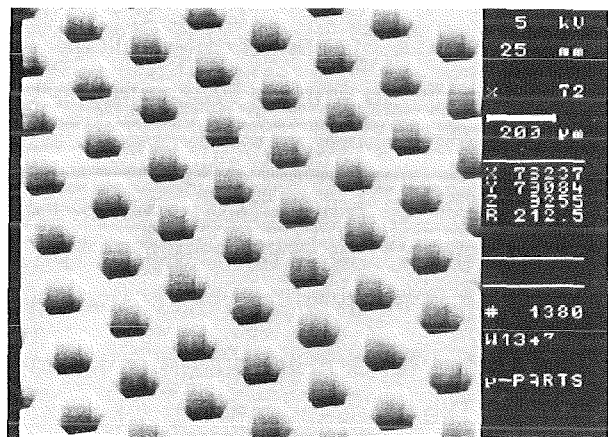
Beim galvanischen Aufbau der Maskierungsschicht aus Nickel traten keine prinzipiellen Schwierigkeiten auf. In der $1\ \mu\text{m}$ dicken Nickelschicht, die auf Wolfram galvanisch abgeschieden wurde, wurden Zugspannungen zwischen 50 und $70\ \text{N/mm}^2$ ermittelt. Abbildung 5.1a zeigt eine Aufnahme eines mit einem SF_6 -Plasma freitragend strukturierten Wabennetzes von $12\ \mu\text{m}$ Dicke. Abbildung 5.1b zeigt die mit diesem Wabennetz als Maske röntgentiefenlithografisch erzeugte Resiststruktur von $300\ \mu\text{m}$ Dicke. Abbildung 5.1c und 5.1d zeigen Aufnahmen der mit dieser Resiststruktur galvanisch erzeugten Nickelstruktur von $270\ \mu\text{m}$ Höhe. Dies zeigt, daß auch die Absorber von Arbeitsmasken mit dem subtraktiven Verfahren hergestellt werden

können. Die hier beschriebenen Vorversuche wurden mit gewalzten Wolframfolien durchgeführt, die über einen Rahmen aufgespannt wurden. Für einen routinemäßig einsetzbaren Maskenprozeß müßte das Aufputtern von Wolframschichten auf Trägerfolien so weiterentwickelt werden, daß auch ca. zehnmal dickere Wolframabsorberschichten (als die im Zwischenmaskenprozeß verwendeten) spannungsarm gefertigt werden können.

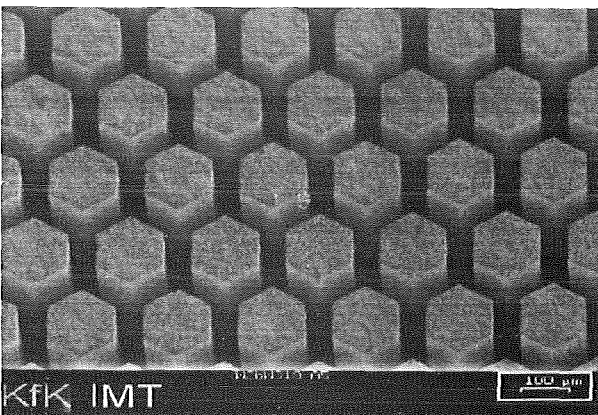
a)



b)



c)



d)

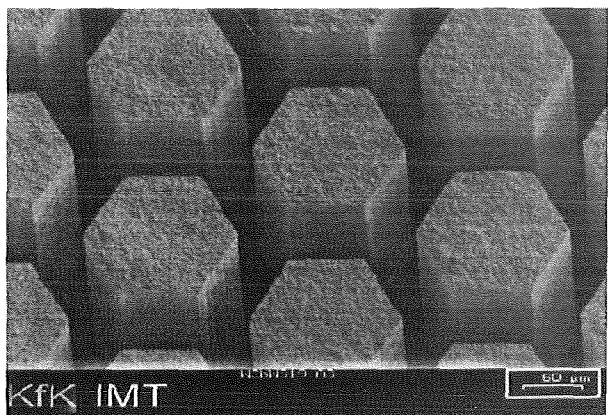


Abb. 5.1: Freitragend strukturierte Wolframfolie (a) und eine 300 µm dicke Resiststruktur, die mit ihr strukturiert wurde (b) sowie Aufnahmen der mit der Resiststruktur erzeugten Galvanikstruktur (c und d)

6 Zusammenfassung und Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde die subtraktive Herstellung von Absorberstrukturen für Röntgenzwischenmasken untersucht. Bei diesem Verfahren wird das Absorbermaterial durch Magnetronzerstäuben haftfest und mit gleichmäßiger Dicke auf die spätere Maskenträgerfolie möglichst spannungsarm aufgebracht. Das Verfahren erlaubt die haftfeste Herstellung von Absorberstrukturen mit nur 0,5 μm Breite und 2 mm Länge bis zu einer Dicke von 2,5 μm . Unabhängig von der Strukturbreite und der globalen Anordnung auf der Maske ergeben sich Abweichungen in der Höhe der Absorberstrukturen innerhalb von nur $\pm 2\%$. Dies bedeutet eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem bisher eingesetzten additiven Herstellungsverfahren durch galvanische Abscheidung von Gold in Resiststrukturen. Das additive Verfahren ist bei Röntgenzwischenmasken vergleichsweise störanfällig, da die Absorberstrukturen der Zwischenmasken nur ca. 2 μm hoch sind und kleinere Defekte schon zu deutlichen Fehlern führen, die bei der größeren Galvanikhöhe der Arbeitsmasken nicht stören würden.

Der Vergleich verschiedener Absorbermaterialien zeigte, daß Wolfram wegen großer Röntgenabsorption, vergleichsweise geringem Preis und guter Strukturierbarkeit am besten geeignet erscheint. Die Röntgenabsorption von Wolfram ist bei der für die Herstellung von Arbeitsmasken verwendeten charakteristischen Wellenlänge der Synchrotronstrahlung höher als die Absorption von Gold. Damit nach der Strukturierung der Wolframschicht keine großen Verzüge auftreten, muß die innere Spannung im Wolfram nach seiner Abscheidung auf der späteren Maskenträgerfolie möglichst gering sein. Bei der Entwicklung eines Herstellungsprozesses für Wolframschichten in der für den Maskenprozeß benötigten Dicke von ca. 2,5 μm zeigte sich, daß in den lateralen Spannungen in zueinander senkrechten Richtungen Unterschiede auftraten, die sich nicht minimieren ließen. Diese Anisotropie der Spannungen in den Wolframschichten geht vermutlich auf die Winkelverteilung des während des Beschichtungsprozesses auf dem Substrat auftreffenden Teilchenstroms und die relativ zum Schmelzpunkt von Wolfram niedrige Substrattemperatur zurück. Die Substrattemperatur war bei der Herstellung der Absorberschicht durch die Verwendung einer Titanträgerfolie beschränkt, da diese bei zu hohen Beschichtungs-temperaturen den zur Funktion der Röntgenmaske notwendigen Spannungszustand verändert. Lateral isotrope Spannungen wurden dadurch erzielt, daß das Substrat während des Beschichtungs Vorgangs um die eigene Achse rotierte. Die isotropen Spannungen konnten dann durch die Optimierung des Sputterdruckes minimiert werden.

Die inneren Spannungen der für den Maskenprozeß hergestellten Wolframabsorberschichten erwiesen sich als langzeitbeständig und wurden durch Temperprozes-

se bis 300 °C im Vakuum nicht verändert. Das Langzeitverhalten und die Temperaturbeständigkeit der inneren Spannungen sowie der Widerstand der hergestellten Schichten deuten auf das Vorliegen der α -Phase des Wolframs hin. Aus dem Sputtergas eingebautes Argon konnte in diesen Schichten nicht nachgewiesen werden. Die Dichte der aufgesputterten Wolframschichten wurde gravimetrisch bestimmt und liegt ca. 7% unter dem Literaturwert.

Als Maskierungsmaterial für die Strukturierung der Wolframabsorberschicht durch reaktives Ionenätzen wurden sowohl metallische als auch organische Materialien untersucht. Organische Maskierungsmaterialien erschienen wegen der geringen Selektivität der Ätzung gegenüber Wolfram als ungeeignet. Von den untersuchten metallischen Masken zeigte sich besonders Nickel für den Einsatz in fluorhaltigen Plasmen geeignet. Mit diesem Material konnten je nach Leistungsbereich und eingesetztem Ätzgas bis zu zwanzigfach niedrigere Abtragsraten als für Wolfram realisiert werden.

Für die Strukturierung der Absorberschicht wurden CF_4 und SF_6 als Ätzgase untersucht. Bei der Verwendung von CF_4 dominiert der physikalische Anteil der Ätzung über den chemischen. Es wurden in der Regel typische Sputterprofile mit glatter Ätzoberfläche und glatten Seitenwänden erhalten. Sowohl mit einer Aluminiumelektrode als auch mit einer Graphitelektrode wurden rückstandsfreie Ätzoberflächen beobachtet. Senkrechte Profile wurden nur bei kleinen ins Plasma eingespeisten Generatorleistungen, geringem Druck und kleinen Gasflüssen erzielt. Nachteilig bei der Verwendung von CF_4 ist die geringe Abtragsrate, die bei der Strukturierung der Absorberschicht erzielt wird.

Durch den Einsatz von SF_6 als Ätzgas konnten wesentlich kürzere Prozeßzeiten realisiert werden. Je nach verwendetem Elektrodenmaterial ergeben sich mehr als zehnfach größere Abtragsraten für Wolfram als bei CF_4 . Die Strukturierung von Wolfram mit SF_6 wird wesentlich von der chemischen Komponente dominiert. Aufgrund der aggressiveren Ätzung dominieren unterätzte Profile in den Ergebnissen. Erst im Bereich hoher ins Plasma eingespeister Generatorleistungen konnten senkrechte und damit für einen Maskenprozeß geeignete Profile unter Verwendung einer Graphitelektrode erzielt werden. Bei der Verwendung einer Aluminiumelektrode zeigten sich mit steigendem Druck und steigendem Gasfluß zum Teil unkontrollierte Abscheidungen auf der Nickelmaskierungsschicht, teilweise auch auf den geätzten Wolframseitenwänden. Ein weiterer Vorteil des SF_6 -Plasmas ist die geringere Abtragsrate der Nickelmaskierungsschicht im Vergleich zum CF_4 -Plasma.

Erzielt wurden mit SF_6 als Ätzmedium und einer Nickelschichtdicke von 0,15 μm minimale Strukturbreiten von 0,5 μm in einer 2,5 μm dicken Wolframschicht. Die 0,15 μm dünne Nickelschicht wurde durch Sputterätzen strukturiert, wobei ein 0,5

μm dicker Resist als Abdeckung diente, der fotolithographisch strukturiert wurde. Die Ätzzeit für die Herstellung von Zwischenmasken bei der Verwendung von SF_6 beträgt typischerweise 1,5 Stunden, wenn mit einer 10 %igen Sauerstoffzugabe gearbeitet wird. Die Zugabe von Sauerstoff zum SF_6 -Ätzgas erhöht die Ätzrate von Wolfram und erniedrigt diejenige von Titan. Deshalb ist bei Zugabe von Sauerstoff zum SF_6 keine zusätzliche Ätzstoppschicht zum Schutz der Trägerfolie erforderlich. Bei einem Zusatz von 15 % Sauerstoff kann die Strukturierung sogar in 50 Minuten durchgeführt werden. In dieser Prozeßzeit ist dann schon eine Überätzzeit von 25 % enthalten. Mit beiden Gasmischungen werden senkrechte Profile erhalten, wobei die Seitenwände der Wolframabsorberstrukturen mit dem zunehmenden Sauerstoffgehalt im Ätzgas tendenziell rauher werden. Dies kann mit dem ansteigenden Gehalt an freiem Fluor im Ätzgas erklärt werden, der sich mit steigender Sauerstoffzugabe einstellt und einen aggressiveren Angriff der Seitenwände bewirkt.

Durch Umkopieren von Zwischenmasken mit Wolframabsorbern zur Herstellung von Arbeitsmasken konnte gezeigt werden, daß sich mit subtraktiv strukturierten Wolframabsorbern mindestens ebenso kleine kritische Dimensionen erreichen lassen, wie mit Goldabsorbern.

Die inneren Spannungen der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Wolframschichten äußern sich in erster Linie in einem Gradienten der inneren Spannungen über die Schichtdicke, da Verzüge aus der Ebene der Trägerfolie heraus beobachtet wurden, wie sie durch Gradienten in der inneren Spannung der Wolframschicht zu erwarten sind. Darauf ist es vermutlich zurückzuführen, daß selbst bei extrem ungünstigen Geometrien der Absorber nur mittlere Verzüge von maximal $1,7 \mu\text{m}$ festgestellt wurden, die offensichtlich eher auf den Übertragungsprozeß als auf die Spannungen der Absorberschicht zurückzuführen sind.

Die Herstellung freitragender Wabenstrukturen aus $12,5 \mu\text{m}$ dicken Wolframschichten, die durch Röntgentiefenlithographie in eine $300 \mu\text{m}$ dicke PMMA-Schicht übertragen und danach galvanisch abgeformt wurden, zeigt das Potential der subtraktiven Absorberformung auch für die Herstellung von Arbeitsmasken. Für diesen Prozeß wären aber noch wesentliche Entwicklungsarbeiten bei der Schichtherstellung notwendig.

7 Literaturverzeichnis

- [Ada85] S. Adachi, N. Susa
Reactive ion etching of tungsten films sputter deposited on GaAs
J. Electrochem. Soc. Vol. 132, No. 12, 1985, **2980 - 2989**
- [Bec85] E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Mahner, D. Münchmeyer:
" Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und
großer Strukturhöhe durch Röntgentiefenlithographie mit
Synchrotronstrahlung"
Galvanoformung und Kunststoffabformung (LIGA-Verfahren)."
KfK 3995, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1985
- [Bes89] T.D. Bestwick, G.S. Oehrlein
Tungsten etching mechanisms in CF_4/O_2 reactive ion etching plasmas
J. Appl. Phys. 66 (10), 15. November 1989, **5034 - 5038**
- [Ble90] P. Bley, J. Mohr, R. Ruprecht
Komponenten der LIGA-Technik für Mikrosysteme
Fachtagung Mikrosystemtechnik, 8. November 1990, München
Dokumentation Mikrosystemtechnik, Herausgeber Münchner Messe- und
Ausstellungsgesellschaft mbH.
- [Bol84] D. Bollinger, S. Iida, O. Matsumoto
Reactive Ion Etching: Part II
Solid State Technology/June 1984, **167 - 173**
- [Bro91] I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew
Taschenbuch der Mathematik, 25. Auflage, 1991
Kap. 2.6.6.1, Seite **227**
- [Bur90] C. Burbaum, J. Mohr, P. Bley, W. Ehrfeld
Fabrication of Capacitive Acceleration Sensors by the LIGA Technique.
Euroensors IV, 1.-3. October 1990, Karlsruhe
Sensors and Actuators, Vol. 27, No. 1/3, **509 - 512**
- [Cho69] K.L. Chopra
Thin Film Phenomena
McGraw-Hill, New York, 1969, **182**
- [Dir77] A.G. Dirks, H.J. Leamy
Columnar microstructure in vapour-deposited thin films
Thin Solid Films, 47 (1977) **219 - 233**
- [Fli89] P.A. Flinn
"Principles and Applications of Wafer Curvature Techniques for Stress
Measurements in Thin Films
Mat.Res.Soc.Symp.Proc., Vol. 130, (1989), **41-51**

- [Fra86] F. Francassi, J.W. Coburn
Quarz crystal microbalance studies of the plasma-assisted etching of polyimide and tungsten thin films
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 68, **407-413**
- [Göt92] J. Göttert, J. Mohr, C. Müller
Coupling Elements For Multimode Fibers by the LIGA Process
in H. Reichl (Ed.), Micro System Technologies 92, vde-verlag gmbh, **297 - 307**
- [Gos87] A.M. Gosnet, F.R. Ladan, M.C. Joncour, Y. Gao
Optimization of the stresses in tungsten sputtered films, study of their stability
Microelectronic Engineering 6 (1987) **253-258**
- [Gro88] E. Grossmann, A. Bensaoula, A. Ignatiev,
An XPS study of XeF₂ dry etching of tungsten silicide
Surf. Sci. 197, (1988), **99 - 108**
- [Gro89] C.R.M. Grovenor
Microelectronic Materials,
IOP Publishing Ltd, Bristol 1989, Chapter **4**
- [Har88] S. Harsch, W. Ehrfeld, A. Maner
Untersuchungen zur Herstellung von Mikrostrukturen großer Strukturhöhe durch Galvanoformung in Nickelsulfamatelektrolythen.
KfK-Bericht 4455, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1988)
- [Har90] M. Harmening, W. Ehrfeld
Untersuchungen zur Abformung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit großer Strukturhöhe aus elektrisch isolierenden und leitfähigen Kunststoffen
KfK-Bericht 4711, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1990)
- [Hei90] M. Heidinger,
Herstellungseinflüsse auf globale und lokale Maßhaltigkeiten von Röntgenmasken für das LIGA-Verfahren
Diplomarbeit an der Fakultät für Physik der Universität Karlsruhe und am Kernforschungszentrum Karlsruhe, Wintersemester 90/91
- [Hei92] H.Hein, P. Bley, J. Göttert, U. Klein
Elektronenstrahlolithographie und Simulationsrechnung für die Herstellung von Röntgenmasken beim LIGA-Verfahren
VDI-Berichte 960, Band 1, 1992, S **387 - 390**
- [Hen74] D. Henderson, M.H. Brodsky, P.Chaudhari
Simulation of structural anisotropy and void formation in amorphous thin films
Applied Physics Letters, Vol. 25, No. 11, **641-643**

- [Heu70] F.M. d'Heuerle,
Aluminum Films deposited by rf sputtering
Metall. Trans. 1, (1970), **725 - 732**
- [Hof77] D.W. Hoffmann, J.A. Thornton
The compressive stress transition in Al, V, Zr, Nb, and W metal film
sputtered at low working pressures
Thin Solid Films 45, (1977), **387-396**
- [Hof82] D.W. Hofman, J.A. Thornton
Internal stresses in Cr, Mo, Ta, and Pt films deposited by sputtering from
a magnetron source
J. Vac. Sci. Technol., 20 (3), (1982), **355-358**
- [Hof83] D.W. Hoffman, C. Peters
Control of stress and properties in sputtered metal films on nonconductive
and heat-sensitive substrates
Proc. IX IVC-V ICSS, Madrid (1983), **415-424**
- [Hun89] P.A. Hunt
Tungsten deposition for local interconnect using a production
sputter deposition system
Applied Surface Science 38, (1989), **485 - 496**
- [Ito91] M. Itoh, M. Hori, S. Nadahara
The origin of stress in sputter-deposited films for X-Ray masks
J. Vac. Sci. Technol. B 9 (1), (1991), **149 - 153**
- [Ito91b] M. Itoh, M. Hori
An ultra-low stress tungsten absorber for X-Ray masks
J. Vac. Sci. Technol. B 9 (1), (1991), **165 - 168**
- [Jon89] G.J. Jones, S. Tandon
Via metal interconnection process utilizing CVD tungsten and liftoff
technology
Materials Research Society, (1989), **151-157**
- [Kad87] K. Kadel
Untersuchungen zur Anwendbarkeit eines plasmagestützten Trockenätz-
Verfahrens zur Strukturierung von Masken für die Röntgentiefenlitho-
graphie
Diplomarbeit an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe
und am Kernforschungszentrum Karlsruhe, September 1987
- [Kad93] K. Kadel, W.K. Schomburg, G. Stern
X-Ray masks with tungsten absorbers for use in the LIGA process
Microelectronic Engineering 21 (1993) **123-126**
- [Kie87] G. Kienel, H. Frey, in Dünnschichttechnologie
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1987), **76 - 182**

- [Kie87b] G. Kienel, H. Frey, in Dünnschichttechnologie
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1987), **119**
- [Kin88] J.A. King
Materials Handbook for Hybrid Microelectronics
Artech House, Boston, London, (1988), **154 - 168**
- [Kow90] B. Kowanz, W. Bacher, P. Bley, W. Ehrfeld
Linear Driving Device for Mikro-Actuators
MIKROMECHANICS EUROPE 1990, 2 nd Workshop on Mikromachining,
Mikromechanics and Mikrosystems, Berlin, 26.-27. November 1990,
- [Kow91] B. Kowanz
Systemtechnische Analyse und Entwicklung eines Mikroventils in LIGA-
Technik
KfK-Bericht Nr. 4886, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1991)
- [Mah88] A. Mahner, W. Ehrfeld, R. Schwarz
Galvanoformung von Absorberstrukturen aus Gold auf Masken für die
Röntgentiefenlithographie
Galvanotechnik 79, (4), (1988), **1101-1106.**
- [Mai89] B. Maid, W. Ehrfeld, J. Hormus, J. Mohr, D. Münchmeyer
Anpassung der spektralen Verteilung der Synchrotronstrahlung für die
Röntgentiefenlithographie
KfK-Bericht 4579, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1989)
- [Mel76] C.M. Melliar-Smith
Ion etching for pattern delination
J. Vac. Sci. Technol., Vol. 13, No. 5, (1976), **1008 - 1022**
- [Men93] W. Menz, P. Bley
Mikrosystemtechnik für Ingenieure
VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge,
(1993), Kap. 7
- [Meu90] R. van Meurs, T. Lassiter, P. Hendrix, M. Utsugi
The etching of CVD Tungsten over TiW using SF₆/Cl₂ chemistry
Sixteenth Annual Plasma Seminar Proceedings, Dallas, (1990), **73-81**
- [Moh88] J. Mohr, W. Ehrfeld, D. Münchmeyer
Analyse der Defektursachen und der Genauigkeit der Strukturübertragung
bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung
KfK Bericht 4414, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1988)
- [Moh90] J. Mohr, C. Burbaum, P. Bley, W. Menz, U. Wallrabe:
Movable Mikrostrukturen Manufactured by the LIGA Process as Basic
Elements for Microsystems.
Micro System Technologies 90, H. Reichel ed., Springer Verlag (1990)

- [Mor74] W.R. Morcom, W.L. Worrell, H.G. Sell, H.I. Kaplan
The preparation and characterisation of beta-tungsten, a metastable tungsten phase
Metall. Trans., 5, (1974), **155-161**
- [Mov69] B.A. Movchan, A.V. Demchishin
Study of the structure and properties of thick vacuum condensates of nickel, titanium, tungsten, aluminum oxide and zirconium dioxide
Phys. Met. Metallogr. 28, (1969), **653 - 660**
- [Oer89] G. S. Oehrlein, J.L. Lindström
Competitive reactions of fluorine and oxygen with W, WSi₂, and Si surfaces in reactive ion etching using CF₄/O₂
J. Vac. Sci. Technol. A 7 (3), (1989), **1035-1045**
- [Par86] S. Park, C.P. Sun, J.T. Yeh, J.K. Cataldo, N. Metropulos
Reactive ion etching of molybdenum in CF₄/O₂ plasma
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 68, (1986), **65-70**
- [Pet73] P. Petroff, T.T. Sheng, A.K. Shinha, G.A. Rozgony, F.B. Alexander
Microstructure, growth, resistivity, and stress in thin tungsten films deposited by rf sputtering
J. Appl. Phys. 44, (1973), **2545-2554**
- [Pic85] A. Picard, G. Turban
Plasma etching of refractory metals (W, Mo, Ta) and silicon in SF₆ and SF₆-O₂. An Analysis of the reaction products
Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol 5, No. 4, (1985), **333 - 351**
- [Rap93] R. Rapp, K. Kadel, W.K. Schomburg, G. Stern
Mit dem LIGA-Verfahren hergestellt Membranpumpe
3. Symposium für Mikrostrukturtechnik, Regensburg, Februar 1993
- [Rog92] A. Rogner,
Micromolding of passive network components
Proceedings of First Plastic Optical Fibres and Applications Conference
Paris, June 22-23, (1992), **102 - 104**
- [Sai87] R.S. Saia, B. Gorowitz
Reactive ion etching of refractory metals for gate and interconnect applications
MRS Material Research Society, Pittsburg Pennsylvania, (1987), **349 - 357**
- [Scho90] W.K. Schomburg, P. Bley, H. Hein, J. Mohr
Masken für die Röntgentiefenlithographie
Fachtagung Mikrosystemtechnik, 8. November 1990, München
VDI Berichte 870, (1990), **133 - 154**

- [Scho90b] W. Schomburg, W. Schelb, G. Stern
Verfahren zur Herstellung dünner Folien
deutsches Patent, DE 39 20 788 C1
- [Scho91] W.K.Schomburg, H.J. Baving, P. Bley
Ti and Be-X-Ray Masks with Alignment Windows for the LIGA-Process
Microelectronic Engineering 13 (1991) **323 - 326**
- [Som76] S. Somekh
Introduction to ion and plasma etching
J. Vac. Sci. Technol., Vol. 13, No. 5, (1976), **1003 - 1007**
- [Schu93] J. Schulz, J. Göttert, A. El-Kholi, K. Kadel, J. Mohr
The influence of sloped absorber sidewalls in deep X-ray lithography
Microelectronic Engineering 21 (1993) **117-122**
- [Tan89] S. Tandon, G.W. Jones
Reactive ion etching of tungsten in SF₆ and CF₄
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 130, (1989), **165-174**
1989 Materials Research Society
- [Tho74] J.A. Thornton,
Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the
structure and topography of thick sputtered layers
J. Vac. Sci. Technol., Vol. 11, No. 4, (1974), **666-670**
- [Tho77] J.A. Thornton, D.W. Hoffman
Internal stresses in titanium, nickel, molybdenum, and tantalum films
deposited by cylindrical magnetron sputtering
J. Vac. Sci. Technol., Vol. 14, No. 1, (1977), **164-168**
- [Tho78] J.A. Thornton, A.S. Penfold,
Thin Film Processes
(J.L. Vossen, W. Kern, eds) , Academic Press, London, (1978), **II-2**
- [Tho89] J.A. Thornton
Stress related effects in thin films
Thin Solid Films, 171 (1989) **5-31**
- [Ull67] Ullmans Enzyklopädie der technischen Chemie
Band 18,
Urban & Schwarzenberg, München , Berlin, Wien, (1967), Seite **650**
- [Vol87] H. Vollmer, W. Ehrfeld, P. Hagmann:
Untersuchungen zur Herstellung von galvanisierbaren Mikrostrukturen mit
extremer Strukturhöhe durch Abformung mit Kunststoff im Vakuum-
Reaktionsgießverfahren.
KfK-Bericht 4267, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1987)

- [Wai78] R.K. Waits,
Thin Film Processes
(J.L. Vossen, W. Kern, eds), Academic Press, London, 1978 , **II-4**
- [Wal92] U. Wallrabe, P. Bley, J. Mohr
Entwicklung, Optimierung und Test von elektrostatischen Mikromotoren
nach dem LIGA-Verfahren
KfK-Bericht 5088, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1992)
- [Weh70] G.K. Wehner, G.S. Anderson,
Handbook of thin Film Technology
(L.I. Maisel, R. Glang eds) McGraw - Hill, (1970), Chapter **3**