

Entwicklung des elektromagnetischen Antriebssystems für einen optischen Mikroschalter

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
genehmigte
Dissertation

von
Dipl.-Ing. Thomas Kohlmeier
geboren am 13.12.1971 in Hameln

2005

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. H.-H. Gatzen
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. H.-D. Stölting
Tag der Promotion: 20. Dezember 2004

Abstract

Entwicklung des elektromagnetischen Antriebssystems für einen optischen Mikroschalter

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung, Fertigung und Charakterisierung eines elektromagnetischen Antriebs für optische mikromechanische Schalter zum Einsatz in Vermittlungssystemen zur faseroptischen Datenkommunikation. Die Arbeit schließt die Untersuchung der notwendigen Prozesstechnologie ein. Der elektromagnetische Mikroantrieb besteht aus mehrlagigen, dreidimensionalen Spulen- und Magnetstrukturen mit großen Querschnittsflächen, um hinreichend hohe Kräfte zu erreichen. Bei begrenzten lateralen Bauteilabmessungen bedeutet dies die Fertigung möglichst hoher Strukturen. Gleichzeitig müssen aber die Einzelschichten und besonders die Aktoroberfläche des optischen Mikroschalters eben sein. Die Oberfläche des Antriebs stellt zum einen die Bezugsebene für die Verkippung des Torsionsspiegels dar, der durch Ablenkung eines Laserstrahls die Schaltfunktion realisiert. Außerdem definiert sie die Größe des Luftspaltes im magnetischen Kreis und somit die Antriebskraft. Ein präziser magnetischer Schichtaufbau ist daher notwendig. Diese Anforderungen gelten ebenso für andere elektromagnetische Mikroantriebe, wie lineare Reluktanz- und Hybridschrittmotoren. Die zu entwickelnden Fertigungsprozesse sind daher universell einsetzbar. Die Strukturierung hoher Aspektverhältnisse macht spezielle Photolithographieprozesse erforderlich. Untersucht werden Tiefenlithographie und Galvanoformung, kombiniert mit Techniken zur Einbettung und Planarisierung hoher Strukturen. Zur Isolation und Einebnung elektrisch leitender sowie magnetischer Mikrostrukturen werden geeignete Funktionswerkstoffe ausgewählt. Die notwendigen mikrotechnischen Prozesse werden entwickelt und an Erregerspulen mit integrierter magnetischer Flussführung erprobt. Anschließend werden Antriebssysteme aufgebaut und in optischen Mikroschaltern charakterisiert.

Zum Aufbau der Systeme werden Werkstoffe, Technologien und Prozessfolgen untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf dem photosensitiven Polymermaterial, das neben der Mikroformung durch UV-Tiefenlithographie auch als Funktionswerkstoff zur Isolation, Einbettung und Planarisierung galvanisch abgeschiedener Strukturen dient. Um Prozessfolgen für den Gesamtaufbau zusammenzustellen, werden Einzelschritte auf ihre Eignung und Kompatibilität geprüft und anschließend ausgewählt. Die Herausforderungen der Fertigung sind hohe Aspektverhältnisse und Schichtdicken für Erregerspulen und Magnetstrukturen sowie der exakte, mehrlagige Schichtaufbau kombiniert mit der Forderung nach chemischer Beständigkeit sowie thermischer und mechanischer Stabilität von Strukturen und Schichten während Fertigung und Betrieb. Gute Schichthftung und geringe Schichtspannungen sind ebenfalls wichtig. Die Eignung des Antriebsentwurfs wird durch Betrieb und Charakterisierung des Schalters demonstriert. Die entwickelte Technologie erlaubt effiziente elektromagnetische Mikroantriebe mit großen Systemhöhen.

Abstract

Development of the Electromagnetic Drive System for an Optical Microswitch

This work deals with the development, fabrication, and characterization of an electromagnetic micromachined drive for an optical micro mechanical switch intended for a fiber optical cross connect for data communication. The work includes the investigation of process technologies necessary for fabricating the micro actuator.

Due to the actuator's electromagnetic drive principle, it is build up by multi-layered three-dimensional magnet and coil structures with large cross sections to achieve a sufficient driving force. To accomplish a small footprint of the component, high structures with large aspect ratios are required. Furthermore, the individual layers and especially the surface of the actuator's coil system have to be even. The system's top represent a reference layer for the tilting actuation of the torsional mirror for laser beam deflection. It additionally defines the air gap's length of the magnetic circuit and consequently the magnetic force of the drive. Thus precise actuation of the micromachined mirror depends on an accurate magnetic layer structure. These requirements are also valid for other electromagnetic actuators, like for linear variable reluctance and hybrid step motors. The fabrication technology developed therefore may be applied universally. High aspect ratio patterning requires specific photolithographic processes. UV-depth lithography and electroplating combined with embedding and planarization of microstructures are investigated. For insulation and embedding of conducting and magnetic structures, appropriate materials are chosen. The necessary micromachining processes are developed and tested on excitation coils with integrated magnetic flux guiding. Subsequently, drive systems are fabricated and characterized.

To facilitate these systems materials, technologies and processes are investigated. The main emphasis is put on photosensitive polymer material used for UV depth lithography as well as for insulation, embedding and planarization of electroplated microstructures. To combine the process flow for the entire drive system single process steps were chosen after been examined and checked concerning their compatibility.

The fabrication challenges are the high aspect ratios and layer thicknesses for the excitation coils and magnetic layers as well as the precision of the structural layers. Furthermore, it is mandatory to achieve thermal, chemical, and mechanical stability of structures and films during fabrication and operation of the device. Good adhesion and low film stress is also of importance. The feasibility of the drive design is verified by functional tests and characterization of the optical switch. The technology developed may be used for other electromagnetic actuators requiring great layer thicknesses and high aspect ratios.

Schlagworte: Elektromagnetischer Antrieb, Mikroschalter, MEMS

Keywords: Electromagnetic drive, Microswitch, MEMS

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen und Abkürzungen	VII
1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft	5
2.1	Optische mikromechanische Schalter	5
2.1.1	Grundprinzip optischer Schalter	5
2.1.2	Einsatz in optischen Vermittlungssystemen	6
2.1.3	Mikrotechnischer Aufbau	7
2.2	Definition und Eigenschaften von Mikroaktoren	8
2.3	Arbeitsprinzip elektromagnetischer Aktoren	10
2.3.1	Energiewandlung	10
2.3.2	Arbeitsvermögen	10
2.4	Form und Aufbau elektromagnetischer Mikroaktoren	12
2.5	Strukturerzeugung mit hohen Aspektverhältnissen	13
2.5.1	Verfahrensüberblick	14
2.5.2	UV-Tiefenlithographie	16
2.5.2.1	Positivresist	17
2.5.2.2	Negativresist	20
2.5.3	Galvanoformung	24
2.5.3.1	Elektrochemische Abscheidung	24
2.5.3.2	Stofftransport	25
2.5.3.3	Stromdichteverteilung	26
2.5.3.4	Mikroformen	28
2.6	Werkstoffe für elektromagnetische Aktoren	29
2.6.1.1	Werkstoffe für mechanische Funktionen	29
2.6.1.2	Magnetische und elektrisch leitende Werkstoffe	30
2.6.1.3	Elektrisch isolierende Werkstoffe	31
2.7	Ausgewählte integrierte elektromagnetische Mikroantriebe	34
2.7.1	Mikromotoren	35
2.7.2	Positionierende Systeme	36
2.7.3	Schaltende Systeme	37
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	41
4	Vorgehensweise	42
5	Versuchstechnik	44
5.1	Verfahren und Anlagen	44

5.1.1	Schichtabscheidung	44
5.1.2	Ätzverfahren.....	46
5.1.3	Strukturübertragung	46
5.2	Messtechniken und Analysemethoden	48
5.2.1	Oberflächenanalyse	48
5.2.2	Magnetische Materialanalyse.....	49
5.2.3	Elektrische, elektromagnetische und thermische Analyse	49
5.2.4	Analyse der Schaltfunktion.....	50
6	Systementwurf	51
6.1	Konzept für einen optischen Mikroschalter	51
6.2	Auslegung.....	52
6.3	Berechnung des Antriebs	54
7	Technologie- und Prozessentwicklung.....	57
7.1	UV-Tiefenlithographie mit DNQ/Novolak-Resist	57
7.1.1	Resistaufbringung	57
7.1.2	Resisttrocknung	58
7.1.3	Resiststrukturierung	59
7.2	UV-Tiefenlithographie mit SU-8-Resist.....	63
7.2.1	Untersuchung des Lithographieprozesses.....	64
7.2.2	Belichtungsdosis und -spektrum	66
7.2.3	Einfluss des Substrates.....	69
7.3	Galvanische Abscheidung von weichmagnetischen Werkstoffen	70
7.3.1	Zielsetzung.....	70
7.3.2	Analyse des Magnetmaterials	70
7.4	Isolation und Einbettung von Mikrostrukturen.....	72
7.4.1	Einebnende Wirkung von SU-8-Resist.....	73
7.4.2	Isolation und Einbettung bei Mehrfachsichten.....	74
7.4.3	Oberflächenbearbeitung.....	75
7.5	Technologieaspekte für Mehrschichtsysteme.....	80
7.5.1	Haftung großflächiger SU-8-Schichten.....	81
7.5.2	Ätzen der Startschicht	83
7.5.3	SU-8-Strukturierung über reflektierenden Strukturen.....	83
7.5.4	Opferschichten	84
7.5.5	Planarisierung	85
7.6	Prozessfolgen für Erregerspulen	87
7.6.1	Arten von Strukturebenen	87

7.6.2	Spulenstrukturen.....	87
7.6.3	Grundlegende Fertigungsfolgen für Spiralspulen.....	88
8	Fertigung.....	92
8.1	Maskenlayout des Antriebs.....	92
8.2	Prozessfolge zur Fertigung des Antriebs.....	93
8.3	Fertigung des Antriebs.....	95
8.4	Fertigung des Ni-Rings auf dem Spiegel.....	97
8.5	Systemintegration.....	97
9	Charakterisierung des Antriebs.....	99
9.1	Antriebssystem.....	99
9.1.1	Elektrische und magnetische Analyse.....	99
9.1.2	Thermische Analyse.....	100
9.2	Mikroschalter.....	101
9.2.1	Topographieanalyse.....	101
9.2.2	Analyse des Schaltverhaltens.....	102
10	Diskussion der Ergebnisse.....	104
10.1	Konzeption.....	104
10.2	Entwickelte Technologie.....	104
10.3	Technologiegerechte Auslegung.....	107
10.4	Prozessfolgen und Fertigung.....	107
10.5	Systemintegration.....	110
10.6	Systemcharakteristik.....	111
10.7	Schlussfolgerung.....	112
10.8	Ausblick.....	113
11	Zusammenfassung.....	114
12	Literatur.....	117

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
Φ	Vs	Magnetischer Fluss
α	1/K	Temperaturausdehnungskoeffizient
α_s	°	Kippwinkel des Spiegels
γ	-	Kontrast
δ	m	Luftspaltlänge
δ_D	m	Diffusionsschichtdicke
ϵ_r	-	Dielektrizitätskonstante
η_D	V	Durchtrittsüberspannung
η_{Diff}	V	Diffusionsüberspannung
η_{ges}	V	Überspannung
η_K	V	Kristallisationsüberspannung
η_R	V	Reaktionsüberspannung
θ	°	Flankenwinkel
μ_r	-	Relative Permeabilität
μ_0	Vs/(Am)	Magnetische Feldkonstante
A	m ²	Querschnittsfläche
B	T	Magnetische Flussdichte
B_L	T	Magnetische Flussdichte im Luftspalt
B_S	T	Magnetische Sättigungsflussdichte
D	m ² /s	Diffusionskoeffizient
D	J/m ²	Belichtungsdosis
D_0	J/m ²	Belichtungsdosis für komplette Entwicklung (Clear Dosis)
D_1	J/m ²	Ansprechdosis
E	Pa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
F_{geg}	N	Belastungskraft

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
F_m	N	Magnetkraft
F_{mA}	N	Anzugskraft
F_{mH}	N	Haltekraft
G_m	Vs/A	Magnetische Leitfähigkeit des magnetischen Kreises
H	A/m	Magnetische Feldstärke
I	A	Elektrische Stromstärke
R_a	m	Arithmetischer Mittenrauwert
c	kg/C	Elektrochemisches Äquivalent
$c(x)$	$\text{mol} \ell^{-1}$	Ionenkonzentration in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand
c_∞	$\text{mol} \ell^{-1}$	Mittlere Ionenkonzentration im Elektrolyten
c_0	$\text{mol} \ell^{-1}$	Ionenkonzentration an der Elektrode
d	m	Abstand
h_R	m	Höhe der Resistschicht (Welligkeit)
h_S	m	Höhe der Struktur
$h\nu$	eV	Energie eines Lichtquants
ℓ	m	Leiterlänge
m	kg	Masse
t	s	Zeit
w	-	Windungszahl
w_S	m	Strukturbreite

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
BCB	Benzocyclobuten
CCD	Charge Coupled Device
CMP	Chemisch-mechanisches Polieren
CVD	Chemical Vapour Deposition
DRIE	Deep Reactive Ion Etching
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EPR	Epoxy-based Photoresist
DNQ	Diazonaphtoquinon
DOP	Degree of Planarization
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digital Mirror Device
DUV	Deep Ultra Violet
FEM	Finite Elemente Methode
GBL	γ -Butyrolacton
HARMST	High Aspect Ratio Microstructure Technology
HDTV	High Definition Television
IBE	Ion Beam Etching
ICA	Indenecarboxylic Acid (Indencarbonsäure)
imt	Institut für Mikrotechnologie
LIGA	Röntgenlithographie mittels Synchrotronstrahlung, Galvanik und Abformung
MAT	Microsensor and Actuator Technology (TU-Berlin)
MCM	Multi Chip Module
MEMS	Micro-electro-mechanical Systems
MOEMS	Micro-optoelectro-mechanical Systems
NMP	N-Methyl-Pyrrolidon
OXC	Optical Cross Connect
PEB	Post Exposure Bake

Abkürzung	Bezeichnung
PGMEA	Propylenglykoldimethylacetat
PMMA	Polymethylmetacrylat
PP	Polypropylen
PR	Photoresist
PVC	Polyvinylchlorid
PVD	Physical Vapour Deposition
REM	Rasterelektronenmikroskop
RIE	Reactive Ion Etching
RKM	Rasterkraftmikroskop
UV	ultraviolett
VSI	Vertical Scanning Interferometry
VSM	Vibrating Sample Magnetometer
VR	Variable Reluctance

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik ist eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Die Mikrotechnik wird viele Wissenschaftszweige beeinflussen, auch wenn Vorhersagen ihres Wachstumspotentials Unsicherheiten beinhalten [SEN01]. Die Forschung auf dem Gebiet der Mikrotechnik ist in den vergangenen Jahrzehnten stark vorangetrieben worden, wodurch neue Technologien entwickelt wurden [FRE99, FUJ98, MUL00]. Es entstanden neben den klassischen Systemen für Datenkommunikation und Automobilsensorik neuartige Mikrosysteme für verschiedene Disziplinen der Natur- und Ingenieurwissenschaften, wie beispielsweise Mikroturbinen und -motoren oder intelligente Sensorsysteme, wie z. B. DNA-Analysesysteme, künstliche Retina- oder Geruchssensoren [GAR01, MAD02].

Photonische Mikrosysteme besitzen zentrale Bedeutung für optische Datenkommunikation, -speicherung und -visualisierung [BOT03]. Erfolgreich mikrotechnisch hergestellte Bauteile sind Mikrochips für Projektions- und Bildverarbeitungssysteme, wie der Digital Mirror Device (DMD) Chip von Texas Instruments. Die Technologie erlaubt die Integration mechano-optischer und elektronischer Funktionen auf einem Chip. Bewegliche elektrostatisch angetriebene Torsionsspiegel mit einer Kantenlänge von nur $16\ \mu\text{m}$ erlauben zwei Schaltstellungen ($\pm 10^\circ$) für einfallende Lichtstrahlen. Die Spiegel sind flächig in einer Matrix (HDTV: 2048×1152) angeordnet, wobei jeder Spiegel einen Bildpunkt definiert. Der mechanische Aufbau besteht aus drei Ebenen von Al-Strukturen, die auf CMOS Chips mittels Opferschichttechnik hergestellt werden (vgl. Bild 1-1). Die unterste Ebene liefert das Potential für die Adresselektroden in der mittleren Ebene. Hier liegt, durch Torsionsfedern beweglich aufgehängt, auch die Basis des Spiegels. Die Verkipfung der Basisstruktur ist durch Anschläge begrenzt [FUJ97, HOR95, YOU95].

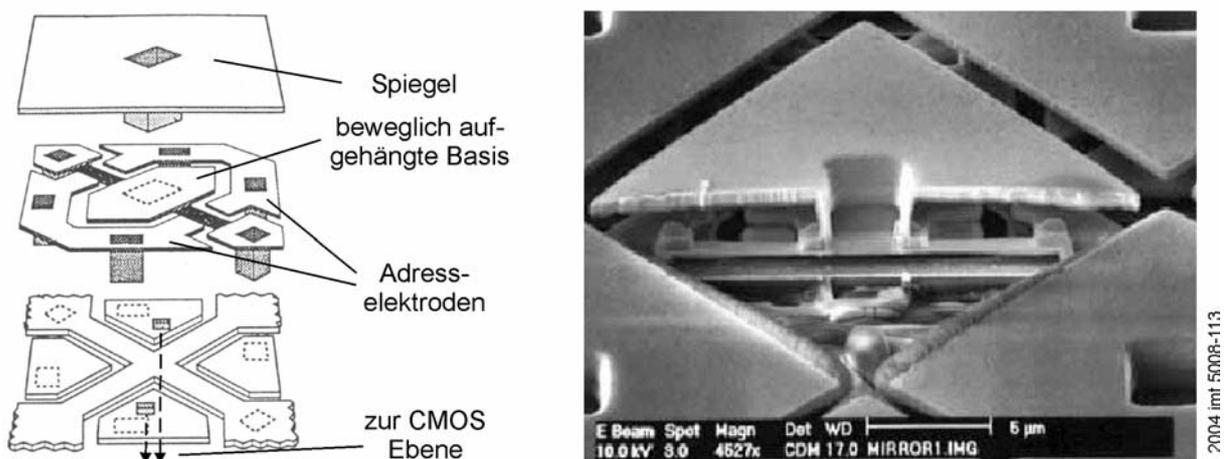


Bild 1-1: Struktur des DMD: Explosionszeichnung (links) und Schnitt durch ein System (rechts), nach [FUJ97, HOR95]

Die mit der Miniaturisierung durch Mikrotechnik verbundene Integration von Funktionen kann auch für andere optische Anwendungen effektiv genutzt werden. So benötigen optische Netzwerke für die Datenkommunikation neue, leistungsstarke Technologien zur Verarbeitung stetig steigender Datenraten. Während laseroptische Komponenten wie Strahlquellen, Verstärker und Filter technisch sehr weit entwickelt sind, besitzen die Daten weiterleitenden Systeme noch ein hohes Entwicklungspotential. Dies gilt besonders in Hinblick auf hohe Datenraten und die hierfür notwendigen Schaltsysteme. Angestrebt wird ein Schalten auf rein optischer Ebene von optischer Faser zu optischer Faser ohne den Umweg über elektronische Komponenten. Dies ist vor dem Hintergrund, dass schon heute in einer Lichtleitfaser gleichzeitig mehrere hundert verschiedene Wellenlängen Daten mit einer Rate von 10 Gbit/s aufnehmen [CHU01], eine technologische Herausforderung.

Eine der Erfolg versprechenden Technologien zum Aufbau miniaturisierter, optischer Schalter ist die Mikrotechnik. Optische Mikrosysteme werden hier als MOEMS (engl.: Micro-optoelectro-mechanical Systems) bezeichnet. Sie sind ideal geeignet zur Miniaturisierung: Das Modulieren und Umleiten von Licht erfolgt rückwirkungsfrei und ist unabhängig von Leistung und Volumen des Mikrosystems. Außerdem sind MOEMS kompatibel mit konventionellen, optischen Technologien wie z. B. der Lichtleitfasertechnik. So erscheint die Mikrotechnik gerade für optische Systeme überaus zweckmäßig. Die Technologie erlaubt eine weitergehende Verkleinerung der Systeme, bietet geringe optische Verluste und geringen Energieverbrauch sowie eine weitgehende Unabhängigkeit von Datenraten und Wellenlängen [CHU01]. Ähnliche Spiegelsysteme zum Ablenken von Licht werden als optische Scanner und Displayeinheiten eingesetzt. Die optischen Schalter bestehen aus dem mechano-optischen Element sowie der Antriebseinheit. Letztere kann auf unterschiedlichen Prinzipien basieren. In der Mikrotechnik weit verbreitet sind das elektrostatische und das elektromagnetische Prinzip. Letzteres wird insbesondere für Antriebe mit großen Kräften oder Luftspalten bevorzugt.

Die Mikrotechnologie ermöglicht durch die Dünnschichttechnik sowie die Fertigung im Nutzen eine Miniaturisierung und kostengünstige Herstellung elektrischer Antriebe. In der Mikroaktorik lassen sich elektromagnetische Antriebsprinzipien nutzen. Elektromagnetische Systeme mit einigen Millimetern Größe sind in energetischer Hinsicht vorteilhaft [CUG03]. Die Integration hartmagnetischer Werkstoffe in strukturierte Schichten erscheint zukünftig möglich und bietet weitere Vorteile für magnetische Mikroantriebe. Die Leistungsfähigkeit magnetischer Aktoren wird durch das Volumen sowie durch die Materialeigenschaften bestimmt. Sowohl die effiziente Nutzung der lateralen Abmessungen als auch die Realisierung großer Systemhöhen ist notwendig, ebenso das Herstellen feiner und hoher Strukturen, um entsprechend hohe Funktions- und Leistungsdichten zu garantieren. Dies bedeutet technologisch die Strukturierung mit hohen Aspektverhältnissen (Höhe zu Breite). Zudem sind die Verluste elektrischer Antriebe durch den ohmschen Widerstand der

Erregerspulen bestimmt. Bei gegebenen lateralen Abmessungen müssen die Spulen folglich ein hohes Aspektverhältnis aufweisen.

Die Anforderungen an die Fertigungstoleranzen ergeben sich hauptsächlich aus der notwendigen Genauigkeit für den Arbeitsluftspalt. Dieser bestimmt maßgeblich die Reluktanz des magnetischen Kreises. Die Variation der Luftspaltbreite hat somit direkten Einfluss auf die Funktion des Antriebs. Je nach Ausrichtung des Luftspaltes, vertikal oder horizontal, bedeutet dies die Notwendigkeit hochgenauer Strukturhöhen und -oberflächen bzw. präziser, senkrechter Strukturflanken. In dieser Hinsicht muss die mikrotechnische Fertigung hohe Anforderungen an Präzision erfüllen. Mikrotechnisch ist ein mehrschichtiger Aufbau von Leitern, Isolation und Magnetkernen zu verwirklichen. Zudem sind Leiterstrukturen in mehreren Ebenen zu realisieren, um mehrlagige Spiral- oder Helixspulen aufzubauen. Die hierfür notwendigen integrierten Fertigungstechniken erlauben Antriebe mit unterschiedlichen elektromagnetischen Funktionsprinzipien. Mit angemessenen mikrotechnischen Verfahren lassen sich Mikromotoren, lineare Stellantriebe oder auch Elektromagnete für begrenzte Stellwege und -winkel verwirklichen. Anforderungen an elektromagnetische Mikroantriebe sind große Kraftwirkung bei geringer Verlustleistung, genaues Positionieren sowie geringer Verschleiß. Diese Eigenschaften sind verknüpft mit dem Einhalten enger Fertigungstoleranzen.

Ziel und Inhalt dieser Arbeit ist die Entwicklung und Herstellung eines elektromagnetischen Antriebs für einen optischen Mikroschalter einschließlich der hierfür notwendigen Fertigungstechnologien sowie die experimentelle Untersuchung des Gesamtsystems. Diese Systeme dienen als optische Mikroschalter für die faseroptische Datenkommunikation. Sie entstanden im Rahmen eines Forschungsprojektes für die US-amerikanische Firma Finisar Corporation in Zusammenarbeit mit dem Bereich Microsensor and Actuator Technology (MAT) der Technischen Universität Berlin. Aufgabe des MAT war dabei die Entwicklung der Spiegelstruktur sowie die Montage von Antrieb und Spiegel zum elektromagnetisch angetriebenen Mikrospiegel. Die verstellbaren mikromechanischen Spiegel sind an Torsionsfedern drehbar aufgehängt. Diese Mikrostrukturen werden auf einem Substrat in Silizium-Mikromechanik hergestellt und anschließend mit dem Mikroantrieb zum Gesamtsystem des optischen Schalters montiert.

Für die Herstellung des elektromagnetischen Mikroantriebs des optischen Schalters sind verschiedene Fertigungstechniken notwendig. Die integrierte Fertigung der Funktionselemente, wie Spulensystemen und magnetischen Strukturen, erfordert den Einsatz lithographischer Strukturierungsverfahren. Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit ist daher die Entwicklung von Fertigungstechnologien, die die Voraussetzung sind für elektromagnetische Mikroantriebe im Allgemeinen sowie den optischen Schalter im Besonderen. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Entwicklung von Spulentechnologien zur Fertigung hoher, mehrschichtiger Aktorkomponenten. Insbesondere sind Mikrostrukturen mit großen Aspektverhältnissen notwendig, um bei kompakter

Bauweise eine hohe Leistungsfähigkeit der Mikroaktoren sicherzustellen. Diese Arbeit beinhaltet daher auch die technologischen Erkenntnisse aus eigenen Untersuchungen, die im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Entwicklung und Konstruktion aktiver Mikrosysteme“ (SFB 516) im Teilprojekt „Fertigung von Erregerspulen für aktive Mikrosysteme“ durchgeführt wurden. Diese Technologien werden entsprechend der Anforderungen des Mikroschalters weiterentwickelt.

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Optische mikromechanische Schalter

2.1.1 Grundprinzip optischer Schalter

Glasfaser-Netzwerke benötigen für ihren zuverlässigen Betrieb sowie die Rekonfigurierung optische Schalter im Vermittlungssystem. Bei konventionellen, Faserschaltern müssen makroskopische Antriebe, mechanische Strukturen und Steuerungen zu einem Gesamtsystem montiert werden, dessen Größe und Fertigungskosten nur schwer verringert werden können. Bild 2-1 zeigt das Prinzip eines konventionellen Schalters. Mikromechanische optische Schalter bieten hier eine weitere Miniaturisierung. Durch die enge Verbindung von mikromechanischer Struktur und elektronischer Steuerung ist eine hohe Leistungsfähigkeit und Funktionsdichte gegeben.

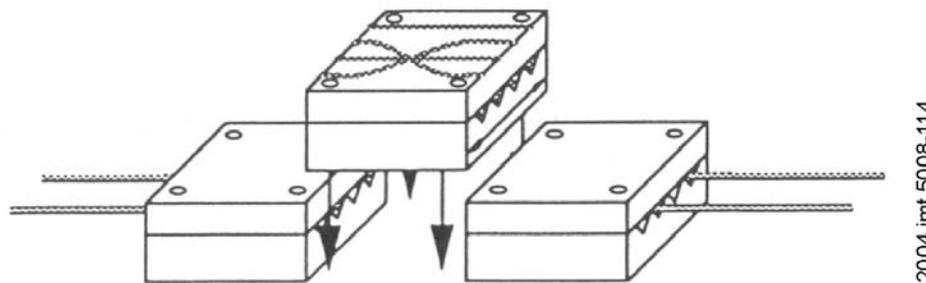


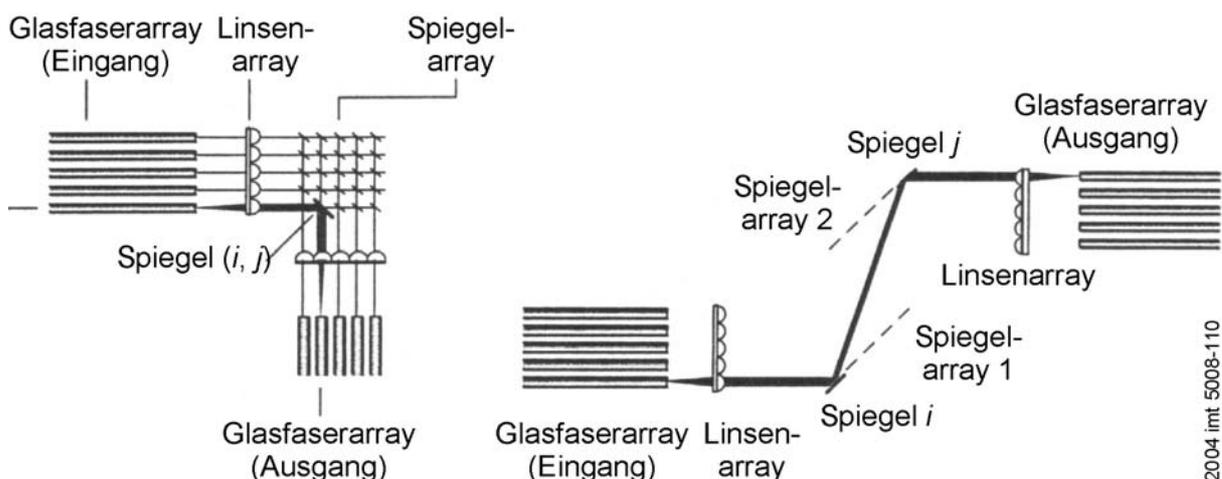
Bild 2-1: Prinzip eines konventionellen optischen Schalters [FUJ97]

Das Umlenken des Lichts von einer Faser in eine andere erfolgt bei mikromechanischen Schaltern mit starrer Faserzuordnung durch Umlenken des Lichts außerhalb der Faser (engl.: Fixed Fiber Switch) und bei solchen mit flexibler Faseranordnung durch Bewegen der Fasern zueinander (engl.: Moving Fiber Switch). Im ersten Fall wird das Licht im freien Raum durch Mikrospiegel abgelenkt. Die Bewegung des Spiegels kann rotatorisch oder translatorisch sein. Dabei liegt die Spiegelfläche parallel bzw. vertikal zur Chipoberfläche. Die Schaltwinkel bei rotatorischen Spiegelsystemen sind üblicherweise kleiner als $\pm 10^\circ$ [CHU01]. Bei translatorischer Bewegung wird der Laserstrahl beim Hineinfahren des Spiegels in den Strahl abgelenkt, ansonsten weitergeleitet. Der Stellweg ergibt sich aus dem Strahldurchmesser von typischerweise $10 \mu\text{m}$ [MAR99].

2.1.2 Einsatz in optischen Vermittlungssystemen

Mikromechanische Schalter werden in Array-Anordnung zum Aufbau kompakter optischer Vermittlungssysteme (engl.: Optical Cross Connect, OXC) benötigt. Dies sind mechano-optische Systeme, die hohe Anzahlen von Lichtleitfasern flexibel miteinander verschalten. Dabei wird das Licht aus den Fasern ohne Umweg über elektronische Bauelemente auf rein optischer Ebene durch definiertes Ablenken in andere Fasern eingekoppelt. Diese OXC-Systeme werden in verschiedenen Konfigurationen aufgebaut. Mikrospiegel lenken das Licht in die entsprechenden Fasern ab. Die Strahlführung ist dabei sowohl in der Ebene (2D-OXC) als auch im Raum (3D-OXC) realisierbar. Möglich ist eine lineare oder flächige Anordnungen der Spiegel mit zwei oder mehr Schaltpositionen. Rotierende Spiegel können darüber hinaus ein- oder zweiachsig ausgeführt sein. Somit wird eine flexible Verschaltung großer Glasfaserarrays erreichbar.

Das Bild 2-2 veranschaulicht den Aufbau von Schaltarrays für translatorisch und rotatorisch bewegte Spiegel für den Fall der linearen Anordnung von Glasfasern. Das linke Bild zeigt ein Array mit senkrecht angeordneten, translatorisch bewegten Spiegeln, die die Strahlen in der Ebene führen (2D-OXC). Dieses Prinzip ist in der Anzahl der Ein- und Ausgänge beschränkt, da für N Ein- und N Ausgänge $N \times N$ Spiegel benötigt werden. Das rechte Beispiel beschreibt den Aufbau im Falle rotatorisch bewegter Spiegel. Die Strahlführung erfolgt durch zwei zueinander ausgerichtete Spiegelarrays mit vor- bzw. nachgeschalteten Linsenarrays zur Aus- und Einkopplung des Lichtes. Dabei werden für N Ein- und N Ausgänge nur $2N$ Spiegel benötigt [SYM02].



2004.int 5008-110

Bild 2-2: Darstellung der Struktur von Vermittlungssystemen für linear bewegliche (links) und rotatorisch (rechts) bewegliche Spiegel [SYM02]

2.1.3 Mikrotechnischer Aufbau

Die Strahlführung stellt hohe Anforderungen an die räumliche Anordnung von Lichtleitfasern, Linsen und Spiegelsystemen zueinander [CHU01]. Die Spiegelstruktur als Grundelement optischer Schalter muss Licht im sichtbaren bis infraroten Bereich mit geringen Verlusten reflektieren. Neben guten Reflexionseigenschaften müssen die Mikrospiegel auch mechanische Stabilität, Dynamik sowie Zuverlässigkeit aufweisen. Hinzu kommt eine präzise Ansteuerbarkeit. Für die Spiegeloberfläche ist außerdem eine hohe Planarität zu gewährleisten [LIN01]. Die Herstellung erfordert eine Fertigungstoleranz, die im Bereich der Wellenlänge des verwendeten Lichts liegt. Nur bei richtiger Kompensation der Effekte zweier gekrümmter Spiegelflächen ist eine Spiegelverformung tolerierbar [SYM02]. Spiegel aus Silizium werden, um ausreichende Reflektivität zu erreichen, metallisch beschichtet [CHU01]. Eigenspannungen sowie thermische Spannungen in diesen Schichtsystemen führen leicht zu Verformungen. Mikrotechnisch werden die federnd gelagerten Spiegel fast ausschließlich aus Silizium oder Polysilizium hergestellt. Wie bei anderen mikrooptoelektromechanischen Systemen wird Bulk- oder Oberflächenmikromechanik genutzt [CHU01]. Alternative Werkstoffe sind Polymere oder Metalle, so z. B. Polyimid und SU-8 [LIU01] oder galvanisches Nickel [YAS99].

Der Aktorteil muss zuverlässig und mit geringen Verlusten arbeiten. Die Miniaturisierung bietet auch hier den Vorteil der integrierten Fertigung im Nutzen. Erste Ansätze magnetisch angetriebener optischer Mikroschalter werden in Kap. 2.7 betrachtet. Die Mehrzahl der mikrooptischen Schalter nutzt jedoch elektrostatische Antriebe. Die Systeme besitzen in diesem Fall Paare von Elektrodenflächen, die sich schwenkend aufeinander zu bewegen [AKS00, PU02, TOS96] oder sich seitlich gegeneinander verschieben können [YAS99], wobei kammartige Strukturen dominieren [DEL01, MAR99, PAT02, WAT02].

Es werden neben rotatorischen auch translatorische Bewegungen erzeugt und über Gelenken umgeformt. Elektrostatische Antriebe können komplett integriert aufgebaut werden. Außerdem erlaubt das elektrostatische Prinzip nahezu verlustloses Schalten [REY01]. OXC-Systeme in Siliziummikromechanik mit elektrostatischem Antrieb sind bereits relativ weit entwickelt. Es wurden sowohl zweidimensionale Schaltsysteme [DEL01, MAR99, WAT02] als auch dreidimensionale Varianten vorgestellt [AKS00, PU02]. Bild 2-3 zeigt einen in Siliziumoberflächenmikromechanik hergestellten elektrostatisch angetriebenen zweiachsigen Spiegel als Teil einer großen optischen Schaltmatrix.

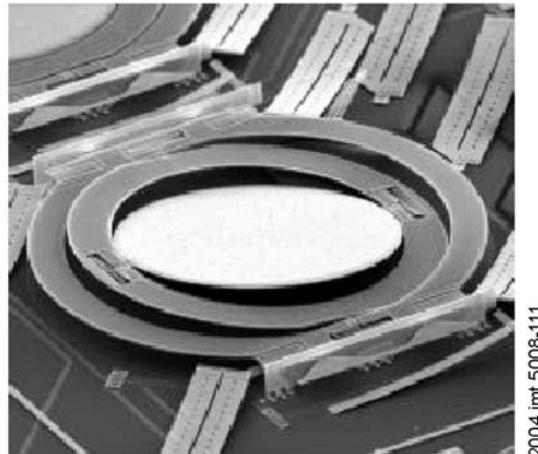


Bild 2-3: Siliziummikromechanischer Spiegel zur Strahlableitung [AKS02]

2.2 Definition und Eigenschaften von Mikroaktoren

Mikroaktoren, wie z. B. Mikroschalter oder -motoren, zählen zu den aktiven Mikrosystemen. Sie werden zum einen mikrotechnisch hergestellt, zum anderen haben ihre Schichtstrukturen zumindest in einer Achse Abmessungen im Mikrometerbereich. Die Gesamtabmessungen, insbesondere von Mikroaktoren, liegen jedoch meist im Bereich von einigen Millimetern.

Ein Aktorsystem besitzt die Funktion des Energiestellers sowie des Energiewandlers. In der Wirkungskette steht die Aktoreinheit zwischen dem informationsverarbeitenden System (Mikrorechner, Steuerung) und dem mechanischen System (Bild 2-4).

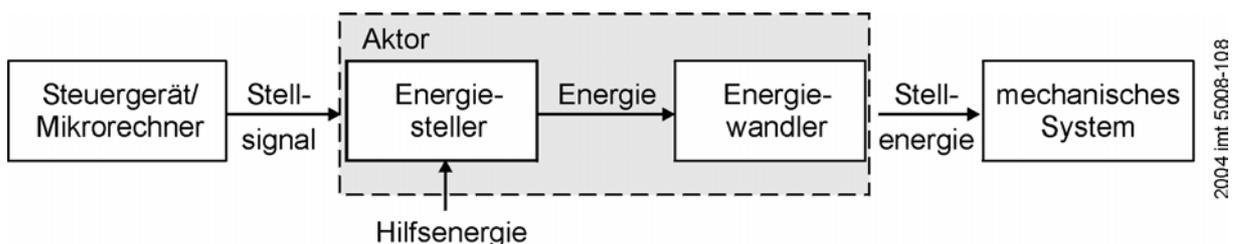


Bild 2-4: Aktorsystem in der Wirkungskette [HEI98]

Die Ausgangsenergieform ist bei elektrischen Kleinmaschinen und insbesondere bei Mikrosystemen elektrische Energie, da diese leicht zu stellen und zu transportieren ist. Die für die Energiewandlung in kinetische Energie genutzten Wandlungsprinzipien sind elektrostatisch, elektro-thermo-mechanisch, elektrodynamisch und elektromagneto-mechanisch oder Festkörpereffekte, wie z. B. die Magnetostriktion oder Piezoelektrizität. In der Mikrotechnik sind Antriebe mit elektrostatischem und elektromagnetischem Wandlungsprinzip üblich [FRA03].

Die Gesamtgröße von Mikroaktoren ergibt sich zumeist durch die Forderung nach ausreichend hohen Kräften, die bei elektromagnetischen Aktoren linear mit dem Volumen zunimmt. Mikrosysteme werden zumeist im Nutzen auf Substraten gefertigt,

wie z. B. Silizium-Wafern. Bei Verringerung der benötigten Waferfläche pro System kann eine größere Anzahl von Bauteilen auf einem Substrat gefertigt werden, entsprechend verringern sich die Kosten für jedes einzelne System. Bei Mikroaktoren, die für eine bestimmte Leistungsfähigkeit ein gewisses Volumen benötigen, ist es daher erforderlich, durch hohe Strukturen mit großen Aspektverhältnissen die dritte Dimension zu nutzen.

Neben dem minimierten Flächenbedarf ergeben sich auch funktionelle Vorteile. So verringern sich bei hohen Leiterstrukturen die ohmschen Verluste. Einen Überblick über die Charakteristika des elektromagnetischen Antriebsprinzips im Vergleich zu anderen Antriebsarten gibt am Beispiel von Schaltanwendungen die Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Vergleich von Mikrorelais unterschiedlicher Antriebsprinzipien [GOD02]

	elektro- statisch	elektromag- netisch	piezoelekt- risch	magne- tostriktiv	thermisch
Leistung	sehr gering, 1...2 μW	hoch, 100- 300 mW (5V)	gering	hoch	hoch, 200 mW
Maximale Kraft	gering	hoch	sehr hoch	-	-
Reichweite	klein	groß	-	groß	groß
max. Energiedichte im Luftspalt	$4 \times 10^5 \text{ Jm}^{-3}$	$9,5 \times 10^5 \text{ Jm}^{-3}$	$5,2 \times 10^7 \text{ Jm}^{-3}$	-	-
Schaltzeit	1...20 μs (typisch)	15 μs (typisch)	< 1 μs (möglich)	-	größer
Schalten durch	elektr. Spannung	elektr. Strom	elektr. Spannung	magn. Feld	elektr. Strom

Auf Grund der Skalierung der elektromagnetischen Kräfte mit dem Volumen sind magnetische Prinzipien in Größe und Reichweite der erreichbaren Kräfte elektrostatischen Prinzipien, die Oberflächenkräfte nutzen, ab einer Systemgröße von einigen 100 μm überlegen. Insbesondere bei mikrotechnisch hergestellten Aktoren von einigen Millimetern Größe wird die Überlegenheit evident [BUS92, FLU96]. Dieser Vorteil zeigt sich bereits bei den hier ausgewählten Mikroschaltern. Bei Anwendungen mit größeren Luftspalten tritt dieser Aspekt der höheren Kräfte und Leistungen durch eine größere Energiedichte im Luftspalt bei magnetischen Mikroantrieben verstärkt in den Vordergrund. Liegen die Gesamtabmessungen des

Antriebes statt im Mikrometerbereich eher im Bereich weniger Millimeter, können magnetisch effiziente, leistungsstarke Systeme erreicht werden.

2.3 Arbeitsprinzip elektromagnetischer Aktoren

2.3.1 Energiewandlung

Elektromagnetische Aktoren wandeln elektrische Energie über die Nutzung von magnetischen Feldern in mechanische Energie um. Nach den bei der Wandlung wirksamen Kräften kann zwischen elektrodynamischen Wandlern, die die Lorentz-Kraft ausnutzen, und Wandlern auf Basis der Reluktanzkraft unterschieden werden [HEI98]. Die Lorentz-Kraft wirkt auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld. Sie resultiert aus der Kraftwirkung auf bewegte Ladungen im magnetischen Feld. Für die Kraft auf einen vom Strom I durchflossenen Leiter mit der kraftwirksamen Leiterlänge ℓ im magnetischen Feld mit der magnetischen Flussdichte B folgt bei senkrecht aufeinander stehender Strom- und Feldrichtung [STÖ02]

$$F = B \cdot \ell \cdot I . \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Elektrodynamische Wandler sind z. B. Gleichstrommotoren mit permanent oder elektrisch erregtem Feld sowie Synchron- und Asynchronmotoren. Sie besitzen Permanentmagnetläufer oder Läufer mit Käfig- oder Kommutatorwicklung. Demgegenüber basieren elektromagnetische Wandler auf Grenzflächenkräften (Reluktanzkräften) zwischen Bereichen unterschiedlicher magnetischer Reluktanz. Die Kraftwirkung lässt sich über den Maxwellschen Spannungstensor berechnen. Für die Kraft auf einen Körper mit der Permeabilitätszahl μ_r und senkrecht in den Luftraum austretendem magnetischen Feld mit der Flussdichte B_{\perp} und der Querschnittsfläche A folgt

$$F = \frac{\mu_r - 1}{2\mu_r \mu_0} A B_{\perp}^2 \quad (\text{Gl. 2.2})$$

bzw. für $\mu_r \gg 1$

$$F = \frac{A B_{\perp}^2}{2\mu_0} . \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Diese Formel wird als Maxwellsche Zugkraftformel bezeichnet [STÖ02]. Die Reluktanzkraft nutzende elektromagnetische Aktoren sind z. B. Linear- und Drehmagnete sowie Hybrid- oder Reluktanzmotoren.

2.3.2 Arbeitsvermögen

Elektromagnetische Antriebe lassen sich prinzipiell in vier Teilsysteme gliedern. Das magnetische Teilsystem, der sogenannte Aktivteil, umfasst die elektrische bzw. permanentmagnetische Erregung, die Flussführung sowie den Arbeitsluftspalt. Das elektrische Teilsystem umfasst Leiterstrukturen, Stromversorgung und Ansteuerung.

mit dem Widerstand R und dem magnetischen Fluss $\psi(\delta, i)$ sowie den durch Strom- bzw. Abstandsänderungen hervorgerufenen Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ [STÖ02]. Die Magnetkraft F_m lässt sich aus der magnetischen Co-Energie ableiten zu

$$F_m = \frac{\partial}{\partial \delta} \int_0^{I_0} \psi(i, \delta) di \quad (\text{Gl. 2.5})$$

mit dem Strom I_0 [STÖ02]. Für relativ große Arbeitsluftspalte sind die ψ - i -Kennlinien linear und es gilt

$$\psi(i, \delta) = i L(\delta) \quad (\text{Gl. 2.6})$$

mit der Induktivität $L(\delta)$, wodurch sich (Gl. 2.5) vereinfacht zu

$$F_m = \frac{\partial}{\partial \delta} \int_0^i i L(\delta) di = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\delta)}{d\delta}. \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Die Induktivität kann zudem beschrieben werden durch $L(\delta) = w^2 G_m(\delta)$ mit der Windungszahl w und der magnetischen Leitfähigkeit des magnetischen Kreises $G_m(\delta)$. Daraus ergibt sich die Magnetkraft für große Arbeitsabstände zu

$$F_m = \frac{i^2 w^2}{2} \frac{dG_m(\delta)}{d\delta}. \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Die Kraft eines Gleichstrommagneten mit relativ großer Luftspatllänge, im Vergleich zum magnetischen Kreis, steigt also quadratisch mit dem Strom i und der Windungszahl w und ist proportional zur Änderung der magnetischen Leitfähigkeit des magnetischen Kreises G_m .

2.4 Form und Aufbau elektromagnetischer Mikroaktoren

Elektrodynamische und elektromagnetische Wandler benötigen Erregerspulen zur Erzeugung magnetischer Felder und weichmagnetische Werkstoffe zur Flussführung. Werden diese Systeme durch Permanentmagneten aus hartmagnetischen Werkstoffen ergänzt, lassen sich Mikroantriebe mit ähnlicher Funktionalität wie im makroskopischen Bereich aufbauen. Mit der Mikrotechnologie werden andere Technologien und Werkstoffe zum Aufbau miniaturisierter Aktoren anwendbar [FLU96, FUJ98, THI00, CUG03]. Der integrierte Aufbau von Mikrosystemen erfolgt durch einen sukzessiven Aufbau von Mikrostrukturen auf Substraten ohne Montage einzelner Funktionselemente. Durch entsprechende Abfolge der Aufbringung und Strukturierung entsteht ein Mikrosystem. Bei elektromagnetischen Systemen besteht der aktive Teil aus elektrisch leitenden oder isolierenden bzw. magnetischen Schichten. Diese Einheit des elektromagnetischen Mikrosystems soll im Folgenden als Aktivteil bezeichnet werden. Teil dieser Mikroaktoren sind Leiterstrukturen, die in Form von Mäander-, Helix- oder Spiralstrukturen die Erregerspulen bilden (Bild 2-6). Sie besitzen eine dreidimensionale Struktur, werden jedoch mikrotechnisch in Einzelschichten sukzessiv planar aufgebaut.

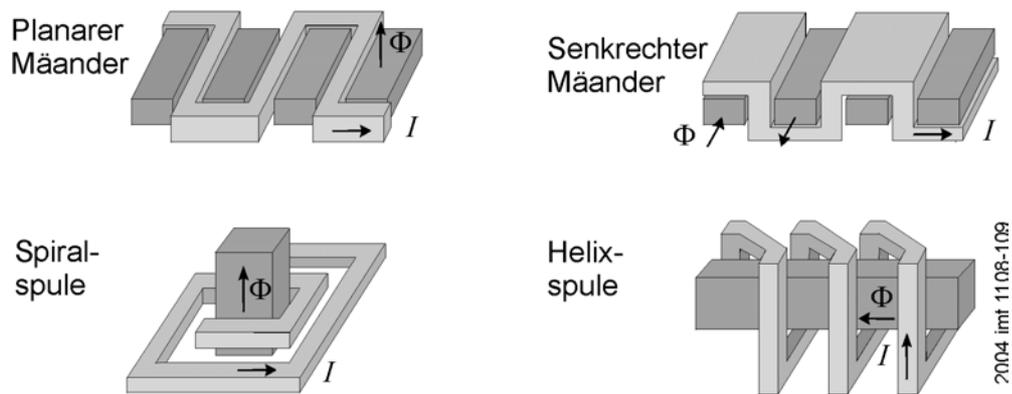


Bild 2-6: Aufbauvarianten für Erregerspulen mit Angabe der Richtung des erzeugten magnetischen Flusses ϕ

Bei dieser Art von aktiven Mikrosystemen sind hohe Schichtdicken sowie einbettende und planarisierende Werkstoffe und Prozesse erforderlich. Zwischenräume innerhalb der Funktionsstrukturen werden ausgefüllt und die Mikrostrukturen eingeebnet, um den weiteren Aufbau des Systems mit lithographischen Mitteln zu ermöglichen. Auf Grund der Größe der Mikroaktoren, unterschiedlicher eingesetzter Werkstoffe sowie Fertigungstechniken muss ein sinnvoller Kompromiss zwischen integrierter Fertigung von Funktionseinheiten, wie Antriebselementen und mechanischen Komponenten, auf der einen Seite und der Montage unterschiedlicher Komponenten auf der anderen Seite gefunden werden.

2.5 Strukturierung mit hohen Aspektverhältnissen

Für kompakte und gleichzeitig leistungsfähige aktive Mikrosysteme muss trotz des schichtweisen Aufbauprinzips der Planartechnik die dritte Dimension gezielt genutzt werden [FLU96, THI00]. Da die Leistungsfähigkeit bei fester Grundfläche durch die Höhe der aktiven Mikrostrukturen bestimmt wird, sind Techniken zur Strukturierung hoher Schichtdicken bei kleinen lateralen Abmessungen notwendig. Die Techniken werden unter dem Begriff HARMST (engl.: High Aspect Ratio Microstructure Technology) zusammengefasst, wobei das Aspektverhältnis den Quotienten aus Strukturhöhe h zu Strukturbreite w bezeichnet (vgl. Bild 2-7).

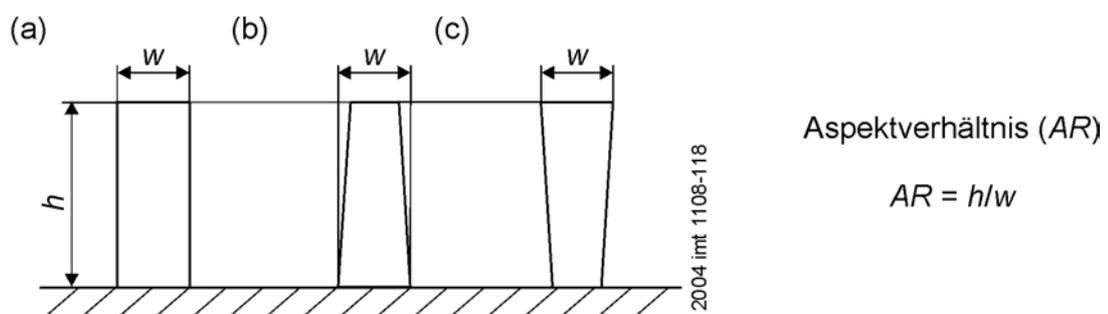


Bild 2-7: Aspektverhältnis für verschiedene Seitenwandneigungen: (a) senkrechte, (b) positiv geneigte und (c) negativ geneigte Flanke

2.5.1 Verfahrensüberblick

Das Ätzen ist ein typisches subtraktives Strukturierungsverfahren. Verwendung finden nasschemische Verfahren und Plasmaätzprozesse [WIL96, KÖH02]. Zur Herstellung von Strukturen mit senkrechten Seitenwänden und hohen Aspektverhältnissen sind die Nassätzprozesse durch isotropen Materialabtrag unzweckmäßig. Für Silizium und polymere Werkstoffe sind für diesen Fall spezielle Trockenätzverfahren nutzbar [CHU01, VÖL00, RAI97]. So werden beim anisotropen Plasmaätzen senkrechte Seitenwände durch Vermeidung seitlicher Unterätzung erreicht. Als Masken dienen entsprechend strukturierte Schichten aus Photolack, Metall oder SiO_2 . Gebräuchliche Verfahren sind das reaktive Ionenätzen und das induktiv gekoppelte Plasmaätzen oder das ASETM (Advanced Silicon Etching) [BHA95, BHA97]. Hohe Aspektverhältnisse werden bei Ionenätzprozessen (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) durch Passivierungsschichten auf den Strukturseitenwänden erreicht. Die Schutzschichten entstehen entweder parallel zum Ätzprozess durch Reaktionsprodukte der Ätzgase selbst oder durch spezielle, dem Ätzprozess vorgeschaltete, sogenannte Precursor-Gase. Geätzt wird hauptsächlich Silizium zur Herstellung beweglicher Strukturen. Aber auch polymere Werkstoffe, wie BCB oder Polyimid, werden durch anisotropes Ätzen strukturiert. Diese werden beispielsweise als Passivierungs- und Isolationsschichten genutzt.

Lassen sich hohe Aspektverhältnisse in Silizium und Polymerwerkstoffen gut subtraktiv herstellen, so eignet sich für metallische Mikrostrukturen besonders die Additivtechnik als Kombination aus Lithographie und galvanischer Abscheidung in Resistmikroformen (Galvanoformung). Die Auflösung und das maximale Aspektverhältnis der Resiststruktur ergeben sich aus der verwendeten Strahlung (UV-Licht, Röntgenstrahlung), dem Resistmaterial sowie dessen Prozessierung. Die galvanische Abscheidung in Mikroformen wird bereits seit den 1970er Jahren z. B. im Bereich der Magnetspeichertechnik unter Einsatz von UV- sowie Röntgenlithographie genutzt [ROM70, ROM97b]. Die Fertigung von Schreib-Lese-Köpfen beinhaltet insbesondere die Galvanoformung mit UV-Mikroformen [ROM89]. Eine neuartige Anwendung fand die Röntgenlithographie kombiniert mit der galvanischen Abformung als LIGA-Technik (Synchrotron-Röntgentiefenlithographie, Galvanoformung und Abformung) [BEC86]. Das LIGA-Verfahren nutzt Synchrotronstrahlung zur Strukturierung von Röntgenresist, üblicherweise PMMA. Die hochparallele Synchrotronstrahlung ermöglicht es, im Schattenwurfverfahren lithographisch geringste Seitenwandneigungen und hohe Aspektverhältnisse herzustellen. Bild 2-8 zeigt die einzelnen Prozessschritte.

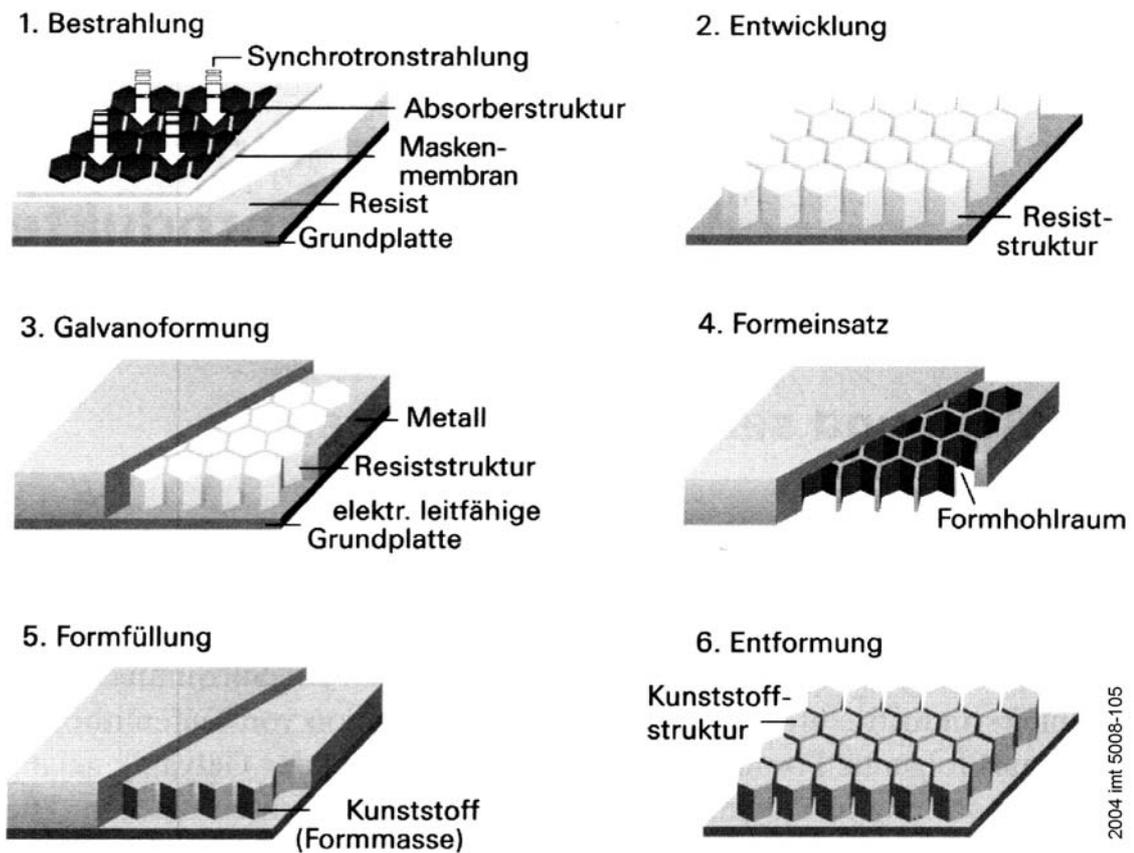


Bild 2-8: Fertigungsfolge beim LIGA-Verfahren [EHR02]

Die Struktur der Maske wird bei Bestrahlung als latentes Abbild in den Resist übertragen. Die Mikroform entsteht durch Herauslösen der bestrahlten Bereiche im Entwickler. Durch galvanische Abscheidung entstehen aus der Resistform metallische Formeinsätze, mit denen in Massenfertigung Kunststoffteile abgeformt werden.

Die LIGA-Technik ist prädestiniert für Anwendungen, bei denen sehr hohe Strukturen mit großer lateraler Präzision und Seitenwandqualität erzeugt werden müssen. Sie eignet sich z. B. für die Herstellung präziser optischer Komponenten [EHR02, KRI99, KUP00]. Die Abformung lässt jedoch nur prismatische Körper ohne Hinterschneidungen zu. Komplexe, mehrschichtige Systeme, wie z. B. Mikroaktoren, lassen sich zwar durch Röntgenlithographie, Galvanoformung und Opferschichttechnik im Nutzen herstellen, der Kostenvorteil durch Abformung geht dabei jedoch verloren [GUC98a, ROG95]. Für mehrschichtige aktive Mikrosysteme wird die Röntgentiefenlithographie nur dann genutzt, wenn große Stellwege oder Kräfte zu verwirklichen sind, die große Schichtdicken erfordern oder wenn hochpräzise Seitenflächen erforderlich sind [FIS01, GUC93, GUC96, GUC98b, OSU98, YAS99]. Metallische Strukturen können durch Abformung von Kunststoffstrukturen erzeugt werden. Werden diese Kunststoffformen auf einem Substrat über LIGA-Formeinsätze, d. h. ohne Lithographieschritt, hergestellt, können Metallstrukturen kostengünstig im Nutzen reproduziert werden.

Unter Anwendung der Dünnschichttechnik ist ein Aufbau elektromagnetischer Systeme möglich, wobei die LIGA-Technik auf eine Strukturebene begrenzt genutzt wird [ROG96]. Der Aufbau bzw. die Montage von Mikromotoren und -antrieben aus Komponenten, die mittels LIGA-Technik hergestellt werden, ist für verschiedene Anwendungen demonstriert worden [ACO95, FIS01, KRI99, ROG96]. Für Massenprodukte ist diese Fertigungstechnologie, gerade in Hinsicht auf die Montage von Mikrobauanteilen, zu aufwendig. Eine weitgehend integrierte Fertigung bieten die nachfolgend beschriebenen Techniken.

Die UV-Tiefenlithographie und Galvanoformung ist eine Strukturierungstechnik für hohe Aspektverhältnisse. Zur Belichtung wird der optische Wellenlängenbereich genutzt, wodurch diese Technik im Vergleich zur Röntgenlithographie mit Synchrotronstrahlung weniger aufwendig ist. Durch UV-Lithographie werden in dicken Photoresistschichten Mikroformen erzeugt. Durch galvanische Abscheidung von metallischen Werkstoffen und Legierungen in diese Formen entstehen die Strukturen.

2.5.2 UV-Tiefenlithographie

Photoresiste bestehen aus einer schichtbildenden Grundmatrix (polymerer Feststoff), die die Löslichkeitseigenschaften festlegt, einer photoaktiven Komponente, die bei der Bestrahlung die Löslichkeitsändernde, photochemische Reaktion auslöst, und einem Lösungsmittel, das die Viskosität des Resistes bestimmt. Bei den photochemischen Reaktionen werden sowohl Polymerisation als auch Depolymerisation sowie die Änderung der Polarität funktioneller Gruppen genutzt. Belichtete Bereiche werden je nach photochemischer Reaktion in einem Entwickler löslich oder unlöslich. Es entsteht das positive bzw. negative Abbild der Maske im Resist. Entsprechend unterscheidet man Positiv- bzw. Negativresist. Durch Absorption nimmt die Belichtungs-dosis im Resist ab. Entsprechend der abnehmenden Löslichkeitsänderung [MOR88] in tieferen Resistschichten bilden sich bei der UV-Tiefenlithographie typischerweise die in Bild 2-9 dargestellten Resistflanken für Positiv- und Negativlacke aus.

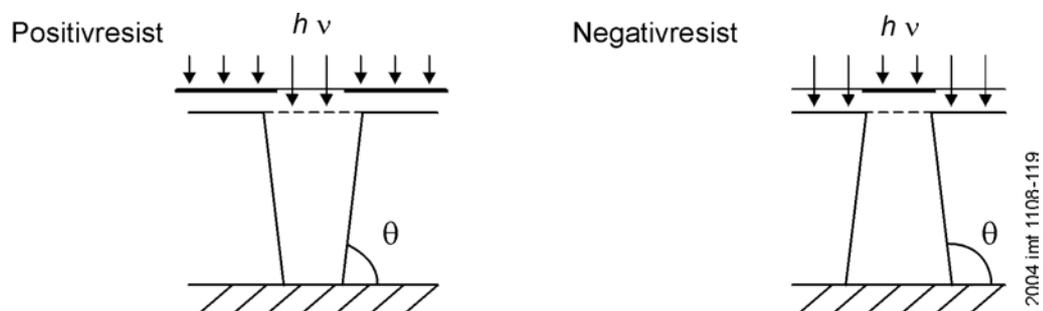


Bild 2-9: Schematische Darstellung der Flanken für Positiv- und Negativresist

Die Resistempfindlichkeit und der Resistkontrast γ sind wichtige Kenngrößen eines Photoresists. Sie lassen sich aus Bild 2-10 entnehmen, das die sog. Schichtdicken-

kurve über der Belichtungsdosis wiedergibt. Aus ihr ist die verbleibende relative Resistdicke nach der Entwicklung für bestimmte Belichtungsdosen zu entnehmen. Die Dosis ist das Produkt aus Belichtungszeit und -intensität.

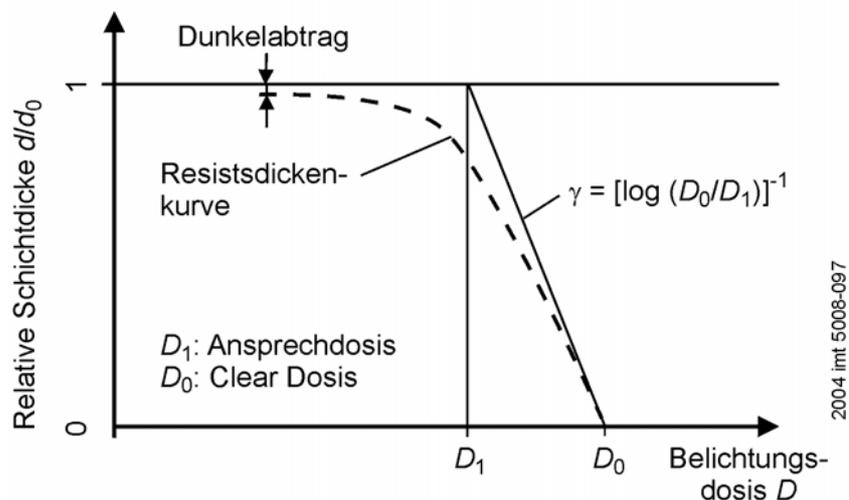


Bild 2-10: Schichtdickenkurve eines Positivresists, nach [VÖL00]

Diese Resistdickenkurve wird experimentell ermittelt, indem der Resist mit unterschiedlichen Dosiswerten belichtet und anschließend unter gleichbleibenden Bedingungen entwickelt wird. Die Ansprechdosis D_0 ist die Dosis, bei der der Resist vollständig wegentwickelt wird. Sie ist ein Maß für die Resistempfindlichkeit. Der Kontrast γ ist die Steigung der Resistdickenkurve im Fußpunkt ($D = D_0$). Der Resistkontrast ist abhängig von der Resisttrocknung, der Entwicklerkonzentration und Temperatur [WID96]. Neben der Strukturübertragung werden Photopolymere auch als strukturierbare elektrische Isolation und als Passivierung eingesetzt. Von besonderer Bedeutung ist ihre chemische Beständigkeit sowie die thermische Stabilität. Auch die einebnende Wirkung dieser Dielektrika ist besonders für Mehrschichtsysteme wichtig, um eine präzise lithographische Strukturübertragung zu gewährleisten.

2.5.2.1 Positivresist

Positivresiste bestehen meist aus drei Komponenten, dem Novolak-Harz als schichtbildende Grundmatrix, einer photoaktiven Komponente und einem Lösungsmittel. Als photoempfindlicher Bestandteil wird häufig die chemische Verbindung Diazonaphthoquinon (DNQ) eingesetzt. Diese Resiste werden dementsprechend als DNQ/Novolak-Resiste bezeichnet. Sie lassen sich nach der Strukturzeugung durch Lösungsmittel leicht entfernen. Dieser Photoresist wird daher u. a. als Mikroform für die galvanische Abscheidung eingesetzt. Die für die elektrochemische Abscheidung erforderliche Startschicht kann nach dem Auflösen der Resistform durch Ätzen komplett wieder entfernt werden.

Das Novolak-Grundharz ist in basischen Lösungsmitteln löslich. Durch die photoaktive, basisch unlösliche Komponente DNQ ist die Auflösung gehemmt. Während der Photoreaktion zerfällt die Diazoverbindung zu Stickstoff und hochreaktivem Carben, das sich zu Keten umlagert (Wolff-Umlagerung). In der Folge nimmt Keten das in der Resistschicht eingelagerte Wasser auf und als Endprodukt der Photoreaktion entsteht schließlich hydrophile Indencarbonsäure (vgl. Bild 2-11). Somit ist die Auflösung des Novolakharzes in basischer Lösung nicht mehr behindert. Belichtete Bereiche werden aus der Resistschicht herausgelöst. Ein Überblick über die Photochemie von DNQ/Novolak-Resiste bietet [DAM93].

Vor der Strukturierung des DNQ/Novolak-Resists ist eine gleichmäßige Reduzierung des Lösungsmittelgehaltes durch Wärmebehandlung zur Verfestigung der Photolackschicht erforderlich [CHU98]. Die Photoreaktion erfordert zusätzlich eine ausreichende, möglichst gleichmäßige Konzentration an Wasser in der Lackschicht [SHI90]. Da sich das Wasser über Diffusionsprozesse nach der Resisttrocknung aus der Reinraumluft einlagert, wird dieser Prozess mit zunehmender Lackdicke zeitkritischer. Für reproduzierbar hohe Photoempfindlichkeit ist generell eine konstante Luftfeuchtigkeit notwendig. Die Entwicklung des latenten Bildes zur Resiststruktur erfolgt typischerweise in alkalischen Lösungen.

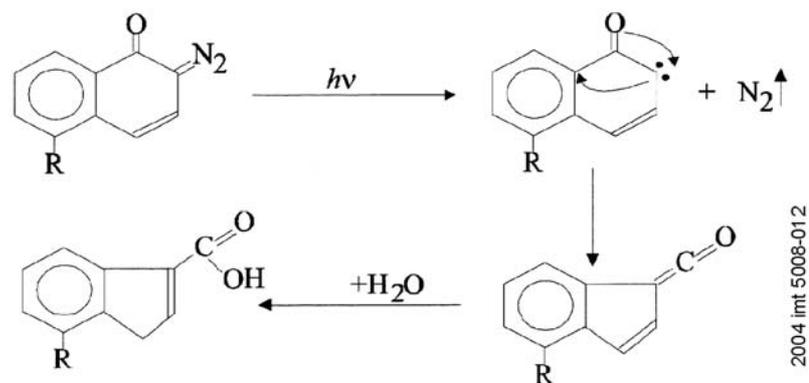


Bild 2-11: Photoreaktion des DNQ-Moleküls zu Indencarbonsäure [MOR88, THO94]

Für Tiefenlithographie ist die Absorptionscharakteristik von besonderer Bedeutung. Die maximal durchbelichtbare Schichtdicke hängt von der optischen Absorption des Resists ab [COR99, LOE00]. Die Transparenz der Resistschicht nimmt bei Belichtung zu, da die Absorption von Indencarbonsäure (ICA) geringer ist als die der DNQ-Moleküle [DAM93]. Dieser Effekt, das sogenannte Bleichen (engl. bleaching), erhöht die Transmission jedoch nur bis zu einem Grenzwert, der durch die Komponenten Novolak und ICA bestimmt ist. Diese Absorptionscharakteristik des Resists kann durch die sogenannten Dill-Parameter *A*, *B* und *C* beschrieben werden: *A* stellt die Absorption des unbelichteten, *B* des belichteten Resists und *C* die Bleichgeschwindigkeit dar [DAM93]. Bei extrem hohen Schichtdicken ist daher

generell eine hohe Transparenz der Novolak-Grundmatrix notwendig. Die Höhe der Transparenz bestimmt auch das maximal erreichbare Aspektverhältnis der Resiststruktur und entscheidet somit bei dicken Schichten über die Strukturauflösung. Dies liegt darin begründet, dass sowohl die Maskenstrukturen als auch die Absorption im Resist unterschiedliche Belichtungsdosen im Resistquerschnitt bewirken. Das Verhältnis der Dosisgradienten in lateraler Richtung zu denen in vertikaler Richtung korreliert über eine entsprechende Löslichkeitsänderung im Resist direkt mit dem Aspektverhältnis [CHU98].

Als Produkt der Photoreaktion nach Bild 2-11 entsteht in belichteten Bereichen des Resists Stickstoff, der zu Auflösungseinbußen führen kann. Kommt es nämlich bei der Prozessierung dicker Lacke zu Stickstoffeinschlüssen, so führen Löslichkeitsunterschiede zu inhomogenen Entwicklungsgeschwindigkeiten (vgl. Bild 2-12).

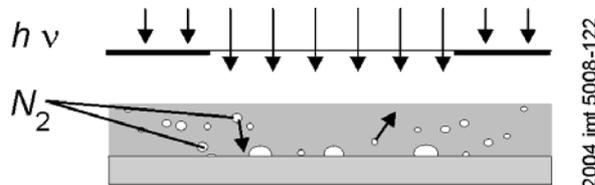


Bild 2-12: Stickstoffbildung während der Photoreaktion in dicken Resistschichten

Die Auflösungsgeschwindigkeit des DNQ/Novolaks im Entwickler wird durch die Temperatur während der Trocknung beeinflusst. Bei zu hohen Temperaturen entstehen thermische Reaktionsprodukte, die weder photoempfindlich noch löslich sind. Bei ungenügender Trocknung durch zu geringe Temperatur oder zu kurze Dauer ist der Photoresist nicht genügend stabil gegenüber dem Entwickler. Daraus resultiert ein erhöhter Dunkelabtrag: Restlösungsmittel wird zu Acetaten umgesetzt, das als Carbonsäure zu erhöhter Löslichkeit führt [CHU98]. Für eine hohe Auflösung ist ein hoher Kontrast im latenten Abbild der Maskenstruktur durch Anpassung des Temperaturprofils der Trocknung an die Lackdicke zu erreichen. Verfahren zur Wärmebehandlung nutzen Konvektionsöfen, Heizplatten oder IR-Strahler.

Eine Bildumkehr (engl.: Image-Reversal) vom Positiv- zum Negativbild der Maskenstruktur ist bei DNQ-Resisten durch Abänderung der Resistchemie möglich. Das latente Bild der Maskenstruktur wird dadurch in den belichteten Bereichen unlöslich, wohingegen durch anschließende ganzflächige Belichtung (Flutbelichtung) der bisher unbelichtete Teil löslich wird und während der Entwicklung das Negativbild entsteht [DAM93]. Die Änderung der Resistchemie kann durch Zugabe eines säurekatalytischen Photoinitiators bewirkt werden, der in belichteten Bereichen eine Säure bildet, die bei thermischer Behandlung die Vernetzung des Resists verursacht. Bildumkehrlacke besitzen im Negativprozess durch die Flutbelichtung sowie die geringe Löslichkeit des vernetzten Resists einen erhöhten Kontrast. Sie werden jedoch vorwiegend in dünnen Schichten für Lift-Off-Prozesse verwendet, indem durch längere Entwicklung die Neigung der Resistflanke von positiv zu unterschritten variiert wird [VÖL00].

2.5.2.2 Negativresist

Die Mehrzahl der Polymere bildet unter Bestrahlung mit UV-Licht Radikale, die zur Vernetzung des Polymers führen. Die ersten für die Mikroelektronik entwickelten Photoresiste basierten auf dieser photoinduzierten Vernetzung über freie Radikale. Als erste Firma führte Kodak in den 1960er Jahren den Negativresist KTFR (Kodak Thin Film Resist) ein, der als Grundmatrix ein vernetzbares Polymer und als photoaktive Komponente eine Diazidverbindung besitzt [DAM93, SHA97, WIL97]. Bei Bestrahlung entstehen aus Azid-Gruppen reaktive Nitrene sowie Stickstoff (Bild 2-13, a)). Die Nitrene reagieren in dem Vernetzungsschema nach Bild 2-13, d) mit dem partiell cyclisierten Polyisopren. Sie können rekombinieren (vgl. Bild 2-13, b)) oder nach Bild 2-13, c) mit Sauerstoff reagieren, was die Vernetzung hemmt. Diese Art von Resist besitzt zwar eine hohe Photoempfindlichkeit und chemische Beständigkeit, muss jedoch zur Vermeidung von Sauerstoffdiffusion unter Stickstoff oder im Vakuum belichtet werden. Während der lösungsmittelbasierten Entwicklung kommt es außerdem zum Quellen der Resiststrukturen. Seit Mitte der 1970er Jahre wurde die Diazid-Photochemie daher durch die positiv arbeitenden DNQ/Novolak-Resisttypen ersetzt.

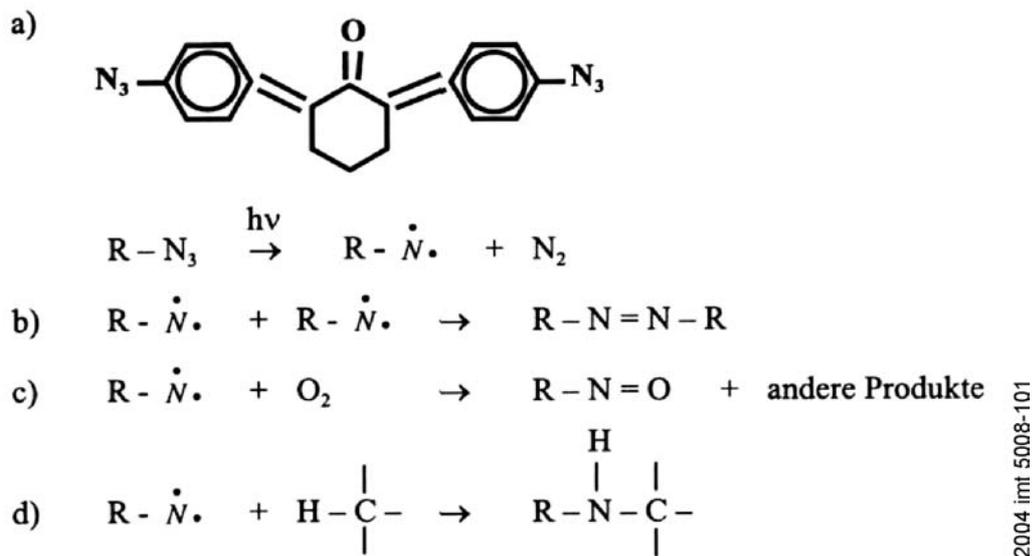


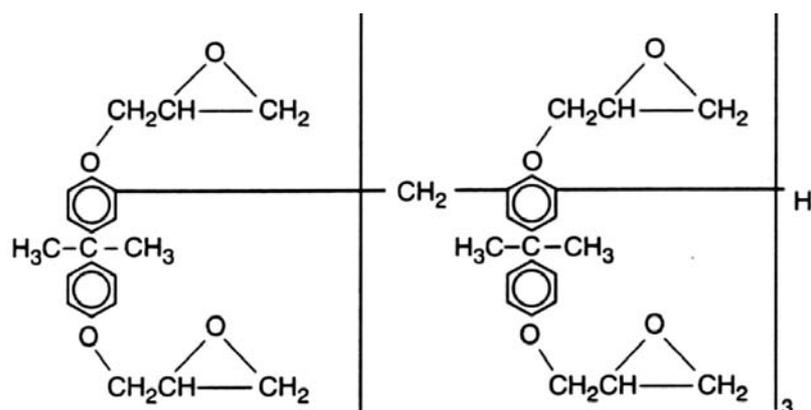
Bild 2-13: a) Diazidstruktur, b) - d) photochemische Vernetzungsreaktionen [VÖL00]

Ebenfalls auf Diazidverbindungen basiert das als Photo-BCB bekannte hochtemperaturstabile, vernetzbare Photopolymer Bezocyclobuten (Cyclotene, Dow Chemical, [DOW97]). Es wird auf Grund seiner hohen Temperaturstabilität (bis 250°C) und seiner geringen Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_r = 2,65$) als strukturierbare Isolations- und Passivierungsschicht für Leiterbahnen eingesetzt [BAI91, STR96, STR97]. Eine typische Anwendung ist die elektrische Chipverbindung bei Multi-Chip-Modulen (MCM). Die Resiststrukturen weisen nach Photostrukturierung stark positive Flanken auf. Dies ist für die Metallisierung von Durchkontaktierungen zwischen Verdrah-

tungsebenen positiv. Diese Aufweitung schließt jedoch eine tiefenlithographische Strukturierung mit hohem Aspektverhältnis aus. Polyimide werden ebenfalls als hochtemperaturbeständige Polymere zur Isolierung und Passivierung genutzt. Die Polyimidresisttechnik arbeitet mit photovernetzbaaren Gruppen. Unter Belichtung bilden sich aus Polyimidvorstufen Polyimidstrukturen, die ausgehärtet werden. Ein Nachteil von Polyimid gegenüber BCB ist die mangelnde Kompatibilität des Polyimidprozesses mit Kupferoberflächen [OHN02].

Mit steigenden Anforderungen an die Photoempfindlichkeit gewinnen Negativlacke als chemisch verstärkte Resiste wieder an Bedeutung. Beim Prinzip der chemischen Verstärkung führen chemische Photoinitiatoren nach lichtinduzierter Anregung zur Polymerisation. Ein Photon löst dabei eine große Zahl von Polymerisationsreaktionen aus. Somit sind für starke Löslichkeitsänderungen nur geringe Bestrahlungsdosen nötig. Bei azidhärtenden Resisten ist die Photoreaktion mit der Bildung einer Säure verbunden. Ein säureempfindlicher Polymerisator löst die katalytische Vernetzungsreaktion aus. Dieser Effekt wird bei DUV-Resisten ebenso wie bei epoxidbasierten Photoresisten (EPR) genutzt.

Ein Vertreter der azidhärtenden, epoxidbasierten Negativlacke ist der von IBM entwickelte Resist SU-8 [LAB95b, LEE95, LOR97]. Die schichtbildende Grundmatrix besteht aus einem Epoxidderivat des Bis-phenol-A Novolak (EPON® SU-8, Shell Chemical), dessen Strukturformel in Bild 2-14 dargestellt ist [LAB95b]. SU-8-Resist besitzt eine hohe Photoempfindlichkeit und gutes Auflösungsvermögen besonders hinsichtlich hoher Aspektverhältnisse in dicken Resistschichten. Diese Charakteristik resultiert aus den Eigenschaften des Epoxidharzes SU-8 sowie der Photosensibilisierung über das Prinzip der chemischen Verstärkung.



2004 limt 5008-103

Bild 2-14: Strukturformel des Epoxidharzes SU-8, nach [LAB95b]

Das Epoxidharz SU-8 hat eine sehr hohe Gruppenfunktionalität. Die daraus resultierende hohe Vernetzungsdichte bewirkt, dass der vernetzte Werkstoff in Lösungsmitteln praktisch nicht mehr löslich ist. Zusätzlich ist das molekulare Gewicht des SU-8-Harzes im Ausgangszustand gering. Dies wiederum ermöglicht eine gute organische Löslichkeit. Die Verwendung von SU-8-Harzen als schichtbildende Matrix

eines Resists ergeben also hohe Löslichkeitsänderungen und somit hohen Kontrast. Ein Quellen der Strukturen tritt auf Grund der hohen Vernetzung nicht auf. Ferner besitzt das Harz eine hohe Transparenz. Die geringe Absorption im nahen UV-Bereich von 365-436 nm erlaubt die kostengünstige Photostrukturierung extrem hoher Schichtdicken [LEE95]. Die Nutzung der chemischen Verstärkung bewirkt zudem eine hohe Empfindlichkeit des SU-8-Resists für UV-, Elektronen- und Röntgenstrahlung [SHA97].

Auflösung, Aspektverhältnis, Flankenprofil und Seitenwandqualität der Resiststrukturen sind eng mit der Belichtung und der Stärke der Polymerisation während des Post Exposure Bake (PEB) verknüpft [EYR98, ZHA99, LIN00, MCC01]. Auflösungseinbußen durch Lichtbeugung sind jedoch selbst bei hohen Schichtdicken wenig ausgeprägt, da belichtetes Resistmaterial durch Änderung des Brechungsindex das Licht führt (engl. Wave Guide Effect) und somit auch bei großen Lackdicken annähernd senkrechte Strukturflanken erreicht werden [BOG00]. Bei hohen Aspektverhältnissen ist fernerhin der Austausch von verbrauchter Entwicklerlösung durch frische sowie das Herauslösen von Polymerresten aus tiefen Strukturen wichtig [ZHA01]. Unter optimierten Bedingungen sind Schichtdicken von bis zu 1200 µm mit Aspektverhältnissen von bis zu 18:1 reproduzierbar strukturierbar [LOR98a].

Photosensitiv wird SU-8 durch einen Photoinitiator (Triaryl-Sulfonium-Salz), der eine säureinduzierte Polymerisation bei thermischer Behandlung auslöst. Entwickelt wird der Resist in dem Lösungsmittel PGMEA (Propylenglykoldimethylacetat). Die Viskosität des Resistes wird über das organische Lösungsmittel GBL (γ -Butyrolacton) eingestellt. Das Aufbringen großer Schichtdicken (bis zu 1 mm mit einer Belackung) erfordert hochviskose SU-8-Varianten [LOR98a]. Durch Mehrfachbelackungen mit zwischengeschalteten Wärmebehandlungen sind Schichtdicken von mehreren Millimetern erzielbar. Bei der Belichtung dieser Lackdicken ist das Absorptionsspektrum des SU-8-Resists zu berücksichtigen (vgl. Bild 2-15). Es zeigt eine Zunahme der optischen Dichte mit abnehmender Wellenlänge. Bei Belichtung mit Wellenlängen unter 350 nm kann es durch Abnahme der Belichtungs-dosis innerhalb der Resistschicht zu Auflösungseinbußen kommen. Das Spektrum von 350 nm bis 550 nm ist daher günstig. Extrem hohe Schichtdicken sollten im oberen Wellenlängenbereich belichtet werden [LIN00, MIM02].

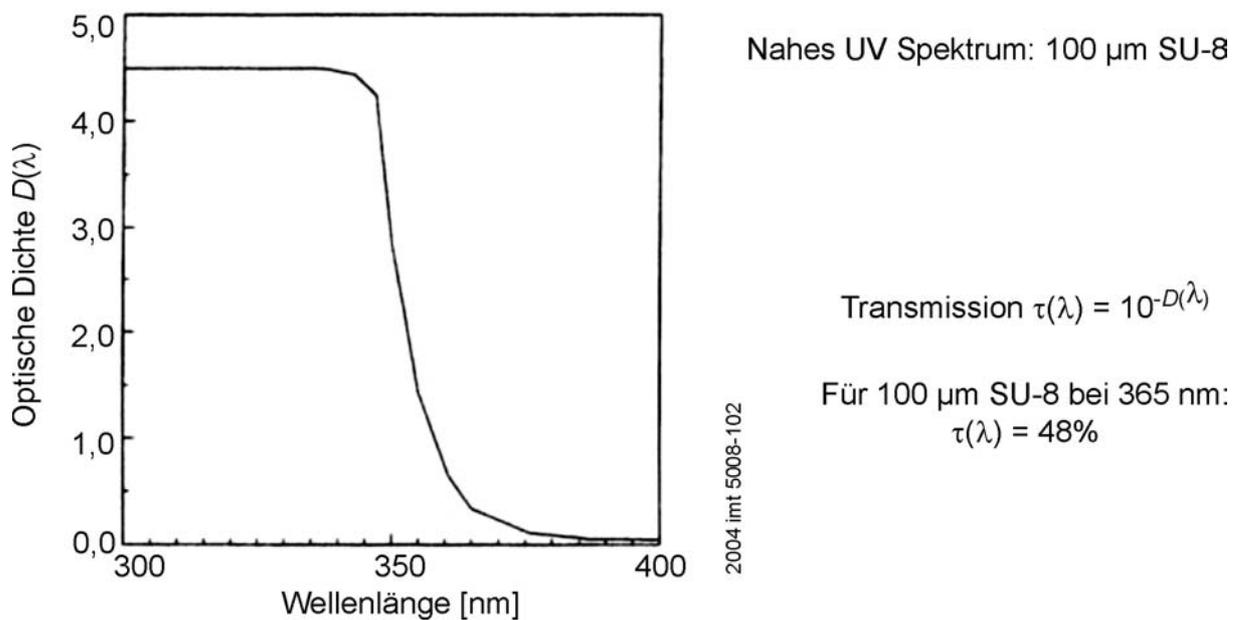


Bild 2-15: Absorptionsspektrum von SU-8, nach [LEE95]

Starke Vernetzung führt bei SU-8 zu mechanischen Spannungen (vgl. Bild 2-16). Sie können bei hohen Schichtdicken und schlechter Haftung zu Schichtablösungen führen [DAN00, LOR98a; LOR98b]. Hinsichtlich der Haftung sind Si- und SiO_2 -Substrate gut, Metallschichten wie Cu, Cr und Ti hingegen schlecht geeignet. Ein spannungsangepasstes Design kann die Haftung der Resiststrukturen verbessern [CHA00].

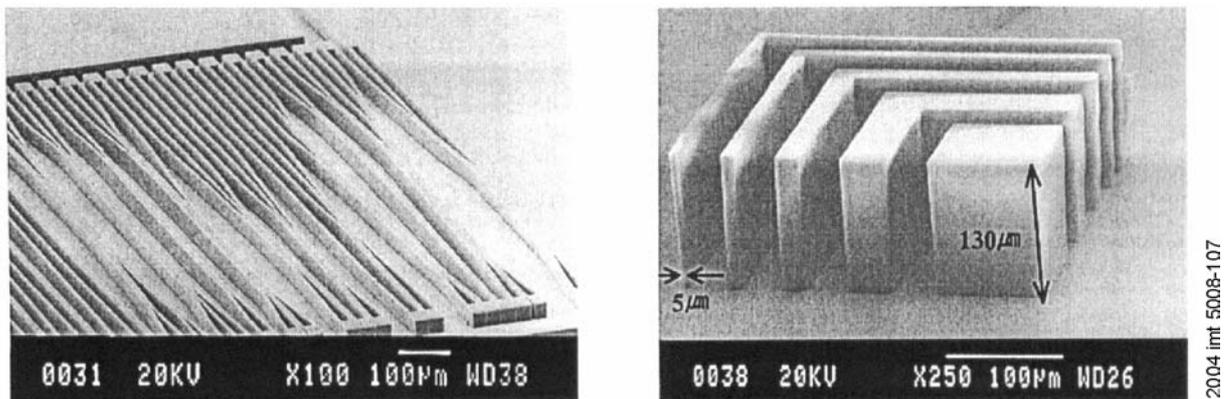


Bild 2-16: Resiststrukturen aus SU-8: Ablösungen durch Schichtspannungen (links) und unter optimierten Bedingungen hergestellte Struktur (rechts) [CHA00]

Spannungsreduzierend wirken zweistufige Wärmebehandlungen mit niedrigen Temperaturgradienten sowie ein Absenken der Prozesstemperaturen bei verlängerten Prozesszeiten [CHA00, LOR98a]. Minimale Spannungen und maximale Aspektverhältnisse sind jedoch gegenläufige Zielsetzungen, da für hohe Aspektverhältnisse eine hinreichend hohe Vernetzungsdichte erforderlich ist. Höchste Aspektverhältnisse bis zu 26:1 sind daher nur für eng definierte

Strukturgeometrien einstellbar [CHA00]. Thermische Fehlanpassungen zwischen Substrat und polymerisiertem SU-8 führen zu zusätzlichen Spannungen. Der thermische Ausdehnungskoeffizient für polymerisiertes SU-8 beträgt $\alpha = 52 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [LOR98b]. Dieser Wert ist im Vergleich zu Substratwerkstoffen wie Silizium, Glas oder Keramik um ein Vielfaches größer. Eine Angleichung der Ausdehnung von Substrat und SU-8 ist schwierig. Der Einsatz von Kunststoffsubstraten ist schwierig, da typische Kunststoffe, wie z. B. PP, PC und PVC, mangelnde chemische Beständigkeit sowie schlechte Benetzung und Adhäsion gegenüber SU-8 aufweisen. Chemisch stabil gegenüber SU-8-Resist und Prozesschemikalien ist PMMA [CHI00]. Polymerisiertes SU-8 kann ebenfalls als Substratwerkstoff eingesetzt werden. Zur Anpassung des Temperaturkoeffizienten von SU-8 ist der Zusatz von Füllstoffen oder die Verringerung des Anteils des Photoinitiators möglich [RUH01]. Hierdurch wird jedoch die Strukturauflösung reduziert.

2.5.3 Galvanoformung

Galvanoformung ist ein additives Verfahren zur Strukturherzeugung, bei dem durch elektrochemische Prozesse metallische Werkstoffe aus einem Elektrolyten abgeschieden werden. Lithographisch hergestellte polymere Mikroformen begrenzen die Abscheidung geometrisch, wodurch die metallischen Strukturen als Negativ der Polymerstrukturen entstehen. Galvanische Prozesse erlauben verhältnismäßig hohe Abscheideraten, wodurch sich das Verfahren für die relativ dicken Schichten der Mikroaktoren anbietet [SCH00, ROM97a, MAD02].

2.5.3.1 Elektrochemische Abscheidung

In einem Elektrolyten kommt es bei Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der positiv (Anode) und der negativ geladenen Elektrode (Kathode) zu einem Stromfluss durch Ionen (Elektrolyse) sowie zu elektrochemischen Reaktionen an der Phasengrenze der Elektroden. Der Stoffumsatz an den Elektroden ist proportional zur bewegten Ladungsmenge, d.h. dem Integral des Stromflusses über der Zeit. Das erste Faradaysche Gesetz beschreibt diesen Zusammenhang

$$m = c \cdot I \cdot t \quad (\text{Gl. 2.9})$$

mit der Masse m , dem elektrochemischen Äquivalent c , der Stromstärke I und der Zeit t . Aus den Größen lassen sich Abscheiderate und Schichtdicke ableiten. Die durchschnittliche Stromdichte im Elektrolyten errechnet sich aus dem Quotienten von Stromstärke und galvanisch beschichteter Oberfläche.

Die Elektrodenreaktionen setzen sich aus verschiedenen Teilschritten, dem Ladungsaustausch, Transportvorgängen, vor- und nachgelagerten Reaktionen und der Elektrokristallisation zusammen. Diese bewirken Potentialverschiebungen, die sich addieren zur Überspannung η_{ges}

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{D}} + \eta_{\text{K}} + \eta_{\text{R}} + \eta_{\text{Diff}} \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Der erste Überspannungsanteil ist die Durchtrittsüberspannung η_D . Der Ladungsdurchtritt durch die Phasengrenze Elektrode/Elektrolyt, die sogenannte elektrolytische Doppelschicht zwischen Elektrode und Elektrolyt, kann nur mit endlicher Geschwindigkeit erfolgen. Diese Durchtrittshemmung hat eine Verschiebung des Elektrodenpotentials um die Durchtrittsüberspannung η_D zur Folge. Die Abhängigkeit der Gesamtstromdichte von dieser Überspannung kann für kinetisch kontrollierte Elektrodenreaktionen durch die Butler-Volmer-Gleichung beschrieben werden, die für die Stromdichte-Überspannungskurve einen linearen bis logarithmischen Zusammenhang liefert.

Eine weitere Größe ist die Kristallisationsüberspannung η_K , die die Hemmung des Kristallisationsvorgangs bei der galvanischen Abscheidung beschreibt. Die Reaktionsüberspannung η_R und die Diffusionsüberspannung η_{Diff} bilden zusammen die Konzentrationsüberspannung. Durch die Elektrodenreaktionen ändert sich die Ionenkonzentration gegenüber der mittleren Elektrolytzusammensetzung. Abhängig von Stofftransportbedingungen und Ionenkonzentration sind die in der Folge auftretenden ausgleichenden Diffusionsvorgänge mit einer Diffusionsüberspannung η_{Diff} verbunden. Vor- und nachgelagerte Reaktionen bewirken die Reaktionsüberspannung η_R . Diese wird zur Konzentrationsüberspannung gezählt, da die ihr zu Grunde liegenden Reaktionen die Konzentrationsunterschiede beeinflussen.

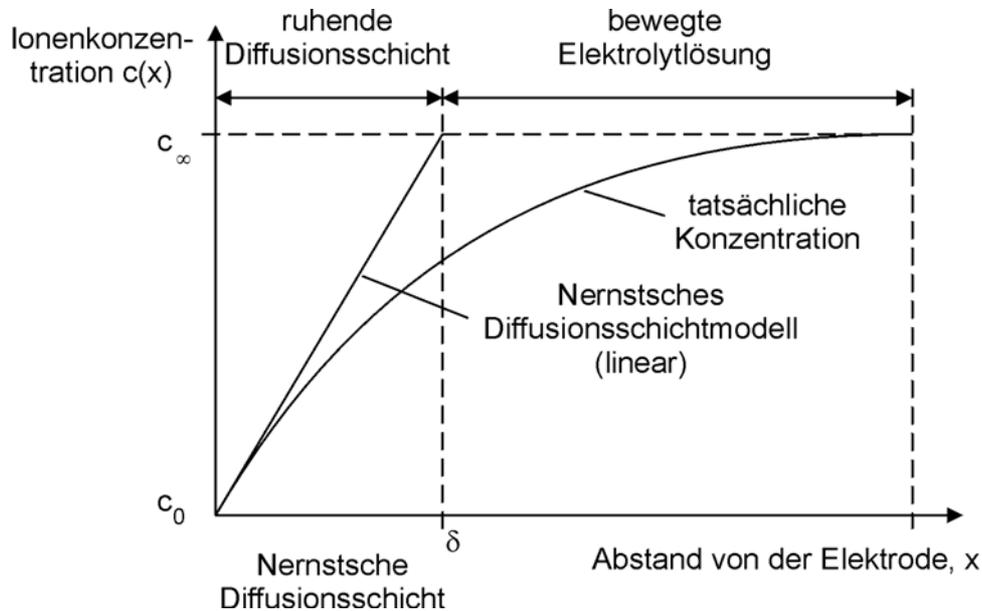
2.5.3.2 Stofftransport

Die elektrochemischen Reaktionen an der Elektrode können nur dann ungestört ablaufen, wenn die für die Reaktionen benötigten Stoffe zur Elektrode transportiert werden. Der Stofftransport ist das Ergebnis der Überlagerung von Konvektion, Diffusion und Migration [JEH99, LEY95]. Die Migration beschreibt die Bewegung der Ionen im Elektrolyten unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden. Diese Art des Stofftransports hat kaum Einfluss auf die galvanischen Prozesse.

Beim hydrodynamischen Stofftransport wird zwischen natürlicher Konvektion durch Temperaturgradienten und erzwungener Konvektion durch Anströmen (Fountain- und Rack-Plater [REI98], Rotating Disk Electrode [LEY95]) oder Rühren (Paddle Cell [ROM97a]) unterschieden. An der Elektrodenoberfläche ist bedingt durch hydrodynamische Reibungskräfte die Konvektion Null.

Die dritte Art des Stofftransports ist die Diffusion: Die Elektrodenreaktionen haben an der Elektrodenoberfläche den Verbrauch von Metallionen und somit Konzentrationsunterschiede zur Folge, die durch Diffusion von Ionen zur Grenzfläche ausgeglichen werden. In der sogenannten Diffusionsschicht ändert sich die Konzentration vom Zustand der Verarmung bis zur mittleren Konzentration im Elektrolyten. Die Dicke δ_D der Diffusionsschicht ist von der Geschwindigkeit der elektrochemischen Reaktion und den hydrodynamischen Verhältnissen vor der Elektrodenoberfläche abhängig. Ohne Konvektion ergibt sich die Nernstsche Diffusionsschicht, die ausgehend von

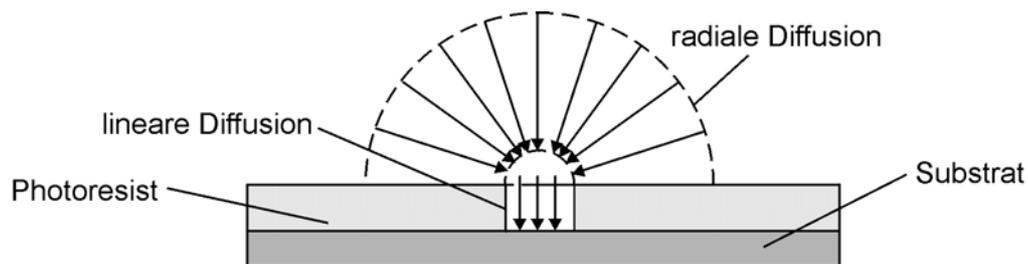
der gleichmäßigen Konzentration c_∞ im Elektrolyten ein lineares Konzentrationsgefälle bis zur Konzentration c_0 an der Elektrode aufweist [LEY95, SCH00]. Bild 2-17 gibt die Konzentrationsverhältnisse im Elektrolyten schematisch wieder.



2004 imt 5008-120

Bild 2-17: Schematische Darstellung der Metallionenkonzentration im Elektrolyten, nach [SCH00]

An einer zurückgesetzten Mikroelektrode lassen sich nach Bild 2-18 zwei Arten der Diffusion unterscheiden: Zu Beginn der Abscheidung liegt reine lineare Diffusion vor. Kurz vor dem Überwachen der Photoresistschicht geht die lineare in die radiale oder auch sphärische Diffusion über.



2004 imt 5008-126

Bild 2-18: Schematische Darstellung der radialen (sphärischen) Diffusion im Vergleich zur linearen Diffusion an einer Mikroelektrode, nach [MEH93]

2.5.3.3 Stromdichteverteilung

Die lokale, aktive Stromdichteverteilung ist direkt proportional zur Strukturhöhe der Mikrostrukturen. Daher ist die Kenntnis über die Verteilung der Stromdichte von entscheidender Bedeutung. Nach den bestimmenden Einflussgrößen wird unterschieden zwischen der primären (ohmscher Spannungsabfall), sekundären (Reaktionskinetik) und tertiären (Metallionenkonzentration) Stromdichteverteilung [LEY95].

Die primäre Stromdichteverteilung wird durch die Geometrie und Anordnung der Elektroden und den Elektrolytbehälter bestimmt. Unter der Annahme homogener Eigenschaften des Elektrolyten ist der Spannungsabfall durch rein geometrische Größen gegeben (Anlagen- und Elektrodengeometrie), so dass eine Beschreibung durch Equipotentiallinien möglich ist. Stromdichteverzerrungen lassen sich durch verschiedene Maßnahmen minimieren. So kann durch Hilfselektroden am Waferrand oder der Kathode [ROM97a] oder durch Blenden eine Homogenisierung der Stromlinien erreicht werden. Zudem kann die Feldlinienverteilung durch eine einheitliche Potentialebene in Wafernähe (z. B. durch ein Metallgitter) verbessert werden.

Die sekundäre Stromdichteverteilung resultiert aus der primären unter Berücksichtigung der elektrochemischen Eigenschaften des Systems, der sogenannten Reaktionskinetik. Diese fasst alle Effekte zusammen, die zu einer Erhöhung des Potentials (Überspannung) bei konstanter Stromdichte führen. Da sie der primären Stromdichte entgegenwirken und um so stärker sind, je größer die Stromdichte ist, wirken sie auf Stromdichte und Schichtdicke ausgleichend. Somit bewirkt die sekundäre Stromdichteverteilung eine einheitlichere Verteilung. Die einebnenden Additive im Elektrolyten wirken beispielsweise auf die Reaktionskinetik und verändern somit die sekundäre Stromdichteverteilung.

Die tertiäre Stromdichteverteilung basiert auf zusätzlichen Hemmungen. Sie resultiert aus Konzentrationsunterschieden, die sich aus dem Stofftransport ergeben. Bei der tertiären Stromdichteverteilung wird der Stromfluss durch die Metallionenkonzentration gesteuert, die wiederum vom Stofftransport durch Konvektion und Diffusion abhängt. Das Nernstsche Diffusionsschicht-Modell nach Bild 2-17 definiert den Grenzfall, dass die Metallionenkonzentration an der Elektrodenoberfläche null ist. Die Stromdichte erreicht für diesen Fall ihr Maximum. Diese Grenzstromdichte ist von der Metallionenkonzentration, dem Diffusionskoeffizienten D des Elektrolyten sowie der Diffusionsschichtdicke δ_D abhängig. Durch Konvektion, d.h. Verringerung der Diffusionsschichtdicke δ_D und Erhöhung des Diffusionskoeffizienten D , kann die Grenzstromdichte gesteigert werden [SCH00]. Der Einfluss von Diffusion und Konvektion wird entscheidend durch das Aspektverhältnis bestimmt. Bei sehr hohen Aspektverhältnissen muss von reiner Diffusion ausgegangen werden. Mit zunehmender Füllung der Mikroform nimmt der Einfluss der Konvektion zu [LEY95]. Für die strukturierte Abscheidung sind hinsichtlich einer gleichmäßigen Materialaufwachsrate und -zusammensetzung mehrere Einflussgrößen auf die Stromdichteverteilung zu berücksichtigen. Art und Dichte der Maskenstrukturen sowie das Aspektverhältnis der Resistsstrukturen zählen dazu. Beispielsweise ist die Ausbildung der Strukturoberfläche bei der Abscheidung in Mikroformen mit hohen Aspektverhältnissen durch inhomogene Stromdichteverteilung während der Abscheidung im oberen Drittel der Strukturen verzerrt, die Nutzung nur des unteren Teils der Mikroform hingegen führt zu einer weitgehend gleichmäßigen Oberflächenstruktur [ROM97a].

2.5.3.4 Mikroformen

Zur galvanischen Abscheidung von Metall in Mikroformen sind elektrisch leitfähige Kathodenflächen notwendig, die als Startschichten bezeichnet werden. Für eine gute Haftung der Startschicht auf dem Substrat sorgen Haftsichten. Die elektrische Kontaktierung dieser Startschicht erfolgt am Substratrand. Mikroformen aus Photoresist decken die Startschicht teilweise ab und definieren so die bei der Abscheidung entstehende Metallstruktur. Nach der Galvanik ist es vielfach notwendig, die Photoresistform zu entfernen, um die Startschicht und die Metallstruktur sowie gegebenenfalls Opferschichten freizulegen. Für eine elektrische Trennung der Strukturen muss die Startschicht entfernt werden. Durch Ätzen von Opferschichten entstehen teilbewegliche oder vollständig vom Substrat abgelöste Strukturen. Das Entfernen der Photoresistformen ist meist über Lösungsmittel zu erreichen. Bei stark polymerisiertem Material, z. B. SU-8-Resist, werden Plasmaverfahren zur Entfernung des Resists eingesetzt oder metallische und organische Opferschichten zum Abheben der Resiststruktur verwendet. Bild 2-19 zeigt ein Beispiel für die Anwendung der Opferschichttechnik, bei dem die galvanische Herstellung von Ni-Strukturen in SU-8-Mikroformen erfolgt.

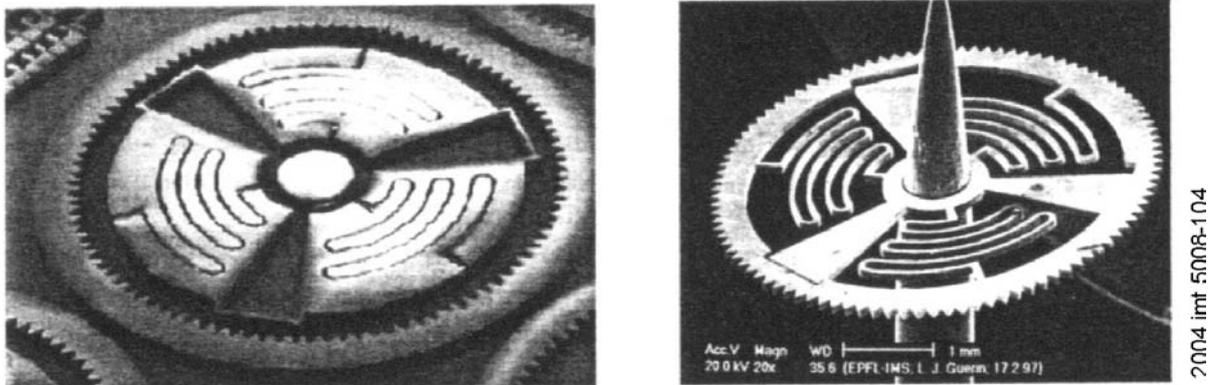


Bild 2-19: SU-8-Mikroform (links) und galvanische Ni-Struktur (rechts) eines Zahnrades mit einer Dicke von 200 μm [MAD02, LOR98a]

Bei der Herstellung von Spritzgussformen wird SU-8 galvanisch durch Überwachsen abgeformt, die SU-8-Form sowie die metallische Spritzgussform vom Substrat getrennt und danach die SU-8-Form von der Spritzgussform entfernt. Diese Technik ermöglicht eine kostengünstigere Herstellung der Gussformen, u.a. für die Uhrenindustrie [LOR98c].

Für echte dreidimensionale SU-8-Strukturen kann die Standardlithographie mit der Mikrostereolithographie kombiniert werden [BER99]. Die Mikrostereolithographie ermöglicht die Herstellung komplexer Polymerstrukturen mittels UV Laser in UV-vernietzbarem Resist [GAR02]. Durch Mehrfachbelichtung und -belackung können planare, dreidimensionale Strukturen (z. B. Mikrokanäle) hergestellt werden [ZHA01]. Wird direkt nach dem Belichten eine weitere Resistschicht aufgebracht, ist eine

optisch dichte Zwischenschicht vorzusehen, um die untere Resistschicht vor der nachfolgenden Belichtung zu schützen. Für Opferschichten, die eine besondere Schichthöhe erreichen sollen, wie beispielsweise für Kanäle, eignet sich auch DNQ/Novolak. Er wird vor der SU-8-Prozessierung einem Hard Bake unterzogen, um eine chemische Stabilität zu gewährleisten [ZHA01]. In dieser Art vorbereitet, lässt sich der DNQ/Novolak Resist auch als Opferschicht zum Ablösen der SU-8-Strukturen nach der Mikrogalvanik einsetzen: Bei passender Prozessführung ist nach der Strukturierung ein Entfernen der Novolak-Resistschicht durch Aceton dort, wo sie nicht durch SU-8 geschützt ist, möglich. Nach erfolgter Galvanik führt das komplette Auflösen der Novolak-Resistschicht zum Trennen der SU-8-Strukturen vom Substrat.

Die Anwendungen von SU-8-Strukturen sind Mikroformen für die galvanische Abscheidung [KOH02b, KOH03, GHA00b], die Nutzung als Formmaterial zur Herstellung von Spritzgussformen [LOR98c, EDW00] und photoplastische Strukturen [SEI02], bei Bedarf kombiniert mit Opferschichttechnik zum teilweisen oder kompletten Ablösen von Strukturen. Letztere werden beispielsweise eingesetzt im Bereich der Mikrofluidik oder als mechanische Funktionsstrukturen. Die Anwendung von DNQ/Novolak Mikroformen zur galvanischen Abformung wurde vielfach demonstriert [CON99, LOE00, ROT99].

2.6 Werkstoffe für elektromagnetische Aktoren

In der Mikrotechnik wird eine Vielzahl von Werkstoffen eingesetzt [GER97]. Hier sollen Werkstoffe zum Aufbau beweglicher elektromagnetischer Mikrosysteme betrachtet werden. Diese Systeme setzen sich aus mechanischen, teilweise beweglichen Strukturen sowie aktiven Strukturen für den Antrieb zusammen. Bei der Integration von Funktionen ist die Kompatibilität der Werkstoffe zu beachten. So unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften magnetischer Werkstoffe von denen des Siliziums, welches für mechanische Strukturen eingesetzt wird. Durch konstruktive Maßnahmen ist dies in der Auslegung zu berücksichtigen [LIN01].

2.6.1.1 Werkstoffe für mechanische Funktionen

Starre Strukturen sowie Federgelenke, Führungen und Lager können mikrotechnisch aus Halbleiterwerkstoffen, metallischen oder keramischen Werkstoffen, Gläsern oder Kunststoffen aufgebaut werden. Als Standardmaterial der Halbleiterindustrie vereinigt Silizium neben mechanischen auch elektrische Funktionen zur Integration von Mikrosensorik und -elektronik [THI00, MUL00]. Die herausragende Stellung der Siliziumtechnologie in der Mikrotechnik liegt in den einzigartigen mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Siliziums sowie in der Adaption von Technologien aus der Mikroelektronik begründet [PET82, WID97].

Für mechanische Strukturen wird vorwiegend mono- und polykristallines Silizium in Form von Volumen- bzw. Oberflächenmikromechanik eingesetzt. Es besitzt sowohl in kristalliner als auch in polykristalliner Form hervorragende, reproduzierbare

mechanische Eigenschaften, insbesondere hohe Verschleißfestigkeit. Es lässt sich sowohl nasschemisch und trocken ätzen als auch präzise mechanisch bearbeiten [GAT96, MUL00].

Kunststoffe lassen sich relativ einfach strukturieren und aufbringen. Sie sind leicht mit anderen Werkstoffen zu verbinden. In Form von Photoresisten sind sie sogar lithographisch direkt strukturierbar. Dies macht ihren Einsatz als mechanische Struktur vorteilhaft. Besondere Bedeutung hat hier der Resist SU-8 erlangt. Anwendungen sind neben mechanischen Konstruktionselementen (Getriebe- und Fluidikkomponenten), Strukturen für optische Komponenten (Spiegelmembran). Nachteilig ist bei Kunststoffen, dass ihre Eigenschaften (z. B. der Vernetzungsgrad) von der Art ihrer Prozessierung abhängig und daher nur bedingt reproduzierbar sind.

Gläser lassen sich in ihren Eigenschaften durch Zusätze variabel einstellen. Hierzu zählt u. a. ihr thermisches Ausdehnungsverhalten, das in weiten Grenzen variiert werden kann. So lässt sich die thermische Ausdehnung von Glas sowohl an Metalle als auch an Silizium oder Keramiken anpassen [GER97]. Bestimmte Gläser sind zudem photostrukturierbar. Keramische Werkstoffe zeichnen sich durch ihre hohe Härte, Steifigkeit und Verschleißfestigkeit aus. Durch den relativ gut an Metalle angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten eignen sie sich als Substratmaterial für magnetische Aktoren. Durch ihre hohe Steifigkeit und ihre gute mechanische Bearbeitbarkeit sind sie für hochgenaue Antriebe und Lagerungen ideal.

2.6.1.2 Magnetische und elektrisch leitende Werkstoffe

Der Aktivteil des elektromagnetischen Antriebs erfordert neben metallischen Leiterstrukturen weich- und hartmagnetische Werkstoffe. Für die Herstellung großer Schichtdicken und hoher Strukturen eignet sich die elektrochemische Abscheidung in Mikroformen, da sie wegen der hohen Abscheideraten und der strukturierten Abscheidung Vakuumverfahren wie PVD- oder CVD-Verfahren überlegen ist [SCH00]. Die Strukturierung ganzflächig abgeschiedener, dicker Schichten durch Ätzen oder Lift-Off-Verfahren ist meist aufwendiger. Die elektrochemische Abscheidung von Metallen und Metalllegierungen erfolgt durch Elektrolyse aus der entsprechenden, zumeist wässrigen Lösung der Metallsalze. Häufig mikrogalvanisch abgeschiedene Werkstoffe sind Kupfer als Leiterwerkstoff, NiFe, NiFeCo sowie Kombinationen aus anderen Übergangsmetallen als weichmagnetischer sowie CoPt, CoNiP und NiP als hartmagnetischer Werkstoff [ROM97a]. Bei hartmagnetischen Werkstoffen werden wegen der besseren magnetischen Eigenschaften oft Vakuumabscheideverfahren bevorzugt [BUD04, CUG03].

Als Werkstoff für niederohmige Leiterbahnen werden in der Mikrotechnik Aluminium und Kupfer verwendet. Aluminium hat in der Siliziumtechnik gegenüber den leicht diffundierenden Schwermetallen Kupfer und Gold Vorteile als Kontakt- und Leitermaterial [WID96]. Kupfer besitzt einen geringen elektrischen Widerstand und höhere Sicherheit gegenüber Elektromigration [VÖL00]. Galvanisch abgeschiedenes

Kupfer wird aus diesen Gründen und wegen einfacher Integration mittels Damascene-Prozess seit kurzem anstelle des Aluminiums für Leiterbahnen bei integrierten Schaltkreisen eingesetzt [AND99]. Kupfer wird häufig in Verbindung mit magnetischen Werkstoffen zum Aufbau induktiver Bauteile genutzt [AHN98, GAT98, LIA99, OHN98, RUB01, SAD00, SEI03].

Für weichmagnetische Schichten werden sehr häufig Legierungen aus NiFe („Permalloy“) oder CoNiFe galvanisch abgeschieden [DIB00]. Ni₈₁Fe₁₉ ist das klassische weichmagnetische Dünnschichtmaterial ($B_s = 1\text{T}$), das wegen hoher Permeabilität und geringer Koerzivität, Magnetostraktion und Schichtspannung in der magnetischen Datenspeichertechnik eingesetzt wurde [AND93]. Für reines Eisen wird das Maximum der Sättigungsflussdichte erreicht (vgl. Bild 2-20). Eine verbesserte Sättigungsinduktion ergibt sich z. B. für Ni₄₅Fe₅₅ ($B_s = 1,7\text{T}$) [RAM03]. Ramasubramanian berichtet sogar von Sättigungsmagnetisierungen über 2,2 T für galvanisch abgeschiedene NiFe-Dünnschichten mit mehr als 73% Eisen. Erhöhte Sättigungsinduktion lässt sich auch durch Co-Anteile erreichen [BON03]. Hohe Fe-Anteile bei Dünnschichten erhöhen jedoch Koerzivität sowie Schichtspannungen und bewirken Korrosionseffekte [BOZ93, JUD94]. Besonders für hohe Schichtdicken von einigen 10 μm werden daher NiFe-Legierungen mit maximal 55% Fe bevorzugt [PAR98, FÖS03].

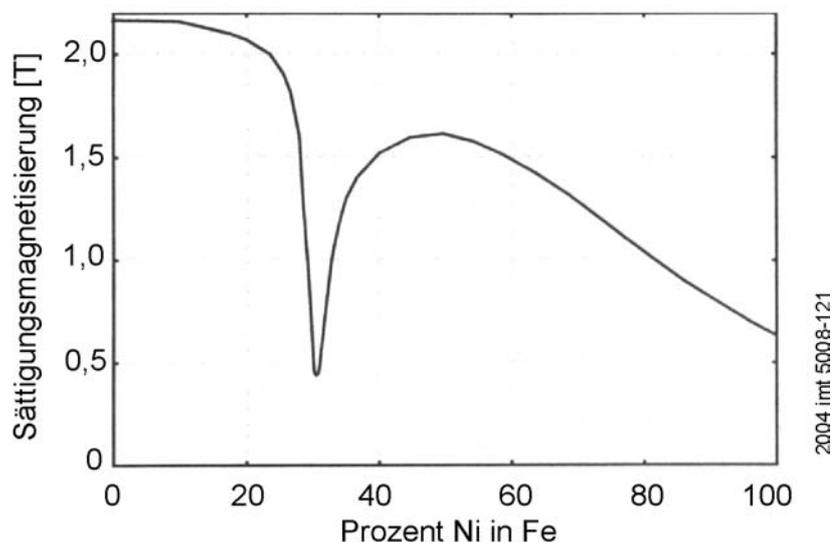


Bild 2-20: Sättigungsmagnetisierung von NiFe-Schichten in Abhängigkeit der Zusammensetzung, nach [BOZ93]

2.6.1.3 Elektrisch isolierende Werkstoffe

Zur elektrischen Isolation werden in der Mikrotechnik sowohl anorganische als auch organische Werkstoffe eingesetzt. Sind neben der Isolation auch Funktionen wie Einebnung und Passivierung der Strukturen wichtig, werden polymere Isolationswerkstoffe genutzt, die zur einfacheren Prozessierung zum großen Teil photostrukturierbar sind. Für die Charakterisierung der einebnenden Wirkung von

Polymerwerkstoffen wird der Planarisierungsgrad (engl.: Degree of Planarization, DOP) genutzt, der die Welligkeit der Polymeroberfläche bezogen auf die Strukturhöhe beschreibt (vgl. Bild 2-21).

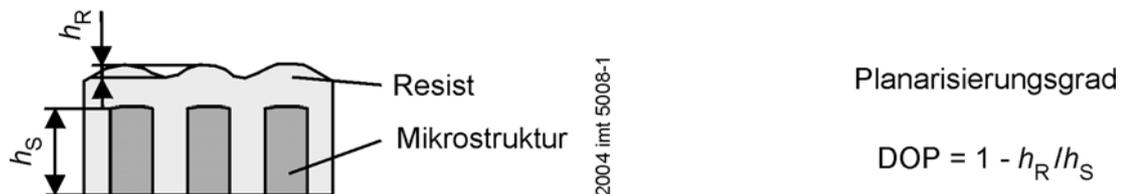


Bild 2-21: Schematische Darstellung der planarisierenden Wirkung von polymeren Werkstoffen

Ein klassischer Werkstoff zur Isolation und Passivierung ist Polyimid. Die Vorstufe des Polyimids ist in Lösungsmittel gelöst und wird wie Photoresist verarbeitet. Die Umwandlung in Polyimid erfolgt durch Cyclisierung unter thermischer Behandlung bei 300 bis 400 °C [WID96]. Polyimid bildet durch nicht vollständig ausgetriebenes Lösungsmittel, insbesondere bei hohen Schichtdicken, leicht Fehlstellen aus. Außerdem reagiert es während des Aushärteprozesses mit Kupfer und bildet bei der Vernetzung durch Schrumpfung des Werkstoffs hohe Schichtspannungen aus [OSU98].

Ein weiterer Isolationswerkstoff ist das Photopolymer Benzocyclobuten (BCB), das sich als polymeres, dielektrisches und sehr gut planarisierendes Material zur Isolation von Spulenstrukturen sowohl für die Sensorik [OHN98] als auch für die Aktorik [OHN00, REH01, CHO00] eignet. Hauptanwendungsgebiet von BCB sind aufgrund der niedrigen Dielektrizitätskonstante hochdichte Verdrahtungsträger für Multi-Chip-Module. Im Vergleich zu Polyimid bietet BCB einen sehr hohen Planarisierungsgrad und geringere Schrumpfung bei niedrigeren Verarbeitungstemperaturen. Beide Polymere sind photostrukturierbar. Die Strukturierung von vernetztem Material ist durch Trockenätzverfahren mit reaktiven Gasen möglich [BAK99, VIT00]. Dies ermöglicht zwar nahezu senkrechte Seitenwände in Resiststrukturen [SEI99], ist jedoch auf Grund geringer Ätzraten aufwendig und teuer.

Standard-Photolacke werden ebenfalls zur elektrischen Isolation eingesetzt [WID96]. Durch chemische Vernetzung während einer Hochtemperaturbehandlung (engl.: Hard Cure) erhalten diese die notwendige chemische Stabilität sowie die isolierende Eigenschaft. Vorteilhaft ist eine mit der thermischen Behandlung verbundene, verbesserte Planarisierung des Resists sowie eine Abrundung von Resiststrukturen. Diese Effekte treten je nach Photolack in unterschiedlich hohen Temperaturbereichen auf [DAM93]. Diese Technik der Planarisierung wurde schon früh in Schreib-Lese-Köpfen von magnetischen Festplattenspeichern eingesetzt [ROM80, ROM89]. Bild 2-22 zeigt ein Schlibbild durch einen heutigen Schreib-Lese-Kopf eines Festplattenspeichers. Auch Sadler et al. setzen zur Isolation von Spulenstrukturen DNQ/Novolak Resist ein. Der Hard Cure zur Erzeugung einer stabilen Isolations-

schicht wird hier bei 220°C durchgeführt [LIA98a, SAD97]. Diese Technik wird beim Aufbau von mikrotechnisch hergestellten Induktivitäten [LIA98b], Flux-Gate- und Wirbelstromsensoren [LIA99] sowie elektromagnetischen Aktoren genutzt [SAD00].

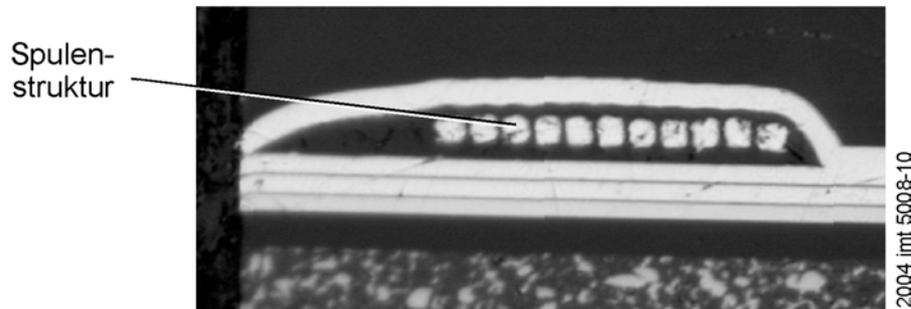


Bild 2-22: Schliffbild des Schreib-Lese-Kopfes eines Festplattenspeichers (IBM/Hitachi), nach [GAT03b]

Auch Epoxidwerkstoff eignet sich zur Isolation, Planarisierung und Einbettung. So besitzt SU-8 Harz durch das geringe Molekulargewicht vor der Vernetzung eine gute einebnende Wirkung. Im vernetzten Zustand ist die chemische Beständigkeit und thermische Stabilität des SU-8-Harzes außerordentlich hoch [LAB95b, LEE95, LOR97]. Vernetzter SU-8 ist gegenüber den meisten Lösungsmitteln, Säuren und Basen beständig. Nur starke Säuren, wie rauchende Salpetersäure [LOR98a] oder heiße, konzentrierte Schwefelsäure [ZHA01] greifen SU-8 an. Auch das Plasmaveraschen ermöglicht nur geringe Abtragsraten [LOR98a, VES00, ZHA01]. Vorteil des epoxidbasierten Materials im Vergleich zu BCB ist die Möglichkeit der Erzeugung von hohen Isolationsschichtdicken bei gleichzeitiger Photostrukturierung mit hohen Aspektverhältnissen. Die dielektrische Konstante von ausgehärtetem SU-8 von $\epsilon = 3 - 4$ ist ebenfalls günstig [THO98].

Die Verwendung eines epoxidbasierten Isolationswerkstoffes wird bei der Fertigung eines Mikromotors erwähnt [ACO95, OSU98]. Nach Acosta et al. hat der Epoxidwerkstoff gegenüber Polyimid und hocherhitztem Photoresist den Vorteil des geringeren Lösungsmittelanteils, geringerer Schichtspannungen und einer besseren Planarisierung. Der epoxidbasierte Photoresist SU-8 ist als photostrukturierbare dielektrische Schicht für Sensoren und Aktoren geeignet [DAN00, SEI01]. Als vom Trägersubstrat abgelöste Struktur kann SU-8 in Form einer strukturierten Folie neben der isolierenden und passivierenden Funktion für Spulenstrukturen auch eine Substratfunktion übernehmen [GUE98].

2.7 Ausgewählte integrierte elektromagnetische Mikroantriebe

Magnetische Antriebe lassen sich nach ihrem Arbeitsprinzip in elektromagnetische und elektrodynamische Wandler unterscheiden. Das Antriebsprinzip entscheidet primär über die zu verwendenden Werkstoffe und Technologien, wohingegen die Art der Bewegung die Geometrie des magnetisch aktiven Teils bestimmt sowie die eingesetzten Funktionseinheiten zum Tragen und Stützen festlegt. Bezüglich Mikroantrieben dominieren bei großen Relativbewegungen, wie z. B. bei Mikrolinearmotoren, Gleit- und Wälzlagerprinzipien während bei kurzen, begrenzten Bewegungen, wie beispielsweise bei Schaltern, federnde Aufhängungen genutzt werden.

Elektromagnetische Antriebe sind gegenüber elektrostatischen Antrieben komplexer im Aufbau und schwieriger zu integrieren. Vorteile der magnetischen Systeme sind eine geringe Betriebsspannung, hohe erreichbare Leistungsdichten, große und weitreichende Kräfte sowie Unempfindlichkeit gegenüber Partikeln. Durch Einsatz hartmagnetischer Werkstoffe werden bidirektionale Kraftwirkungen sowie stromlos Haltekräfte nutzbar [CHU01, CUG03, REY01]. Zur Erzeugung des magnetischen Flusses werden neben Spulen Permanentmagnete eingesetzt, die stromlos ohne Verluste Haltekräfte erzeugen.

Bei Reluktanzmikroantrieben muss die Genauigkeit der Läuferlagerung bzw. Ankeraufhängung besonders beachtet werden, da die Reluktanzkräfte mit der Luftspaltlänge abnehmen. Die Toleranzen des Luftspalts sind daher für die Systemcharakteristik entscheidend. Fertigungstoleranzen im Mikrometer- bis Sub-Mikrometerbereich sind notwendig. Bei kleinen Stellwegen bieten sich Festkörpergelenke an, die sehr präzise, meist ohne zusätzliche Montageschritte durch Ätzprozesse integriert gefertigt werden. Bei großen Relativbewegungen können die Aktivteile sowie notwendige Führungsstrukturen für den beweglichen Teil einzeln integriert gefertigt werden, müssen danach jedoch montiert werden.

Beide dieser konstruktiven Lösungen können prinzipiell für optische Schalter eingesetzt werden, wobei Festkörpergelenke mit kurzen Stellwegen präziser und einfacher mikrotechnisch herstellbar sind. Es können konventionelle Fertigungstechniken, wie gewickelte Spulen oder mechanische bearbeitete Permanentmagnete, hybrid mit Strukturen der LIGA- und Dünnschichttechnik kombiniert werden. Müssen die integriert hergestellten Komponenten montiert werden, bieten Montagetechniken Vorteile die im Nutzen arbeiten.

Im Folgenden werden beispielhaft Mikrosysteme mit elektromagnetisch aktiven Komponenten betrachtet. Der Schwerpunkt liegt auf schaltenden und linear positionierenden Systemen. Der elektromagnetische Aktivteil sollte jeweils integriert dünnschichttechnisch hergestellt sein.

2.7.1 Mikromotoren

Erste rotatorische Reluktanzmotoren wurden bereits Anfang der 1990er Jahre in verschiedenen Ausführungsformen demonstriert (vgl. Bild 2-23). Zur Strukturierung wurden sowohl die UV-Tiefenlithographie [AHN93a] als auch die Röntgentiefenlithographie [ACO95, OSU98] genutzt, wobei alle Aktoren dünnschichttechnisch hergestellte Spulen beinhalten. Bei der Nutzung des LIGA-Verfahrens werden auch Spulen mit Drahtwicklungen verwendet, um eine hohe Durchflutung zu erreichen [GUC93].

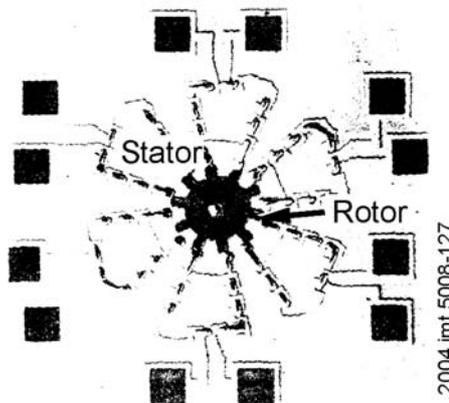


Bild 2-23: Reluktanz-Mikromotor für rotierende Bewegungen [AHN93a]

Rotierende Mikromotoren, die nach dem elektrodynamischen Prinzip arbeiten, sind meist hybrid montierte Systeme, um bei unterschiedlichen Werkstoffen und Strukturen die jeweils optimale Aufbautechnik nutzen zu können. Kämper et al. entwickelten einen hybrid montierten Mikromotor mit Permanentmagnetläufer [KÄP96]. Die Spulen werden hierbei mikrotechnisch auf Folien hergestellt. Der Antrieb enthält zusätzlich ein in LIGA-Technik hergestelltes Getriebe. Der Mikromotor wurde in verschiedenen Varianten weiterentwickelt, bei denen u. a. die lithographische Strukturierung der Spulen und Hartmagneten umgesetzt wurde [NIE99]. Integriert gefertigte Linearmotoren basieren meist auf dem Reluktanzprinzip. Im Rahmen des SFB 516 entstehen lineare Reluktanzmotoren mit Mäander- und Spiralspulen, die im Luftspalt ein senkrecht ausgerichtetes Magnetfeld erzeugen [GAT00] und solche, die eine Magnetfeldausrichtung in Substratebene aufweisen [SEI02]. Letztere sind auf ähnlich hohe Magnetstrukturen wie in der LIGA-Technik angewiesen, um hohe Kräfte zu erzeugen. In LIGA-Technik sind bereits lineare Reluktanzantriebe mit waagerechter Magnetfeldrichtung im Luftspalt aufgebaut worden, die federnd gelagert sind [GUC96, GUC98b, OHN96]. Gatzert et al. entwickelten lineare Asynchronmotoren in Dünnschichttechnik, die durch Mikrokugeln in V-Gräben geführt werden [GAT02]. Da die mikrotechnische Herstellung hartmagnetischer Werkstoffe in sehr dicken Schichten aufwendig ist, wurde das Permanentmagnetmaterial als Folie eingeklebt.

2.7.3 Schaltende Systeme

Die Hauptanwendungsbereiche für magnetische Mikroschalter sind Mikrorelais, Ventile für Fluidströme und optische Schalter. Die Schalter basieren zumeist auf Elektromagneten als Antrieb oder auf dem elektrodynamischen Prinzip. Erste vollständig integrierte, oberflächenmikromechanische Aktoren mit magnetischem Schaltprinzip demonstrierten Ahn und Allen [AHN93b].

Mikrorelais erlauben eine galvanische Trennung, niedrige Kontaktwiderstände, stark reduzierte bewegliche Massen und geringes Volumen bei geringer Leistungsaufnahme [SCH99]. Zahlreiche Aktorprinzipien sind für Mikrorelais vorstellbar (vgl. Tabelle 2-1). Zum Erreichen kurzer Schaltzeiten bei großen Kontaktabständen sind elektromagnetische Prinzipien zweckmäßig. Als grundsätzliche Aufbauvarianten kommen Strukturen mit vertikaler Auslenkung und der Anregungsebene senkrecht zum Wafer oder horizontaler Beweglichkeit und Anregung in der Waferenebene in Frage. Die Aufhängung der Ankerstruktur werden als Torsions- oder Biegefedern ausgeführt. Der mechanische Aufbau besteht aus der Ankerplatte, die die Kontaktbahn bzw. den Schließer trägt, und der Kontaktfeder, die durch die Rückstellkraft das Öffnen des Schalters sicherstellt.

Den prinzipiellen Aufbau eines mikrotechnischen Relais mit vertikal beweglichem Schließer zeigt Bild 2-25. Der Aufbau besteht aus einem oberen und einem unteren Chip. Der magnetische Kreis wird beim elektromagnetischen System über das FeSi-Substrat geschlossen, beim oberen Chip durch eine NiFe-Schicht.

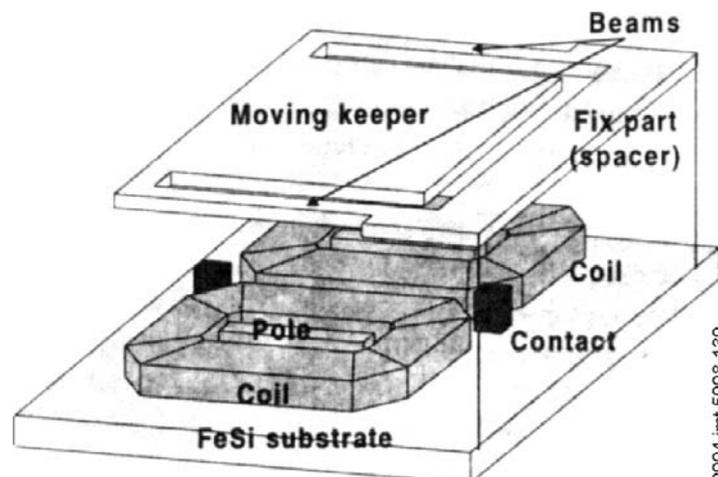


Bild 2-25: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Mikrorelais [FUL98]

Bei elektromagnetischen Relaisausführungen kommen als magnetische Schichten meist NiFe-Legierungen zum Einsatz, welche galvanisch abgeschieden werden. Der Anker ist entweder vertikal [FUL98, RUA01, TAY94, TAY97, TIL99] oder horizontal [ROG95] beweglich, wobei letzteres Konzept große Querschnitte benötigt und daher in LIGA-Technik realisiert ist. Die Flussführungsstrukturen und elektrischen Leiter

werden jeweils in einem Mehrlagenprozess gefertigt, wobei Spiralspulen [FUL98, RUA01, TIL99], einlagige Mäander [TAY98, SEI99] oder, bei lateraler Bewegung des Ankers, Helixspulen mit großen Magnetquerschnitten realisiert werden.

Einen elektromagnetisches Mikrorelais mit permanentmagnetischer, stromloser Verriegelung stellt Bild 2-26 dar [RUA01]. Der Aufbau besteht aus einem drehbar an zwei Torsionsfedern aufgehängten magnetischen Ankerstruktur in Form eines Balkens, die in zwei durch Anschläge definierte Schaltstellungen verkippt werden kann und dabei elektrische Kontakte schließt. Unterhalb des Balkens befindet sich eine Spiralspule. Auf der Rückseite des Trägersubstrates ist ein Permanentmagnet zur Erzeugung des externen Magnetfeldes untergebracht.

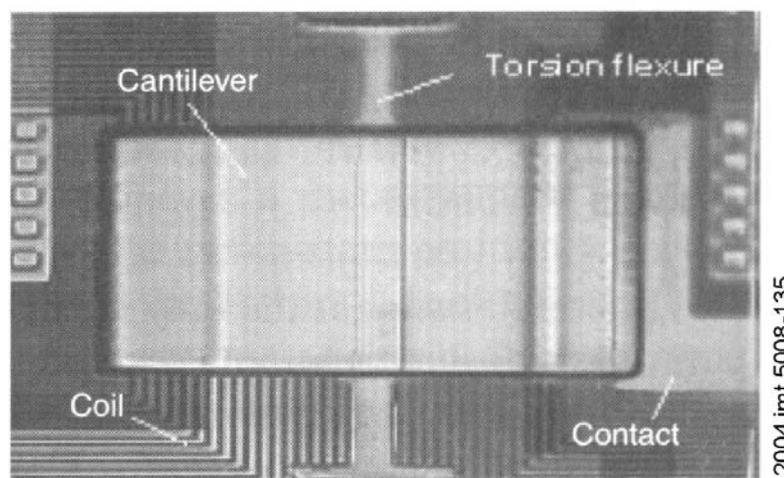


Bild 2-26: Mikrorelais mit externer hartmagnetischer Verriegelung

Durch das externe, senkrechte Magnetfeld richtet sich der magnetische Balken aus und erreicht eine der beiden Schaltstellungen. Das Magnetfeld hält den Balken gegen die Kraft der Torsionsfedern in einer stabilen Lage. Ein kurzzeitiger Strompuls in der Spule kehrt die Magnetisierung entlang des magnetischen Balkens um, wodurch ein entgegengesetztes Drehmoment wirksam wird. Der Schalter öffnet und schaltet in die entgegengesetzte, stabile Lage um. Ein entgegengesetzter Strompuls bewirkt die Umkehrung des Schaltvorgangs.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für elektromagnetische Antriebe in schaltenden Systemen sind Mikroventile zur Steuerung von Fluidströmen. Sadler et al. setzen zum Abschluss des Fluidstroms eine Membran mit einer magnetischen Schicht als Anker ein (vgl. Bild 2-27). Bei Bestromung der Spule des Elektromagneten zieht dieser den Anker an und öffnet das Ventil. Die Membran ist in Silizium nasschemisch geätzt. Der Antrieb ist als Helixspule mit NiFe-Flussführung aufgebaut, deren Pole durch das Substrat auf die Rückseite in Richtung Membran geführt sind. Die Spulenabmessungen liegen bei etwa 5 mm^2 [SAD99].

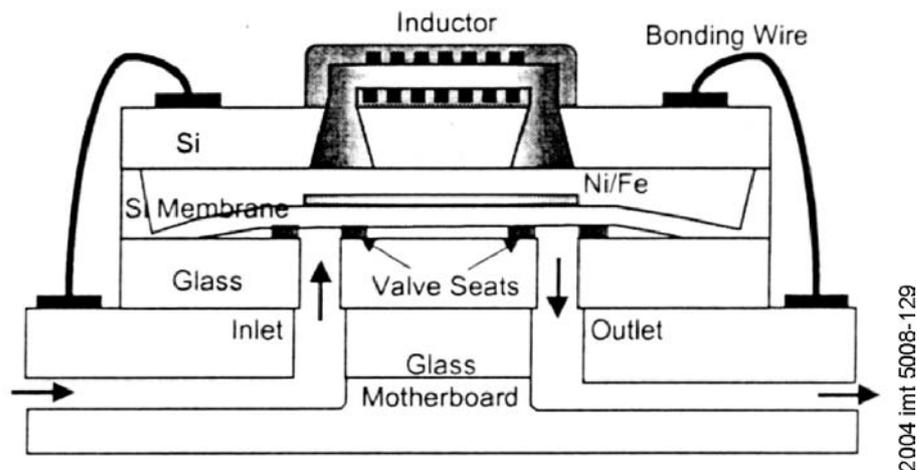


Bild 2-27: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Mikroventils zum Schalten von Fluidströmen [SAD99]

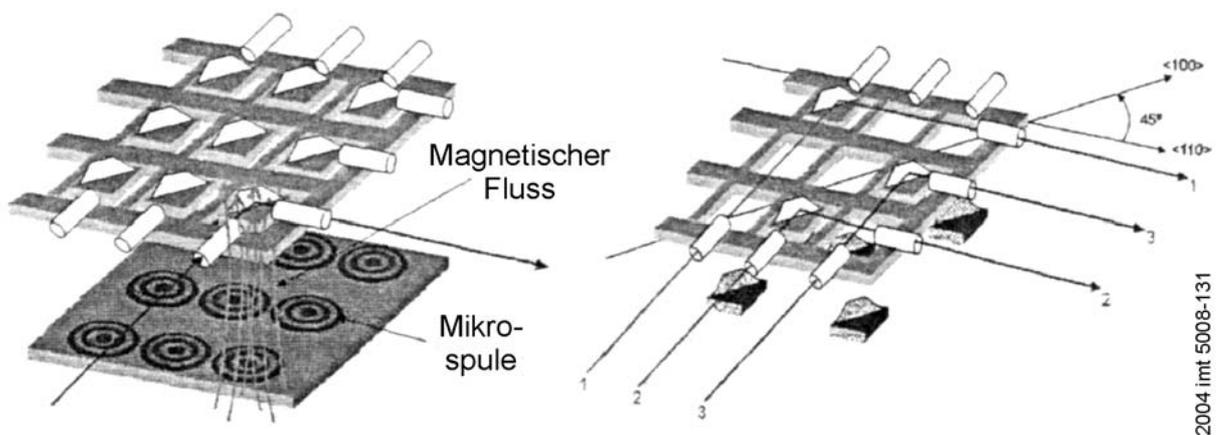
Eine weitere Gruppe innerhalb der schaltenden Mikrosysteme bilden optische Mikroschalter. Dabei können zwei Prinzipien unterschieden werden: Beim ersten Prinzip wird zum Einkoppeln des Lichts die Ausrichtung von Lichtleitfasern mechanisch verändert (engl.: Moving Fiber Switch). Dieses Schaltkonzept arbeitet optisch sehr verlustarm, da keine optischen Elemente in den Strahlengang eingebracht werden. Durch die Abstände der Faserkerne sind jedoch große Stellwege von ca. 100 μm zu überwinden. Das Prinzip erfordert große, leistungsstarke Antriebe. Magnetische Aktoren in LIGA-Technik erfüllen diese Anforderung [FIS01].

Beim zweiten Prinzip ist die Faser ortsfest, und der Lichtstrahl wird durch bewegliche, optische Komponenten abgelenkt (engl.: Fixed Fiber Switch). Nach diesem Prinzip arbeiten die nachfolgend beschriebenen Systeme. Eine Gruppe bilden dabei die elektrodynamischen Schalter, die die Lorenzkraft ausnutzen [CHO02, SCH02]. Sie erfordern ein externes Magnetfeld. Durch Bestromen einer auf dem beweglichen Mikrospiegel befindlichen Spule im Magnetfeld wird die Spule in ihrer räumlichen Lage verdreht und dadurch der Spiegel verkippt.

Judy und Muller entwickelten einen magnetisch angetriebenen Scanner, bei dem ein Torsionsspiegel aus Polysilizium mit galvanisch abgeschiedener Nickelschicht ($450\ \mu\text{m} \times 450\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ dick) durch ein internes Magnetfeld einer Mikrospule gekippt wird. Der Torsionsspiegel liegt über einer Spule mit zehn Windungen. Mit einem Strom von 500 mA wird ein Magnetfeld erzeugt, das den Spiegel um mehr als 45° dreht. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen Spiegel und Substrat können die Endpositionen elektrostatisch gehalten werden [JUD96]. Shen et al. nutzen dasselbe Prinzip, nur wird hier eine Membran aus Polyimid eingesetzt, auf die weichmagnetisches Material abgeschieden ist [SHE02]. Spule und Membran werden bei diesem Beispiel jeweils auf separaten Wafern hergestellt.

Houlet et al. verfolgen das Prinzip eines optischen Matrix-Schalters mit elektromagnetischem Antrieb [HOU02]. Dieser besteht aus Mikrospulen, die auf einem

separaten Wafer gefertigt werden, sowie weich- und hartmagnetischen Komponenten. Durch hybride Integration der Einzelelemente entsteht ein Array von elektromagnetisch angetriebenen Mikrosiegeln. Die Spiegel selbst werden in Volumenmikromechanik auf einem zweiten Wafer hergestellt. Bild 2-28 zeigt die Anordnung und das Arbeitsprinzip der optischen Schalter schematisiert. Die Mikrospulen stellen eine Weiterentwicklung einer früheren Variante mit gewickelten Spulen dar [REY01]. Die Verbindung von Magnetik und Mikrospulen zu einer kompletten Antriebseinheit konnte jedoch bei ersten Prototypen des Matrix-Schalters bisher nur hybrid realisiert werden [HOU02]. Komplett integriert gefertigte, elektromagnetische angetriebene mikromechanische optische Schalter sind demnach noch zu entwickeln.



2004 imt 5008-131

Bild 2-28: Prinzipdarstellung der elektromagnetisch angetriebenen optischen Schaltmatrix [REY01]

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In optischen Netzwerken werden für Netzwerkkonfiguration und sichere Datenkommunikation Schalter benötigt, die den Lichtweg zwischen optischen Fasern beeinflussen. Diese werden zu Vermittlungssystemen zusammengefasst. Die Schalter werden vollständig mikrotechnisch hergestellt und in Array-Anordnung zwischen optischen Fasern eingesetzt.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit umfasst die Entwicklung und Herstellung des Antriebsteils eines als optischer Schalter dienenden Spiegelsystems. Das Antriebskonzept ist passend zum mikromechanischen Kippspiegel, der durch den Kooperationspartner entworfen und gefertigt wird, zu gestalten. Die Schaltfunktion wird über Verkipfung eines Mikrospiegels erreicht. Die Kippbewegung ist elektromagnetisch zu bewirken. Die Arbeit beinhaltet den Entwurf des gesamten Antriebssystems, die Entwicklung der Fertigungstechnologie für elektromagnetischen Antrieb, den Aufbau des elektromagnetischen Antriebs sowie die Erprobung des Gesamtsystems.

Aus der Aufgabenstellung leiten sich sowohl fertigungstechnische als auch systemtechnische Problemstellungen ab. In systemtechnischer Hinsicht ergeben sich aus der Arbeitsweise des optischen Schalters folgende Zielsetzungen: Da der Kippwinkel des Spiegels sowie die Kraftwirkung des Antriebs von der Luftspaltlänge im magnetischen Kreis abhängen, müssen sämtliche den Magnetkreis bestimmenden Größen fertigungstechnisch ausreichend genau eingehalten werden. Weiterhin sind geringe elektrische Verluste anzustreben. Magnetische sowie ohmsche Widerstände sind durch geeignete Materialwahl und Auslegung des Systems gering zu halten, um die Kraftausbeute bei gegebener Verlustleistung optimal zu gestalten.

Das Ziel eines kompakten Mikroantriebs erfordert hohe Schichtstrukturen und entsprechende Strukturierungsprozesse sowie die Zusammenführung verschiedener Fertigungstechniken: Das elektromagnetische Prinzip bedingt elektrisch isolierte Leiterstrukturen, die sich räumlich um eine magnetische Flussführung winden. Es ist daher eine Prozesstechnik zu entwickeln, mit der dreidimensionale Systeme mit hohen Strukturen schichtweise aufgebaut werden können. Zielsetzung prozesstechnischer Untersuchungen ist es, lithographische Verfahren zur Fertigung des Mikroaktors zu entwickeln, die nicht nur große Aspektverhältnisse, sondern auch die Einbettung und Planarisierung von Strukturen zulassen, so dass trotz hoher Strukturen ein planarer, mehrschichtiger Systemaufbau möglich ist.

4 Vorgehensweise

Die Entwicklung des Antriebssystems ist eingebettet in ein Gesamtprogramm zum Aufbau eines optischen Mikroschalters. Die Konzeption des Gesamtsystems erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Bereich Microsensor and Actuator Technology (MAT) der Technischen Universität Berlin als Projektpartner. Dieser entwickelt parallel zum Antriebssystem die Spiegelstruktur und führt anschließend die Integration von Antrieb und Spiegel zum Gesamtsystem durch. Die aus Aufgabenstellung und Zielsetzung abgeleitete Vorgehensweise bei der Entwicklung des Mikroantriebs ist in Bild 4-1 dargestellt.

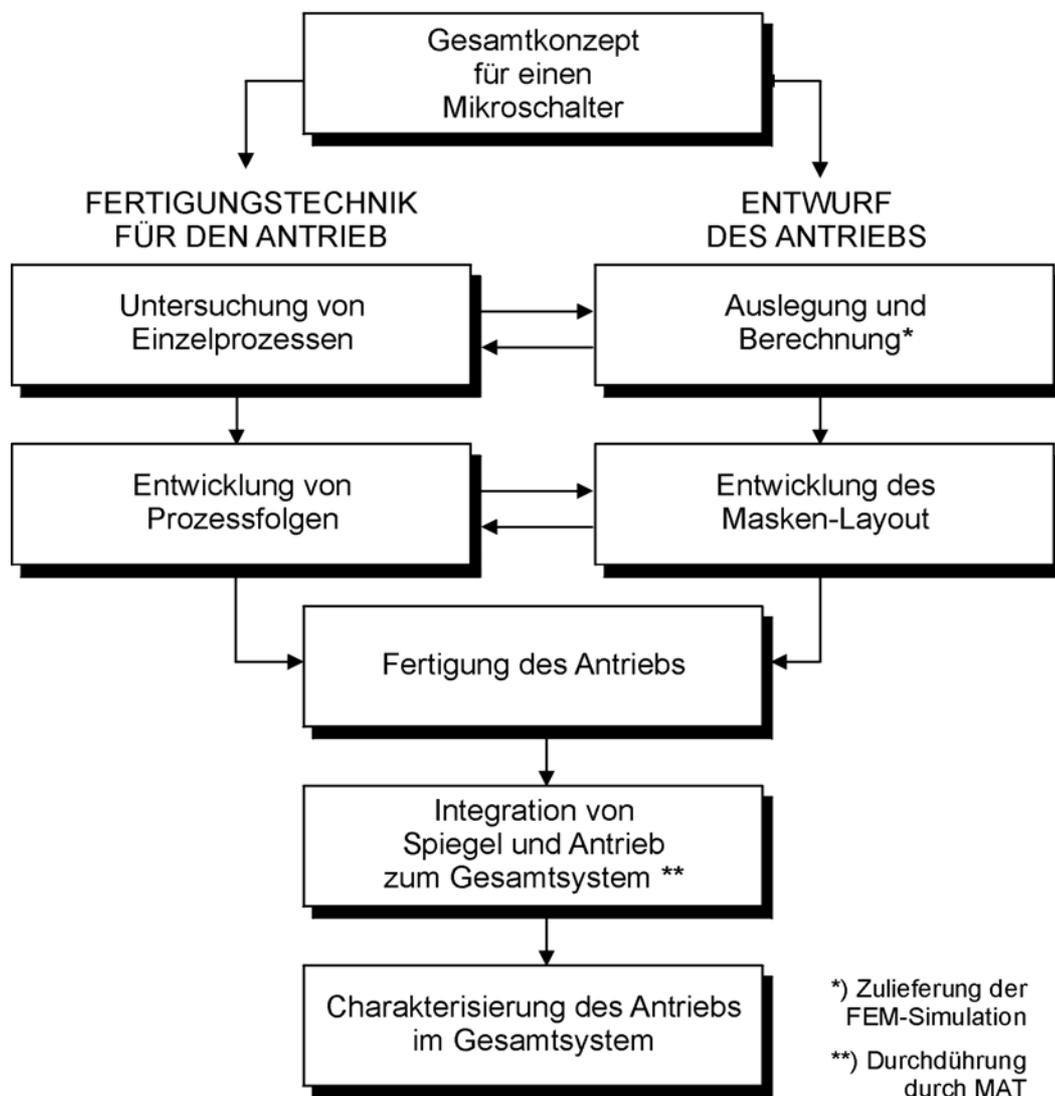


Bild 4-1: Vorgehensweise zur Bearbeitung der Aufgabenstellung

Die Vorgehensweise gliedert sich in prozesstechnische Untersuchungen zur Analyse von Fertigungsprozessen sowie die systemtechnischen Untersuchungen zur Entwicklung des Antriebs. Die Fertigung des Mikrosystems basiert auf den entwickelten Prozessen und setzt die Auslegung in Form des Maskenlayouts um.

Nach dem Aufbau von Antriebssystemen werden diese durch das MAT durch Montage mit Spiegelsystemen zum optischen Mikroschalter integriert. Durch messtechnische Untersuchungen des optischen Schalters wird der Antrieb abschließend charakterisiert. Dies liefert Erkenntnisse, die zur Optimierung von Fertigung und Auslegung des Antriebs genutzt werden können. Aus den Erkenntnissen leiten sich allgemeine Hinweise für den Aufbau elektromagnetischer aktiver Mikrosysteme ab.

Die Auslegung des optischen Schalters als Teil der systemtechnischen Untersuchungen beinhaltet das Erarbeiten des Konzepts für das Gesamtsystems sowie die Entwicklung des Antriebs in Abstimmung mit den technologischen Ergebnissen. Nach der Prüfung und Optimierung der Auslegung mittels FEM-Simulation erfolgt die technologische Umsetzung des elektromagnetischen Antriebs in Form des Maskenlayouts. Die Ergebnisse der technologischen Untersuchungen fließen sowohl in das Design als auch in die Prozesspläne zur Fertigung des elektromagnetischen Antriebs ein. Die Auslegung des Aktors berücksichtigt die Zielsetzung, hohe magnetische Kräfte bei geringer Leistungsaufnahme und geringen Stromwärmeverlusten zu erreichen. Vorteilhaft sind für geringe magnetische und elektrische Widerstände große Strukturquerschnitte sowie Magnetwerkstoffe mit hoher Sättigungsmagnetisierung. Die Grenzen für die technologische Auslegung und Umsetzung des Systems liefern die prozesstechnischen Untersuchungen.

Während der Fertigung des Antriebssystems werden die Prozesse anhand der hergestellten Bauteilstrukturen überprüft, analysiert und gegebenenfalls korrigiert. Dies betrifft hauptsächlich die Topographie sowie elektrische und magnetische Eigenschaften. Nach Abschluss der Fertigung sowie Integration zum Gesamtsystem erfolgt die Charakterisierung des Aktors hinsichtlich der Systemparameter und des Schaltverhaltens.

5 Versuchstechnik

5.1 Verfahren und Anlagen

Zur Herstellung von metallischen Mikrostrukturen für elektromagnetische Mikroaktoren werden Tiefenlithographie und Galvanoformung angewandt. Dabei werden photolithographisch durch Maskenbelichtung in hochviskosen, UV-empfindlichen Photoresisten Mikroformen hergestellt, in die elektrochemisch Metalle abgeschieden werden, die magnetische, elektrisch leitende oder mechanische Funktion haben.

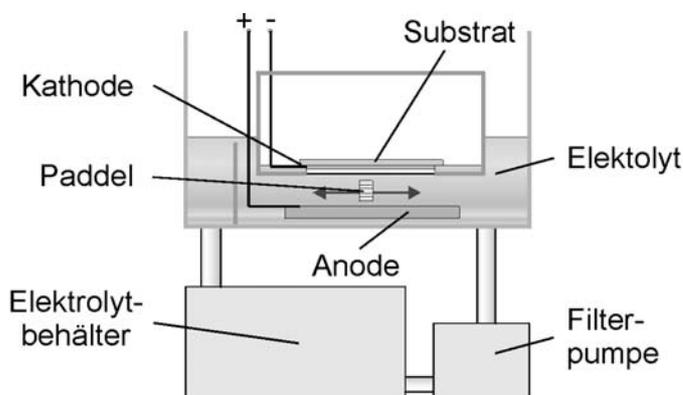
5.1.1 Schichtabscheidung

Vakuuabscheidung

Für die Abscheidung von metallischen sowie von isolierenden Dünnschichten stehen Kathodenzerstäubungsanlagen der Firmen MRC und Leybold zur Verfügung. So können u.a. leitende (Cu, Au) und magnetische (NiFe) Schichten, Haftschichten (Cr, Ti) und Isolationsschichten (Al_2O_3) erzeugt werden.

Mikrogalvanik

Für die mikrogalvanische Abscheidung werden verschiedene Elektrolyte eingesetzt. Die Zusammensetzung der Elektrolyte wird bis auf die Variation von Additiven konstant gehalten. Zur Abscheidung werden Galvanikanlagen nach Art einer Paddle Cell (vgl. Bild 5-1) genutzt [AND94, FÖH03]. Das Paddel besitzt Langlöcher und befindet sich zwischen Substrat und Anode. Durch Bewegung des Paddels mit einer Frequenz von 0,5 Hz werden nahe des Substrates annähernd laminare Strömungsverhältnisse erzeugt.



2004 imt 5008-18

Bild 5-1: Aufbau der Galvanikanlagen: Schematische Darstellung (links) und Abscheidebecken mit Paddel und Anode (rechts)

Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-3 zeigen die Zusammensetzung der verwendeten Cu-, NiFe- und Ni-Elektrolyte. Für die Abscheidung von reinem Nickel wurde der Eisenanteil im NiFe-Elektrolyt weggelassen. Die Abscheidung von Gold erfolgte mit einem kommerziell erhältlichen Elektrolyten (Microfab Au-300, Fa. Enthone OMI).

Tabelle 5-1: Kupfergalvanik [DEG94]

Kupfer [g/l]	55 - 65
Schwefelsäure [ml/l]	27 - 35
Chlorid [mg/l]	50 - 70
Glanzzusatz, Netzmittel	-
pH-Wert [-]	< 1
Frequenz des Paddels [Hz]	0,5

Tabelle 5-2: NiFe Galvanik [PAR98, FÖH01, FÖH03]

NiSO ₄ · 7H ₂ O [g/l]	214
NiCl ₂ · 6H ₂ O [g/l]	5
FeSO ₄ · 7H ₂ O [g/l]	8
H ₃ BO ₃ [g/l]	25
pH-Wert [-]	2,5 ± 0,1 @ 30°C
Saccharin [g/l]	3-4
Frequenz des Paddels [Hz]	0,5

Tabelle 5-3: Ni Galvanik [KOH03]

NiSO ₄ · 7H ₂ O [g/l]	214
NiCl ₂ · 6H ₂ O [g/l]	5
H ₃ BO ₃ [g/l]	25
pH-Wert [-]	3,0 ± 0.1 @ 22°C
Saccharin [g/l]	3-4
Frequenz des Paddels [Hz]	0,5

5.1.2 Ätzverfahren

Für das Entfernen und Strukturieren von Metaldünnschichten wird das Nass- und Trockenätzen eingesetzt. Zum Trockenätzen wird das Ionenstrahlverfahren (IBE) genutzt. Dieses Verfahren dient dem Differenzätzen und Strukturieren von Startschichten. Das nasschemische Ätzen wird insbesondere beim selektiven Entfernen von metallischen Opferschichten eingesetzt.

5.1.3 Strukturübertragung

Für die Strukturübertragung stehen Maskenjustier- und Belichtungsanlagen zur Verfügung (MA150, MA6, Fa. Süss MicroTec). Die Belichtung erfolgt mit einem Breitbandspektrum (Hg-Höchstdrucklampe) von 350 bis 450 nm mit oder ohne i-Line-Filter. Die spektrale Verteilung der Lichtintensität vor der Maske in einer MA6-Maskenjustieranlage gibt Bild 5-2 für eine im Lampenhaus eingebaute 350 W-Quecksilberdampflampe wieder. Die Intensität ist normiert und im Vergleich zu einer 1000 W Lampe (HBO 1000W/D) dargestellt.

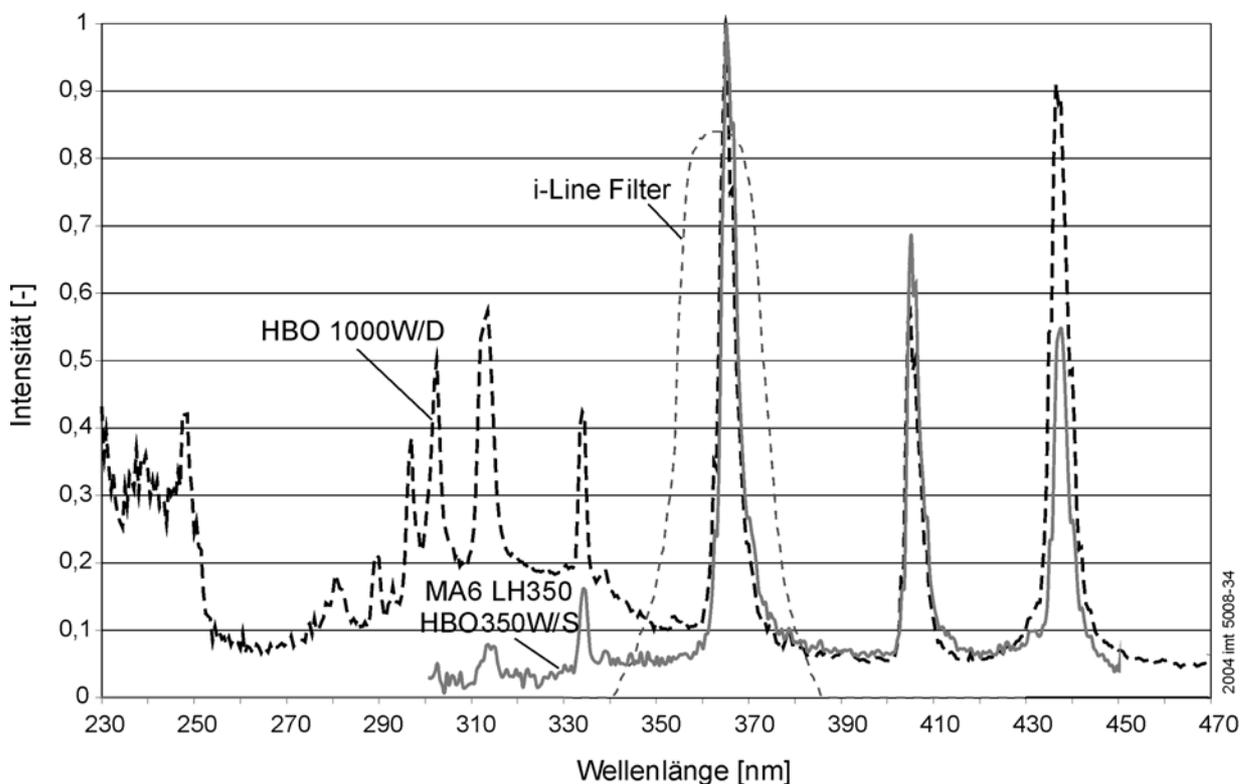


Bild 5-2: Intensitätsverteilung des Belichtungsspektrums an der Maske bei Einsatz einer Standardoptik mit und ohne i-Line-Filter [CUL03]

Durch die Optik des Lampenhauses wird die Intensität unter 360 nm und über 445 nm im Vergleich zur reinen Quecksilberdampflampe reduziert. Die Graphik zeigt außerdem den Spektralbereich, für den der eingesetzte i-Line-Filter durchlässig ist.

Für den restlichen Spektralbereich ist der Filter optisch vollständig undurchlässig. Bei einer Wellenlänge von 365 nm besitzt der Filter eine Durchlässigkeit von ca. 85 %.

Die Belackung dicker Resistschichten wird mit einer Lackschleuder mit rotierendem Deckel (Gyrset RC8, Süss MicroTec) ausgeführt. Bild 5-3 zeigt die Anlage. Durch den mit dem Substrat mitrotierenden Deckel entsteht im Inneren eine mit Lösungsmittel gesättigte Atmosphäre ohne Turbulenzen. Dadurch lassen sich besonders dicke Photolackschichten fehlerfrei aufschleudern. Es steht außerdem für geringere Schichtdicken und zu Vergleichszwecken ein konventioneller Spin-Coater (Typ 1001S, Fa. Convac) zur Verfügung. Die Entwicklung der Resiste erfolgt mit einem Sprühentwickler oder durch Tauchentwicklung.

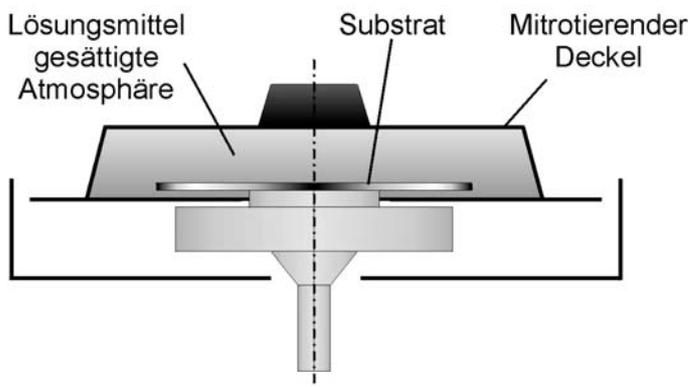


Bild 5-3: Lackschleuder mit rotierendem Deckel für hohe Photolackdicken

5.2 Messtechniken und Analysemethoden

5.2.1 Oberflächenanalyse

Tastschnittverfahren

Zur Untersuchung von Oberflächen über Profilmessungen dient ein Tastschnittmessgerät (Dektak, Fa. Veeco). Dabei wird die Oberfläche mit einer Diamantnadel mechanisch abgetastet. Die Auflösung in z-Richtung liegt im nm-Bereich. Die Messlänge kann einige Millimeter betragen.

Rasterkraftmikroskopie

Mit der Rasterkraftmikroskopie (RKM) lassen sich Oberflächeneigenschaften hochauflösend und zerstörungsfrei charakterisieren. Im Kontaktmodus wird eine atomar feine Spitze, die an einem Hebel befestigt ist, der Probenoberfläche angenähert. Bei Kontakt kommt es zur Auslenkung des Hebels, die detektiert und auf einen konstanten Wert geregelt wird. Beim Nicht-Kontaktmodus berührt die schwingende Spitze die Probenoberfläche nur punktwise bzw. taucht in die adsorbierte Wasserschicht auf der Oberfläche ein. Auf diese Weise lassen sich Auflösungen im atomaren Bereich erzielen.

Weißlichtinterferometrie

Das Weißlichtinterferometer (Wyko, Fa. Veeco) wird zur dreidimensionalen Topographieanalyse eingesetzt. Bei der Messung wird ein Lichtstrahl durch einen Strahlteiler in Richtung Probe abgelenkt, wobei er ein Objektiv mit aufgesetztem Mirau-Interferometer durchläuft. Am Ausgang des Interferometers reflektiert ein halbdurchlässiger Spiegel einen Teil des Strahls auf einen Referenzspiegel, der andere Teil des Strahls fällt auf die Probenoberfläche. Die vom Messobjekt und vom Referenzspiegel reflektierten Strahlen werden zusammengeführt und interferieren im Bereich des Detektorfeldes, wo die Lichtintensitätsverteilung der Interferenzbilder von CCD-Feldern aufgenommen wird. Die Topographie wird mittels Datenverarbeitung errechnet.

Das VSI-Verfahren wird zur Vermessung von rauen Oberflächen und größeren Stufen eingesetzt. Der vertikale Messbereich beträgt 500 µm. Die Messung erfolgt durch vertikale Verschiebung des Systems Objektiv-Interferometer. Der Interferenzkontrast und damit die Intensität des Messsignals ist für jeden Punkt der Oberfläche im Fokus maximal. Aus der Änderung des Interferenzmesssignals wird die Oberflächentopographie errechnet. An dem Messgerät können neun verschiedene optische Vergrößerungen zwischen 1,6- und 60-fach gewählt werden. Die vertikale Auflösung liegt im Sub-Nanometerbereich, die laterale Auflösung ist durch die Optik begrenzt und beträgt 0,8 µm.

Rasterelektronenmikroskop

Zur Analyse von Mikrostrukturen und Dünnschichten wird ein Rasterelektronenmikroskop (REM) des Typs JSM-6400F der Fa. Joel eingesetzt. Es ist mit einer kalten Feldemissionskathode ausgerüstet. Der Vorteil dieser Kathode ist die sehr hohe Elektronendichte im Primärelektronenstrahl, so dass auch bei kleinen Strahldurchmessern bzw. niedrigsten Beschleunigungsspannungen rauschfreie Abbildungen möglich sind. Die Größe der Probenkammer ermöglicht die Analyse von Strukturen auf Substraten von bis zu 150 mm Durchmesser.

5.2.2 Magnetische Materialanalyse

Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)

Mit dem REM können Materialuntersuchungen an Hand von Rückstreuелеktronen durchgeführt werden. Die energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) ermöglicht die chemische Materialcharakterisierung an der Objektoberfläche für alle Elemente.

Vibrationsmagnetometer

Zur Analyse von magnetischen Materialeigenschaften wird ein Vibrationsmagnetometer (VSM) der Fa. EG & G eingesetzt, bei dem ein von S. Foner entwickeltes Messverfahren angewandt wird: Die Probe wird einem von außen angelegten Magnetfeld ausgesetzt, dessen Stärke durch eine Hall-Sonde gemessen wird. Die Magnetfeldstärke wird in einem definierten Zyklus von einer maximalen positiven über eine maximale negative Feldstärke bis zurück zur maximalen positiven Feldstärke variiert. Dabei wird die Hysteresekurve des Magnetmaterials durchlaufen. Gleichzeitig wird die Probe durch ein Schwingungssystem in eine oszillierende Bewegung mit bekannter Frequenz versetzt. Der durch das Schwingen der Probe veränderliche magnetische Fluss induziert in einem benachbarten Spulenpaar eine Wechselspannung. Da die Amplitude der induzierten Spannung proportional zum magnetischen Moment der Probe ist, ergibt sich daraus die Hysteresekurve als $m-H$ -Diagramm, das abschließend in ein $B-H$ -Diagramm umgerechnet werden kann.

5.2.3 Elektrische, elektromagnetische und thermische Analyse

Messung elektrischer Kennwerte

Mit einem RLC-Meter (PM3606, Fa. Fluke) ist die Bestimmung elektrischer Kennwerte wie ohmscher Widerstand, Induktivität und Kapazität über einen Frequenzbereich von 50 Hz - 1 MHz möglich.

Thermographiemessung

Zur Analyse der Temperaturverteilung im elektromagnetischen Antrieb des optischen Schalters wird eine Thermographiekamera eingesetzt. Mit dem System lassen sich sowohl statische als auch dynamische Messungen an Oberflächen durchführen. Die Darstellung erfolgt mit einer örtlichen Auflösung von 50 μm . Für die thermischen

Messungen sind alle metallischen Oberflächen zu schwärzen, um Reflexionen zu vermeiden.

Magnetfeldmessung

Das Magnetflussmessgerät (Teslameter) FH 54 (Fa. Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH) ermöglicht eine hochgenaue, eindimensionale Flussdichtemessung im Bereich von 3 mT bis 3 T. Das Messsystem basiert auf einem Hallsensor, der den magnetischen Fluss senkrecht zur Sensoroberfläche auswertet. Dieser Hallsensor ist in eine ca. 1 mm dicke und 4 mm breite Sonde eingebracht. Die aktive Messfläche hat einen Durchmesser von 0,4 mm 0,4 mm. Ein axialer Hallsensor (HGA-2010 Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH) mit einer aktiven Fläche von 125 µm x 125 µm ermöglicht eine genauere Ortsauflösung.

5.2.4 Analyse der Schaltfunktion

Zur Darstellung der Spiegelbewegung kann ein fokussierbares Laserdiodenmodul (FP-65/1AF-AV-SD1, Fa. Laser Components GmbH) eingesetzt werden, das einen Laserstrahl von 500 µm bis minimal 200 µm Durchmesser (im Abstand von 100 mm) mit einer Wellenlänge von 650 nm erzeugt. Eine einstellbare Haltevorrichtung für das Lasermodul ermöglicht die Ausrichtung des Laserstrahls auf den Spiegel.

6 Systementwurf

6.1 Konzept für einen optischen Mikroschalter

Das Schalten des Lichtes erfolgt durch eine Drehbewegung einer Spiegelfläche, deren Struktur in Si-Mikromechanik hergestellt ist. Die Rotation des Spiegels wird durch einen elektromagnetischen Antrieb erreicht [GAT01]. Bild 6-1 zeigt das Prinzip des optischen Schalters schematisiert.

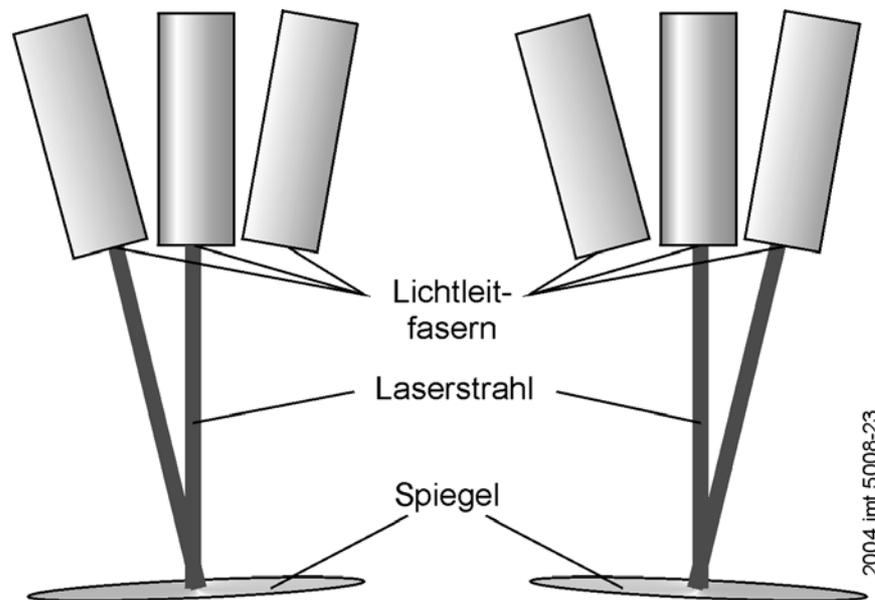


Bild 6-1: Schematische Darstellung des Einsatzes des optischen Mikroschalters

Ziel ist der Aufbau eines mikromechanischen Schalters für den Einsatz in der optischen Datenkommunikation zum Ablenken von Licht einer bestimmten Wellenlänge. Neben der stufenlosen Verstellung soll mit dem Aktor eine Fixierung des Spiegels in den jeweiligen Endpositionen möglich sein. Der Neigungswinkel des Spiegels muss einen Verstellbereich von $\pm 5^\circ$ aufweisen. Dieser Schwenkwinkel soll bei Bestromung des Aktors mit maximal 300 mA erreicht werden.

Der Entwurf umfasst einen elektromagnetisch angetriebenen optischen Schalter für Laserlicht für den Bereich der optischen Datenkommunikation. Die Entwicklung und Fertigung des mikromechanischen Aktorsystems erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Institut „Microsensor and Actuator Technology“ (MAT) der TU-Berlin. Das MAT entwickelt die bewegliche mechano-optische Einheit und das imt die Antriebseinheit.

Das Schalten des Lichtes erfolgt durch eine Drehbewegung eines einachsigen Mikrospiegels, die durch einen elektromagnetischen Antrieb erzielt wird. Das Grundkonzept ist in Bild 6-2 schematisch dargestellt. Die Spiegelstruktur wird in Si-Mikromechanik hergestellt. Die Spiegelfläche hat bei einem Durchmesser von einem halben Millimeter nur eine Dicke von wenigen Mikrometern.

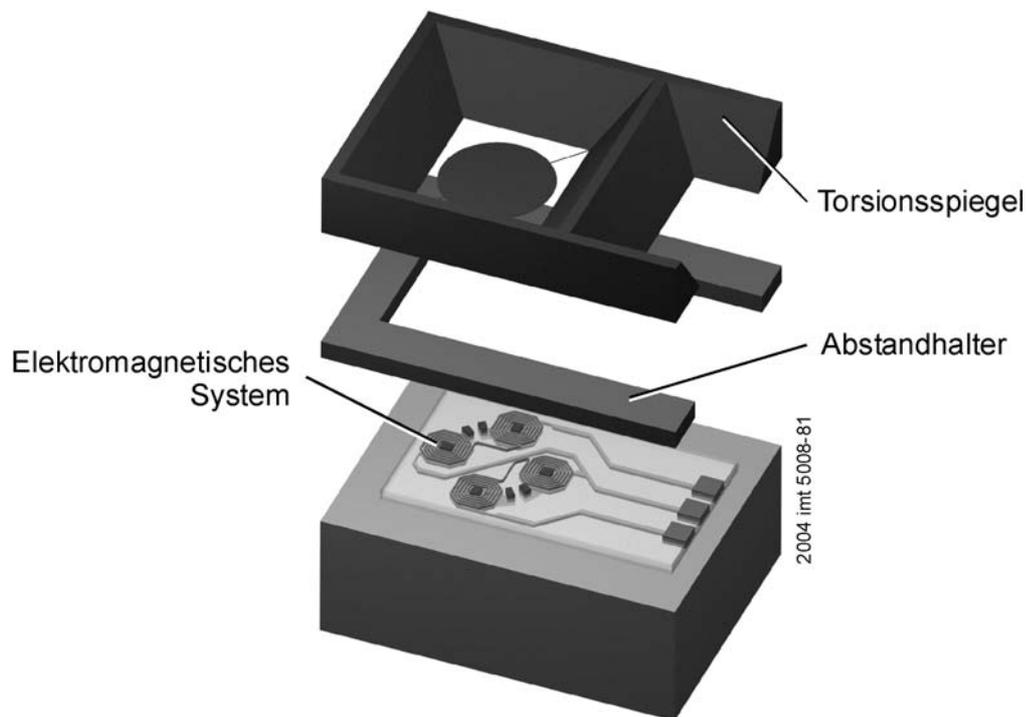


Bild 6-2: Explosionsansicht des Mikroschalters mit Spiegel, Abstandhalter und elektromagnetischem Antriebssystem [GAT03a]

Als Antrieb wird ein Elektromagnet genutzt, der einachsige Kippbewegungen des an zwei Torsionsfedern aufgehängten Spiegels bewirkt. Die Spiegelfläche besitzt hierfür auf ihrer Rückseite einen Nickelring als Anker. Unter Bestromung eines von zwei Spulensystemen wird der Spiegel durch Reluktanzkräfte am Anker in die jeweilige Richtung verkippt. Da die Magnetkräfte dabei senkrecht zur Spiegelfläche wirken sollten, ist im Luftspalt ein senkrechter gerichteter Fluss zu erzeugen. Abstandhalter wie auch Spiegelstruktur begrenzen die laterale Ausdehnung der Antriebseinheit, so dass eine kompakte Spulenanordnung notwendig ist. Wegen der außerdem senkrechten Ausrichtung des Magnetflusses im Luftspalt kommen Spiralspulen (vgl. Bild 2-6) mit jeweils U-förmigem Magnetkern zum Einsatz. Der Drehwinkel des Spiegels wird durch Anschläge begrenzt. Ein Abstandhalter stellt die gewünschte Distanz zwischen dem Aktorsystem und dem Spiegel ein. Durch Integration von Permanentmagneten in das Spulensystem lassen sich ferner stromlos Haltekräfte erzeugen.

6.2 Auslegung

Der Spiegeldurchmesser legt die maximale Ausdehnung des Ni-Rings fest und gibt die Anordnung der magnetischen Flussführungen des Antriebs vor. Die lateralen Abmessungen des Aktors und, in der Folge, auch die maximal erreichbaren Kräfte sind daher begrenzt. Um die Schaltfunktion zu gewährleisten, darf die Federsteifigkeit der Torsionsfedern nicht zu hoch gewählt werden. Die FEM-Simulation der Si-mikromechanischen Spiegelstruktur mit einem Durchmesser von 500 μm und einer

Dicke von 2 μm ergab für die Torsionsbalken einen Querschnitt von 4 μm x 2 μm bei einer Eigenfrequenz des Torsionsspiegels von 1.290 Hz [GAT03a]. Die Systemabmessungen sind in Tabelle 6-1 wiedergegeben. Für hohe Schaltfrequenzen ist eine hohe Eigenfrequenz sinnvoll. Die geringe Dicke der bewegten Spiegelfläche ist daher vorteilhaft.

Tabelle 6-1: Systemvorgaben zum optischen Mikroschalter

Bauteilabmessungen	
Breite	1,1 mm
Länge	1.505 mm
Gesamthöhe	0.915 mm
Spiegelstruktur	
Durchmesser des Spiegels	500 μm
Dicke des Spiegels	2 μm
Querschnittsfläche des Torsionsbalkens	4 μm x 2 μm
Kippwinkel des Spiegels	$\pm 5^\circ$
Abstandhalter	
Dicke der Metallstruktur	70 μm
Dicke der Polymerschicht	20 μm

Das Spulensystem ist auf geringe Verlustleistung und ausreichende magnetische Kräfte ausgelegt. Die Höhe der Aktorspulen ist mit 61 μm so gewählt, dass der Abstand von Spiegel zu Aktoroberfläche $d = 29 \mu\text{m}$ den erforderlichen Schaltwinkel von $\alpha_s = 5^\circ$ erlaubt. Für eine genaue Einstellung des Schaltwinkels sind auf den magnetischen Polen Höcker (Höhe: 8 μm) vorgesehen, die über Punktkontakt mit dem Ni-Ring präzise Schaltstellungen des Spiegels gewährleisten. Der Ni-Ring unter dem Spiegel besitzt einen Außen- und Innendurchmesser von 500 μm bzw. 400 μm . Eine Schnittdarstellung des Antriebs sowie der Spiegelstruktur stellt Bild 6-3 dar.

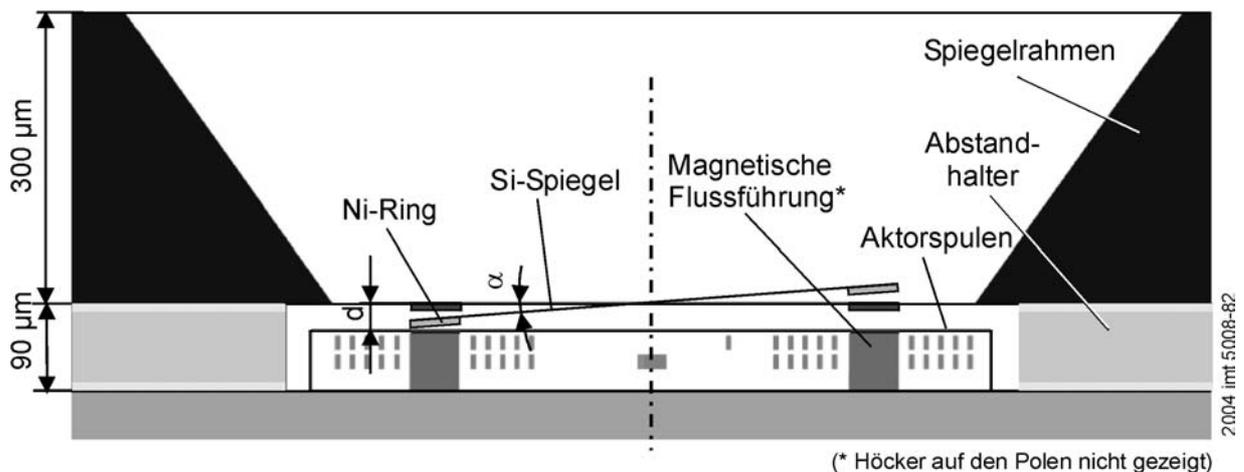


Bild 6-3: Schnittdarstellung des optischen Schalters

6.3 Berechnung des Antriebs

Die Darstellung der Ergebnisse der Berechnungen dienen dem Vergleich mit Messungen am elektromagnetischen Mikroschalter und ihrer Validierung. Bild 6-4 zeigt die berechnete Magnetkraft im Vergleich zur Federkraft über dem Kippwinkel.

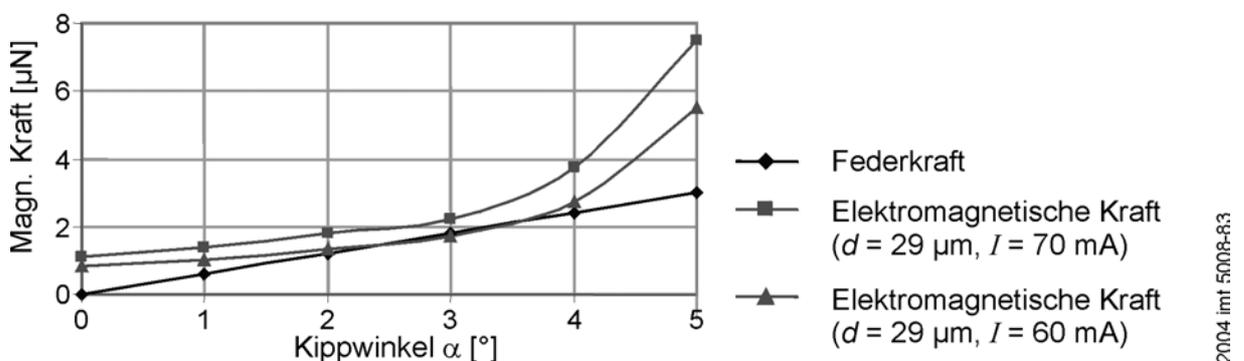


Bild 6-4: FEM-Simulation der elektromagnetischen Kraft im Vergleich zur Federkraft der Torsionsfedern Abgängigkeit des Kippwinkels des Spiegels [GAT03a]

Laut Simulation wird für das Schalten des Spiegels ein minimaler Erregerstrom von 70 mA je Spule benötigt. Dies gilt jedoch nur bei einem Abstand zwischen Spiegel- und Aktoroberfläche von $d = 29 \mu\text{m}$. Bei größeren Abständen dagegen erhöhet sich der notwendige Erregerstrom entsprechend des magnetischen Widerstandes des Luftspaltes (vgl. Gl. 2.8). Für die weiteren Betrachtungen wird ein Schaltstrom (Nennstrom) von 80 mA angenommen.

Die magnetische Flussverteilung bei Nennstrom zeigt Bild 6-5. Die Flussdichte liegt im gesamten Magnetmaterial unter einem Wert von 0,5 T. Magnetische Sättigungseffekte könnten somit ausgeschlossen werden (vgl. Bild 7-17 Sättigungsflussdichte NiFe $B_s = 1,25 \text{ T}$). In Tabelle 6-2 sind die wichtigsten Kenngrößen zusammengefasst.

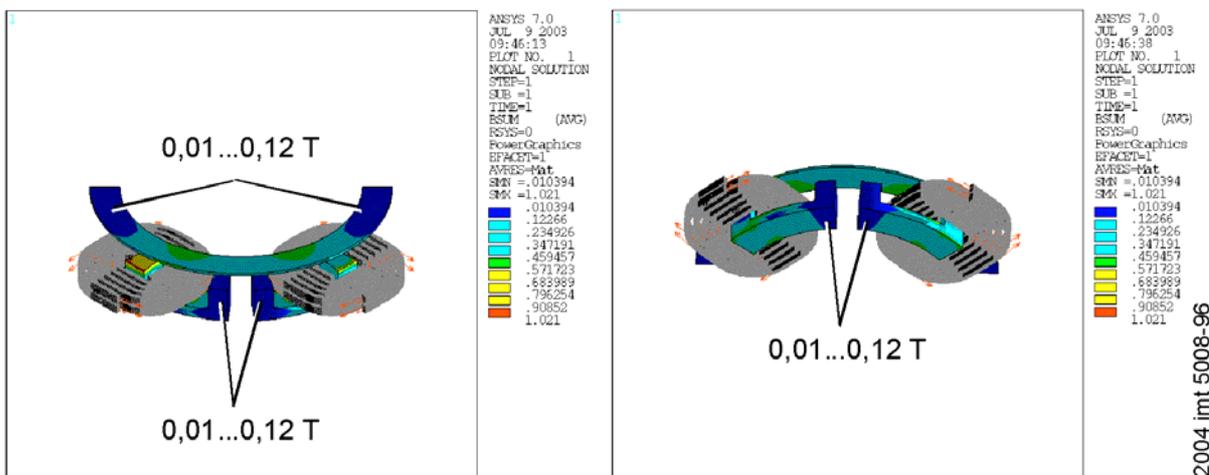


Bild 6-5: FEM-Simulation der Flussdichte für Joch, Pol und Ni-Ring bei Erregung mit Nennstrom (80 mA): Sicht von oben (links) und unten (rechts)

Tabelle 6-2: Kenngrößen des elektromagnetischen Systems

Aktorhöhe	61 μm
Luftspaltlänge (für $\alpha_s = 0^\circ$)	<25 μm
Ohmscher Widerstand eines Spulensystems	< 1 Ω
Schaltstrom	> 70 mA

Für die Auslegung ist neben der Flussdichte in den Magnetstrukturen die in den Erregerspulen erzeugte Wärme eine wichtige Größe. Hohe Temperaturen führen zum Versagen der Spulen und durch Temperaturunterschiede kommt es zu thermischen Spannungen. Durch FEM-Simulation kann die Temperaturverteilung für den Fall einer komplett in SU-8 eingebetteten Spule auf Si-Trägersubstrat für eine Stromstärke von $I = 80 \text{ mA}$ (Stromdichte $j = 0,66 \text{ mA}/\mu\text{m}$) unter Annahme einer Umgebungstemperatur von 20°C und konvektiver Wärmeabfuhr berechnet werden. Die Materialdaten für die Simulation sind in Tabelle 6-3 aufgeführt. Bild 6-6 zeigt die Ergebnisse der Berechnung.

Tabelle 6-3: Kennwerte der verwendeten Werkstoffe

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Spezifischer Widerstand [Ωm]	Wärmeübergangskoeff. [W/(m^2K)]
Kupfer	398	$0,18 \times 10^{-7}$	-
SU-8	0,2	-	-
Si-Wafer	146,5	-	-
Luft	-	-	10

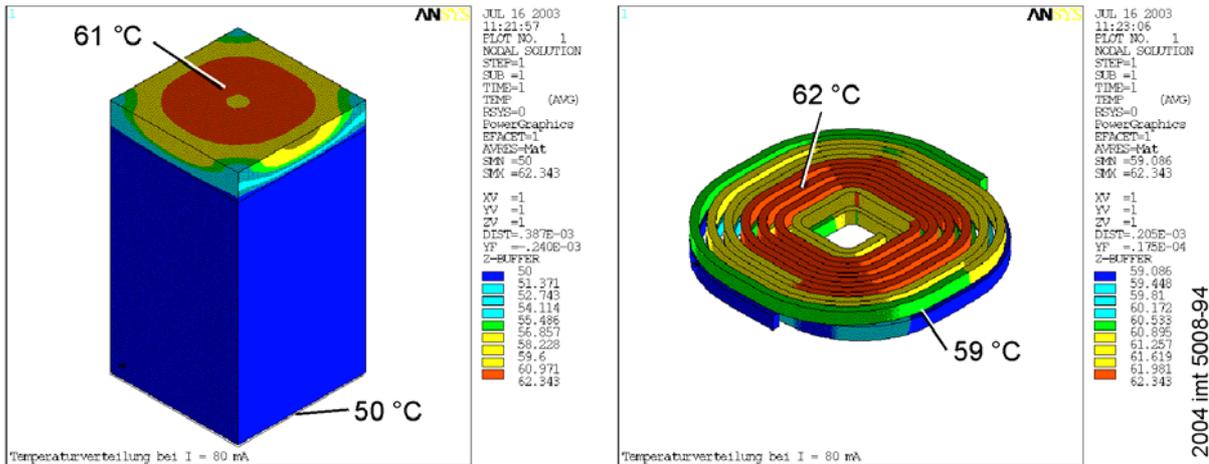


Bild 6-6: FEM-Simulation der Temperaturverteilung einer in SU-8 eingebetteten Spule bei Nennstrom auf einem Si-Chip mit rückseitig konstant 50°C.

An der Rückseite des Substrates wird eine konstante Temperatur von 50°C für das Gehäuse angenommen. Die Verlustleistung für eine Spule mit dem Widerstand von 1 Ω beträgt in diesem Fall 6 mW. Die maximal erreichte Übertemperatur des SU-8-Materials gegenüber dem Substrat liegt bei 11 K, die der Spule bei 12 K. Diese Temperaturerhöhung stellt einen Maximalwert dar, da eine Wärmeableitung über angrenzende Substratbereiche oder die Kontaktdrähte zu Null gesetzt ist.

7 Technologie- und Prozessentwicklung

Der zu entwickelnde Antrieb des optischen Schalters erfordert bestimmte Prozesstechnologien zum Aufbau leistungsfähiger, elektromagnetischer Mikroaktoren. Die Leistungsfähigkeit dieser Mikrosysteme ist durch das Volumen sowie den magnetischen Widerstand des Aktivteils bestimmt. Hohe Strukturen mit großem Aspektverhältnis erlauben eine hohe Durchflutung bei optimaler Flächenausnutzung und geringer thermischer Belastung auf Grund geringer Verlustleistung. Eine hohe Fertigungsgenauigkeit und Strukturtreue, sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung, ermöglichen geringere Abweichungen in der Bauteilcharakteristik. Die Entwicklung der hierfür erforderlichen Prozesstechnik bezüglich Lithographie und Strukturaufbau soll hier dargestellt werden.

Für den elektromagnetischen Antrieb werden Mehrlagenstrukturen mit hohen Aspektverhältnissen und Schichtdicken angestrebt. Die Spulensysteme umfassen metallische Strukturen mit leitender und weichmagnetischer Funktion, die sinnvoll durch Galvanoformung erzeugt werden können. Die Prozesse der Strukturherzeugung sollten drei wesentliche Aspekte berücksichtigen: Strukturherzeugung mit möglichst senkrechten Flanken für hohe Schichtdicken, gute Schichthaftung und geringe Schichtspannungen. Ein technologischer Schwerpunkt ist daher die Entwicklung der UV-Tiefenlithographie unter Anwendung hochviskoser Photolacke, die in hohen Schichtdicken als Mikroformen zur Galvanoformung oder auch als Isolation eingesetzt werden. Mit diesen Photolacken werden Prozesse entwickelt, die auch auf hohen Strukturen ausgezeichnete Strukturauflösungen erreichen. Es sollen somit nicht nur möglichst hohe Aspektverhältnisse (von 10:1) und Schichthöhen (bis 100 µm) erzielt werden, sondern auch ein präziser Strukturaufbau im Mehrschichtsystem, d.h. auf schon vorhandenen Strukturen. Dies ist insbesondere für eine gute Schichtstruktur und Oberflächenqualität des Mikroantriebs wichtig. Beides hat Einfluss auf die Schaltfunktion des Spiegels.

7.1 UV-Tiefenlithographie mit DNQ/Novolak-Resist

Für die UV-Tiefenlithographie wird der DNQ/Novolak Photoresist AZ9260 (Fa. Clariant) eingesetzt. Dieser Photolack arbeitet positiv und ist nach der Strukturierung leicht in Lösungsmitteln löslich.

7.1.1 Resistaufbringung

Für die Mikrogalvanik werden für hohe Aspektverhältnisse und Resistdicken hochviskose Photolacke eingesetzt, die sich durch ihre außerordentlich hohe Transparenz auch in dicken Schichten durchbelichten lassen. Eingesetzt und optimiert wurde der DNQ/Novolak Resist AZ4562 sowie die besonders für hohe Schichtdicken entwickelte Resist AZ9260. Für die Aufbringung der dicken Resistschichten wurde ein Spin Coater mit mitrotierendem, geschlossenem Deckel

eingesetzt (Gyrset RC8, Süss MicroTec). Dieser ermöglicht trotz hoher Lackschichten eine homogene Resistverteilung auf dem Substrat und verringerter Blasenbildungen. Bild 7-1 zeigt Schichtdicken für den AZ9260 bei Belackung mit und ohne Deckel. Für Drehzahlen unter 500 min^{-1} war die Qualität und Gleichmäßigkeit der Schicht ungenügend und wurde daher nicht weiter verwendet. Die Belackungen wurden jeweils mit konstanter Beschleunigung (300 s^{-2}) durchgeführt. Zu bemerken ist, dass die Lackdicken mit der Anzahl der Belackungen zunehmen. Die Randentlackung wurde erst nach dem letzten Belackungsschritt für die gesamte Schicht ausgeführt. Der leichte Randwulst erhöht die Gesamtschichtdicke zusätzlich.

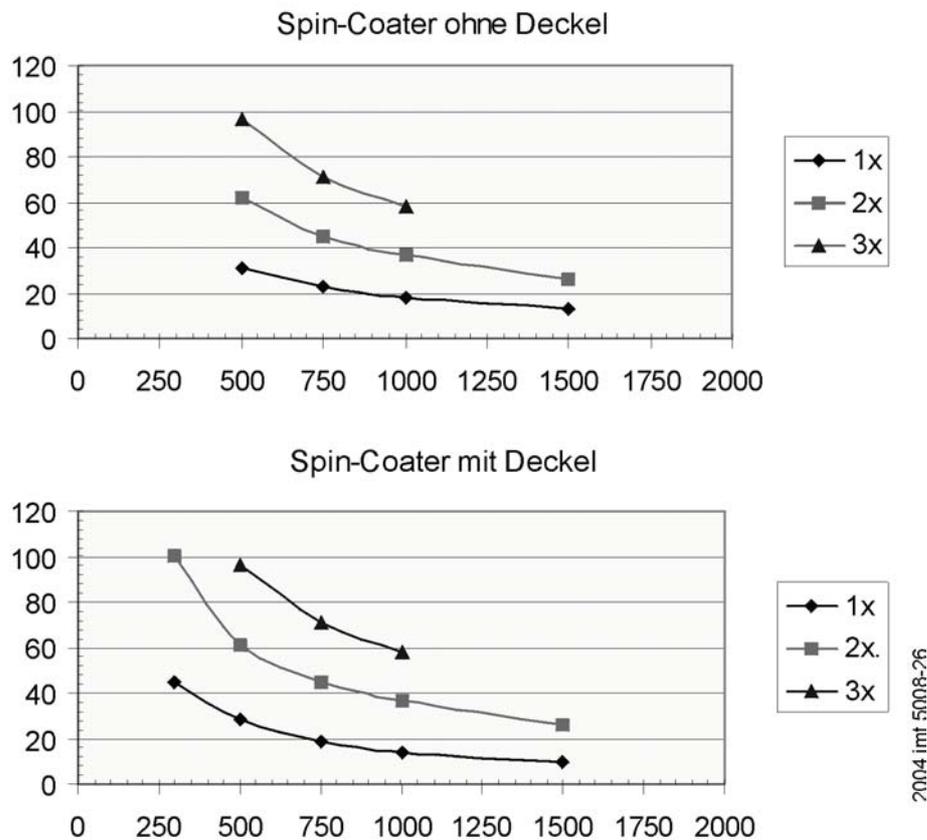


Bild 7-1: Vergleich von Schleuderkurven für den DNQ/Novolak-Resist AZ9260 mit einem geschlossenen und einem offenen Belacker

7.1.2 Resisttrocknung

Die diffusionsabhängige Trocknung des Resistes bedingt eine zur Resistoberfläche hin abfallende Konzentration des Lösungsmittels PGMEA. Je dicker die Resistschicht, desto zeitaufwendiger ist eine ausreichend gleichmäßige Trocknung. Durch Mehrfachbelackung und -trocknung können Einzelschichten vorgetrocknet werden, um eine geringe Lösungsmittelkonzentration auch im unteren Bereich der Resistschicht zu gewährleisten, ohne dass die Gesamttrocknungszeit übermäßig gesteigert werden muss. Die Trocknung wurde auf einer Heizplatte durchgeführt.

Dauer und Temperatur dieser Behandlung muss auf die Schichtdicke abgestimmt sein, um einen ausreichenden, homogenen Lösungsmittelaustrag aus dem Resist zu erreichen. Das Lösungsmittel diffundiert dabei durch den Resist hindurch nach oben. Keinesfalls darf dieser Prozess durch übermäßig schnell getrocknete Randschichten blockiert werden.

7.1.3 Resiststrukturierung

Die Ruhezeit nach der Trocknung ist für die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit ebenfalls wichtig für eine gute Strukturübertragung. Dies ist insbesondere an den erreichbaren Aspektverhältnissen abzulesen. Problematisch sind zum Teil mangelnde Resisthaftung bzw. Resistspannungen, die bei hohen Aspektverhältnissen, besonders auf metallisierten Substraten, teilweise zur Ablösung der Resiststrukturen führen kann. Ein Beispiel für derartige Ablösungen zeigt Bild 7-2 für feine Strukturen mit hohem Aspektverhältnis ($> 7:1$). Die Belackungen wurden jeweils mit konstanter Beschleunigung ausgeführt. Zu bemerken ist, dass die Lackdicken mit der Anzahl der Belackungen zunehmen.

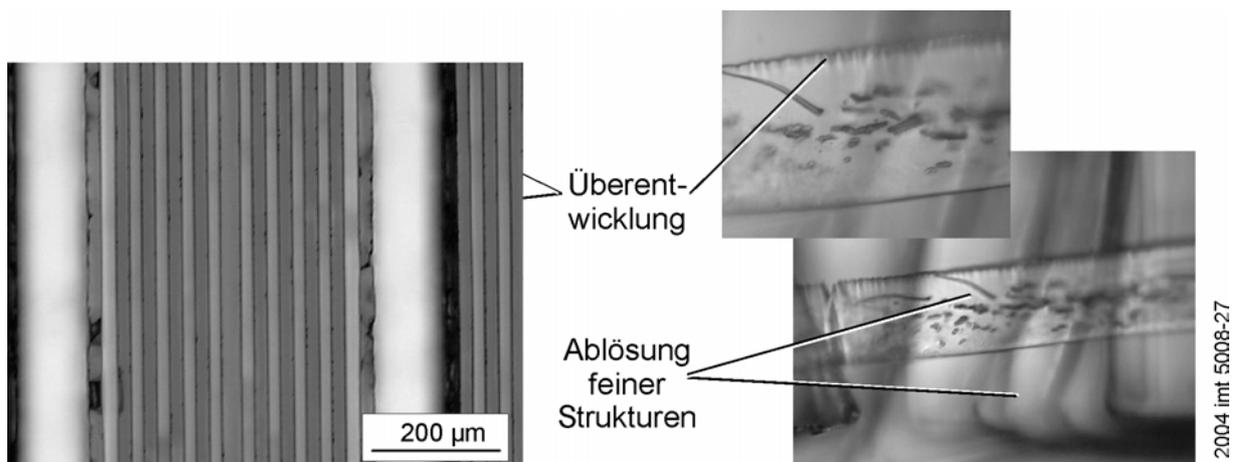


Bild 7-2: Auflösungsgrenze des DNQ/Novolak Resists: Überentwickelte obere Kanten und abgelöste Resiststrukturen bei hohem Aspektverhältnis

Die Diffusion des während der Belichtung entstandenen Stickstoffs aus dem Resist ist bei dicken Resistschichten (ca. größer 60 µm) nur bedingt gegeben. Vielmehr kommt es kurz nach der Belichtung im Resist zu einer Stickstoffansammlung in Form von Blasen, die an der Substratoberfläche auch zu Ablösungen führen kann. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei großflächig belichteten Bereichen zu beobachten, da sich der Stickstoff hier nicht wirksam seitlich verteilen kann (vgl. Bild 7-3).

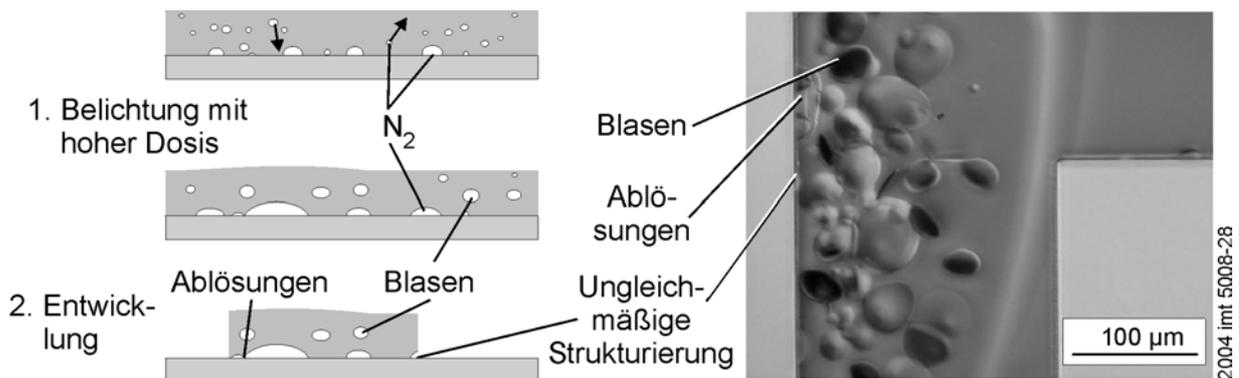


Bild 7-3: Mangelnde Schichthftung und Auflösungseinbußen durch Blasenbildung zwischen Resist und Substrat, links: Schema, rechts: Strukturierungsbeispiel (AZ9260, Dicke: 93 μm)

Die Maßnahmen stufenweises Belichten, längere Resisttrocknung sowie Verwendung eines Haftvermittlers konnten die Blasenbildung nicht entscheidend beeinflussen. Für die Strukturierung sind diese Phänomene bei Anpassung des Maskenlayouts unkritisch. Eine lange Ruhephase zur Feuchtigkeitsaufnahme vor der Belichtung und eine Trocknung bei niedrigen Temperaturen erwiesen sich insbesondere bei der Strukturierung von Resistschichten von 50 μm bis 100 μm als vorteilhaft.

Ruhezeiten von mehreren Stunden (bzw. über Nacht) ergaben sich bei diesen Dicken als zweckmäßig. Die Belackung wird in mehreren Schritten ausgeführt, um die erforderlichen Schichthöhen zu erreichen. Nach der Belackung erfolgt jeweils eine Trocknung auf Heizplatten bei Temperaturen von 50°C und 90°C mit sanften Rampen von max. 6 K/min. Optimale Trocknungszeiten wurden durch Aufnahme von Kontrastkurven und Bestimmung des Kontrastwertes γ ermittelt, wobei die thermische Behandlung jeweils gleich lang durchgeführt wurde (vgl. Bild 7-4).

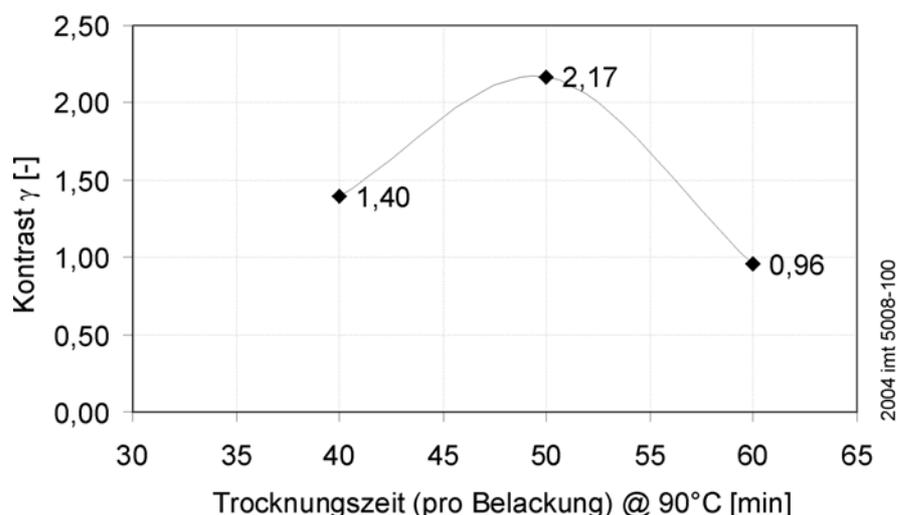


Bild 7-4: Kontrast in Abhängigkeit der Trocknungszeit (bei 90°C) bei Dreifachbelackung mit dem Resist AZ9260 (Gesamtschichtdicke ca. 93 μm)

Tabelle 7-1 fasst die Prozessparameter für zwei ausgewählte Resistdicken zusammen. Die Belichtung wird bei einer Lampenleistung von $6,5\text{mW/cm}^2$ (365 nm) durchgeführt. Die Entwicklung erfolgt durch Sprühentwicklung (Entwickler: AZ 400 K, Verhältnis Entwickler : H_2O ; 1:4). Die dargestellten Prozesse gestatten Aspektverhältnisse von bis zu 10:1 und Flankenwinkel über $\theta = 88^\circ$.

Tabelle 7-1: Prozessparameter zur Strukturierung von Photolackschichten mit hohem Aspektverhältnis

Prozess	2-fach Belackung (62 μm)	3-fach Belackung (93 μm)
Belackung	30 sec @ 500 min ⁻¹	30 sec @ 500 min ⁻¹
Softbake (je Belackung)	10 min @ 50°C; 50 min @ 90°C	10 min @ 50°C; 50 min @ 90°C
Belichtung (Hartkontakt)	1740 mJ/cm ² (@365nm)	2030 mJ/cm ² (@365nm)
Sprühentwicklung	Min. 300 sec	Min. 350 sec
Flankenwinkel θ Aspektverhältnis	$\leq 88^\circ$ 7:1 bis 10:1	$\leq 87^\circ$ 7:1 bis 10:1

Voraussetzungen sind eine an die Schichtdicke angepasste Trocknungsdauer und Belichtungsdosis. Eine ausreichende Trocknung mit langen Ruhezeiten vor der Belichtung liefert auch bei hohen Schichtdicken einen hohen Kontrast. Die hohe und über die Schichtdicke konstante Löslichkeitsänderung äußert sich in kurzen Entwicklungszeiten und steilen Resistflanken. Letztere gestatten hohe Auflösungen. Die besten Ergebnisse können durch Sprühentwicklung bei kurzen Entwicklungszeiten erreicht werden. Die Flankensteilheit sowie das Auflösungsvermögen werden in Bild 7-5 anhand von REM-Aufnahmen abgeformter Kupferstrukturen demonstriert.

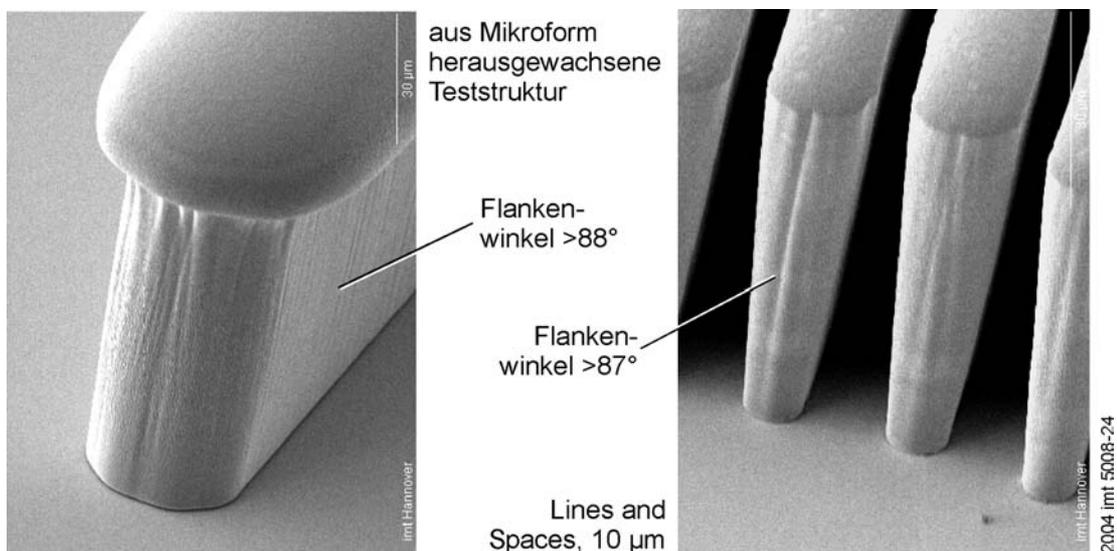


Bild 7-5: In Mikroformen (AZ9260, Lackdicke: 93 μm) abgechiedene Cu-Strukturen

Verminderte Aspektverhältnisse ergeben sich bei nicht idealem Kontakt zwischen Maske und Wafer. Problematisch sind insbesondere Unebenheiten in der Resistdicke durch Belackungsfehler oder durch bereits auf dem Substrat befindliche hohe Strukturen. Diese führen häufig zu Blasenbildung. Besonders bei tiefen Gräben ist zur Minimierung von Blasenbildung auf eine verlängerte rampengesteuerte Trocknung zu achten, um einen homogenen Lösungsmittelaustrag zu gewährleisten. Auf diese Weise können auch relativ enge Strukturzwischenräume photostrukturiert werden. Bild 7-6 zeigt dies an zwischen Magnetstrukturen durch Galvanoformung hergestellten Mäanderleitern zum Aufbau eines Mikrolinearmotors. Die erreichbare Auflösung bei diesem Prozess ist durch den unvermeidlichen Abstand zwischen Maske und Wafer, der sich auf Grund der Unebenheit der Photolackdicke einstellt, beschränkt. Diese Problematik kann durch Verwendung von permanenten Mikroformen (vgl. Kapitel 7.2) umgangen werden.

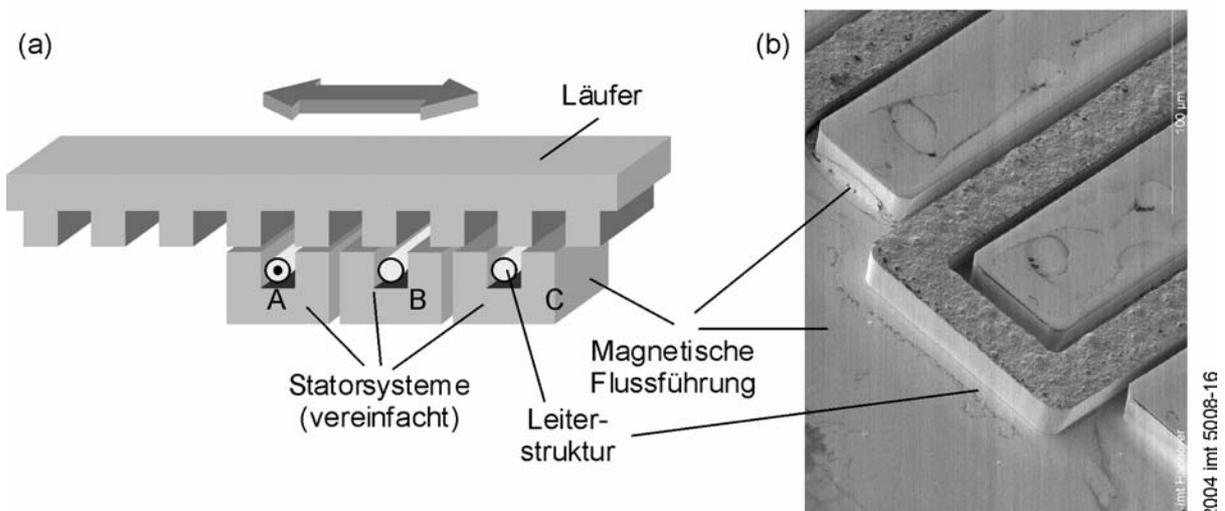


Bild 7-6: Einbringen von Leiterstrukturen zwischen Flussführungen: (a) Motorprinzip und (b) gefertigte Mäanderleiter zwischen NiFe-Strukturen [KOH02b]

Die entwickelte Resisttechnik kann auch zur Fertigung präziser mechanischer Strukturen eingesetzt werden. Bild 7-7 zeigt ein Beispiel mehrlagiger, durch Galvanoformung hergestellte Nickelstrukturen. Durch Montage der zweiteiligen Nickelstrukturen und Einlegen von Rubinkugeln ($\varnothing 200 \mu\text{m}$) entstehen Mikrokugellager. Bei entsprechend hoher Flankensteilheit können die Mikrostrukturen bei der Montage passgenau ineinander gesteckt werden (Bild 7-8). Durch den pyramidenförmigen Schichtaufbau kann auch die Startschicht mehrfach verwendet werden. Bei der Herstellung der zweiten Strukturebene wird daher die zweite Resistschicht aufgebracht, ohne die erste zu entfernen. Dies erhöht die Planarität der Resistschicht bei der Belichtung. Im Vergleich zum Negativresist SU-8 kann dieser Photolack nach der Galvanik einfach entfernt und das Bauteil durch Opferschichttechnik vom Substrat getrennt werden [KOH03]. Diese Technik lässt sich auch zur Herstellung der Abstandhalterstrukturen des optischen Mikroschalters nutzen.

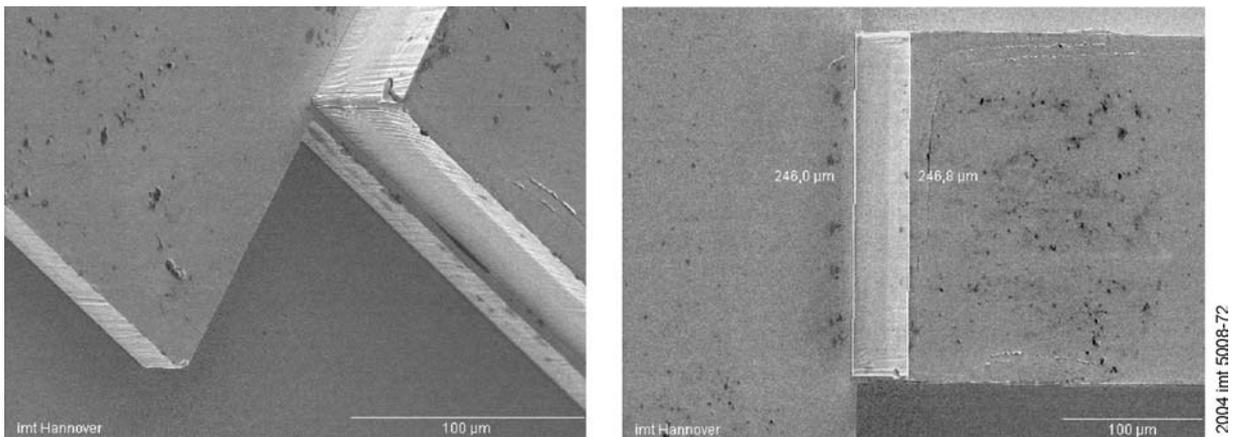


Bild 7-7: Galvanisch erzeugte Nickelstruktur mit senkrechten Flanken ($>88^\circ$)

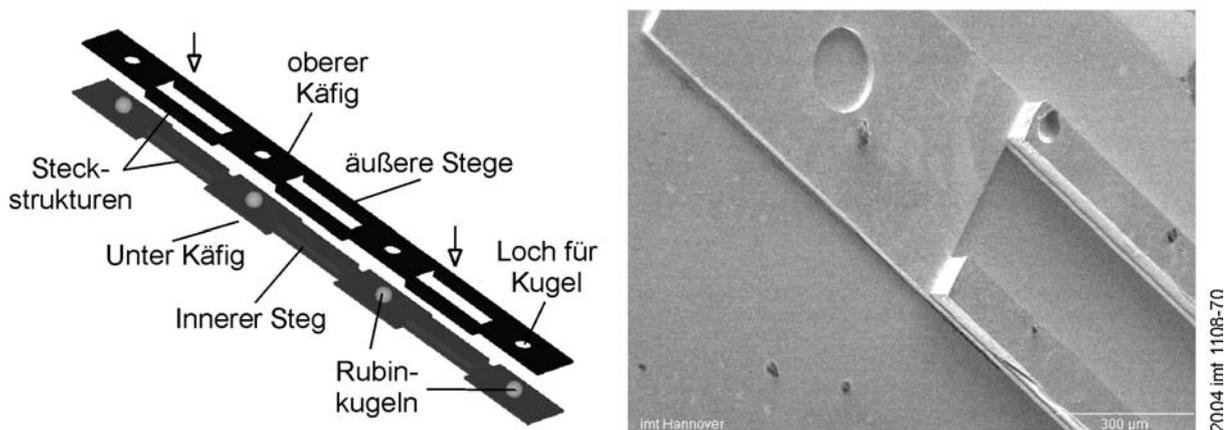


Bild 7-8: Schematische Darstellung und REM-Aufnahme realisierten Strukturen. Die Anwendung ist ein Lagerkäfig für Mikrokugeln eines Durchmessers von 200 µm

Eine Resiststabilisierung vor der Abscheidung ist bei sauren Galvanikbädern nicht erforderlich. Für alkalische Bäder, z. B. für Goldelektrolyt, kann eine zusätzliche thermische Behandlung erforderlich werden, da ein erhöhter Lösungsmittelgehalt im Resist die Stabilität in basischen Lösungen herabsetzt. Durch einen Hard Bake kann die Beständigkeit des Resistmaterials gesteigert werden, jedoch auf Kosten der Strukturauflösung, da durch Oberflächenspannungen ein Verfließen der Strukturen bei Temperaturbehandlung verursacht wird. Nur extrem niedrige Temperaturen weit unterhalb der Trocknungstemperatur sind bei hohen Aspektverhältnissen unkritisch.

7.2 UV-Tiefenlithographie mit SU-8-Resist

Als zweiter tiefenlithographisch strukturierbare Resist wurde SU-8 (NanoTM SU-8, MicroChem Corp.) in verschiedenen Viskositätsklassen (SU-8 2 bis SU-8 100) ausgewählt [MCC01]. Es wurde auch der Resisttyp SU-8 2000 desselben Herstellers getestet.

7.2.1 Untersuchung des Lithographieprozesses

Es wurde die Prozessierung des Resists für unterschiedliche Schichtdicken und Resisttypen untersucht. Im nachstehenden Abschnitt sind die Ergebnisse dargestellt. Für die Verarbeitung hochviskoser SU-8-Photolacke erwies sich die Verwendung des geschlossenen Belackers als sinnvoll. Zum einen gewährleistet diese Art des Aufschleuderns eine gleichmäßige Verteilung des Resists. Zum anderen kommt es während des Belackens gerade von hochviskosen Photolacken auf offenen Systemen der SU-8-Reihe zur Bildung von Resistfäden, die sich auf die Substratoberfläche niederlegen. Auf die Entfernung der Randwulst nach der Belackung wurde bei den Versuchen verzichtet, da sich die Randwulst während des Ruhens der Wafer und der anschließenden thermischen Behandlung durch die hohe Oberflächenspannung wieder zurückbildet. Beim Soft-Bake werden außerdem leichte Fehlstellen ausgeglichen und mikrostrukturbedingte Unebenheiten weitestgehend eingebettet und ausgeglichen. Für galvanische Anwendungen wurde der Randbereich des Wafers freientwickelt. Eine Randentlackung ist nach Verfestigung der Resistschicht durchzuführen, da während des Soft Bakes Resist in den freien Randbereich abfließen würde. Bei der Verarbeitung von SU-8 sind vielfach längere Ruhezeiten der Wafer erforderlich. Während dieser Zeit ist unbedingt zu gewährleisten, dass die Proben waagrecht liegen. Denn bis zur vollständigen Trocknung ist der Lack zähflüssig und verläuft bei nicht waagerechter Lagerung. Eine Variation der Zeitdauer des Soft-Bakes ergab, dass eine Resistschichtdicke von ca. 110 μm mit einer Temperaturbehandlung von 20 Minuten bei 90°C ausgehärtet ist. Der erste Temperaturschritt ist 50°C für 5 min. Der anschließende Temperaturanstieg erfolgt mit ca. 6 K/min. Die wesentliche Planarisierung der Oberfläche findet im zweiten Schritt bei 90 °C statt.

Eine zu geringe Belichtungs-dosis 400 mJ/cm^2 (400 nm) bei einer Schichtdicke von ca. 110 μm hat eine schlechte Haftung zwischen SU-8 und dem Substrat zur Folge. Die Haftung kann dabei so weit zurückgehen, dass es zu einer großflächigen Ablösung des Resists kommt. Es trennen sich zuerst die Strukturen mit hoher Auflösung vom Substrat. Strukturen mit niedriger Auflösung lösen sich an den Kanten ab. Auf großen Resistflächen bildet sich ein Netz aus oberflächlichen, feinen Rissen. Durch eine Erhöhung der Belichtungs-dosis (820 mJ/cm^2 , 400 nm) bei gleicher Schichtdicke ist eine Verbesserung der Strukturqualität möglich. Auch die Anzahl der spannungsbedingten Risse nimmt ab.

Die Durchführung eines Hard Bake mit einer Temperatur von 120 °C reduziert oberflächliche Spannungsrisse deutlich. In Bild 7-9 a) sind flächige SU-8-Strukturen vor und in b) nach der Durchführung eines Hard Bakes zu sehen. Die deutliche Steigerung der Oberflächenqualität ist an der Verringerung der Rissbreite oder dem Verschwinden der Rissen erkennbar.

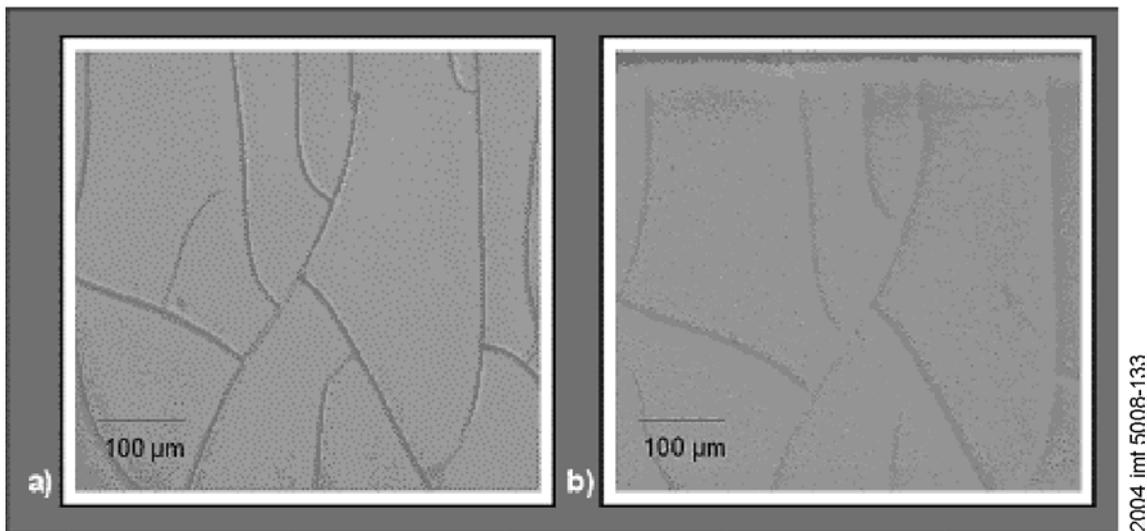


Bild 7-9: Verminderung von Oberflächenrissen durch Hard Bake: a) vorher, b) nachher

Die Substratvorbehandlung ist ebenfalls von Einfluss. Eine saubere, rückstandsfreie Substratoberfläche ist Voraussetzung für fehlerfreie Strukturierung und Haftung. Feuchtigkeit kann ebenfalls die Haftung von SU-8 auf dem Substrat erheblich reduzieren. Daher ist eine Dehydrierung der Wafer vor der Prozessierung vorteilhaft (vgl. Bild 7-10). Eine erhöhte Luftfeuchtigkeit hat ebenfalls negativen Einfluss auf die Haftung der SU-8-Strukturen.

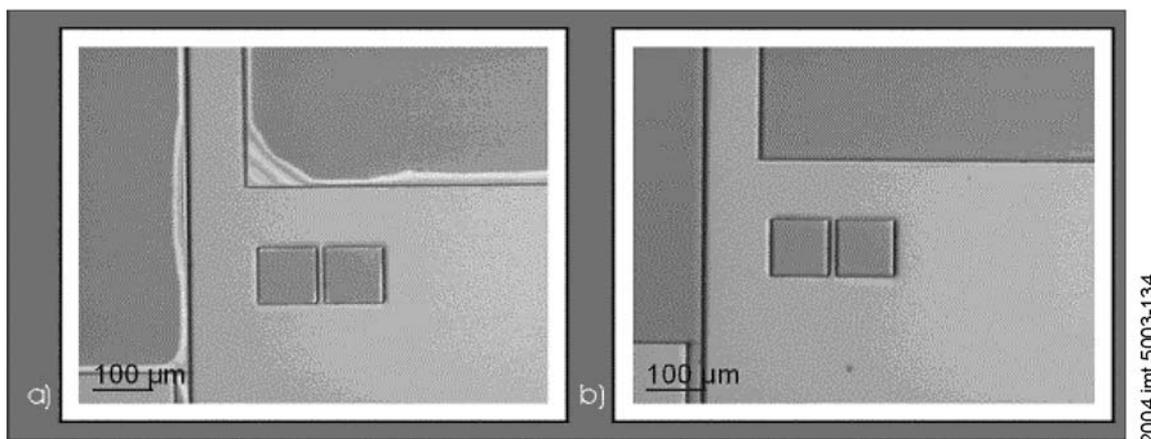


Bild 7-10: Einfluss der Dehydrierung des Substrates: a) ohne und b) mit Wärmebehandlung

Es wurden Teststrukturen entworfen, anhand derer die Prozessierung von SU-8 für hohe Schichtdicken optimiert wurde. Die Prozessparameter für zwei ausgewählte Schichtdicken sind in Tabelle 7-2 dargestellt. Bei Aspektverhältnissen größer 20:1 sind die Haftungsbedingungen der Strukturen auf dem Substrat als auch die Resistspannungen zunehmend kritisch und führen bei nicht optimalen Bedingungen leicht zu Ablösungen. Um diese Resistspannungen zu minimieren, wird die thermische Behandlung mit Temperaturrampen von maximal 6 Kmin^{-1} durchgeführt.

Tabelle 7-2: Prozessparameter für 110 µm und 220 µm Schichtdicke

Prozessparameter	110 µm Schichtdicke	220 µm Schichtdicke
Belackungsdrehzahl [min^{-1}]	2.200	1.500
Ruhephase [min]	≤ 10	≤ 10
Soft-Bake-Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] Soft-Bake-Dauer [min]	65°C, 10 min 90°C, 50 min	65°C, 20 min 90°C, 100 min
Ruhephase [h]	≤ 3	≤ 3
Belichtungsdosis (min - max) [mJ/cm^2] (mit i-Line-Filter)	675 – 2.025 (5 mW/cm^2 @ 365 nm)	750 – 2.250 (5 mW/cm^2 @ 365 nm)
PEB-Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] PEB-Dauer [min]	75°C, 10 min 90°C, 20 min	65°C, 15 min 90°C, 30 min
Ruhephase [h]	≤ 3	≤ 3
Entwicklungsdauer [min]	≤ 30	≤ 30

7.2.2 Belichtungsdosis und -spektrum

Die Strukturqualität wurde in Abhängigkeit von der Belichtungsdosis und des Belichtungsspektrums untersucht. Bild 7-11 zeigt den Effekt des Einsatzes des i-Line Filters.

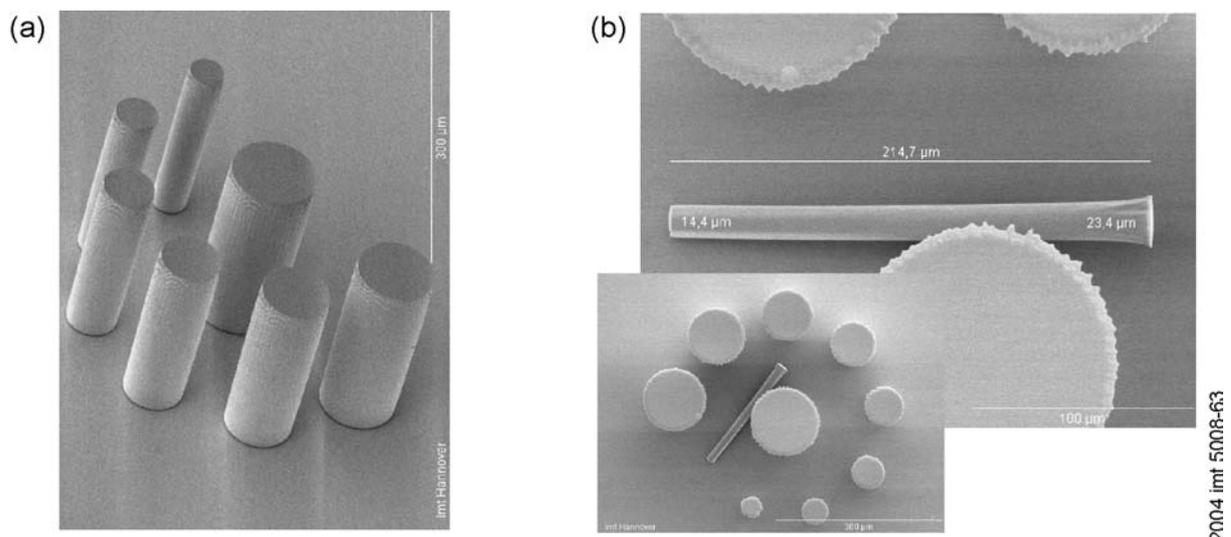


Bild 7-11: Strukturqualität bei Belichtung mit (a) i-Line Filter ($1.500 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 365 nm) und ohne (b) i-Line Filter ($3.000 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 365 nm)

Es wurde eine 220 μm dicke SU-8-Schicht bereichsweise mit unterschiedlichen Dosen mit und ohne i-Line Filter (Breitbandbelichtung, vgl. Bild 5-2) belichtet. Durch den Filter kommt es im oberen Resistbereich nicht zur Aufweitung der Struktur (Bild 7-11 (a)), wie sie ohne Filter zu erkennen ist (Bild 7-11 (b)). Die Strukturqualität ist einheitlich gut. Die Verbreiterung ist auf die Belichtung im kurzwelligen Spektralbereich unterhalb 350 nm zurückzuführen. Diese Wellenlängen werden im Resist absorbiert und bewirken im oberen Schichtbereich verstärkte Vernetzung, wie die Verbreiterung der Resistsäule in Bild 7-11 (b) zeigt. Die umgekippte Säulenstruktur hat sich während der Entwicklung vom Substrat gelöst.

Die unterschiedliche Strukturausprägung kann durch Analyse der Strukturverbreiterung von Teststrukturen (vgl. Bild 7-12) einer konstante Schichtdicke von 220 μm bestimmt werden. Das Ergebnis der Belichtungsvariation ist in Bild 7-13 dargestellt. Die Herstellerempfehlung ist durch die gestrichelten Linien angedeutet. Die Strukturverbreiterung bezieht sich dabei auf die Vorgabe in der Maske. Die Verbreiterung bei Einsatz des Filters ist um den Faktor fünf geringer als ohne Filter. Die Verwendung eines i-Line Filters ermöglicht eine exzellente Strukturierung in einem weiten Bereich der Belichtungs-dosis. Das Ergebnis ist insbesondere bei der Belichtung von Resist mit unterschiedlicher Schichtdicke relevant. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn Spulenstrukturen in Resist eingebettet werden und der Resist zu einer Mikroform photostrukturiert wird. Beispielsweise wird dies zur Herstellung von Polstrukturen notwendig, die im Falle des Antriebs für den optischen Schalter besonders klein und deshalb bei der Strukturierung kritisch sind.

Strukturierungsergebnisse von Teststrukturen einer Dicke von 220 μm zeigt Bild 7-14. Hier zeigt sich, dass auch enge Spalte mit hohen Aspektverhältnissen freientwickelt werden können. Diese Anforderung gilt beispielsweise auch für die Fertigung der Mikroformen für die Polstrukturen des Mikroantriebs.

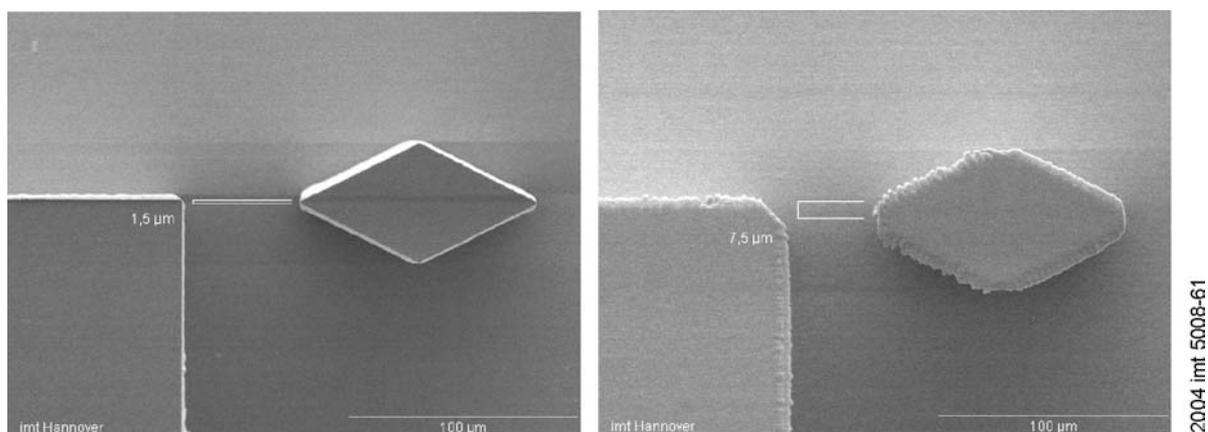


Bild 7-12: Strukturverbreiterung von 220 μm SU-8: links Belichtung mit i-Line-Filter (2.225 mJ/cm^2 , 365 nm) und rechts ohne (3.000 mJ/cm^2 , 365 nm)

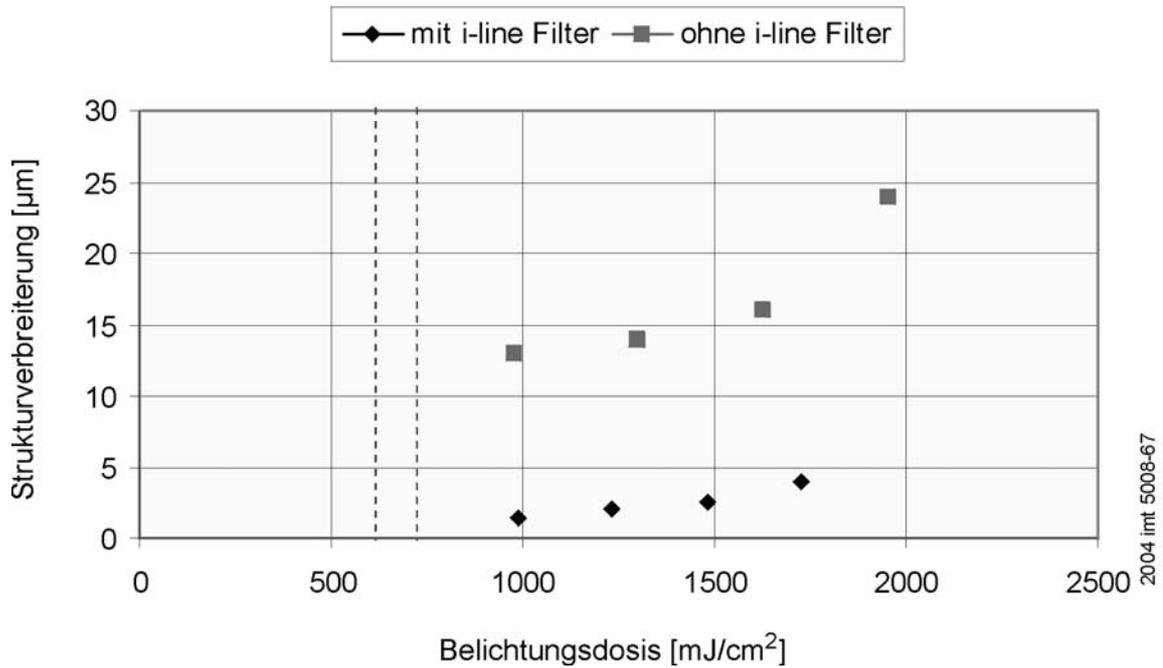


Bild 7-13: Differenz der Breite von Maskenstrukturen und der entsprechenden Resiststrukturen (an der Resistoberfläche) einer 220 µm dicken SU-8-Schicht auf SiO₂-Substrat bei Belichtung mit und ohne i-Line-Filter in Abhängigkeit von der Belichtungs-dosis

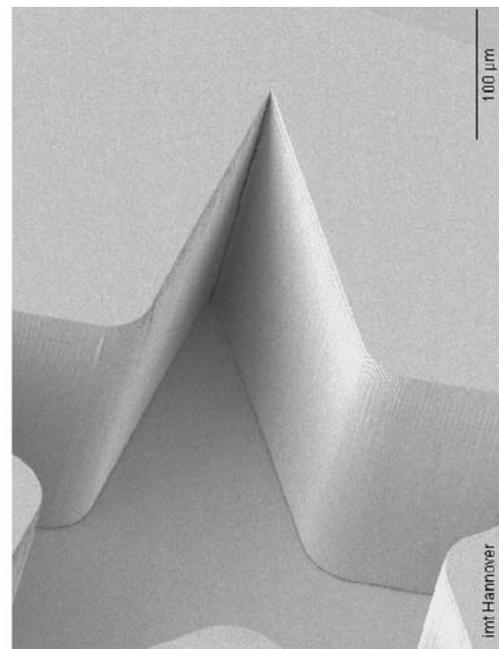
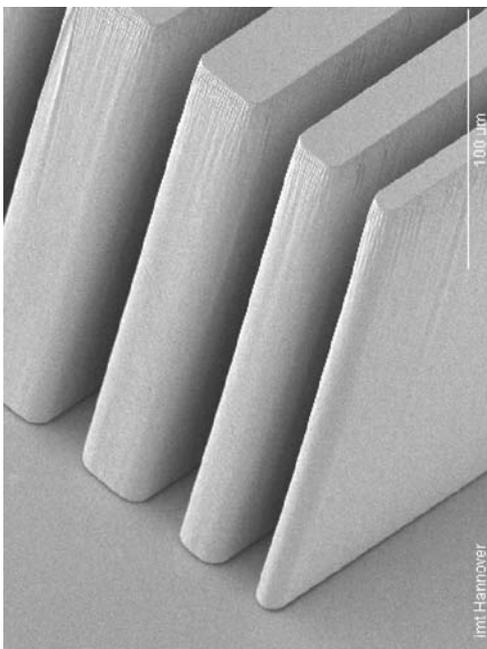


Bild 7-14: Strukturierung einer 220 µm dicken SU-8-Schicht (Belichtungs-dosis: 1.500 mJ/cm², 365 nm mit i-Line Filter)

7.2.3 Einfluss des Substrates

Der Substratwerkstoff und seine Oberflächeneigenschaften (pH-Wert, Metallisierung, Rauheit, Ebenheit) haben Einfluss auf die Photostrukturierbarkeit von SU-8, die Ausbildung von mechanischen Spannungen sowie die Haftung der Mikrostrukturen. Dies wurde an ausgewählten Beispielen untersucht. Das Substratmaterial hat über sein thermisches Ausdehnungsverhalten Einfluss auf die Strukturierung von SU-8. Je besser die Anpassung der Werkstoffe ist, desto geringer sind die substratbedingten mechanischen Spannungen. Ein Problem bei der Belichtung von SU-8 auf Keramiksubstraten ist die Teiltransparenz der Keramiksubstrate gegenüber UV-Licht und die Rückstreuung im Substrat. Dies bedingt Vernetzungseffekte in nicht belichteten Bereichen. So treten auf Keramik (Al_2O_3 -Substrate ohne Metallisierung) an den Rändern der belichteten SU-8-Bereiche Resistrückstände auf, die auch durch längere Entwicklungszeiten nicht entfernt und durch Verringerung der Belichtungs-dosen lediglich reduziert werden können. Eine Beschichtung des Keramiksubstrates mit einer dünnen Metallschicht (100 nm Au) verhindert das Auftreten dieser SU-8-Ränder (vgl. Bild 7-15 (a) und (b)).

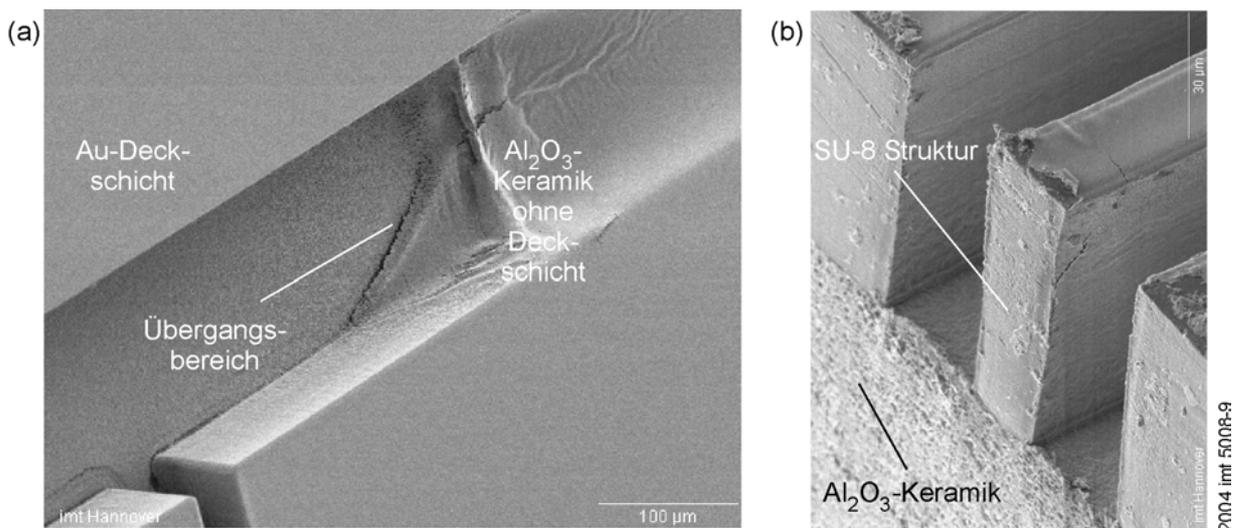


Bild 7-15: Photostrukturierung auf Keramiksubstrat: (a) Vergleich der Strukturierung mit und ohne metallische Zwischenschicht (Au 100 nm, Cr 25 nm), (b) trenngeschliffene SU-8-Struktur auf Al_2O_3 -Keramik

Durch diese Beschichtung wird das UV-Licht vollständig an der Substratoberfläche reflektiert. Ohne Beschichtung sind die Keramiksubstrate teildurchlässig, wobei ein Teil des UV-Lichtes durch diffuse Reflexion im Keramiksubstrat zur Substratoberfläche zurückgeworfen wird. Dies führt zur Belichtung und Vernetzung von Randbereichen des SU-8-Resists, obwohl diese durch die Maske abgedeckt sind.

7.3 Galvanische Abscheidung von weichmagnetischen Werkstoffen

7.3.1 Zielsetzung

Das Ziel bei der Abscheidung des weichmagnetischen Werkstoffes NiFe für Flussführungen ist, eine hohe Permeabilität und Sättigungsmagnetisierung bei geringer Schichtspannung zu erreichen. Diese Anforderungen an den Werkstoff sind nach Föhse et al. (vgl. Bild 7-16) für Zusammensetzungen von $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{35}$ bis $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ gegeben. Die Schichten sind mit der angegebenen Pulsstromcharakteristik abgeschieden. Entsprechend der Literatur nimmt mit steigendem Eisenanteil die Sättigungsflussdichte zu [BOZ93]. Bei extrem hohen Eisenanteilen treten jedoch Probleme durch erhöhte Schichtspannungen auf [JUD94]. Daher wird bei der Abscheidung eine durchschnittliche Schichtzusammensetzung von $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ angestrebt. Diese toleriert leichte Variationen der Zusammensetzung durch Stromdichteunterschiede bei gleichbleibend guten magnetischen Eigenschaften.

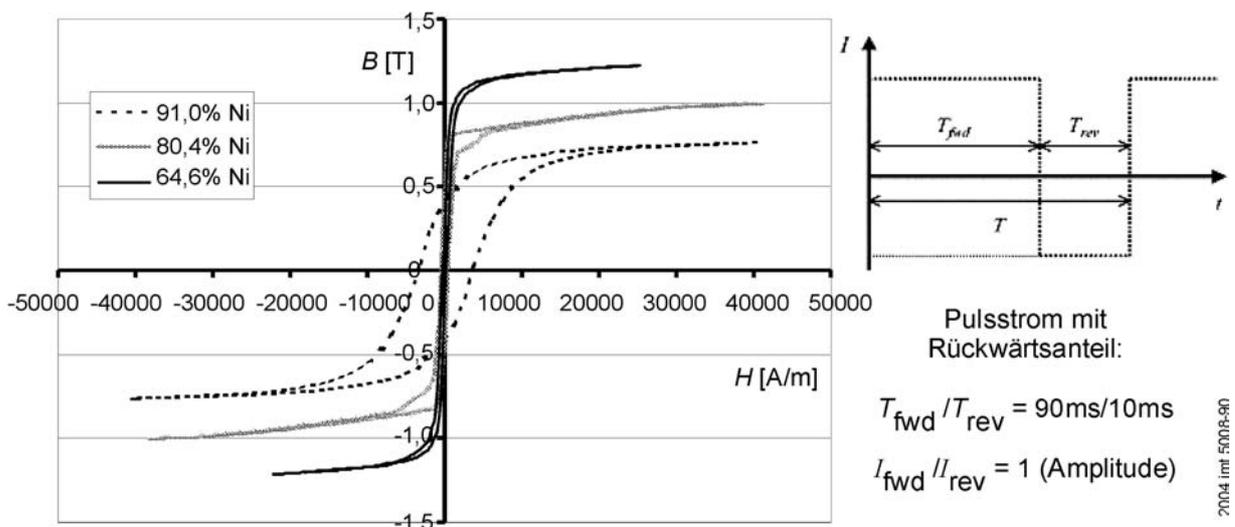


Bild 7-16: BH-Kurven von NiFe Magnetschichten unterschiedlicher Zusammensetzung bei Messung in Substratrichtung, nach [FÖH01].

7.3.2 Analyse des Magnetmaterials

Zur Analyse der magnetischen Eigenschaften der Flussführungsstrukturen werden Jochstrukturen (vgl. Bild 8-1) an fünf äquidistanten Positionen A bis E auf dem Substrat analysiert. Dabei liegt Position A auf dem Waferrand und Position E in Substratmitte. Die Analyse wird jeweils vor und nach der mechanischen Bearbeitung durchgeführt. Die Ergebnisse sollen Aufschluss geben über die Variation der Zusammensetzung als Folge veränderter Abscheidebedingungen. Bei pilzförmigem Aufwachsen der Legierung aus der Form ist von einem ausreichenden Stofftransport durch Konvektion und sphärischer Diffusion auszugehen. Bei der Formfüllung hingegen kann der Fall eintreten, dass die Abscheidung durch mangelnde

Konvektion und Diffusion gehemmt ist, wodurch die lokale aktive Stromdichte reduziert ist (vgl. Kap. 2.5.3). Bei sinkenden Stromdichten und sonst gleichen Bedingungen verringert sich bei der Pulsstromabscheidung von NiFe nach Föhse et al. der Eisenanteil. Tabelle 7-3 stellt die Schichtzusammensetzung der Jochstrukturen zusammen.

Tabelle 7-3: Schichtzusammensetzung (EDX-Analyse) von Magnetstrukturen (Joch) an verschiedenen Positionen auf dem Substrat

Bereich	Gehalt Ni (At.-%)		Gehalt Fe (At.-%)	
	vor dem CMP	nach dem CMP	vor dem CMP	nach dem CMP
A	75,3	76,8	24,7	23,3
B	72,9	74,1	27,2	25,9
C	72,3	76,0	27,8	24,0
D	72,8	-	26,2	-
E	72,5	-	27,5	-
Durchschnitt	73,2	75,6	26,7	24,4

Aus der Analyse der Zusammensetzung ist ersichtlich, dass der Anteil des Eisens in der Legierung bei Abscheidung oberhalb der Mikroform ansteigt. Dies ist auf die Erhöhung der Abscheiderate durch sphärische Diffusion zurückzuführen. Dieser Teil wird während der CMP-Bearbeitung entfernt. Der Eisenanteil der eigentlichen Jochstruktur liegt mit 24,4 At.-% Fe im Bereich der angestrebten Zusammensetzung $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$.

Die magnetischen Eigenschaften sind entsprechend Bild 7-16 im Vergleich zu $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ verbessert: Durch den höheren Eisenanteil ergibt sich eine höhere Sättigungsflussdichte. Bild 7-17 zeigt die Messung von BH -Kurven magnetischer Flussführungen (Jochstrukturen) aus dem Bereich C mit $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{24}$. Durch den hohen Fe-Anteil der Probe von 24 At.-% Fe wird nach Bild 7-17 trotz der hohen Schichtdicke der positive Effekt der höheren Sättigungsflussdichte erreicht. Die relative Permeabilität von $\mu_r \approx 500$ ist ausreichend hoch. Bei Magnetisierung senkrecht zum Substrat ergeben sich für die Jochstruktur bedingt durch Formanisotropie schlechtere Eigenschaften, die jedoch bei waagerechtem Magnetfluss im Joch von geringem Einfluss auf den magnetischen Widerstand sind.

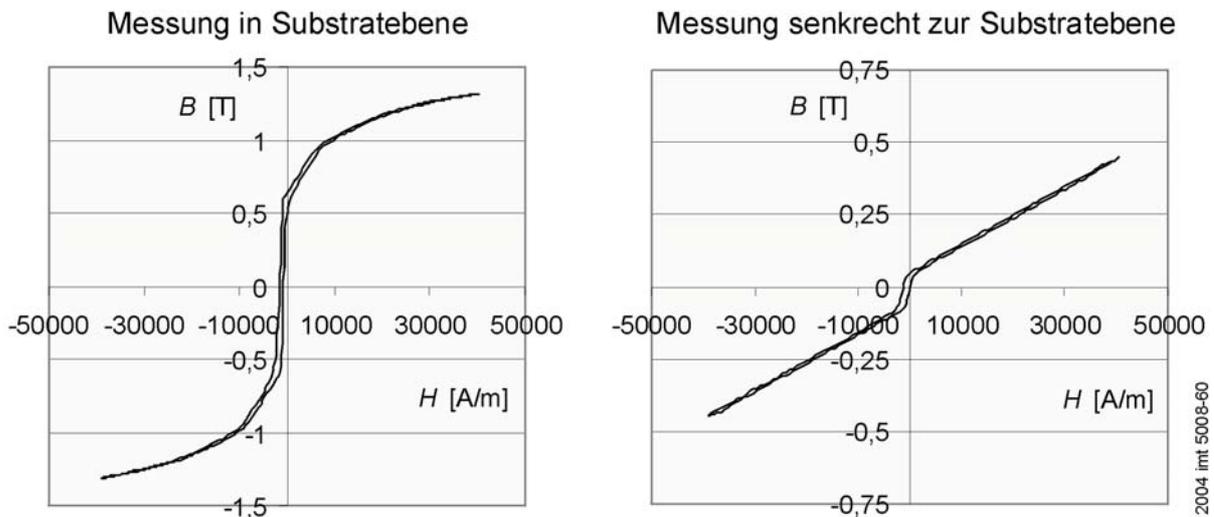


Bild 7-17: *BH*-Kurven von NiFe-Flussführungen (Jochstrukturen) des Bereiches C gemessen in Substratrichtung (links) und senkrecht zum Substrat (rechts).

7.4 Isolation und Einbettung von Mikrostrukturen

Zur Isolation wurden photostrukturierbare Polymere eingesetzt. Um den Anforderungen an die Oberflächengenauigkeit gerecht zu werden, mussten zudem Verfahren zur Einbettung, zum Wiederfreilegen und zum Planarisieren von Mikrostrukturen und Oberflächen entwickelt werden, die mit den eingesetzten Werkstoffen kompatibel sind. SU-8 kann gegenüber anderen Polymerwerkstoffen, wie z. B. Benzocyclobuten (BCB), auch bei großen Schichtdicken mit hohen Aspektverhältnissen photostrukturiert werden. Die Anwendung des epoxidbasierten Polymers als isolierende Funktionsschicht für hohe metallische Strukturgeometrien erscheint vorteilhaft [KOH02a].

Neben der Nutzung von SU-8 als Mikroform wurde dessen planarisierende Wirkung bei der Anwendung als Dielektrikum untersucht. Für eine weitergehende Planarisierung der Mikrostrukturen wurde zusätzlich die mechanische Bearbeitbarkeit von SU-8 ermittelt und optimiert. SU-8 wurde dabei sowohl als reiner isolierender Füllstoff als auch als Mikroform eingesetzt. In Hinblick auf die Verwendung als Isolationsmaterial sind auch die hervorragenden planarisierenden Eigenschaften von SU-8 zu nennen [KOH02a]. Außerdem ist das Epoxidmaterial mechanisch zu bearbeiten [KOU03, FÖH01].

Der SU-8-Resist vernetzt während der Belichtung und bei nachfolgenden thermischen Behandlungsschritten stark. In herkömmlichen Lösungsmitteln (Aceton, Isopropanol, PGMEA) sind die Strukturen nicht mehr aufzulösen. Ein Entfernen der Strukturen ist daher schwer und meist nur über ein Ablösen der Strukturen vom Untergrund zu erreichen. Aus diesem Grund ist eine Verwendung dieses Resists für permanente Anwendungen als photostrukturierter Funktionswerkstoff sinnvoll. Es

wurde daher die Verwendung von SU-8 als Mikroform und Isolationsmaterial, als mechanisch bearbeitetes Einbettmaterial sowie als Polierstopp beim CMP-Prozess untersucht. Das Ziel sind isoliert eingebettete, planarisierte Mikrostrukturen, die zusammen mit dem Polymer durchgängig ebene Oberflächen bilden. Diese Ebenen gleicher Höhenlage bieten gute Bedingungen für die weitere photolithographische Strukturierung.

7.4.1 Einebnende Wirkung von SU-8-Resist

Die planarisierende Wirkung wurde für feine Leiterstrukturen untersucht. Die sehr gute Einebnung von Teststrukturen mit kleinen Zwischenräumen zeigt Bild 7-18. Die Ergebnisse für unterschiedliche Linienbreiten sind in Tabelle 7-4 aufgelistet. Unter idealen Bedingungen beträgt der Planarisierungsgrad mehr als 95 %. Kleinräumige Strukturen, Unebenheit und Rauheit von Substraten werden gut planarisiert. Sehr gut eignet sich SU-8 auch als Isolationsmaterial bei Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen, wie beispielsweise planare Spiralspulen oder bei engen Spalten. Einheitliche Formen und Abstände bei großflächigen Strukturen ergeben zudem gleichmäßige Topographien. Dies erhöhte die Ebenheit der Oberfläche. Bei hohen Plateauflächen mit entsprechend geringem Aspektverhältnis können die Stufen nur bedingt ausgeglichen werden.

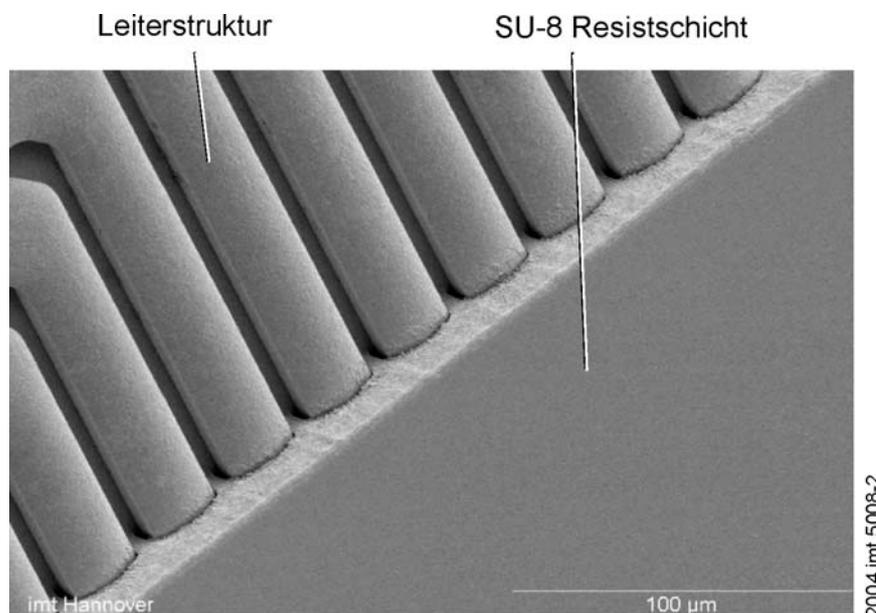


Bild 7-18: Planarisierende Wirkung von SU-8-Resistschichten

Zur Optimierung der Planarisierung und somit auch zur Verbesserung der Lithographie sind möglichst hohe Schichtdicken bei der Belackung einzusetzen. Durch eine mechanische Planarisierung wird die Restunebenheit beseitigt. Dies erlaubt eine optimale Auflösung und Strukturgüte in nachfolgenden Lithographieprozessen. Außerdem können die SU-8-Schichtdicke der Isolation beliebig reduziert oder Strukturen nach der Einbettung wieder freigelegt werden.

Tabelle 7-4: Welligkeit der Oberfläche und Planarisierungsgrad bei SU-8 für eine Leiterhöhe von 20 μm

SU-8 Schichtdicke [μm]	Strukturbreite / Zwischenraum [μm]	Welligkeit über den Leiterstrukturen [μm]	DOP [%]	Welligkeit über der Spule [μm]	DOP [%]
38	10/10	0	1	0,65	97
34	10/10	0,04	99,8	0,60	97
24	10/10	0,08	99,6	0,50	98
20	10/10	0,2	99,0	1,0	95
38	20/10	0,02	99,9	0,90	96
34	20/10	0,02	99,9	0,70	96
24	20/10	0,24	98,8	0,70	96
20	20/10	0,4	98	1,4	93

7.4.2 Isolation und Einbettung bei Mehrschichten

Bei ausreichend großen Flächen ist ein sukzessives Aufbauen von mehreren SU-8/ Mikrostruktur-Ebenen möglich. Einschränkend gilt jedoch, dass die Randbereiche der Strukturen wegen der Oberflächenspannung des SU-8-Resists weniger mit Resist bedeckt werden als in der Mitte. Es bildet sich ein leicht konvexes Oberflächenprofil aus. Dies ist um so deutlicher, je größer das Verhältnis von zu belackender Strukturhöhe und der Resistschichtdicke der herzustellenden SU-8-Struktur ist. Dieser Effekt bewirkt bei dünnen Schichten bzw. hohen Strukturen oder Schichtaufbauten sogar freiliegende Strukturen. Dünne SU-8-Resistschichten lassen sich daher nur bedingt gleichmäßig auf bereits strukturierte Flächen aufbringen.

Neben der Topographie wirken sich auch die Oberflächenspannungen der beteiligten Schichten auf das Benetzungsvermögen aus. Das Produkt SU-8 2000 wurde in dieser Hinsicht zur verbesserten Benetzung von Substraten und Strukturen entwickelt [MCC01, SHA03]. Bild 7-19 zeigt das unterschiedliche Benetzungsverhalten auf einem 20 μm hohen Plateau aus SU-8 für SU-8 2 (a) und SU-8 2005 (b). Im Fall von SU-8 2 führt die Oberflächenspannung nach der Belackung dazu, dass die dünne SU-8 2 Schicht sich wieder zusammenzieht und dabei den äußeren Bereich des SU-8-Plateaus wieder freigibt (Bild 7-19₁ (a)). Die Belackung mit dem Resist SU-8 2005 hingegen erfolgt auf der gesamten Plateaufläche (Bild 7-19 (b)).

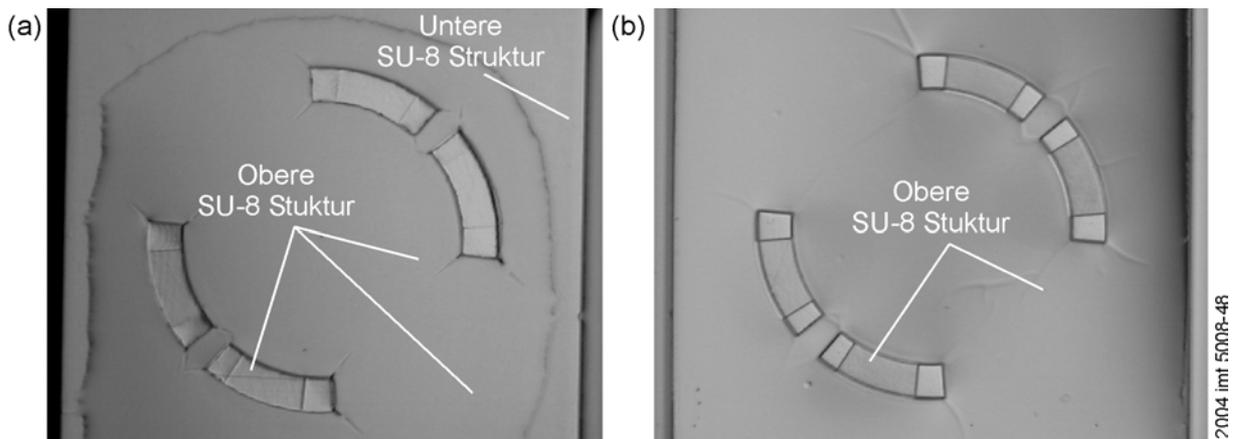


Bild 7-19: Benetzungsvermögen von SU-8 2 (a) im Vergleich zu SU-8 2005 (b) auf einer 20 µm hohen flächigen Struktur aus SU-8

Eine Optimierung der Schichtgleichmäßigkeit ist durch verbesserte Plateageometrien möglich. Bei kleinen Abständen ist eine vollständige Ausfüllung der Zwischenräume gegeben. Feine Strukturzwischenräume werden von hochviskosem SU-8 Resist eingeebnet (vgl. Tabelle 7-4). Die Spaltweite zwischen Plateauflächen kann über Hilfsstrukturen verkleinert werden. Diese können durch Opferschichttechnik oder beim Vereinzeln entfernt werden.

Die Oberflächenspannung des SU-8-Resists wirkt sich außerdem positiv auf die Ebenheit der Resistoberfläche aus. Bei ausreichender Schichtdicke im Vergleich zur bedeckten Plateaustruktur kommt es durch das Verfließen von Resist während der Ruhephase nach der Belackung und der Trocknung zu einer erheblichen Einebnung der Oberfläche. Sind die geforderten Schichtdicken zu klein bzw. die Plateaufläche zu hoch, ist eine Prozessierung mit erhöhter Schichtdicke sinnvoll. Nach der Strukturierung kann diese dann durch mechanische oder chemisch-mechanische Verfahren auf die Sollstärke abgetragen und planarisiert werden.

7.4.3 Oberflächenbearbeitung

Mit SU-8-Resist lassen sich Strukturen ganzflächig ohne Rissbildung einbetten, um Zwischenräume auszufüllen und Stufen zu planarisieren. Tabelle 7-5 zeigt die Prozessschritte für eine ganzflächige Einbettung mit SU-8-Resist mit Schichtdicken von 20-50 µm. Durch Abtragen des Polymers ist die Dicke der Deckschicht zu reduzieren. Dabei werden Restunebenheiten minimiert. Ebenso können abgedeckte Strukturen wieder freigelegt werden. Hierbei entstehen ebene Oberflächen aus einer Kombination von Metall- und Resiststrukturen. Mit diesem Verfahren lassen sich hochgenaue Oberflächen herstellen, wie sie für magnetische Luftspalte erforderlich sind.

Tabelle 7-5: Prozessparameter für die Einbettung von Strukturen von 20-50 µm

Prozessschritt	Prozessparameter
Wafervorbehandlung	120 °C für 30 min.
Belackung	Resistdicke 1-1,5x Strukturhöhe
Relaxation	> 10 min
Softbake	95 °C für 25 min.
Relaxation	> 2 h
Belichtung	Belichtungsleistung < 10 mW/cm ²
Post Exposure Bake; Hard Bake	95 °C für 20 min.; 120°C für 10 min.

Die ganzflächige Einbettung erzeugt für die mechanische Bearbeitung eine geschlossene, eingeebnete Waferoberfläche. Dies ist für ein gutes Polier- bzw. Läppergebnis vorteilhaft. Beim Vereinzeln muss jedoch durch SU-8 hindurch geschnitten werden. Dabei kann die Haftung von SU-8 und Substrat aufgehoben werden. Eine Strukturierung der Schicht zum Freilegen von Bereichen zum Vereinzeln ist daher sinnvoll. Vor dem mechanischen Planarisieren ist dabei das Aufbringen von temporärem Füllmaterial sinnvoll: Zum einen wird dadurch das Oberflächenprofil zusätzlich eingeebnet, zum anderen werden Beschädigungen der SU-8-Mikrostrukturen an exponierten Bereichen, wie z. B. Strukturkanten, verringert. Als Füllmaterial eignet sich DNQ/Novolak Resist. Beim Wiederauffüllen der SU-8-Mikroformen durch DNQ/Novolak-Resist entsteht somit eine durchgängig planarisierte Oberfläche. Sie sorgt bei der mechanischen Bearbeitung für gleichmäßige Abtragsraten bei bleibenden Strukturen. Das Resistmaterial wird selbst zügig abgetragen und kann nach der Bearbeitung mit Lösungsmitteln entfernt werden.

Die mechanische Bearbeitung durch ungebundenes Korn kann durch Läppen oder Polieren erfolgen. Läppen ist ein materialabtragendes Verfahren zur Herstellung von ebenen, glatten Oberflächen. Diese Bearbeitungsmethode bedeutet einen massiven Eingriff in die Oberflächenstruktur des Werkstückes. Läppen eignet sich daher nur für relativ harte Werkstoffe, da das Korn in diesem Fall nicht so tief in bereits planarisierte Bereiche eindringen und sie damit weniger schädigen kann. Die geringe Rauheit und hohe Planarität der neu entstehenden Oberfläche kann nur durch einen gleichmäßigen Abtrag erzielt werden. Der Abtrag durch das Korn sollte daher in möglichst ungeordneter Weise auf der gesamten Werkstückoberfläche erfolgen. Die Läppscheibe wird mit der Läppemulsion benetzt, bevor der auf den Substrathalter aufgeklebte Wafer mit der zu bearbeitenden Oberfläche auf die Läppscheibe aufgelegt wird. Durch den Zwangantrieb wird der Substrathalter ebenfalls in Rotation versetzt, so dass durch die Umdrehungsgeschwindigkeiten von Läppscheibe und Substrat ungeordnete Schneidbahnen der in der Läppemulsion enthaltenen Diamantkörner gewährleistet sind. Der Substrathalter wird zur Variation

des Anpressdruckes mit Gewichten beschwert. Die Oberflächenrauheit wurde für unterschiedliche Vernetzungsgrade des SU-8-Resists mit Rasterkraftmikroskopie untersucht. Als Ergebnis konnte eine deutliche Verringerung der Rauheit mit der Vernetzungsstärke festgestellt werden. Der Vergleich von thermisch nicht behandelten mit thermisch behandelten SU-8-Resistschichten nach der Bearbeitung verdeutlicht den positiven Effekt der Vernetzung durch den Hard-Bake. Oberflächenmessungen mit dem Rasterkraftmikroskop zeigen Bild 7-20 und Bild 7-21.

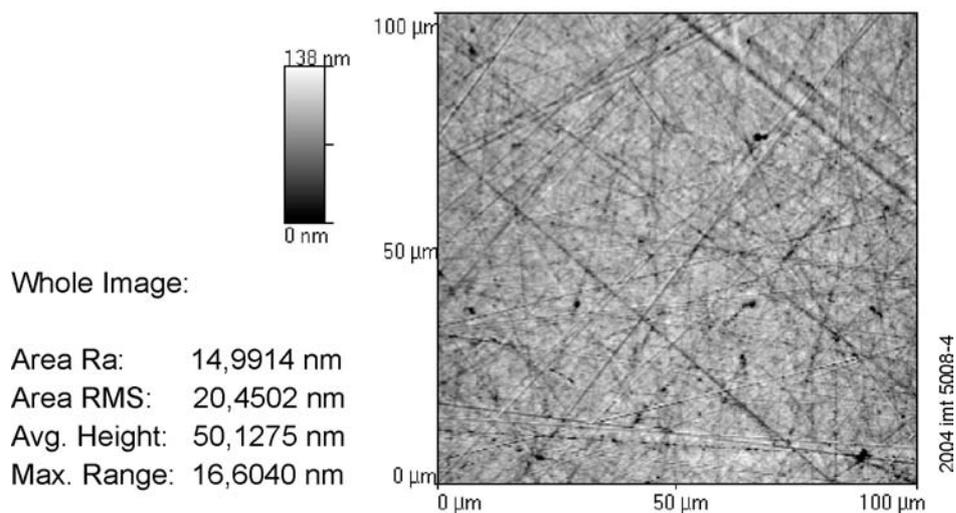


Bild 7-20: RKM-Messung einer geläpften, leicht vernetzten SU-8-Oberfläche

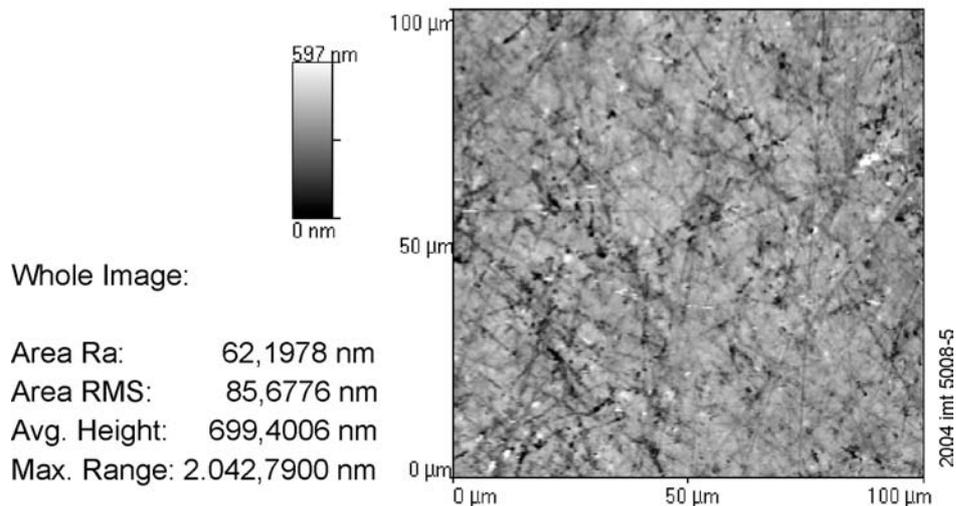


Bild 7-21: RKM-Messung einer geläpften, hoch vernetzten SU-8-Oberfläche (Hard-Bake bei 150°C, 2 min)

Die mechanische Bearbeitung zeigt, dass mit einer höheren Vernetzung des SU-8-Materials eine geringere Schädigung der Resistoberfläche (Riefen) erreicht werden kann. Dennoch wird die Resistoberfläche und darin eingebettete Strukturen durch den rein mechanischen Abtrag relativ stark beansprucht. Das Freilegen von

Mikrostrukturen durch Läppen ist prinzipiell möglich. Bei Unebenheiten der Strukturoberflächen, die bei der galvanischen Abscheidung auftreten können, ist es zur besseren Druckverteilung im Arbeitsspalt notwendig, Strukturüberhöhungen mit einer ausreichenden SU-8-Schichtdicke auszugleichen. Dies vermeidet Beschädigungen an den Mikrostrukturen durch örtlich auftretende zu hohe Kräfte (vgl. Bild 7-22). Die durchgeführten Versuche erbrachten folgende Erkenntnisse: Bei längeren Läppzeiten verschlechtert sich die Oberflächenqualität durch vermehrte Furchenbildung. Bedingt durch die vorgegebene Läppkinematik schreitet der Abtrag in den Randbereichen meist schneller voran als in der Mitte des Substrates. Lösen sich Strukturen des Randbereichs und geraten diese in den Arbeitsspalt, beschädigen sie die SU-8-Oberfläche. Beim Läppen ist also das Freihalten des Randbereichs und die kurzzeitige Bearbeitung sinnvoll.

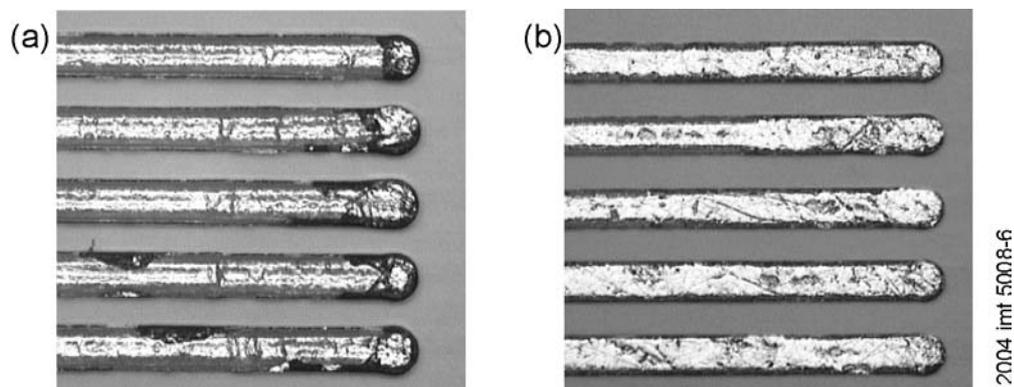


Bild 7-22: Eingebettete Cu-Strukturen mit einer Breite von 5 μm vor (a) und nach dem Läppen (b)

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen eine prinzipielle Eignung des Planarisierens durch Auffüllen der Strukturen mit epoxidbasiertem SU-8-Resist und Wiederfreilegen der Strukturen durch mechanischen Abtrag der polymerisierten Resistschicht. Die Bearbeitung von SU-8-Material muss wegen des hohen mechanischen Angriffs und der Riefenbildung auf ein Minimum reduziert werden. Aus diesem Grund wurde die Bearbeitung von Galvanikstrukturen, die aus SU-8-Resistmaterial herausgewachsen sind (vgl. strukturierte Einbettung), untersucht. Die Bearbeitung der metallischen Mikrostrukturen erfolgte durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP). Dieser Prozess wurde am imt zu einem effizienten, hochgenauen Verfahren weiterentwickelt [KOU03]. Der Abtrag von SU-8-Material beim CMP lässt sich durch Aushärten des strukturierten SU-8-Werkstoffs reduzieren.

Bei allen Planarisierungsverfahren ist der Anteil der SU-8- und DNQ/Novolak-eigenen Einebnung erheblich: Für eine lokale Einebnung reicht dies für die meisten Anwendungen bereits aus. Globale Planarisierung sowie die Eignung großer Plateauflächen lässt sich hingegen nur durch chemisch-mechanische Bearbeitung, d.h. durch Entfernen überschüssigen Material erreichen. Beste Planarisierungsergebnisse lassen sich bei hoher Lackdicke und geringer Strukturhöhe bzw.

Zwischenraumweite und zusätzlicher Anwendung dicker DNQ/Novolakschichten erreichen. Zum besseren Schutz des Resists bei der chemisch-mechanischen Bearbeitung ist eine Stabilisierung durch thermische Vernetzung durch einen Hard Bake des Resists sinnvoll. Die Gleichmäßigkeit der Höhenverteilung sowie der lateralen Ausdehnung der Metall- und Resiststrukturen bzw. Resistschichten ist gerade für die globale Planarisierung von entscheidender Bedeutung.

Der SU-8-Resist zeigt eine sehr gute Eignung als Füllstoff, der durch chemisch-mechanische Verfahren weitergehend bearbeitet wird. Dabei ist eine entsprechende Vorbehandlung des SU-8-Materials zur Polymerisation und Steigerung der mechanischen Festigkeit zu berücksichtigen. Außerdem sollte die Ebenheit der Oberfläche vor der Bearbeitung so gut wie möglich sein, um großflächige Unebenheiten zu vermeiden, die auch durch Lappen oder CMP nicht beseitigt werden können. Eine Einebnung von Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen sowie eine Ausfüllung von Strukturen ist daher immer erforderlich. Für die anschließende chemisch-mechanische Bearbeitung wurde die ganzflächige, unstrukturierte Einbettung mittels SU-8 sowie die strukturierte Einbettung mit Auffüllung der verbleibenden Zwischenräume durch Photoresist untersucht. Die strukturierte Einbettung ermöglicht, das isolierende Einbettmaterial gleichzeitig als Mikroform für die Galvanik zu nutzen.

Die chemisch-mechanische Bearbeitung von in SU-8-Resist eingebetteten metallischen Strukturen ermöglicht wegen der höheren Stabilität die Planarisierung von Mikrostrukturen ohne Beeinflussung ihrer lateralen Geometrie. Galvanische Höhentoleranzen können so exakt ausgeglichen werden. Außerdem werden Ungleichmäßigkeiten in der SU-8 Dicke eingeebnet. Stabilität und Abtrag des SU-8-Resists während der Bearbeitung lässt sich über die Polymerisation des SU-8-Resists während eines Hard Bakes einstellen [KOU03]. Durch diesen optionalen Hard Bake lassen sich durch Vernetzung die Abtragsraten von SU-8 gegenüber denen metallischer Strukturen reduzieren. Somit ist eine gleichmäßige Planarisierung von Metall- und Polymerstrukturen möglich [KOU03]. Bei feinen Strukturen ist ein Schutz der Strukturkanten durch temporäre Einbettung in DNQ/Novolak ist möglich und sinnvoll, um übermäßige Beanspruchung der Strukturen bei zu hoher Topographie zu vermeiden und die Oberflächenqualität zu verbessern. Zwischenräume der SU-8-Strukturen werden dabei ausgefüllt und so eine planare Ausgangsoberfläche hergestellt, wodurch sich auch die Auflagefläche während der CMP-Bearbeitung vergrößert, so dass übermäßige Belastung von einzelnen Strukturen vermieden wird. Dies verbessert die Planarität und reduziert die Riefenbildung und andere Beschädigungen während der Bearbeitung. Letzteres gilt insbesondere für SU-8-Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen, deren Kanten ansonsten mechanischer Bearbeitung ausgesetzt wären und abgerundet würden. Der DNQ/Novolak kann nach der Planarisierung wieder entfernt werden. Bild 7-23 zeigt eine fertig planarisierte SU-8-Oberfläche mit ebenfalls bearbeitetem magnetischem Pol.

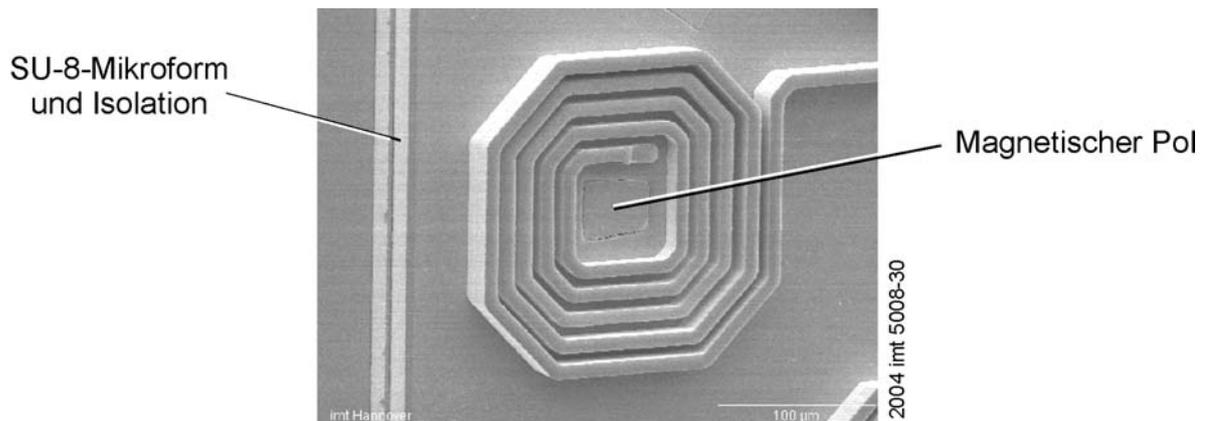


Bild 7-23: CMP-bearbeitete Oberfläche einer doppellagigen SU-8-Isolationsschicht (gleichzeitig Mikroform) mit integrierter Pol- und Spulenstruktur

Die mechanische Bearbeitung und Planarisierung durch CMP in reinem DNQ/Novolak ist dann möglich, wenn eine hinreichend große galvanische Struktur den Druck der Bearbeitung aufnimmt, wie beispielsweise bei den großflächigen Strukturen des Ni-Kugelkäfigs (vgl. Bild 7-24). Ansonsten besteht die Gefahr der Verformung der Mikrostrukturen während der Bearbeitung (z. B. bei Mikrospulen). Höhenvariationen der Mikrostrukturen sind durch CMP gut auszugleichen. Dies sollte zum Schutz der Strukturen noch in der Resistform geschehen. Eine zusätzliche Lackschicht über den Strukturen liefert eine planarisierte Ausgangsoberfläche.

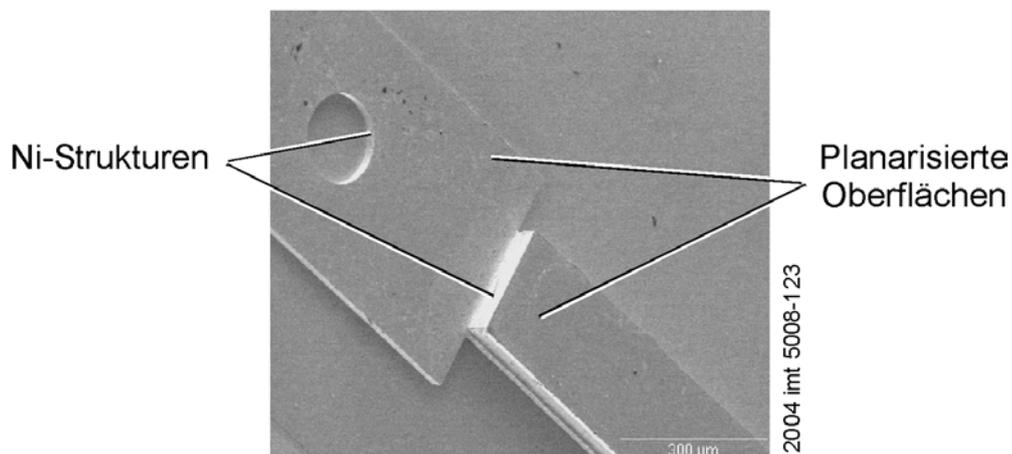


Bild 7-24: Mehrlagige, CMP-bearbeitete Ni-Struktur

Bei mehrlagigen Strukturen ist es sinnvoll, die Resistschichten erst nach dem letzten Galvanikschritt zu entfernen, um die planare Oberfläche des Photolacks für die nachfolgende Belackung, die Lithographie und die CMP-Bearbeitung auszunutzen. Dieses Vorgehen ist bei der dargestellten zweilagigen Ni-Struktur durchführbar.

7.5 Technologieaspekte für Mehrschichtsysteme

Für die Prozessierung von mehrschichtigen, hohen Mikrostrukturen ist neben einer guten Strukturierbarkeit der Einzellagen in allen Ebenen eine gute Haftung und

Stabilität der Schichten und Strukturen untereinander sowie zum Substrat erforderlich. Bei der Verarbeitung von SU-8 ist insbesondere die Haftung zum Substrat kritisch, wohingegen sich SU-8 Schichten untereinander gut verbinden.

7.5.1 Haftung großflächiger SU-8-Schichten

Metallisierung, Substratmaterial und Oberflächenrauheit haben Einfluss auf die Haftung von SU-8. Auf metallischen Schichten ist die Haftung von SU-8 schlechter als auf Si und SiO₂. Die beste Haftung wird auf Au-Schichten erreicht. Durch strukturierte Startschichten, die weite Bereiche des Substrates freigeben, kann eine verbesserte Haftung von SU-8 zum Substratmaterial, im Vergleich zur Startschicht, erreicht werden. Ein Anwendungsbeispiel zeigt Bild 7-25. Haftprobleme der ersten SU-8-Struktur auf der metallischen Startschicht für die NiFe-Strukturen werden hierbei vermieden werden.

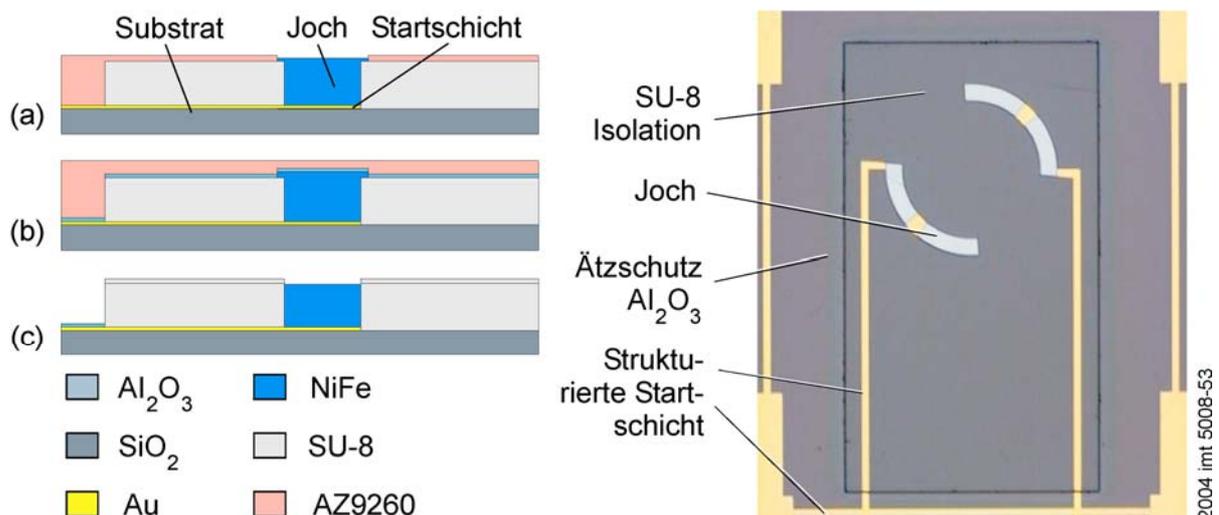


Bild 7-25: Schichtaufbau mit strukturierter Startschicht zur Anwendung für die Abscheidung von magnetischen Flussführungen in SU-8-Strukturen auf SiO₂-Substraten: Schematische Darstellung (links) und Umsetzung (rechts)

Die weitgehend frei liegende Oberfläche des SiO₂-Substrates wird für die Haftung der SU-8-Schicht eingesetzt. Als Startschichten dienen sowohl NiFe- als auch Au-Schichten, die mittels Trockenätzen strukturiert werden. Die nach der Galvanik aufgebraute Al₂O₃-Schicht schützt die mehrfach verwendete Startschicht bei Ätzprozessen.

Kritische Aspekte bei der Verarbeitung von SU-8 sind Schichtspannungen sowie mangelnde Haftung. Zur Analyse der Abhängigkeit von Schichthaftung und Schichtspannung von der Belichtungsintensität- und vom Belichtungsspektrum wurden Strukturierungsversuche für SU-8 durchgeführt. Die SU-8-Schicht wird dabei zu Mikroformen für magnetische Pole strukturiert. Dies ist bei der Fertigung des Spiegelantriebs der kritischste Prozessschritt bezüglich der Lithographie. Als

Kontaktschicht für SU-8 wird SiO_2 gewählt, auf der eine Startschicht abgeschieden und strukturiert ist. In Bild 7-26 sind Strukturierungsergebnisse dargestellt.

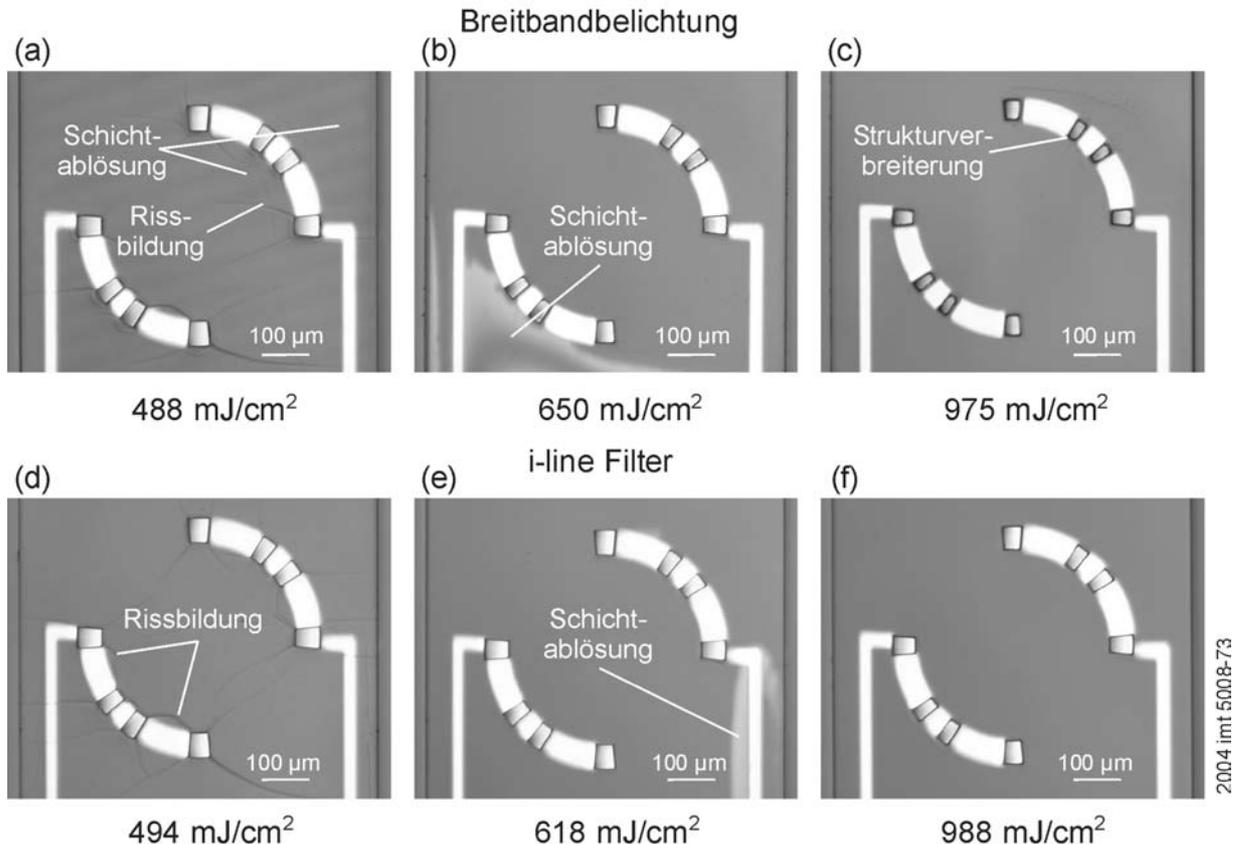


Bild 7-26: Belichtungsabhängigkeit der Haftung bei großflächigen SU-8-Strukturen einer Dicke von $46 \mu\text{m}$ auf SiO_2 und strukturierter Au-Schicht (Herstellerempfehlung zur Belichtung: $300\text{-}420 \text{ mJ/cm}^2 @ 365 \text{ nm}$)

Schichtspannungen zeigen sich in Strukturecken von Mikroformen, von denen an der Oberfläche Spannungsrisse ausgehen. Bei mangelnder Haftung führen diese Spannungen zu Schichtablösungen. Mangelnde Haftung zeigt sich durch ganzflächige Ablösungen (vgl. Bild 7-26 (a)) oder Teilablösungen, die von Strukturkanten ausgehen und besonders auf metallischen Strukturen auftreten (vgl. Bild 7-26 (b) und (e)). Der Vergleich der Aufnahmen verdeutlicht, dass durch erhöhte Belichtungs Dosen Haftungsprobleme bei großflächigen Strukturen vermieden werden können. Bei Breitbandbelichtung kommt es durch übermäßige Vernetzung nach Überbelichtung zu Strukturverbreiterung (vgl. Bild 7-26 (c)). Durch Verwendung eines i-Line Filters kann dieser Effekt hinreichend unterdrückt werden, so dass durch Überbelichtung gleichzeitig gute Haftung und Strukturtreue erreicht wird (vgl. Bild 7-13). Um gute Haftung und Strukturauflösung zu erreichen, ist daher die Verwendung eines i-Line Filters bei gleichzeitiger Überbelichtung um den Faktor zwei bis drei gegenüber den Herstellerangaben von zu empfehlen.

7.5.2 Ätzen der Startschicht

Rückstände an den Seitenflächen von Galvanik und Resiststrukturen können durch Anpassung von Ätzwinkel und Schichtdicke der Startschicht verhindert werden. Bei einem Ätzwinkel von 30° können Redepositionen von Metall und Abschattung von Strukturbereichen vermieden werden. Bild 7-27 zeigt den Effekt der unterschiedlichen Ätzwinkel. Das Trockenätzen mit IBE ist wegen der guten Prozesskontrolle dem nasschemischen Entfernen von Haft- und Startschichten (z. B. Cr/Cu) vorzuziehen.

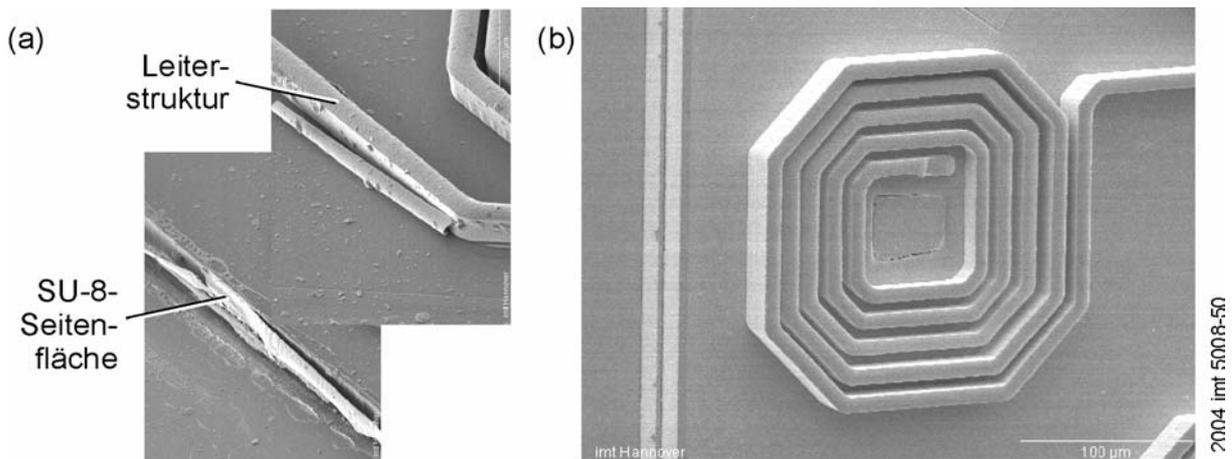


Bild 7-27: Rückstände nach dem Trockenätzen von Startschichten auf SU-8-Seitenflächen bei einem Ätzwinkel 15° (a) im Vergleich zum Ätzen unter 30° (b)

7.5.3 SU-8-Strukturierung über reflektierenden Strukturen

In der direkten Umgebung von metallischen Strukturen, wie z. B. Spulenstrukturen, kommt es während der Belichtung von SU-8-Resist zu Reflexionen an rauhen und unebenen Metalloberflächen. Dies führt zur Belichtung auch abgeschatteter Bereiche und kann zu Vernetzungserscheinungen und Resistrückständen nach der Entwicklung des Resists führen. Dieser Effekt wird besonders an Polstrukturen sichtbar: Im Bereich der Spule ist die Polmikroform verjüngt, im Bereich außerhalb der Spule ist sie fehlerfrei strukturiert, wie Bild 7-28 zeigt. Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem bei der Belichtung auf Al_2O_3 -Keramik-Substraten. Die Vernetzung der Strukturränder kann in hinreichender Weise durch Verringerung der Belichtungsstärke reduziert werden. Eine weitere Verbesserung der Strukturierung könnte durch eine mechanische Bearbeitung der Spulenoberflächen erreicht werden. Hierdurch würde eine Reflexion des UV-Lichtes an metallischen Strukturoberflächen in lateraler Richtung weitgehend vermieden.

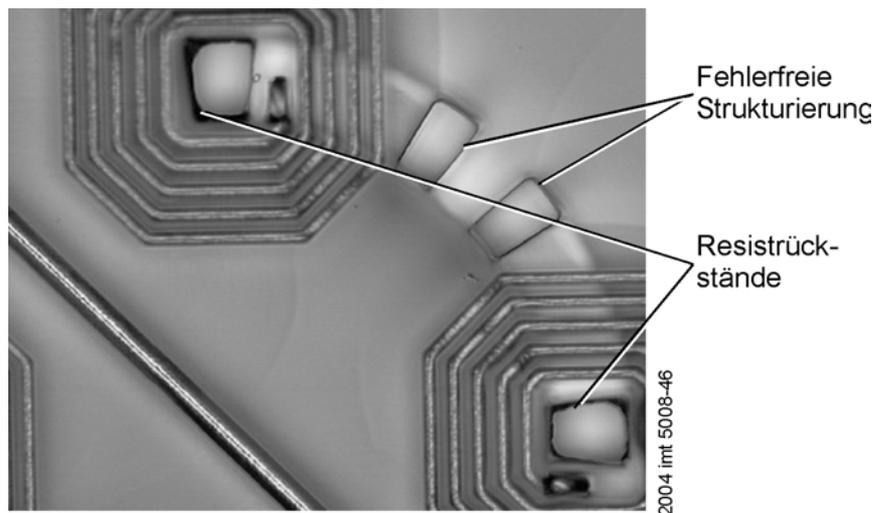


Bild 7-28: Resistrückstände in der Nähe metallischer Strukturen

7.5.4 Opferschichten

Eine Ablösen von SU-8-Strukturen vom Substrat ist mit bestimmten Lösungsmitteln (NMP, 30 min, 80°C in Ultraschall) nur dann noch möglich, wenn der Resist thermisch nur leicht vernetzt ist. SU-8-Mikroformen können so nach der Galvanik entfernt werden. Besonders bei Resiststrukturen mit geringen Aspektverhältnissen kann das SU-8 zwischen den Galvanikstrukturen relativ leicht entfernt werden [KOH03].

Für ein teilweises Ablösen von SU-8-Strukturen aus einer Isolationsstruktur ist dieses Verfahren jedoch ungeeignet. Daher wurden hierzu Opferschichten untersucht. Zum einen eignet sich Chrom als Opferschicht, das entsprechend der herauszulösenden SU-8-Struktur strukturiert werden muss. Zum anderen ist die Verwendung einer organischen Opferschicht (OmniCoat, Fa. MicroChem Corp.) möglich [MCC02].

Als Oberschicht eignet sich insbesondere Chrom. Es lässt sich mittels Salzsäure (HCl, konzentriert) mit hoher Selektivität zu Ni, NiFe und Cu sowie SU-8 ätzen. Sie kann durch nasschemisches Ätzen mit einer dünnen SU-8-Schicht als Maske strukturiert werden. Demgegenüber kann die OmniCoat-Schicht mit dem organischen Lösungsmittel NMP aufgelöst werden. Die aufgebrauchte Opferschicht wird von der eigentlichen SU-8-Struktur maskiert und durch einen Entwickler in nicht abgedeckten Bereichen entfernt. Nachteilig ist bei diesem Vorgehen der mögliche Angriff von SU-8-Strukturen durch NMP, die permanent auf dem Wafer verbleiben.

Mit diesen Opferschichtprozessen lassen sich nicht nur Mikrostrukturen von SU-8 befreien, sondern auch in SU-8 hergestellte Strukturen vom Substrat trennen. Diese können z. B. mechanische Nickelstrukturen [KOH03] oder Spulensysteme mit NiFe-Kern und SU-8-Isolation sein.

7.5.5 Planarisierung

Eine planare Aktoroberfläche sowie eine eingehaltene Gesamthöhe des Antriebssystems sind Voraussetzungen für exaktes Schalten des Spiegels bei Bestromung. Die Oberfläche und Höhe der Magnetstrukturen definieren durch den Abstand zum Nickelring unter dem Spiegel sowohl den magnetischen Luftspalt als auch den maximalen Kippwinkel. Bild 7-29 zeigt daher beispielhaft die Höhenverteilung der galvanischen NiFe-Jochstruktur vor und nach der Bearbeitung mittels CMP. Bezogen auf ein System liegt die Höhenverteilung im Sub-Mikrometerbereich und liefert ebene Plateauflächen. Für ein Aktor-Array von 11x8 Systemen ist die Variation der Höhe beschränkt auf $\pm 1 \mu\text{m}$.

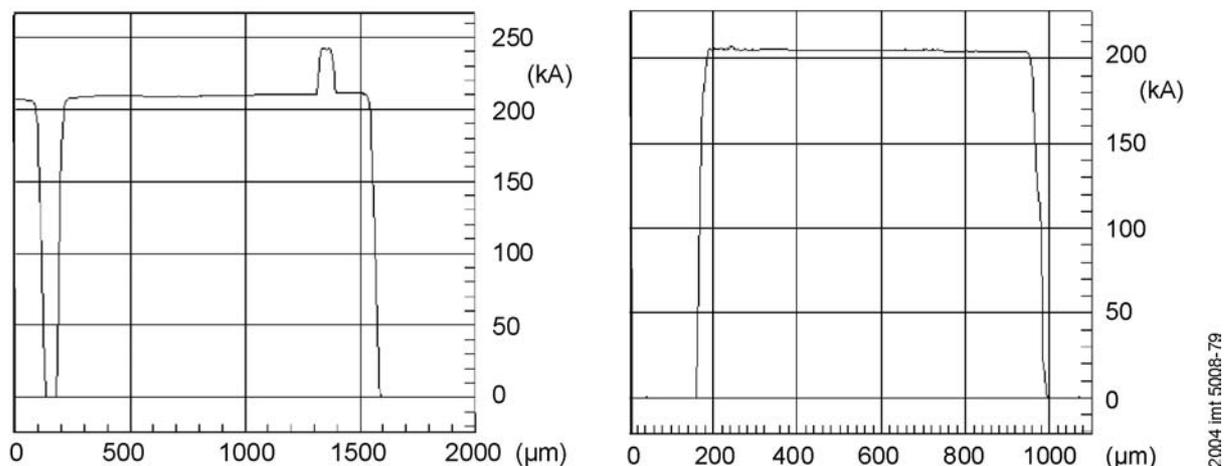


Bild 7-29: Profilmessung einer Jochstruktur vor (links) und nach (rechts) der mechanischen Bearbeitung durch CMP

Die Planarisierung durch den SU-8-Resist ist zwar im Bereich der Spulen auch ohne chemisch-mechanische Bearbeitung ausreichend gut, über dem gesamten Bauteil ist die Höhenverteilung jedoch recht unterschiedlich. Die Wirkung der Planarisierung macht der Vergleich von Profilmessungen der oberen Spulenlage deutlich (vgl. Bild 7-30). Das Ergebnis einer zusätzlichen Bearbeitung durch CMP zeigt Bild 7-31. Die Oberfläche des fertig prozessierten Aktorsystems kann durch das chemisch-mechanische Polieren auf die geforderte Höhe reduziert werden, wobei sich gleichzeitig bei ausreichend vorhandenem Polymermaterial eine exakt ebene Oberfläche ausbildet. Durch schrittweise Reduzierung der Schichtdicke der letzten Ebene, bestehend aus SU-8-Isolation und Polmagnetik, kann die vorgeschriebene Aktorhöhe von $61 \mu\text{m}$ auf $\pm 1 \mu\text{m}$ genau eingestellt werden. Dieser Wert erscheint ausreichend, da die laterale Justiergenauigkeit für den Aufbau des Antriebs eine ähnliche Größenordnung besitzt.

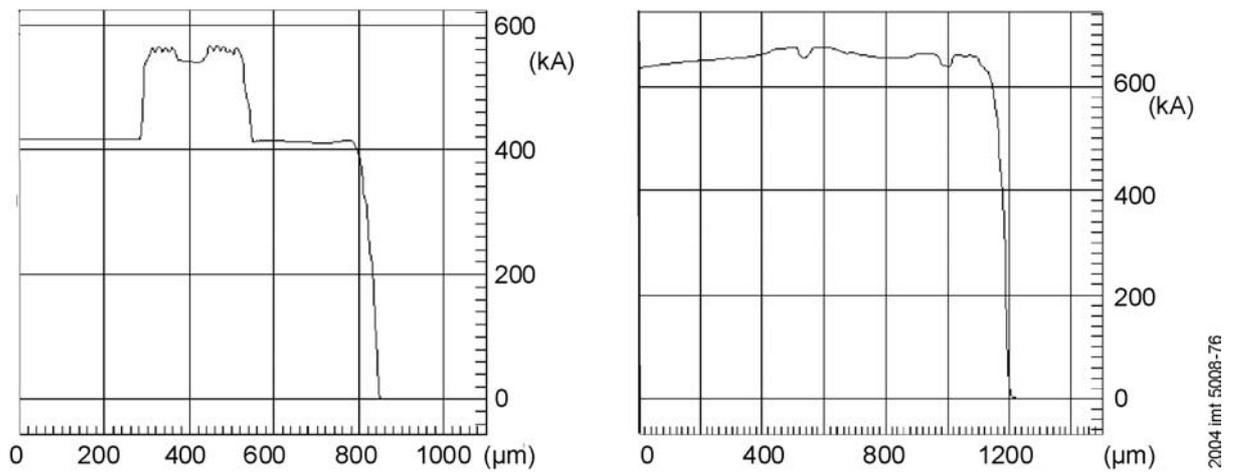


Bild 7-30: Profilmessung einer doppelagigen Spulenstruktur vor (links) und nach (rechts) der Isolation der zweiten Spulenlage.

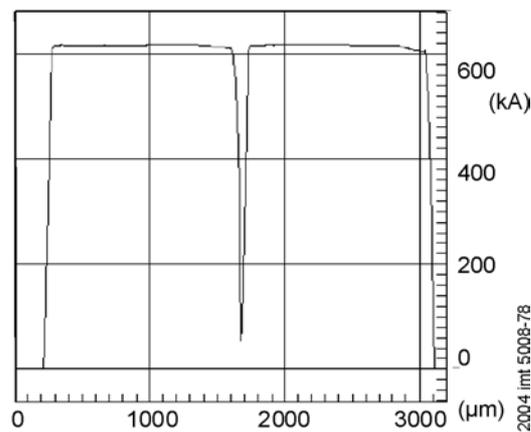


Bild 7-31: Profilmessung eines Aktorsystems nach abschließender CMP-Bearbeitung

7.6 Prozessfolgen für Erregerspulen

Mikroaktoren besitzen Erregerspulen, deren Strukturen hohe Aspektverhältnisse besitzen. Die Spulen- und Flussführungsstrukturen sind durch Isolationsschichten voneinander getrennt.

7.6.1 Arten von Strukturebenen

Aus der unterschiedlichen Geometrie von Spulen ergeben sich zwar unterschiedliche Anforderungen an die Fertigungstechnologie insbesondere in Bezug auf die Dicke der Schichtebenen, die Strukturebenen setzen sich jedoch aus denselben Funktionsstrukturen zusammen. So lassen sich Spulensysteme nach Bild 7-32 auf vier verschiedene Arten von Strukturebenen zurückführen. Die einzelnen Ebenen bestehen aus Isolationsmaterial, in das galvanische Strukturen integriert sein können. Diese sind entweder flussführende Strukturen, Leiterstrukturen oder eine Kombination aus beiden. Durch Anpassung von Geometrie und Schichtdicke lassen sich mit diesen Arten von Strukturebenen sämtliche Spulentypen verwirklichen.

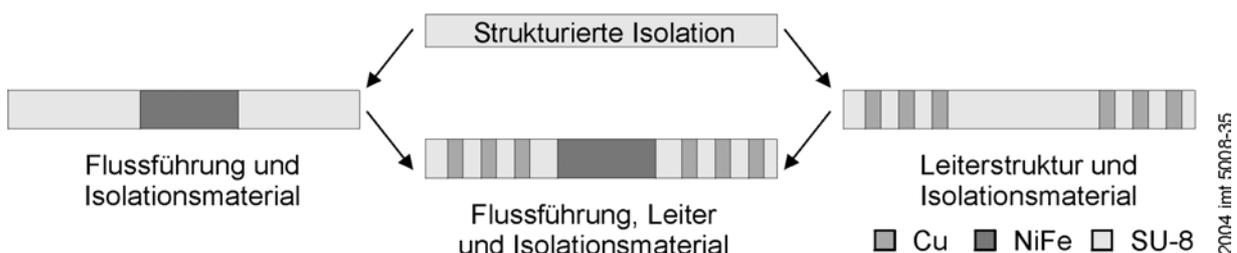


Bild 7-32: Darstellung von Strukturebenen, aus denen sich Planarspulen zusammensetzen

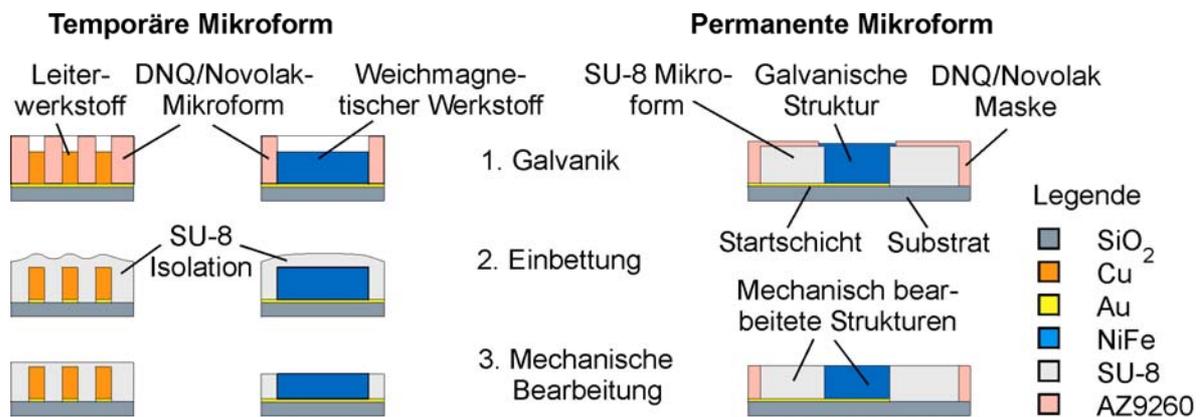
7.6.2 Spulenstrukturen

Die Spulenvarianten lassen sich nach der Richtung des erzeugten Magnetfeldes senkrecht und waagrecht zur Substratebene unterteilen (vgl. Bild 2-6). Die Spiralspule und der ebene Mäander erzeugen magnetischen Fluss senkrecht zur Substratebene, die Helixspule und der vertikale Mäander dagegen waagrecht zur Substratebene. Besondere Anforderungen an die Prozessfolgen stellen die Helix- und die Spiralspule. Spiralspulen setzen sich aus zweilagigen, planaren Leiterstrukturen und mehrschichtigen, dreidimensionalen Magnetstrukturen zusammen. Diese Art der Spulen erzeugen den magnetischen Fluss durch ihren planaren Aufbau senkrecht zum Substrat. Feine Leiterstrukturen mit Verbreiterung im Bereich der Durchkontaktierung (Via) ermöglichen kompakte Systeme mit hohen Windungszahlen. Helixspulen hingegen weisen eine dreidimensionale, über mehrere Schichtebenen gehende Leiterstruktur mit ebener parallel zum Substrat verlaufender Magnetstruktur auf. Die Spule erzeugt den magnetischen Fluss durch das Winden um den Magnetkern in der Substratebene. Durch die Leiterführung sind je Windung zwei Viakontakte erforderlich. Für geringe Übergangswiderstände zwischen den Leiterebenen sind Leiterstrukturen mit großen Querschnitten üblich. Bei gleicher

Windungszahl ergeben sich daher größere Systemabmessungen. Helixspulen werden daher meist bei Bauteilen ab einigen Millimetern Größe eingesetzt. Für beide Erregerspulentypen ergeben sich ähnlich hohe Anforderungen an die Aspektverhältnisse, wobei hohe Durchflutungen große magnetische Querschnitte und somit auch hohe Schichtdicken erfordert. Die Ausrichtung des Arbeitsluftspalts des Mikroaktors folgt meist bereits aus der Magnetfeldrichtung des eingesetzten Spulentyps.

7.6.3 Grundlegende Fertigungsfolgen für Spiralspulen

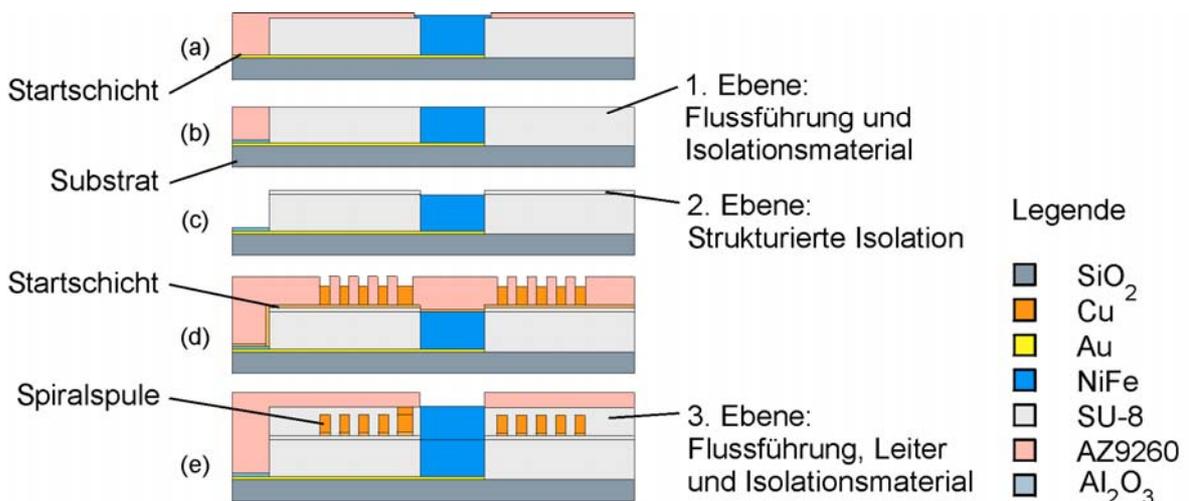
Die einzelnen Arten von Strukturebenen lassen sich auf verschiedene Weise herstellen. Im Falle der Mikroaktorkonstruktion sind Prozesse auszuwählen, die große Aspektverhältnisse, hohe Strukturen und ausreichende Planarisierung erlauben. Aus den Prozessuntersuchungen ergeben sich zwei unterschiedliche Methoden der Strukturherstellung mit hohem Aspektverhältnis: Die Galvanoformung mit temporärer oder permanenter Mikroform mittels DNQ-Novolak bzw. SU-8-Resist (vgl. Bild 7-33). Für einen Mehrlagenaufbau werden galvanisch in DNQ/Novolak-Mikroformen hergestellte metallische Strukturen nach Entfernen der Form in SU-8 eingebettet, um Zwischenräume auszufüllen, die Strukturen zu planarisieren und zu isolieren. Eine abschließende mechanische Oberflächenbearbeitung des Polymermaterials sowie der Strukturen ist möglich (Bild 7-33, links). Optional ist auch zuvor, noch im DNQ/Novolak Resist, eine mechanische Bearbeitung der galvanischen Strukturen zur Verringerung der Höhenvariation durchführbar. Beim SU-8-Prozess füllt die permanente Mikroform die Strukturzwischenräume aus und dient als Isolation. SU-8 ist zwar zum Aufbau hoher Strukturen mit großen Aspektverhältnissen ideal, die Startschicht unter der SU-8-Struktur kann jedoch nicht entfernt werden. Daher ist für Leiterstrukturen, die in SU-8-Resist abgeschieden werden, eine strukturierte Startschicht nötig, die nach der Galvanik selektiv entfernt wird und so eine galvanische Trennung der Leiterstrukturen erlaubt. Das Aussparen einzelner Mikroformbereiche wird durch Maskierung erreicht (Bild 7-33, rechts). In beiden Fällen kann eine nachträgliche mechanische Bearbeitung des ausgehärteten Polymers und/oder der Galvanikstruktur zur Planarisierung der Oberfläche eingesetzt werden (vgl. Bild 7-33, unten). Im ersten Fall kann die Isolationsschichtdicke reduziert oder sogar die Metallstruktur wieder freigelegt werden. Im zweiten Fall kann aus Mikroformen herausgewachsenes Metall wieder entfernt werden. Eine vollständige Ausfüllung der SU-8-Mikroformen ist somit erreichbar. Durch mechanische Bearbeitung kritischer Systemebenen ist ein präziser Aufbau auch bei hohen Mikrostrukturen erfüllbar.



2004 imt 5008-124

Bild 7-33: Prozesse zur Fertigung von planaren Strukturebenen bei hohen Aspektverhältnissen der Mikrostrukturen

Werden diese grundlegenden Prozesse kombiniert, können verschiedenste Anordnungen von Flussführungen, Leitern und Isolation erreicht werden. Eine zweckmäßige Prozessfolge zur integrierten Herstellung von Spulen und Magnetik zeigt Bild 7-34.



2004 imt 5008-125

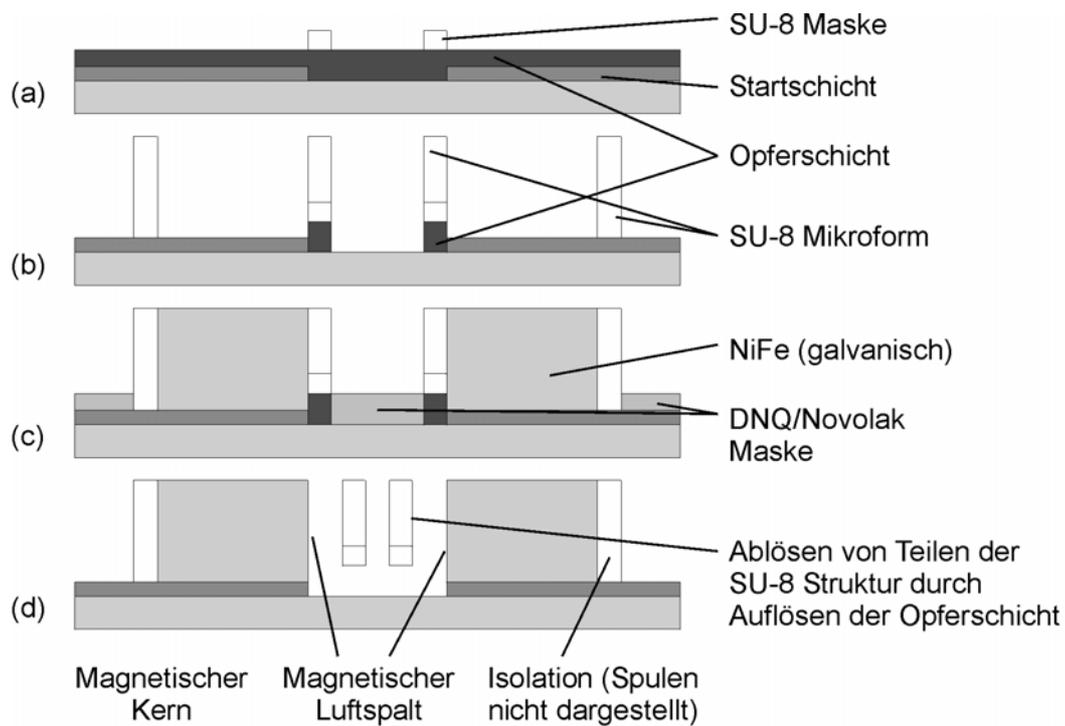
Bild 7-34: Prozessfolge zur integrierten Herstellung von Spulen und Magnetik

SU-8-Resist wird als Mikroform sowie als permanent im System verbleibende isolierende Schicht für Leiterstrukturen eingesetzt. Bei der Galvanik werden Teilbereiche der Mikroform, z. B. für die Bauteilvereinzelung, durch DNQ/Novolak Resist maskiert. Auf diese Weise können SU-8-Mikroformen selektiv gefüllt werden. Beim Herauswachsen der Galvanik aus der SU-8-Form ist durch die DNQ/Novolak Maske außerdem eine zusätzliche, laterale Begrenzung gegeben. Die Maskierung der SU-8-Strukturen erlaubt eine freie Gestaltung der galvanisch abgeschiedenen Strukturen und der Isolation. Mit der Verwendung beider Resisttypen lassen sich Spulenstrukturen, Isolation und Magnetik kombiniert in einer Strukturebene herstellen. Glatte Schicht- und Strukturflächen werden durch die planarisierende Wirkung der Resiste sowie durch mechanische Bearbeitung erreicht. Somit ist eine

exakte lithographische Strukturübertragung auch nach mehreren Schichten noch möglich, wodurch u.a. exakte magnetische Luftspaltgeometrien erzielt werden können.

Ein weiterer Aspekt der dargestellten Prozesse ist die Mehrfachverwendung der Startschicht sowie deren Strukturierung. Mehrfaches Nutzen einer Startschicht ist bei lateral gleich- oder kleiner werdenden galvanischen Strukturen möglich. In Bild 7-34 trifft dies für die NiFe-Strukturen zu. Gegenüber Ätzangriff ist eine Ätzschutzschicht vorzusehen, wie im Beispiel eine Al_2O_3 -Deckschicht. Diese Schicht wird nach der Galvanik aufgebracht und während der Planarisierung zusammen mit der galvanischen Oberfläche entfernt. Eine Strukturierung der Startschicht ist bei Verwendung von SU-8 als Mikroform für Leiterstrukturen erforderlich, um diese elektrisch voneinander trennen zu können, ohne die Mikroform zu entfernen. Außerdem ermöglicht das teilweise Entfernen der metallischen Startschicht verbesserte Haftung des SU-8-Resists auf darunter liegenden Schichten.

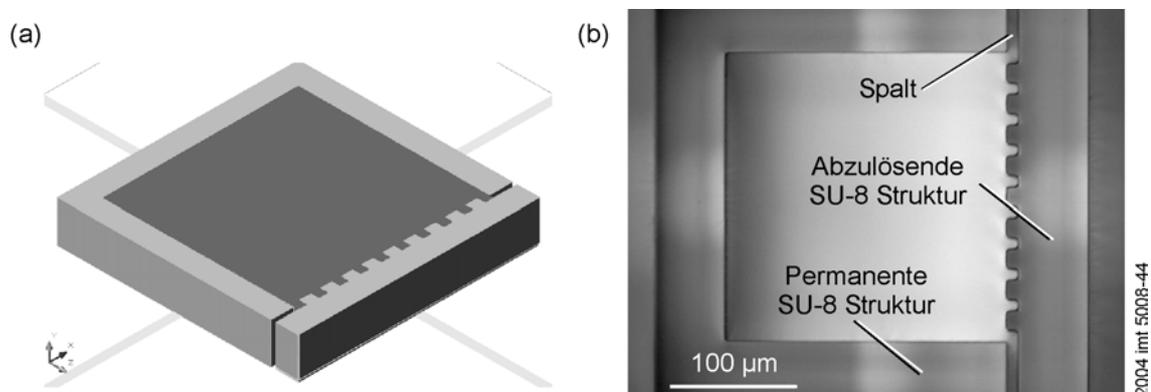
Das Entfernen von SU-8-Resist kann durch Opferschichttechnik ermöglicht werden. Dadurch wird SU-8 nicht nur als permanente, strukturierte Isolationsschicht und Mikroform sondern auch als temporäre Mikroform einsetzbar. Opferschichten erlauben es, bestimmte Bereiche der SU-8-Mikroformen zu entfernen, ohne die Isolationsschichten anzugreifen. Ein selektives Ablösen von Mikroformen, die nicht der Isolation dienen, ist somit erreichbar. Die Prozessfolge für das selektive Ablösen von SU-8-Resist ist am Beispiel der NiFe-Galvanik in SU-8-Mikroformen in Bild 7-35 dargestellt: Im mittleren Bereich des Bildes sollen später bewegliche NiFe-Strukturen eingefügt werden. Nach Aufbringen einer Start- und Opferschicht wird letztere zunächst über eine SU-8-Maske strukturiert und anschließend die eigentliche Mikroform für die magnetischen Strukturen hergestellt (Bild 7-35, (a), (b)). Nach der galvanischen Abscheidung von NiFe, bei der Teile der SU-8-Form durch DNQ/Novolak maskiert sind, werden die SU-8-Strukturen durch Auflösen der Opferschicht vom Substrat getrennt und somit entfernt. Es entsteht eine frei zugängliche, magnetische Fläche, die durch die SU-8-Mikroform sehr senkrechte Flanken aufweist (Bild 7-35, (c), (d)). Ein Anwendungsbeispiel sind elektromagnetische Antriebe, bei denen die Flussführungen in der Substratebene liegen. Das Freilegen des Luftspaltes erlaubt das Einbringen von Magnetstrukturen eines beweglichen Ankers. Vorteil der Verwendung von SU-8 zur Strukturierung sind in diesem Fall die nahezu senkrechten Magnetstrukturen. Daraus resultieren auch bei sehr hohen Strukturen präzise Luftspaltgeometrien, die mit DNQ/Novolak-Resist nicht erreicht werden könnten. Liegen die Flussführungen bei diesem Konzept in der Substratebene, sind nach Bild 7-17 zudem bessere magnetische Eigenschaften zu erwarten.



2004 imt 5008-22

Bild 7-35: Selektives Abheben von SU-8-Mikroformen nach der Galvanik

Aufgrund der Luftspaltgeometrie ergibt sich bei diesem Konzept eine Kraftwirkung bzw. eine Bewegung des Ankers in Substratebene. Für den vorliegenden Anwendungsfall mit Torsionsspiegel ist dieses Konzept daher nicht geeignet, es eröffnet aber z. B. für optische Schalter mit Strahlführung in der Substratebene interessante Anwendungen. Beispielhaft zeigt Bild 7-36 SU-8-Strukturen, die durch Opferschichten selektiv vom Substrat ablösbar sind. Nach der Abscheidung von NiFe und dem Ablösen des rechten Teils der Mikroform liegen Zahnstrukturen frei (Zahnbreite: 8 μm , Zahnhöhe: 100 μm). Diese Zahnstruktur könnte für Reluktanz-Linearantriebe genutzt werden.



2004 imt 5008-44

Bild 7-36: Anwendungsbeispiel für eine Zahnstruktur auf NiFe, herzustellen in einer teilweise ablösbaren Mikroform aus SU-8-Resist: (a) schematische Darstellung der Mikroform auf strukturierter Opferschicht, (b) SU-8-Mikroform

8 Fertigung

Die Fertigung des Antriebs lässt sich unterteilen in die Fertigung des elektromagnetischen Antriebsteils und die des Ni-Rings auf dem Spiegel. Zur Systemintegration werden Spiegel und Antrieb über den Abstandhalter (vgl. Bild 6-2) miteinander verbunden. Diese Systemintegration, wie auch die Fertigung der Spiegelstruktur, wurde am MAT in Berlin entwickelt und durchgeführt. Sie wird daher hier nur kurz dargestellt. Schwerpunkt ist vielmehr der elektromagnetische Antrieb mit Bezug auf die gewählte Prozessfolge sowie seine bauteilspezifischen, fertigungstechnischen Aspekte.

8.1 Maskenlayout des Antriebs

In Bild 8-1 ist das Maskendesign des elektromagnetischen Antriebs gezeigt. Die Auslegung sieht großflächige SU-8-Strukturen vor. Diese erlauben einheitliche hohe Aktorsysteme, bei denen die feinen Leiter- und Flussführungsstrukturen durch SU-8 eingebettet und somit geschützt sind. Die Spulen besitzen bei einem vorgegebenen Spiegeldurchmesser und einem maximalen Durchmesser für den Rückschluss (Ni-Ring) eine ausreichende Windungszahl bei hohem Leiterquerschnitt. Die Erregerspulen eines Mikroantriebs erfordern präzise, hohe galvanische Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen, um geringe ohmsche und magnetische Widerstände zu gewährleisten. Die Gesamthöhe des Antriebs beträgt mit $61\ \mu\text{m}$ bezogen auf die Jochoberfläche.

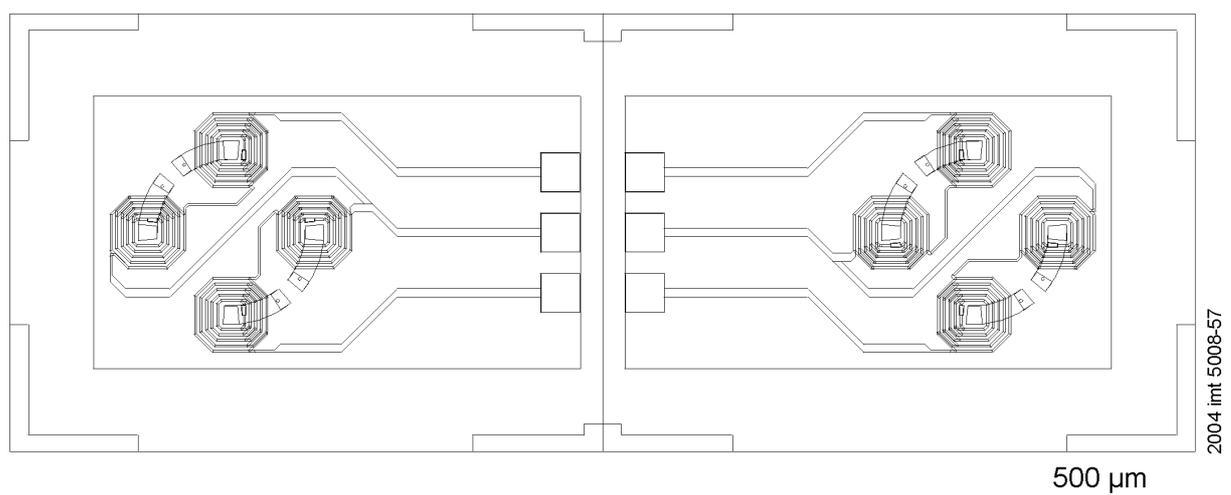


Bild 8-1: Maskenstrukturen eines Aktorpaars

Die Kräfte beim Schalten des Spiegels sind nach (Gl. 2.8) abhängig von den Struktur- und Luftspaltverhältnissen des magnetischen Kreises. Die Luftspatlänge, also der Abstand von Jochstruktur und Ni-Ring, hat dabei dominierenden Einfluss. Um die berechneten Kräfte zu erhalten, sind sowohl die Gesamthöhe des Antriebs

als auch die Dicke des Abstandhalters zwischen Aktor- und Spiegelwafer genau einzuhalten. Der Kippwinkel wird durch die Höhe der Anschläge auf dem Aktorsystem definiert. Er ist dementsprechend ebenfalls abhängig vom Abstand des Nickelrings zur Aktoroberfläche.

8.2 Prozessfolge zur Fertigung des Antriebs

Die Prozessfolge zur Fertigung des elektromagnetischen Antriebs wird nach Verifikation der Eignung und Kompatibilität der Einzelprozesse auf Basis der in Kapitel 7.6 vorgestellten Fertigungsfolgen für Erregerspulen zusammengestellt. Einen Überblick über die Prozessfolge gibt Bild 8-2. Als besondere Anforderung ist der Bereich des Abstandhalters frei zu halten. Außerdem muss die Höheneinstellung des Pols mit hoher Genauigkeit möglich sein. Nach dem Aufbau des Aktorsystems werden auf der planarisierten Oberfläche der Pole zusätzlich galvanische Anschläge (Bumps) für die Spiegelstruktur abgeschieden.

Eine mehrfache Nutzung der strukturierten Startschicht sowohl für die magnetischen Strukturen sowie für die Anschläge ist zweckmäßig. Hierzu wird direkt nach dem Abscheiden des Joches eine Al_2O_3 -Schicht aufgebracht, die während der anschließenden CMP-Bearbeitung auf der Aktoroberfläche entfernt wird, im übrigen Bereich jedoch erhalten bleibt und somit die Startschicht bei nachfolgenden Ätzprozessen (IBE) schützt. Vor jeder CMP-Bearbeitung wird eine temporäre Einbettung mit DNQ/Novolak-Resist zum Schutz von Strukturkanten vorgenommen.

Nach der Fertigung einer dünnen SU-8-Isolationsschicht wird die erste Spulenlage in DNQ/Novolak-Resiststformen abgeschieden, die nach dem Ätzen der Startschicht durch eine strukturierte Isolationsschicht abgedeckt wird. Die Polmikroform wird anschließend durch NiFe-Galvanik gefüllt. Um die Abscheidung auf die Pole zu beschränken, ist eine zusätzliche Maskierung mit DNQ/Novolak-Resist vorgesehen. In entsprechender Art und Weise folgt danach die zweite Spulenebene mit in SU-8-Isolation integriertem Polteil. Nach CMP-Bearbeitung der Endoberfläche werden die Anschläge sowie die Kontaktschichten für die Anschluss pads abgeschieden.

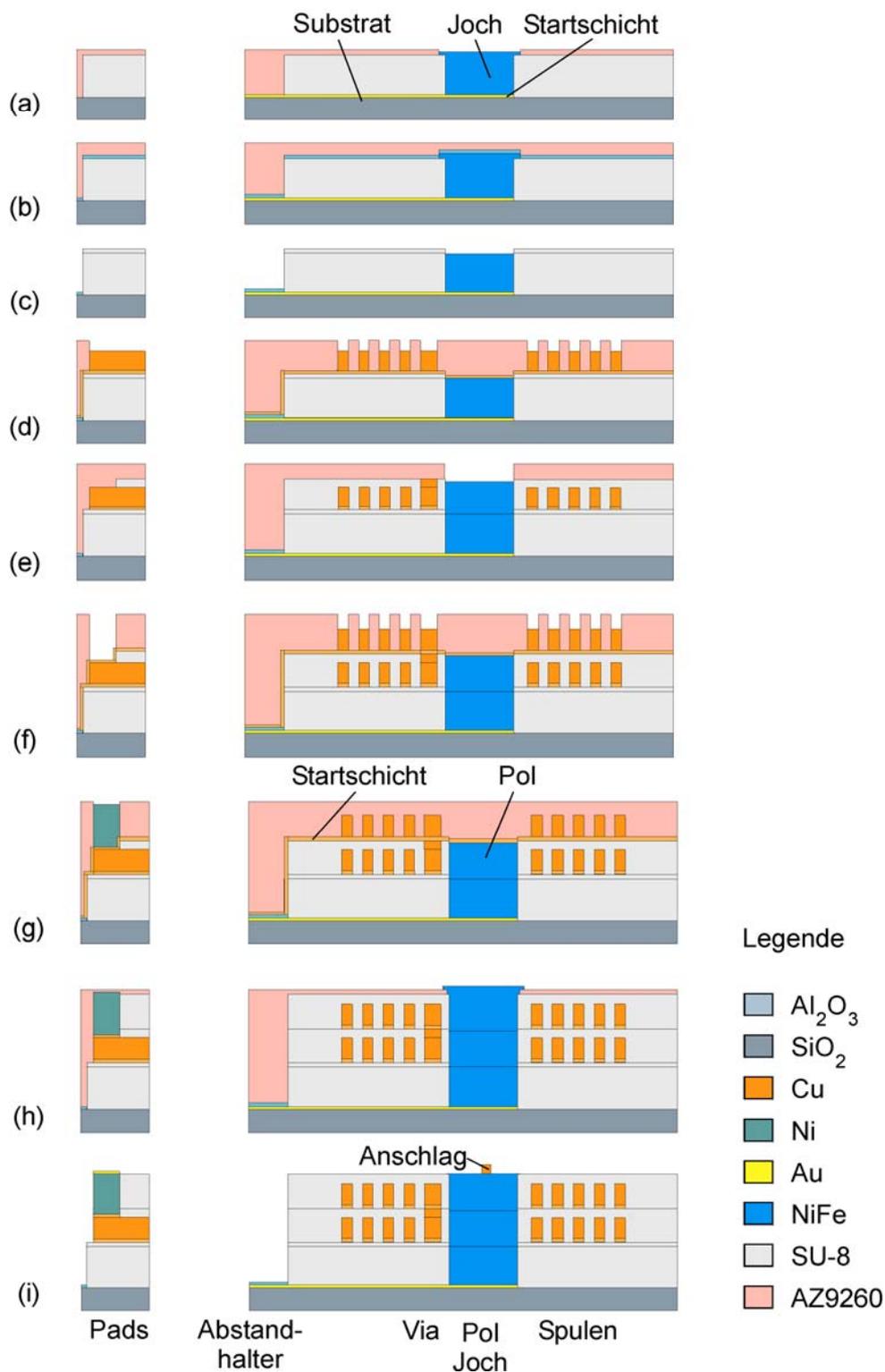


Bild 8-2: Prozessfolge: (a) Joch in SU-8 mit strukt. Startschicht, Startschichtschutz (Al_2O_3) (b) CMP mit DNQ/Resist Deckschicht, (c) SU-8-Isolation, (d, e) untere Spulenlage, SU-8-Isolation sowie unterer Polteil, (f, g) obere Spulenlage und Pads, (h) SU-8-Isolation und oberer Polteil, (i) CMP mit DNQ/Resist Deckschicht, Au-Kontaktschicht und Herstellung der Anschläge auf den Polen

8.3 Fertigung des Antriebs

Der Aktor wurde mit der beschriebenen Technologie für Spiralspulen aufgebaut. Bild 8-3 zeigt die CMP-bearbeitete Jochstruktur. Zu Erkennen ist ebenfalls die strukturierte Startschicht, die zum Schutz vor nachfolgenden Ätzprozessen mit einer Al_2O_3 Schicht abgedeckt ist. Auf Bild 8-4 ist ein Spulensystem mit magnetischen Polen zu erkennen. Die zweite Spulenebene mit Isolationsschichten und Magnetik fehlt hier noch.

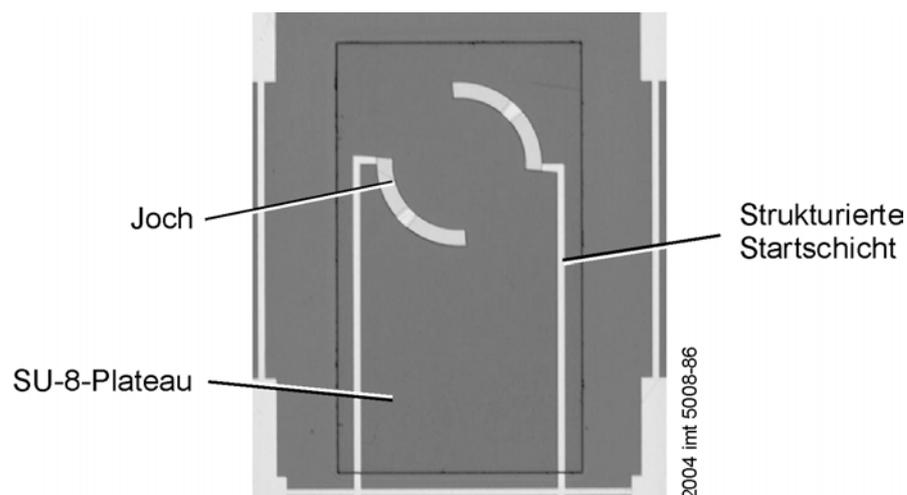


Bild 8-3: Mikroskopaufnahme der in SU-8-Resist eingebetteten Jochstruktur nach der CMP-Bearbeitung

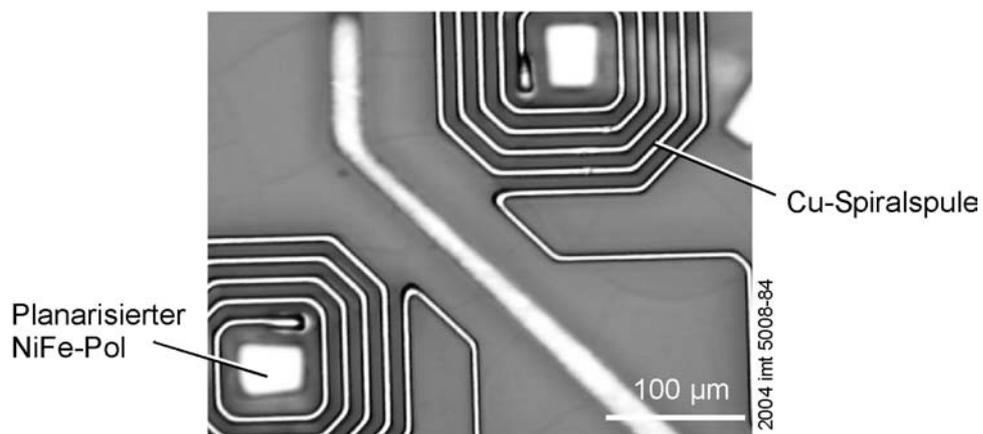


Bild 8-4: Mikroskopaufnahme einer doppelagigen Spulenstruktur mit integrierter magnetischer Flussführung aus NiFe

Um eine möglichst genau Spiegelverkipfung für alle auf dem Wafer befindlichen Systeme zu gewährleisten, ist eine genau Einstellung der Einzelschichtdicken und der Aktorgesamthöhen wichtig. Dies wurde durch CMP erreicht [KOU03]. Die Bewegung des Spiegels ist durch mechanische Anschläge beschränkt, die in Form von Halbkugeln auf den magnetischen Polen des Aktors sitzen. Diese Anschläge werden aus Cu galvanisch auf den magnetischen Polen abgeschieden. Die mehrfach

verwendete strukturierte Startschicht dient hier wiederum zur elektrischen Kontaktierung. Bild 8-5 zeigt eine REM-Aufnahme eines Antriebsteils mit Anschlägen.

Den Gesamtaufbau im Schnitt zeigen jeweils die Schliffaufnahmen von Bild 8-6 sowie Bild 8-6. Dargestellt sind Schnitte, die jeweils um 90° zueinander versetzt erzeugt wurden. Das erste Bild stellt eine Jochstruktur mit Pol sowie Spiralspulen dar.

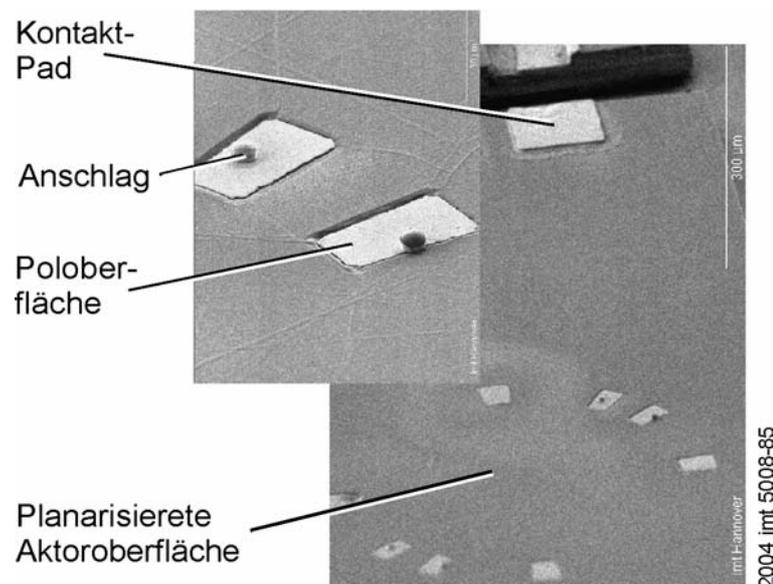


Bild 8-5: REM-Aufnahme einer planarisierten Aktoroberfläche mit Detailaufnahme der galvanischen Anschläge (Bumps) auf den magnetischen Polen

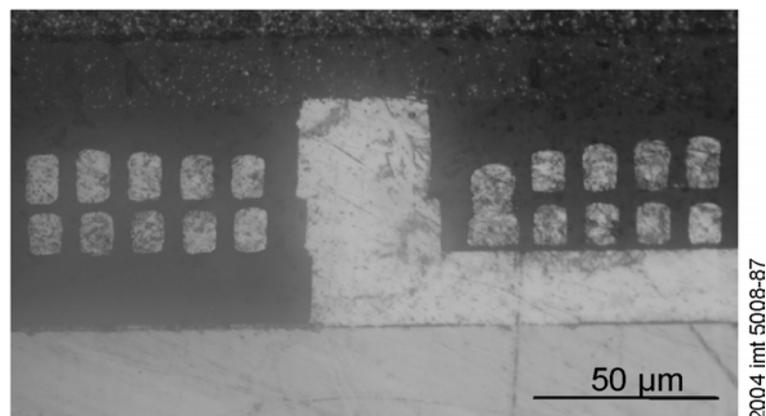


Bild 8-6: Schliffbild eines Aktorsystems mit Joch-, Pol- und Leiterstrukturen

Das Bild 8-7 zeigt den Schnitt durch ein komplettes Aktorsystem. Die geringen Abstände zwischen den Leiterebenen verdeutlichen die gute planarisierende Wirkung von SU-8-Resist. Die senkrechten Seitenflächen der flussführenden Strukturen resultieren aus senkrechten Flanken der Resistmikroformen. Der laterale Versatz resultiert aus Justierfehlern bei der Belichtung des Resists.



Bild 8-7: Schliffbild durch komplettes Spulensystem

Zu erkennen ist zudem die Planarität der Magnetstrukturen, die durch CMP-Bearbeitung erzeugt wurde. Das CMP erlaubt einen ebenen Schichtaufbau mit jeweils annähernd konstanten Schichtdicken. Die Präzision im Schichtaufbau bedingt jedoch eine erhöhte Anzahl an Prozessschritten. Die Vorteile der galvanischen Abscheidung, nämlich hohe Abscheideraten und einfache Strukturierung, werden dadurch etwas gemindert. Dies gilt besonders vor dem Hintergrund, dass durch die hohen Schichtdicken die Prozesszeiten für Resistaufbringung, Strukturierung, galvanische Abscheidung und Planarisierung entsprechend erhöht sind.

8.4 Fertigung des Ni-Rings auf dem Spiegel

Nach der Strukturierung der Polysilizium-Spiegelstruktur erfolgt die galvanische Abscheidung des Ni-Rings auf der Spiegelrückseite. Diese Galvanoformung der Ankerstruktur erfolgt auf Waferniveau. Nachdem Haft- und Startschicht wieder entfernt sind, wird das KOH-Ätzen des Bulk-Siliziums und das Freiätzen der beweglichen Spiegelstruktur durchgeführt. Ergebnis ist ein beweglicher Kippspiegel aus Polysilizium mit weichmagnetischem Anker in Form eines Ni-Rings auf seiner Rückseite.

8.5 Systemintegration

Die Systemintegration erfolgt durch Verbinden des Spiegel- und des Aktorteils mit dem Abstandhalter als Zwischenlage. Das Verkleben erfolgt durch beidseitig auf die metallische Abstandhalterstruktur aufgebrachte BCB-Schichten. Die vereinzelt Antriebs- und Spiegelarrays werden in der anschließenden Nutzenmontage zu Gesamtsystemen verbunden [GAT03a]. Diese Systemintegration wurde vom MAT durchgeführt. Das Bonden mittels BCB erfolgt dabei unter Druck und Temperatur. BCB härtet dabei erst bei Temperaturen von über 200°C. Durch vorheriges Erweichen verfließt das BCB auf dem Abstandhalter. Hierdurch kann es dazu kommen, dass die exakte Ausrichtung von Antriebssystem und Ni-Ring des Spiegels nicht immer gewährleistet ist.

Einen montierten optischen Schalter zeigt die Mikroskopaufnahme in Bild 8-8. Links ist das komplette System zu erkennen, rechts die Spiegelstruktur über dem Spulensystem.

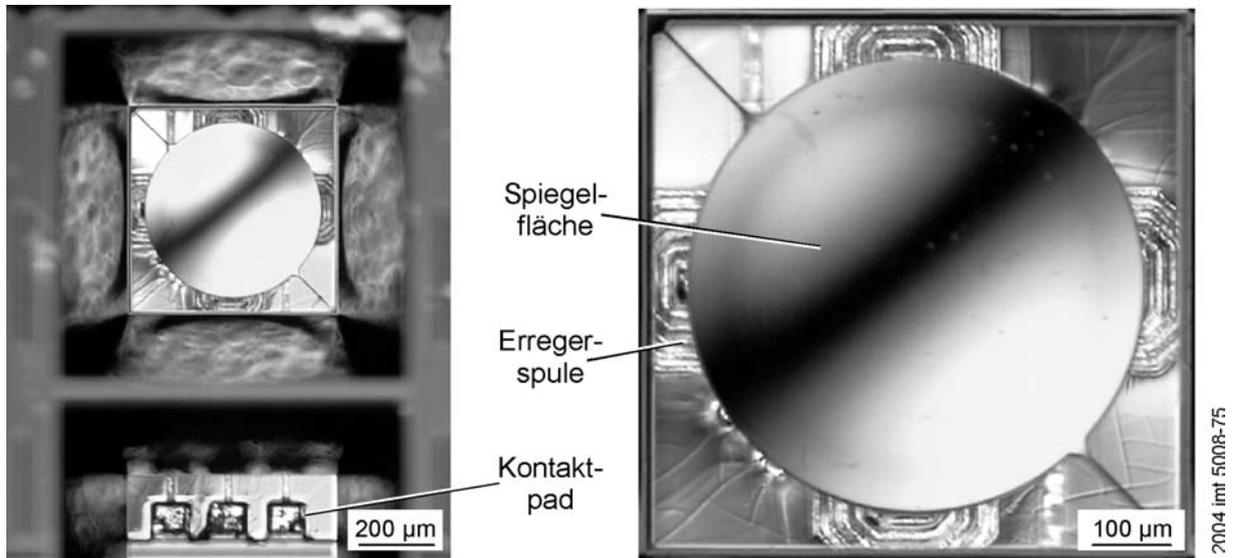


Bild 8-8: Mikroskopaufnahme des montierten optischen Schalters (Ansicht von oben)

9 Charakterisierung des Antriebs

Die Charakterisierung des Mikroschalters evaluiert die Eigenschaften des Antriebs sowie die entwickelte Technologie und die verwendeten Prozessfolgen. Zur Systemanalyse werden Antriebssysteme messtechnisch hinsichtlich ihren elektrischen, magnetischen und thermischen Kenngrößen untersucht sowie das Systemverhalten des Mikroschalters charakterisiert. Die Ergebnisse werden mit den Daten der Simulation verglichen und ausgewertet.

9.1 Antriebssystem

9.1.1 Elektrische und magnetische Analyse

Die Vermessung des Spulensystems, bestehend aus zwei in Reihe geschalteten Einzelspulen, ergibt einen Widerstand von ca. $1,8 \Omega$, kontaktierte Einzelspulen besitzen einen elektrischen Widerstand von ca. 1Ω . Als Induktivität im Spiegelverbund ergibt sich ein Wert von $3,8 \mu\text{H}$.

Die magnetische Feldverteilung erwies sich als messtechnisch schwierig zu erfassen, da die Hall-Sensoren des Teslameters eine zu große Messfläche ($400 \mu\text{m}$ Durchmesser) sowie einen (nicht definierten) Mindestabstand zur Probe besitzen. Außerdem ist nur eine Messung ohne magnetischen Rückschluss möglich, was den zu messenden magnetischen Fluss weiter verringert, der im Bereich der Auflösungsgrenze des Sensors von 3 mT liegt. Bild 9-1 stellt zum Vergleich die magnetische Flussverteilung für den Fall ohne Nickelrückschluss dar. Die Darstellung zeigt den Bereich oberhalb und unterhalb der Ni-Ring Position, in dem maximale Werte von nur $7\text{-}8 \text{ mT}$ erreicht werden.

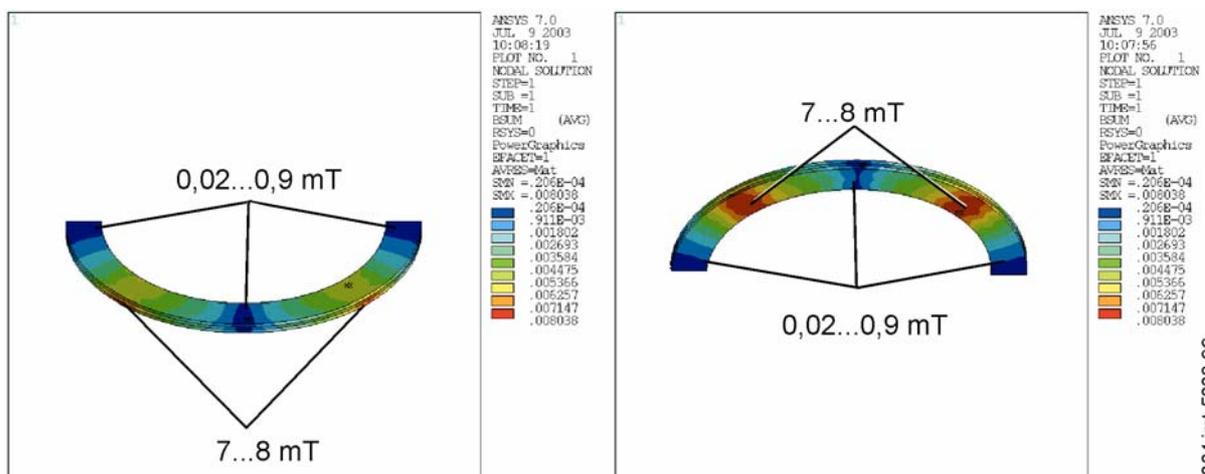


Bild 9-1: FEM-Simulation der Flussdichte direkt oberhalb (links) und unterhalb (rechts) des Ni-Rings bei einem Kippwinkel $\alpha_s = 0^\circ$ für einen Erregerstrom von 80 mA

9.1.2 Thermische Analyse

Mit Hilfe einer IR-Thermographiekamera wurde die Erwärmung des Aktors bei Bestromung gemessen. Dazu wurde die Oberfläche des Aktors mittels Lack geschwärzt, um Reflexionen an metallischen Oberflächen zu vermeiden. Während der Messung wurden jeweils beide Spulensysteme mit Gleichstrom bestromt (Reihenschaltung), um eine maximale thermische Belastung zu simulieren. Der Stromfluss wurde bis zum Versagen der Spulen bei 200 mA erhöht. Der Gesamtwiderstand der Spulen beträgt $1,8 \Omega$. Eine erkennbare Widerstandserhöhung des Spulensystems auf Grund des Temperaturanstiegs des Leitermaterials wird erst ab Stromdichten von ca. $1,5 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$ (180 mA) deutlich. Die Temperaturabhängigkeit ist bei Stromdichten um $1 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$ vernachlässigbar klein. Bild 9-2 gibt die Temperaturverteilung für eine Bestromung von 150 mA wieder. Es wird ersichtlich, dass die Temperatur im Bereich der Spulen nicht mehr als 7 K über der Umgebungstemperatur liegt. Da die Kontaktdrähte ebenfalls eine erhöhte Temperatur zeigen, wird auch über sie Wärmeenergie abgeführt.

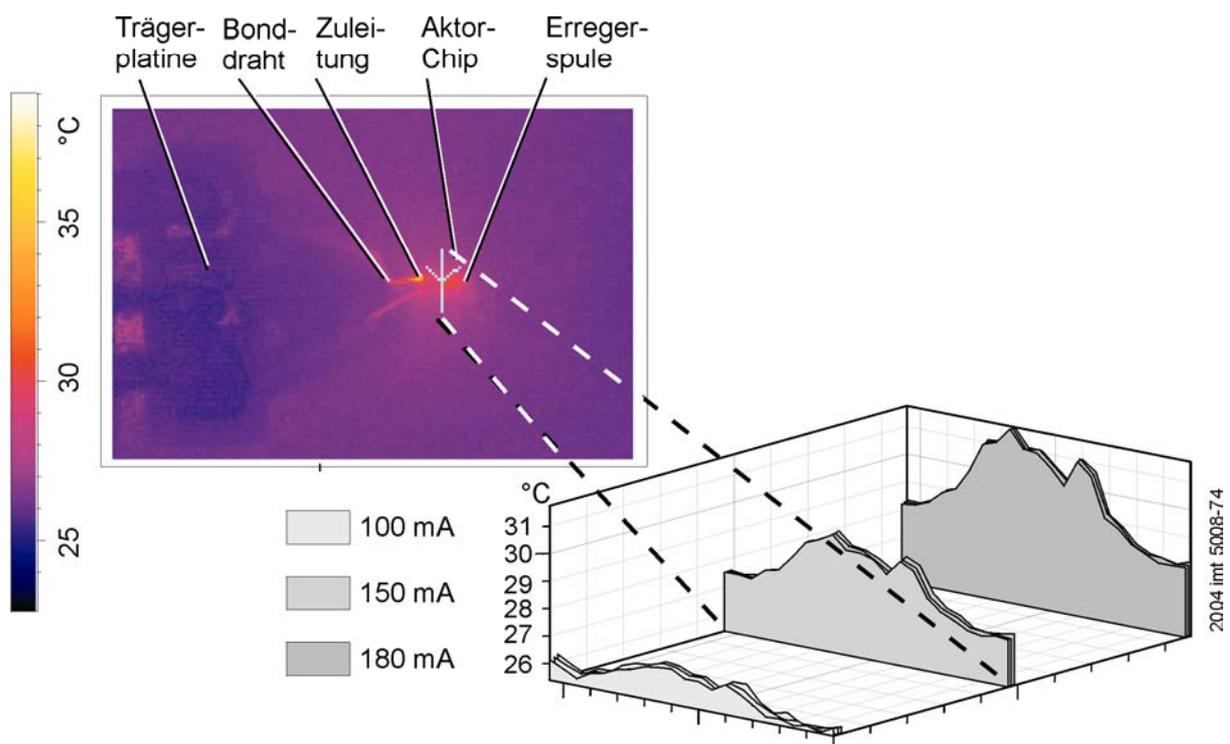


Bild 9-2: Thermographiebild des bestromten Aktorsystems sowie Schnittdarstellung der Temperaturverteilung für verschiedene Erregerströme

Die Temperaturverteilung im Querschnitt für Erregerströme von 100 mA, 150 mA und 180 mA ist in Bild 9-2 ebenfalls dargestellt. Die für den Extremfall keiner Wärmeableitung über Substrat und Bonddrähte simulierte Übertemperatur der Spulenoberfläche von 11 K wird selbst bei 150 mA nicht erreicht. Bei weiterer Erhöhung des Stroms kam es durch Erreichen der maximalen Stromdichte bei einem Dauerstrom von ca. 200 mA zur Zerstörung des Testsystems. Dies entspricht einer

Stromdichte von $1,7 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$. Bei Bestromung von Einzelsystemen wurden Stromdichten von über $2 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$ erreicht. Verglichen mit anderen Aktorsystemen liegt diese maximale Stromdichte relativ niedrig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Leiterstrukturen in diesem Fall durch Polymermaterial thermisch isoliert sind und nicht direkt auf dem Trägersubstrat liegen.

9.2 Mikroschalter

9.2.1 Topographieanalyse

Der vertikale Abstand zwischen Aktor und Spiegel ergibt sich aus der Höhe der Aktoroberfläche sowie der Dicke des Abstandhalters und der Polymerschichten zum Verkleben der Bauteile. Zur Überprüfung des Abstands nach der Montage des Spiegels durch das MAT wurde mittels Weißlichtinterferometer die Oberfläche von Spiegel und Aktor vermessen. Bild 9-3 zeigt das Ergebnis in der 3D-Darstellung und im Schnitt.

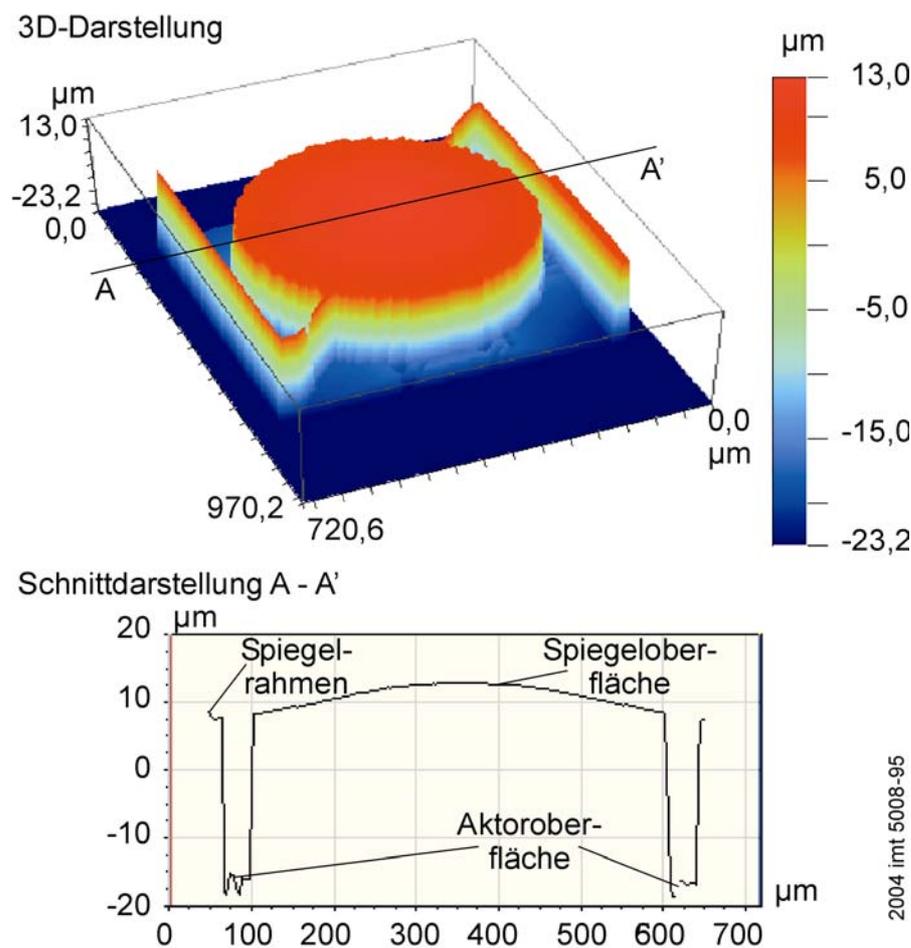


Bild 9-3: Interferometrische Oberflächenmessung des Schalters

Es ist eine konvexe Krümmung des Spiegels zu erkennen, wodurch der Mittelpunkt des Spiegels ca. $5\ \mu\text{m}$ höher liegt als der Rand. Der Abstand zwischen Aktor und Nickelring liegt unter Berücksichtigung der Nickelring- und Spiegeldicke von $4\ \mu\text{m}$ bei ca. $25\ \mu\text{m}$ unter der geforderten Größe von $29\ \mu\text{m}$.

Die laterale Positioniergenauigkeit des Spiegels zum Aktor muss ebenfalls berücksichtigt werden. Durch die mangelnde Positionskontrolle während der Klebung der Prototypen ist hier die Unsicherheit mit ca. $\pm 15\ \mu\text{m}$ anzusetzen. Daraus folgt eine große Variation der magnetischen Luftspaltlänge.

9.2.2 Analyse des Schaltverhaltens

Die Bestromung der Schalter liefert gut mit Lupe oder Mikroskop sichtbare Spiegelbewegungen (vgl. Bild 9-4). Der niedrigste Schaltstrom liegt bei $70\ \text{mA}$. Die Zerstörung der Spulen erfolgt bei konstantem Gleichstrom von etwa $200\ \text{mA}$, bei Impulsbestromung bei ca. $240\ \text{mA}$, was einer Stromdichte von $2\ \text{kA/mm}^2$ entspricht.

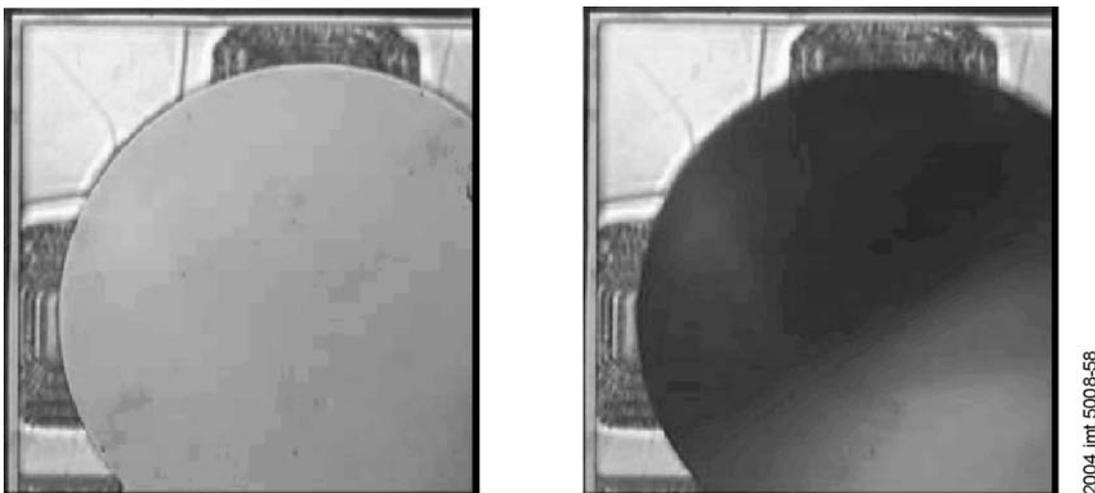


Bild 9-4: Mikroskopaufnahme des schaltenden Spiegels während des Schaltens: links die waagerechte Spiegelposition, rechts die gekippte Position

Durch Betrachtung der Amplitude des Spiegels im Resonanzbereich kann die mechanische Eigenfrequenz des Spiegels ermittelt werden. Es wird dabei an ein Spulensystem eine rechteckförmige Spannung bestimmter Frequenz angelegt. Bei einer Anregungsfrequenz von $1,16\ \text{kHz}$ wird die Eigenfrequenz des Spiegelsystems erreicht. Es sind zwei Spiegelstellungen, nämlich jeweils die maximale Auslenkung, zu erkennen. Bei weiterer Erhöhung der Frequenz ist nur noch die Spiegelmittenposition erkennbar. Dieses Messergebnis stimmt recht gut mit der mechanischen FEM-Simulation überein, die eine erste Eigenfrequenz der Spiegelaufhängung bei $1,29\ \text{kHz}$ liefert [GAT03a].

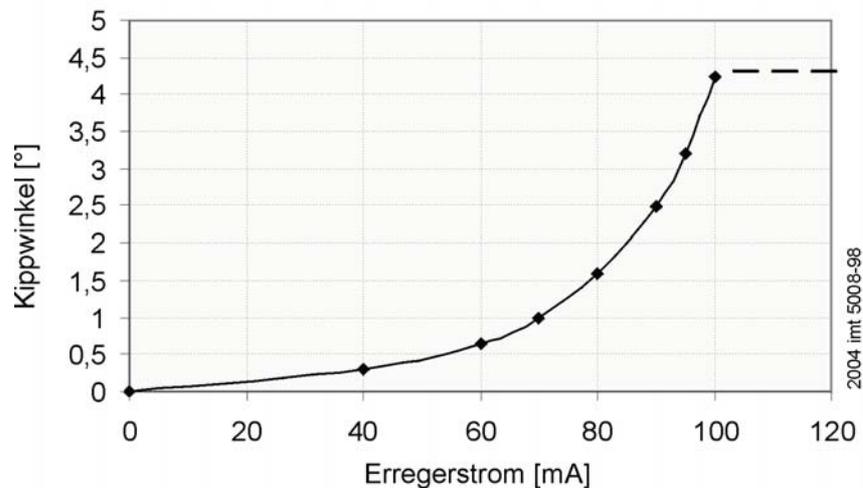


Bild 9-5: Kippwinkel α_s der Spiegelstellung bei Bestromung des Aktors

Messungen am MAT lieferten den in Bild 9-5 dargestellten Verlauf der Spiegelverkipfung über dem Erregerstrom. Bei einem Erregerstrom von maximal 100 mA wurde ein maximaler Kippwinkel von ca. $\alpha_s = 4,3^\circ$ ermittelt. Bei weiterer Erhöhung des Stromes bleibt der Kippwinkel konstant. Damit ist der Kippwinkel ca. um Faktor zwei kleiner als durch die Simulation berechnet. Ursachen hierfür könnten zu geringe magnetische Kräfte sein. Dies ist mit dem Versatz des Aktors zum Spiegel von über $\pm 10 \mu\text{m}$ Mikrometern erklärbar. Eine zu hohe Federkraft ist unwahrscheinlich, da die gemessene Eigenfrequenz gut mit der berechneten übereinstimmt. Durch die senkrechte Magnetisierung der Polstrukturen ist hier außerdem mit geringerer Permeabilität und Sättigungsflussdichte zu rechnen. Der erhöhte magnetische Widerstand würde zur Verringerung der Kräfte beitragen.

Die Empfindlichkeit des Systems gegenüber Änderungen im Abstand von Aktoroberfläche und Ni-Ring wird durch Messungen an Prototypen des optischen Schalters bestätigt. Größere Luftspatllängen bewirken einen kleineren Maximalaus Schlag bei gleicher Erregung der Spulen. Mit den reduzierten Kräften wird der maximale Kippwinkel gegen die Federkraft nicht mehr erreicht. Daraus resultiert eine hohe Anforderung an die Genauigkeit der Montage mit Toleranzen von wenigen Mikrometern. Die Größe der magnetischen Kräfte ist im Vergleich zur Simulation reduziert.

10 Diskussion der Ergebnisse

10.1 Konzeption

Die Konzeption des elektromagnetischen Antriebs für einen optischen Schalter erfordert eine vertikale Kraftwirkung auf den Ni-Ring-Anker des Torsionsspiegels. Aus der Lage der Spiegeloberfläche folgt für den Antrieb eine Orientierung senkrecht zur Substratoberfläche, um die Drehbewegung des Spiegels zu realisieren. Ein Antrieb unter Umformung einer lateralen Bewegung in eine Drehbewegung, wie bei kapazitiven Antrieben mit Kammstrukturen, wäre zwar konzeptionell denkbar, fertigungstechnisch jedoch schwer zu realisieren, da Silizium- und Magnetstrukturen lateral nicht zu integrieren sind. Das gewählte Konzept mit einem Spiegel- und einem Aktorwafer und dem Ni-Ring-Anker als Schnittstelle ist nicht nur zur Funktionstrennung von Antrieb und mechanischer Struktur sinnvoll, sondern ist auch aus fertigungstechnischer Sicht erforderlich. Der Aufbau von beweglicher Spiegelstruktur und magnetischen Aktor auf einem Wafer wäre nicht möglich. Vielmehr ist eine Integration durch Montage notwendig.

Die im Rahmen des Entwurfs durchgeführte Simulation der magnetischen Antriebskraft ist vielversprechend. Durch die Integration von hartmagnetischen Strukturen kann zusätzlich ein stromloses Halten der Schaltstellung erreicht werden. Das Antriebskonzept sowie die optischen Anforderungen setzen jedoch eine präzise Aufbautechnik von Aktor und Spiegel voraus. Da das Gesamtsystem erst durch Montage der zwei Teilsysteme entsteht, werden auch an das Verfahren der Verbindung bezüglich Positionierung und Ausrichtung der Teilsysteme zueinander ähnlich hohe Anforderungen gestellt. Um diese zu erfüllen, ist nur eine Montage auf Waferniveau bzw. Array-Niveau sinnvoll.

Das Konzept des separaten Abstandhalters hat hier einen entscheidenden Nachteil: Die Aufbringung des Polymermaterials zur Verbindung des Abstandhalters mit den zwei Teilen des Mikroschalters kann nicht ähnlich präzise wie auf Waferniveau durchgeführt werden. Daher wäre eine integrierte Herstellung des Abstandhalters, z. B. in Verbindung mit dem Aktorwafer sinnvoll. Eine Möglichkeit ist die galvanische Abscheidung von Abstandhalterstrukturen aus Ni mit anschließender CMP-Bearbeitung. Diese Technik konnte erfolgreich an ähnlichen Strukturen demonstriert werden (vergl. Bild 7-7). Durch dieses Vorgehen ist das Polymermaterial nur einseitig auf die Rahmenstruktur zu applizieren. Zudem erlaubt das Aufschleudern und Photostrukturieren ein sehr gezieltes Aufbringen in präziser Schichtdicke.

10.2 Entwickelte Technologie

Die für die Fertigung des Antriebs des optischen Schalters entwickelte Prozesstechnologie ist eine Kombination von exzellenten Strukturierungs- und Planarisierungsverfahren. Dabei ist der Photoresist SU-8 insbesondere als auf dem Substrat

verbleibender Strukturwerkstoff geeignet. So ist durch Mikroformen mit großen Aspektverhältnissen, die gleichzeitig als permanente Isolation für galvanische Mikrostrukturen dienen, die Fertigung hoher mehrlagiger elektromagnetischer Systeme möglich.

Für eine gute Strukturierung von SU-8-Resist ist die Abstimmung von Belichtung und PEB wichtig, wodurch der Grad der Vernetzung und somit die Löslichkeitsänderung definiert wird. Demgegenüber ist der Einfluss von Prozessvariationen bezüglich der Resisttrocknung und -entwicklung gering. Von besonderer Bedeutung ist das verwendete Belichtungsspektrum (vgl. Bild 7-13). Wird ein i-Line-Spektrum genutzt, ist die Seitenwandqualität gegenüber Breitbandbelichtung erheblich verbessert, da verstärkte Absorption kurzwelliger Spektralanteile im oberen Bereich der Resistschicht vermieden wird. Die Untersuchungen zeigen ferner, dass eine erhöhte Dosis bei dieser Art der Belichtung die Strukturqualität nicht beeinträchtigt, wohingegen es bei Breitbandbelichtung zu starker Strukturverbreiterung kommt. Die Prozesstoleranz hinsichtlich Überbelichtungen ist für die Strukturierung von SU-8 in mehrlagigen Systemen, wie dem elektromagnetischen Antrieb, von großer Bedeutung, da hier die SU-8-Schichtdicke durch eingebettete Strukturen schwankt. Weiterer Vorteil verstärkter Belichtung ist die verbesserte Schichthaftung im Kontaktbereich zur unterliegenden Schicht durch verstärkte Vernetzung.

Durch flache Temperaturrampen und Ruhezeiten werden thermische Spannungen im SU-8-Resists auf ein Minimum beschränkt, was mit wachsender Schichtdicke zunehmend wichtig ist. Wegen der ausreichend hohen chemischen Beständigkeit des polymerisierten Resists bereits bei PEB-Temperaturen von 90 °C, sollte mit Rücksicht auf thermische Schichtspannungen ein Hard Bake vermieden werden. Die erhöhte Vernetzung des Resists beim Hard Bake würde zusätzliche Spannungen hervorrufen.

Für die UV-Tiefenlithographie und Galvanoformung wurde zudem der DNQ/Novolak Resist AZ9260 untersucht, der sich durch hohe Transparenz auszeichnet, so dass hohe Schichtdicken durchbelichtet werden können. Durch Prozessentwicklung konnten Aspektverhältnisse von bis zu 10:1 bei Schichtdicken von über 90 µm strukturiert mit Flankenwinkeln von bis zu 88° erzielt werden (Bild 7-5, Tabelle 7-1). Die Strukturierungsanforderungen für den Aufbau von Mikroaktoren sowie speziell des elektromagnetischen Antriebs sind somit gut erfüllt. Diese Genauigkeit der Strukturierung ist insbesondere wichtig bei der Herstellung der oberen Spulenlagen des Antriebs.

Durch sukzessive Belackung und Trocknung lassen sich Resistschichten mit Dicken von bis zu hundert Mikrometern mit hinreichender Genauigkeit prozessieren. Eine Mehrfachbelackung mit gleichbleibender Einzelschichtdicke und jeweils konstanter Trocknungsdauer ist möglich und sinnvoll. Zum einen erleichtert dieses Vorgehen die Anpassung der Prozessparameter an unterschiedliche Schichtdicken; zum anderen entweicht das Lösungsmittel schnell und gleichmäßig, wodurch auf Heizplatten relativ

kurze Trocknungszeiten eingehalten werden können. Die intermediäre Trocknung zwischen den Belackungen sorgt für die notwendige Stabilisierung des Resists. Das Lösungsmittel entweicht dabei wegen kurzer Diffusionsstrecken aus den Einzelschichten relativ schnell. Es kann sich so schichtweise ein gleichmäßiger Lösungsmittelgehalt einstellen. Diese gleichmäßige Trocknung ist auf Grund der Resistchemie für einen gleichmäßigen Kontrast der gesamten Schicht und somit für steile Strukturflanken und hohe Auflösung besonders wichtig. Temperaturrampen und Ruhephasen dienen zudem der Spannungsreduktion, denn besonders bei hohen Aspektverhältnissen können Schichtspannungen zu Ablösungen führen (vgl. Bild 7-2). Für große Aspektverhältnisse ist ein hoher Kontrast über der gesamten Schichtdicke nötig. Dauer und Temperatur der Trocknung beeinflussen den Kontrastwert. Zur Ermittlung der idealen Wärmebehandlung wurden Kontrastkurven unter Variation der Belichtungsstärke und Anpassung der Entwicklungsdauer erfolgreich aufgenommen (vgl. Bild 7-4).

Durch die planarisierende Wirkung ergeben sich beim Belacken von Strukturen zwangsläufig unterschiedliche Schichtdicken. Aus Vertiefungen entweicht das Lösungsmittel langsamer, wodurch eine gleichmäßige Trocknung ausbleibt. Daher sollte der Resist möglichst im Bereich ebener Flächen strukturiert werden, die gleichmäßige Resistdicken und gute Kontaktverhältnisse während der Belichtung gewährleisten. Derartige Plateaus, mit SU-8 als Einbettwerkstoff, können durch CMP-Bearbeitung erreicht werden. Dieses Prinzip ist beim Mikrospiegelantrieb durch SU-8-Plateaus umgesetzt, in die die elektromagnetischen Strukturen eingebettet sind.

Als metallische Werkstoffe werden Cu als Leitermaterial und NiFe für weichmagnetische Flussführungen genutzt. Zur Fertigung hoher magnetischer Schichtdicken im Aktorsystem eignet sich insbesondere die galvanische Abscheidung, die spannungsarme NiFe-Schichten von mehreren zehn Mikrometern Dicke erlaubt. Die erzeugten Schichtstrukturen der Zusammensetzung NiFe (75/25) bieten bei derartigen Strukturhöhen einen guten Kompromiss zwischen hoher Sättigungsmagnetisierung und Permeabilität auf der einen und geringen Schichtspannungen auf der anderen Seite (vgl. Bild 7-16 und Tabelle 7-3). Die erreichten magnetischen Eigenschaften entsprechen denen in der Literatur [BON03, FÖH03, RAM03]. Zur Einstellung der Zusammensetzung ist die Pulsstromabscheidung mit Rückwärtsstrom sinnvoll. Ungleichmäßiges Aufwachsen von Strukturen durch unterschiedliche aktive Stromdichten und Variation des Stofftransports kann jedoch nicht vermieden werden. Besonders die Abscheidung der kleinflächigen Flussführungsstrukturen des Spiegelantriebs ist in dieser Hinsicht problematisch. Für eine vollständige galvanische Ausfüllung der Strukturen und einheitliche Strukturhöhen sind daher nach der Galvanik mechanische Bearbeitungsverfahren unerlässlich. Hiermit lassen sich trotz der maskierten, galvanischen Abscheidung die für den optischen Spiegel erforderlichen Schichtdickentoleranzen erreichen.

10.3 Technologiegerechte Auslegung

Aus der verwendeten Technologie ergeben sich wichtige Aspekte, die bei der Auslegung, und insbesondere beim Maskenlayout, elektromagnetischer Antriebe berücksichtigt werden müssen.

Hohe Strukturen mit geringen Zwischenräumen und hohen Aspektverhältnissen sind ideal, denn mit der Höhe der Strukturen steigt zum einen die Leistungsfähigkeit der Bauteile, zum anderen führt eine hohe Strukturdichte mit geringen Zwischenräumen zu höherer Prozesskonstanz: Bei der galvanischen Abscheidung wird eine einheitliche Stromdichteverteilung erreicht. Dadurch ist die Abscheiderate und die Materialzusammensetzung konstanter. Beim CMP bewirken gleichmäßig verteilte Auflageflächen einen einheitlichen Anpressdruck und geringere Belastungen an den Strukturkanten und somit verbesserte Bearbeitungsergebnisse [KOU03]. Enge, gleichmäßige Strukturanordnungen verbessern zudem durch einen hohen Planarisierungsgrad (vgl. Tabelle 7-4) das Belackungs- und damit auch das Strukturierungsergebnis.

Die Strukturübertragung bei hohem Schichtaufbau erfordert ausgedehnte, ebene Flächen, auf denen kritische Strukturen aufgebaut werden können. Diese Plateaus, wie sie beim Mikrospiegelantrieb realisiert sind (vgl. Bild 8-1), gewährleisten auch bei großen Strukturhöhen gleichmäßige Schichtdicken bei der Resistbelackung und eine gute Strukturübertragung. Unebenheiten und Schichtdickenschwankungen führen zwangsläufig zu unterschiedlichen Lösungsmittelgehalten nach der Trocknung. Unebenheiten in der Resistoberfläche verschlechtern zudem die Kontaktbedingungen während der Belichtung. Beides führt zu verschlechterter Strukturqualität. Bei DNQ/Novolak-Resist sind die negativen Effekte stärker ausgeprägt als bei SU-8-Resist, da eine inhomogene Trocknung im Falle des DNQ-Resists stärkeren Einfluss auf das Strukturierungsergebnis hat und die Planarisierung weniger stark ausgeprägt ist. Daher ist die Ebenheit der Ausgangsoberfläche hier besonders wichtig. Demgegenüber bietet SU-8-Resist neben guter Planarisierung auch eine große Prozesstoleranz bei der Belichtung gegenüber Schichtdickenschwankungen (vergl. Bild 7-13), wodurch er zur Einbettung mit anschließender Photostrukturierung sehr gut geeignet ist.

10.4 Prozessfolgen und Fertigung

Die entwickelten Einzeltechnologien werden für die Herstellung des elektromagnetischen Antriebs zu zweckmäßigen Prozessfolgen kombiniert. Besonders vorteilhaft ist dabei die Nutzung strukturierter SU-8-Schichten zur Einbettung und Isolation metallischer Strukturen, die zuvor in DNQ/Novolak-Resist abgeschieden wurden, wobei die SU-8-Struktur gleichzeitig als Mikroform für eine weitere Abscheidung eines anderen Werkstoffs. Die Vorteile von SU-8 liegen insbesondere in der einfachen Photostrukturierung sowie in der hohen Seitenwandqualität. Durch Maskierung mit DNQ/Novolak-Resist kann die Abscheidung in die SU-8-Mikroform je

nach Anwendung auf bestimmte Bereiche beschränkt werden. Die Strukturtreue des DNQ/Novolak-Resists ist dabei nicht relevant, da die Mikroform nur durch den SU-8-Resist definiert wird. Allenfalls die Strukturhöhe ist durch den DNQ-Resist begrenzt, der durch Belichtung und Entwicklung aus den SU-8-Strukturen entfernt werden muss: Hohe Belichtungs Dosen lassen jedoch selbst bei engen, sehr tiefen Strukturen ein rückstandsfreies Entfernen zu. Die Oberfläche der schützend in DNQ/Novolak eingebetteten Metall- und SU-8-Strukturen lässt sich nach der galvanischen Abscheidung durch chemisch-mechanische Bearbeitung besonders präzise bearbeiten. Dabei werden aus der Form herausgewachsene Strukturen sowie unebene SU-8-Bereiche planarisiert. Zum Aufbau hoher elektromagnetischer Aktorsysteme bietet dieses Vorgehen eine Reihe von Vorteilen. Die komplette Ausfüllung der Mikroform ist bei gleichzeitiger Schaffung ebener Oberflächen mit gleichmäßiger Höhenverteilung möglich. Durch selektive Ausfüllung von SU-8-Mikroformen können zudem Freiräume für das Fügen des Aktor- und des Spiegelwafers sowie für das Trennen der Chips geschaffen werden. Ein weiterer Vorzug ist, dass sowohl die SU-8-Mikroform als auch die Galvanik keine zusammenhängende Struktur bilden. Die Gefahr der Verformung des Substrates oder der Ablösung von Strukturen durch Schichtspannungen wird dadurch verringert.

Galvanische Mikrostrukturen, die durch DNQ/Novolak-Resist hergestellt wurden, können durch SU-8 permanent isoliert oder eingebettet werden. Wirkungsvoll nutzbar sind dabei die hohen Planarisierungsgrade des SU-8-Harzes (vgl. Tabelle 7-4). Bei einheitlichen Ausgangshöhen und Aspektverhältnissen sind dünne Deckschichten mit ebener Oberfläche zu erreichen. Da der vollständig polymerisierte Resist eine hohe chemische Beständigkeit und thermische Stabilität aufweist, ist eine weitergehende Prozessierung der Wafer uneingeschränkt möglich. Die Belackung und Photostrukturierung von SU-8 sowie von DNQ/Novolak auf bereits bestehenden Mikrostrukturen wird durch gleichmäßige Planarisierung verbessert. Eine gleichmäßige Schichtdicke gewährleistet gute Kontaktverhältnisse und somit gute Strukturübertragung und ermöglicht einen gleichmäßigen Schichtaufbau. Beide Photoresiste besitzen zwar gute bis exzellente planarisierende Eigenschaften, die erwünschte Schichtgleichmäßigkeit kann jedoch nur bei einheitlichen Ausgangshöhen und Aspektverhältnissen der zu belackenden bzw. einzubettenden Strukturen erreicht werden. Bei großen Strukturhöhen und kleinen SU-8-Deckschichten kann es abhängig von der Strukturverteilung trotz der planarisierenden Eigenschaften zu Stufen und Unebenheiten an der Resistoberfläche kommen. Zur Herstellung planarer Oberflächen wurde daher das mechanische Bearbeiten von SU-8 durch Lappen untersucht. Das Verfahren ist grundsätzlich verwendbar, hinterlässt jedoch Riefen, die durch stärkere Vernetzung des Resists verringert, jedoch nicht ganz vermieden werden können (vgl. Bild 7-20 und Bild 7-21). Daher wurde das Verfahren des chemisch-mechanischen Polierens geprüft. Auch hier ist die mechanische Bearbeitung von polymerisiertem SU-8-Resist möglich. Die mechanischen Abtragsraten und sowie partiell auftretende Riefenbildung lassen sich durch stärkere

Vernetzung in einem Hard Bake-Schritt reduzieren. Gleichzeitig ist durch den chemischen Abtrag und die mechanische Bearbeitung eine hochgenaue Planarisierung von in Resist eingebetteten Metallstrukturen realisierbar. Die Planarisierung durch CMP ist sowohl auf galvanische Strukturen, die in SU-8-Mikroformen abgeschieden werden, als auch auf in SU-8-Isolation eingebettete Metallstrukturen anwendbar. Es ist deshalb zweckmäßig, nach jeder vollständig gefertigten Strukturebene des Antriebs, einen Planarisierungsschritt durchzuführen. Je größer die Planarität der Waferoberfläche vor der Bearbeitung ist, desto gleichmäßiger ist auch das Ergebnis der Planarisierung. Ungleichmäßigkeiten der SU-8/Metall-Strukturen sind daher vorab durch temporäre Photolack-Einbettung auszugleichen.

Bei mehrschichtigen Systemen tritt diffuse Reflexion während der Belichtung auf, wenn in SU-8-Resist eingebettete, metallische Strukturen mit abgerundeten Oberflächen Licht in unterschiedliche Richtungen reflektieren, wie beispielsweise bei der Strukturierung von Spulenisolationen (vergl. Bild 7-28). Dies kann unerwünschte Vernetzungseffekte hervorrufen. Ein entsprechend angepasstes, unkritisches Maskenlayout oder prozesstechnische Maßnahmen, wie beispielsweise mechanische Bearbeitung zur Strukturanpassung, reduziert die Auswirkungen. Bei lichtdurchlässigen Substraten, z. B. aus Al_2O_3 -Keramik, die die Strahlung diffus reflektieren, treten diese Probleme in ähnlicher Form auf (vgl. Bild 7-15). Vernetzungseffekte lassen sich hier durch nur optisch dichte Deckschichten auf dem Substrat vermeiden. Bei der Fertigung des Antriebs wurde daher auch auf die Verwendung von Keramiksubstraten verzichtet.

Bei hohen Schichtdicken akkumulieren sich die Schichtspannungen, so dass gute Schichthaftung gegenüber dem Substrat sowie anderen Strukturen und SU-8-Schichten notwendig wird. Zur Verbesserung der Haftung ist die Belichtung mit erhöhter Dosis möglich und sinnvoll. Dies wurde durch Erhöhung der Belichtungs-dosis um den Faktor zwei bis drei verglichen mit den Herstellerangaben erreicht. Dies liegt in der erhöhten Vernetzung des Resists insbesondere auf Substratniveau begründet. Die Haftung kann weiterhin durch die richtige Wahl der Substratwerkstoffe bzw. Haftschichten erreicht werden. Bei Startschichten bietet sich deren Strukturierung an, um das Substrat oder spezielle Haftschichten als vorwiegende Kontaktfläche für SU-8-Strukturen zu nutzen. Während nämlich SU-8 auf Metallschichten schlecht haftet, hat es auf Substratschichten wie Si oder SiO_2 gute Haftung bewiesen. Die Verwendung von organischem Haftvermittler (Omni-Coat) hat sich hingegen bei permanent auf dem Substrat verbleibenden Strukturen als untauglich erwiesen, da die Beständigkeit des Haftvermittlers beim Systemaufbau gegenüber Entwicklerlösungen nicht gegeben ist. Diese Substanz ist jedoch, falls Strukturen vom Substrat gelöst werden sollen, alternativ zu metallischen Schichten als Opferschicht einsetzbar.

Mit den diskutierten Gesamtprozessen lässt sich der Antrieb des optischen Schalters entsprechend des Entwurfs aufbauen. Aus der Anzahl an Einzelprozessen und der angestrebten hohen Schichtdicken (vgl. Bild 8-2) ergeben sich naturgemäß lange Prozesszeiten. Diese sind bei magnetischen Mikroaktoren jedoch nicht zu vermeiden, insbesondere dann nicht, wenn hohe Aspektverhältnisse in mehreren Lagen erreicht werden müssen. In der Beziehung könnten durch Nutzung magnetischer Substratwerkstoffe Prozessschritte entfallen. Dies wäre im vorliegenden Anwendungsfall jedoch mit thermischen Fehlanpassungen zum Substratwerkstoff des Spiegelteils verbunden.

10.5 Systemintegration

Die Montage des optischen Schalters erfolgt durch Fügen von Spiegel- und Aktorarrays über die Abstandhalterstruktur als drittem Teil. Die Genauigkeit dieses Verfahrens bestimmt die magnetische Luftspaltlänge und somit den Widerstand des magnetischen Kreises in der Ausgangslage des Spiegels. Dieser ist nicht nur vom Abstand in der Höhe sondern auch von der lateralen Ausrichtung von Anker und Flussführung des Spulensystems abhängig. Im vorliegenden Fall muss daher nicht nur die Schichtstruktur präzise gefertigt sein, sondern auch die Waferverbindungstechnik für die Spiegelstruktur und den Abstandhalter ähnlich hohe Anforderungen an die räumliche Ausrichtung erlauben. Die Toleranz bei der Montage der Aktor- und Spiegelarrays (11x8 Systeme) sollte bei der vorgegebenen Luftspaltlänge von 29 μm (vgl. Bild 6-3) daher im Bereich weniger Mikrometer liegen. Dies erfordert eine präzise Ausrichtung der Systeme beim Zusammenfügen der Chips mit dem Abstandhalter als Verbindungsstruktur.

Eine integrierte Herstellung von Abstandhalter und Aktor könnte die präzise Ausrichtung von Anker und Polstruktur des Spulensystem im Antriebsteil erleichtern. Ein Abstandhalter aus Nickel könnte galvanisch direkt auf dem Aktorwafer abgeschieden und anschließend durch CMP planarisiert werden, ähnlich wie bei der Herstellung der in Kapitel 7 vorgestellten Ni-Strukturen (vgl. Bild 7-8). Dadurch ist eine präzise vertikale Zuordnung des Abstandhalters zur Magnetstruktur des Aktors erreichbar. Zum Verbinden von Aktor- und Spiegelchip könnte eine dünne Polymerschicht auf die Ni-Struktur aufgeschleudert und photostrukturiert werden.

10.6 Systemcharakteristik

Die entwickelte Prozesstechnologie ist notwendige Voraussetzung für den erfolgreichen Aufbau der elektromagnetischen Mikroantriebe für optische Schalter. Die Funktion der entwickelten und hergestellten elektromagnetischen Antriebe sowie der montierten Mikroschalter, bestehend aus Spiegelstruktur und Antrieb, konnte demonstriert werden. Insbesondere die Höhe der magnetischen Pole mit ihren Luftspaltgrenzflächen definiert zusammen mit der Lage des magnetischen Rückschlusses unter dem Spiegel den magnetischen Luftspalt. Die genutzte Aufbautechnik für den Aktorwafer ermöglicht eine reproduzierbare Höheneinstellung der Antriebssysteme mit einer Genauigkeit im Submikrometerbereich (Bild 7-31).

Unzureichende Genauigkeit bei der Ausrichtung des Spiegels zum Spulensystem des Aktors ist ein Grund dafür, dass der maximale Kippwinkel, der durch die Anschläge auf den Aktorpolen definiert ist, nach Bild 9-5 erst bei Strömen oberhalb des Nennstroms erreicht wird. Als weitere Ursachen kommen die Richtungsabhängigkeit der Magnetmaterialien (vgl. Bild 7-17) sowie leichte Verformung des Spiegels durch den Ni-Ring in Betracht. Diese Größen beeinflussen die magnetische Luftspalllänge, die nach (Gl. 2.8) starken Einfluss auf die erreichbare Kraft des magnetischen Antriebs hat. Die in Bild 9-3 dargestellten Spiegelverformungen auf Grund von Eigenspannungen und mangelnder thermischer Kompatibilität der Werkstoffe Nickel für den Anker und Polysilizium für den Spiegel könnten durch konstruktive Maßnahmen verringert werden: Alternativen sind die Verwendung dickerer Spiegelstrukturen oder die örtliche Trennung von Spiegelfläche und Anker. Außerdem wäre eine konkave Krümmung der Spiegeloberfläche durch den Ring für eine Bündelung der Strahlen nutzbar [SYM02]. Die thermische Untersuchung verdeutlicht durch die geringe Temperaturerhöhung bei Erregung des Spulensystems nach Bild 9-2 eine geringe Wärmeentwicklung bei guter Wärmeabfuhr. Die Bestromung führt auch bei Dauerbetrieb nicht zu überhöhter thermischer Belastung. Somit werden auch thermische Spannungen, die zur Verformung des Spiegels führen könnten, vermieden. Die geringe Erwärmung ist auf den geringen ohmschen Widerstand des Spulensystems und die relativ große Chipfläche zur Abfuhr der Verlustleistung zurückzuführen. Eine Leistungssteigerung durch größere Stromstärken bei gleichbleibenden lateralen Abmessungen des Antriebs ist durch höhere Leiterstrukturen und größere magnetische Querschnitte möglich. Die zu erwartende höhere Verlustwärme kann ausreichend schnell über das Substrat abgeleitet werden. Die Anwendung zeigt, dass über hohe Aspektverhältnisse und geringe elektrische Widerstände thermisch optimierte Mikroantriebe erreicht werden. So wird die Verlustleistung erst bei großen Antriebsleistungen und Strömen begrenzender Faktor für die Antriebskraft.

10.7 Schlussfolgerung

Der elektromagnetische Antrieb des optischen Schalters kann mit Hilfe der vorab beschriebenen weiterentwickelten Technologien aufgebaut werden. So lassen sich dynamische elektromagnetische Mikroaktoren herstellen, die hohe Schichtdicken bei großer Präzision der Oberflächen und Schichtstrukturen erfordern. Die Strukturierung hoher Aspektverhältnisse lässt auch bei begrenzten lateralen Abmessungen durch ein relativ großes Systemvolumen die Ausnutzung der Vorteile des magnetischen Antriebsprinzips zu.

Die Untersuchungen zeigen, dass bei elektromagnetischen Mikroaktoren der Einstellung der Luftspaltlänge des magnetischen Kreises besondere Bedeutung zukommt, da kleine Fertigungstoleranzen bei Dimensionen im Mikrometerbereich großen Einfluss auf die Systemeigenschaften haben. Für den Aufbau von präzise arbeitenden elektromagnetischen Systemen ist daher ein möglichst fehlertoleranter Entwurf und eine präzise Fertigungstechnik anzustreben. Weiterhin sind Schwankungen in den Materialeigenschaften zu berücksichtigen, die durch prozessgerechtes Design sowie Prozessüberwachung minimiert werden können.

Die entwickelte Aufbautechnologie für elektromagnetische Mikroaktoren gewährleistet Strukturen hoher Präzision sowohl in lateraler als auch in vertikaler Ausrichtung. Durch die planarisierende Wirkung des Einbettwerkstoffs sowie der zusätzlichen Möglichkeit der Oberflächenbearbeitung durch CMP ist eine präzise dünnschichttechnische Fertigung möglich. Es können sowohl die Höhe der einzelnen Systemebenen als auch die Gesamthöhe präzise eingestellt werden. Somit sind magnetische Luftspaltgeometrien hoher Genauigkeit erreichbar. Eine vertikale Ausrichtung des magnetischen Flusses bietet dabei die freie Gestaltung des magnetischen Querschnittes im Arbeitsluftspalt, der rein über die lateralen Abmessungen und nicht über die Schichtdicke der Magnetik definiert ist.

Die integrierte Fertigung von Systemen und Komponenten sowie die Montage zu kompletten aktiven Mikrosystemen im Nutzen hat sich in dieser Arbeit als vorteilhaft erwiesen. Bei der Montage integriert gefertigter Komponenten zu Aktorsystemen ist die Einhaltung der geforderten Präzision durch Montagehilfen und Kontrollstrukturen sinnvoll.

Die Nutzung aktiver elektromagnetischer Mikrosysteme ist durch ihre relativ geringen Kräfte eingeschränkt, insbesondere, da eine integrierte Fertigung größerer Mikrosysteme nicht wirtschaftlich ist. Die Optik mit ihren geringen Kraftanforderungen stellt hingegen ein sinnvolles Anwendungsfeld für integrierte Mikroaktoren dar.

10.8 Ausblick

Das Anwendungsbeispiel des optischen Schalters zeigt, dass das elektromagnetische Prinzip für Mikroschalter einsetzbar ist [GAT03a]. Durch zusätzliche Integration hartmagnetischer Schichten in den Elektromagneten wäre ein stromloses Halten des Spiegels in verkippter Stellung zu erreichen. Durch diese Art von Elektromagnet mit magnetischer Erregung wäre der elektrische Energiebedarf auf den Schaltvorgang beschränkt. Die hierfür notwendige dünnfilmtechnische Herstellung hartmagnetischer Mikrostrukturen [BUD04] sowie deren Integration [KOH02c] ist möglich.

Die entwickelte Technologie ist über die vorgestellte Anwendung hinaus ideal für den Aufbau elektromagnetischer Linearmotoren (vgl. Bild 10-1) geeignet, insbesondere, wenn diese geringere Luftspaltabmessungen erfordern. Der zwar relativ komplexe und aufwendige elektromagnetische Aufbau bietet gerade bei größeren Antrieben durch die Reichweite und Größe magnetischer Kräfte Vorteile. So können Reluktanzmotoren in linearer Bauform mit Hilfe der vorgestellten Technologien umgesetzt werden [KOH03, KOH04]. Auch Stellantriebe sind realisierbar, die an Stelle von Spiralspulen Helixspulen nutzen [SEI04]. Mit geeigneten Prozessfolgen sind hierfür mittels SU-8 Mikroformen die notwendigen, hohen magnetischen Strukturen realisierbar. Im Bereich des Luftspaltes können diese Magnetstrukturen durch Opferschichttechnik von der sie umgebenden Mikroform befreit werden (vergl. Bild 7-35).

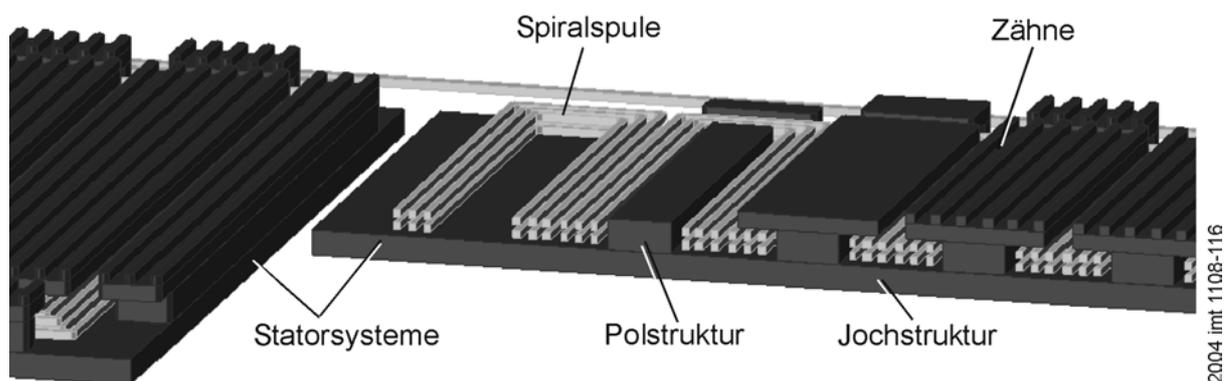


Bild 10-1: Schematische Darstellung eines linearen Reluktanzschrittmotors [SEI04]

Geregelte Antriebe oder aktive Lagerungen sind ebenfalls denkbar. Hierzu ist jedoch passende Sensorik notwendig. Positions- bzw. Abstandsregelung ist unter Verwendung induktiver oder optischer Wegsensorik möglich. Eine anspruchsvolle Anwendung wäre eine aktiv geregelte elektromagnetische Lagerung mit minimalen Reibungskräften. Durch integrierte Sensorik sowie präzise Fertigungstechnik sind enge magnetische Luftspalte und somit relative große Tragkräfte erreichbar.

11 Zusammenfassung

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die Entwicklung sowie die Herstellung elektromagnetischer Schalter mit den untersuchten Technologien möglich und sinnvoll ist. Mit der entwickelten Technologie konnten elektromagnetisch angetriebene optische Schalter erfolgreich aufgebaut werden. Die Erkenntnisse aus der Prozessentwicklung sowie der Charakterisierung des Systemverhaltens sind auf die Entwicklung und Fertigung anderer aktiver elektromagnetischer Mikrosysteme übertragbar.

Ausgehend vom Gesamtkonzept des optischen Schalters wurde ein elektromagnetischer Antrieb für einen Polysilizium-Kippspiegel entwickelt. Der Entwurf sieht ein Spulensystem auf der Antriebsseite sowie einen Ni-Ring als magnetischen Rückschluss auf der Spiegelrückseite vor. Die Umsetzung des Antriebsentwurfs erfolgt auf Grundlage von Technologieentwicklungen zum Aufbau elektromagnetischer Mikroaktoren. Es wurden die Tiefenlithographie und die Galvanoformung als Basistechnologien zur Erzeugung metallischer Mikrostrukturen weiterentwickelt. Diese Techniken wurden mit Verfahren zur Einbettung und Planarisierung von Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen und Schichtdicken kombiniert. Anhand der Untersuchungsergebnisse ließen sich Aufbaukonzepte entwerfen, die elektromagnetische Aktorsysteme mit hoher lateraler und vertikaler Präzision erlauben.

Die Untersuchung der Prozesse der Galvanoformung in Hinblick auf hohe Schichtdicken und Strukturen sowie deren Anwendung auf elektromagnetische Systeme zeigen, dass sich die UV-Tiefenlithographie mit DNQ/Novolak Photoresist in Schichtdicken von 90 µm und mehr bei Aspektverhältnissen von bis zu 10:1 zur Galvanoformung in mehrschichtigen Systemen eignet. Der epoxidbasierte SU-8-Resist erreicht sogar noch höhere Schichtdicken und Aspektverhältnisse. Da dieser Resist nach Vernetzung unlöslich und thermisch stabil ist, verbleibt die Mikroform als permanente Struktur auf dem Substrat.

Die Eigenschaften beider Resiste können in geeigneter Weise zum Aufbau elektromagnetischer Mikroaktoren kombiniert werden. Magnetische Flussführungen und die sich um sie windenden Leiterstrukturen müssen voneinander isoliert werden. Der planare, schichtweise Aufbauprozess erfordert zudem die Ausfüllung von Zwischenräumen und die Planarisierung von Oberflächen. Als günstig für diese Anwendung erweist sich SU-8-Resist, der zudem in hohen Schichtdicken mit senkrechten Seitenflächen strukturiert werden kann. Die SU-8-Isolationsschicht lässt sich bei entsprechender Prozessfolge zugleich als Mikroform nutzen. Eine selektive galvanische Ausfüllung der Isolationsstruktur ist durch eine temporäre Maskierung mit einer zusätzlichen Resistschicht möglich. Hierzu eignet sich der DNQ/Novolak-Resist. Eine typische Anforderung beim schichtweisen Aufbau elektromagnetischer Mikroaktoren ist, Strukturen unterschiedlichen Materials isoliert nebeneinander in einer Ebene aufzubauen. Hierzu wird das beschriebene Vorgehen angewandt. Die

Kombination der Funktionen Isolation und Mikroform in einem strukturierten Photopolymer mit senkrechten Seitenflächen erlaubt bei hohen Schichtdicken einen kompakten Aufbau. Dies wird dann evident, wenn die Grundfläche des elektromagnetisch aktiven Teils, wie im Fall des optischen Schalters, beschränkt ist und doch hohe Kräfte erreicht werden sollen.

Die Strukturierung des SU-8-Isolationsmaterials im Schichtverbund ist durch Variationen in der Schichtdicke, Reflexionen durch Strukturen und Schichtspannungen bei unzureichender Schichthaftung erschwert. Durch Verwendung eines Spektralfilters und erhöhte Belichtungs Dosen können jedoch unabhängig von der vorliegenden Schichtdicke des Photoresists auf dem gesamten Substrat gute Strukturqualität und Haftung erreicht werden.

Die untersuchte Einbettung und Planarisierung von Strukturen mit dem SU-8-Photopolymer ist in vielen Fällen für den lithographischen Aufbau von Mikroaktorstrukturen ausreichend. Werden jedoch an die vertikale Genauigkeit der Strukturen ähnlich hohe Anforderungen gestellt wie an die lateralen, so sind zusätzlich Planarisierungsschritte erforderlich. Weder die Galvanik noch das Aufschleudern von Photoresist erzeugt über das Substrat hinweg die notwendige Schichtdickenkonstanz. Insbesondere bei hohen Schichtdicken verursachen Unterschiede in den lateralen Abmessungen bei beiden Prozessen Schichtdickenvariationen. Bei der Galvanik führen sphärischer Stofftransport sowie strukturbedingte, vergrößerte aktive Stromdichten zu erhöhten Abscheideraten. Beim Polymerwerkstoff verringert sich der Grad der Planarisierung mit dem Aspektverhältnis der eingebetteten Strukturen. Für eine präzise Schichtdickenkontrolle wird daher die mechanische Bearbeitung von Strukturen und Einbettwerkstoff zur Herstellung ebener Oberflächen erprobt. Für die erfolgreiche Planarisierung ist eine angemessene Vorbereitung der Strukturen notwendig. Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen sowie das relativ weiche Einbettmaterial müssen hinreichend geschützt werden. Hierfür hat sich die Verwendung von dicken Deckschichten aus Photoresist als sinnvoll erwiesen, die nach der Bearbeitung wieder entfernt werden. Die thermische Aushärtung des SU-8-Resists ist zur Reduzierung der Abtragsrate gegenüber metallischen Werkstoffen sinnvoll. Durch Bearbeitung mittels CMP lassen sich eine Planarität von Metall- und Polymerstrukturen von unter einem Mikrometer erzielen.

Die entwickelte Technologie fließt in die Ausgestaltung von Gesamtprozessen zur integrierten Fertigung des Antriebssystems ein. Die Genauigkeitsanforderungen an den elektromagnetischen Teil des optischen Schalters können mit den entwickelten Prozessen erfüllt werden, wobei die für den Schichtaufbau notwendigen Prozessschritte entsprechend des elektromagnetischen Antriebsprinzips, verglichen mit kapazitiven Aktorprinzipien, in Anzahl und Umfang erhöht sind. Auch die Integration von Magnet- und Siliziumstrukturen ist auf Grund von Materialspannungen und sich daraus ergebenden Verformungen mitunter problematisch.

Die Charakterisierung des Gesamtsystems zeigt, dass ein Verkappen des Spiegels bei einem Spulenstrom von 80 mA erreicht wird. Der maximale Kippwinkel stellt sich jedoch erst bei höheren Strömen ein. Dies ist auf eine ungenaue Justierung bei der Montage des Spiegel mit Ni-Ring zum Aktorsystem zurückzuführen. Außerdem kommt es durch den Ni-Ring zu einer leichten Verformung des Spiegels. Beides hat durch einen veränderten Luftspalt zwischen Nickelring und Aktoroberfläche Einfluss auf den Kippwinkel des Spiegels bei Bestromung. Die Verlustleistung des Schalters liegt bei dauerhafter Bestromung bei nur ca. 6 mW. Daher beträgt auch die Erwärmung nur wenige Kelvin.

Abschließend kann festgestellt werden, dass mit den Erkenntnissen aus der vorliegenden Arbeit der elektromagnetische Antrieb des optischen Spiegels ausgelegt und technologisch umgesetzt werden kann.

12 Literatur

- [ACO95] Acosta, R.E. et al.: Integrated Variable Reluctance Magnetic Mini-Motor. Electrochemical Society Proceedings, Vol. 95, No. 18 (1995) S. 508-520.
- [AHN93a] Ahn, C.H., Kim, Y.J., Allen, M.G.: A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Wrapped Coils. IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, No. 4 (1993) S. 165-173.
- [AHN93b] Ahn, C., Allen, M.G.: A Fully Integrated Surface Micromachined Magnetic Microactuator with a Multilevel Meander Magnetic Core. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, No. 1, March (1993) S. 15-22.
- [AHN93c] Ahn, C., Allen, M.G.: Planar Micromachined Spiral Inductor for Integrated Magnetic Microactuator Applications. J. Micromech. Microeng., 3 (1993) S. 37-44.
- [AHN98] Ahn, C.H., Allen, M.G.: Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6 (1998) S. 866-876.
- [AKS00] Aksyuk, V.A. et al.: Lucent MicrostarTM Micromirror Array Technology for Large Optical Crossconnects. MOEMS and Miniaturized Systems, Proc. SPIE, Vol. 4178 (2000) S. 320-324.
- [AKS02] Aksyuk, V.A. et al.: 238x238 Surface Micromachined Optical Crossconnect With 2dB Maximum Loss. Optical Fiber Communications Conference OFC 2002, Anaheim, California, Post Deadline Paper, March 17-22 (2002).
- [AND93] Andricacos, P.C., Romankiw, L.T.: Magnetically Soft Materials in Data Storage: Their Properties and Electrochemistry, in *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, Vol. 3 (1993) S. 227-321.
- [AND99] Andricacos, P.C.: Copper On-Chip Interconnections – A Breakthrough in Electrodeposition to Make Better Chips, The Electrochemical Society *Interface* (Spring 1999) S. 32-37.
- [ARX97] Arx, J.A. von, Najafi, K.: On-Chip Coils with Integrated Cores for Remote Inductive Powering of Integrated Microsystems. Proc. Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '97, Chicago, USA, June 16-19 (1997) S. 999-1002.
- [BAI91] Bair, H.; Pryde, C.: Curing and Glass Transition Behavior of a Benzocyclobutene Polymer, Proc. AN-TEC '91 (1991) S. 1550-1553.
- [BAK99] Baklanov, M.R. et al.: Effects of Oxygen and Fluorine on the Dry Etch Characteristics of Organic low-k Dielectrics. J. Vac. Sci. Technol. B 17(2), Mar/Apr, (1999) S. 372-377.

- [BEC86] Becker, E.W. et al.: Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoforming and Plastic Forming (LIGA Process). *Microelectronic Engineering*, 4 (1986) S. 35.
- [BEH98] Behin, B., Lau, K.Y., Muller, R.S.: Magnetically Actuated Micromirrors for Fiber-optic Switching. *Tech. Dig. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, June 8-11 (1998).
- [BER99] Bertsch, A., Lorenz, H., Renaud, P.: Combining Microstereolithography and Thick Resist UV Lithography for 3D Microfabrication. *Sensors and Actuators*, 73 (1999) S. 14-23.
- [BHA95] Bhardwaj, J.K., Ashraf, H.: Advanced Silicon Etching Using High Density Plasmas, *Proc. SPIE Micromachining and Microfabrication Process Technology*, Vol. 2639 (1995) S. 224-233.
- [BHA97] Bhardwaj, J., Ashraf, H., McQuarrie, A.: Dry Silicon Etching for MEMS, *Symposium on Microstructures and Microfabricated Systems, Annual Meeting of the Electrochemical Society*, Montreal, Quebec, Canada, May 4-9 (1997).
- [BHA00] Bhansali, S. et al.: Prototype Feedback-controlled Bidirectional Actuation System for MEMS Applications. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9., No. 2 (2000) S. 245-251.
- [BOG00] Bogdanov, A.L., Peredkov, S.S.: Use of SU-8 Photoresist for Very High Aspect Ratio X-ray Lithography. *Microelectronic Engineering*, 53 (2000) S. 493-496.
- [BON03] Bonhôte, C. et al.: Electroplated High Moment NiCoFe. *Magnetic Materials, Processes, and Devices VII and Electrodeposition of Alloys, Proceedings of the International Symposia, Electrochemical Society Proceedings Volume 2002-27* (2003) S. 254-261.
- [BOT03] Botthof, A., Pelka, J.: *Mikrosystemtechnik – Zukunftsszenarien*. Springer-Verlag (2003).
- [BOZ93] Bozorth, R.M.: *Ferromagnetism*. New York IEEE Press (1993).
- [BRI01] O'Brien, J. et al.: Advanced Photoresist Technologies for Microsystems. *J. Micromech. Microeng.*, 11 (2001) S. 353-358.
- [BUD04] Budde, T., Gatzert, H.H.: Magnetic Properties of an SmCo/NiFe System for Magnetic Microactuators, *J. of Magnetism and Magn. Mat.*, Volumes 272-276, Part 3, May 2004, S. 2027-2028.
- [BUS92] Busch-Vishniac, I.J.: The Case for Magnetically Driven Microactuators, *Sensors and Actuators A* 33 (1992) S. 207-220.

- [CHA00] Chang, H.-K. and Kim, Y.-K.: UV-LIGA Process for High Aspect Ratio Structure Using Stress Barrier and C-shaped Etch Hole. *Sensors and Actuators A*, 84 (2000) S. 342-350.
- [CHA01] Chang, C.W. et al.: A Magnetically Actuated Scanner for Intravascular Ultrasound Imaging. Proc. 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, MEMS 23914, New York (2001).
- [CHI00] Chiang, Y.-M. et al.: SU-8 Processing on a Variety of Substrates, *Material Research Society, Mat. Res. Symp. Proc.*, Vol. 605 (2000)-
- [CHO00] Chowdhury, S. et al.: Acoustic and Magnetic MEMS Components for a Hearing Aid Instrument. Proc. of SPIE, Vol. 4019 (2000).
- [CHO02] Cho, I.-J. et al.: A Low-Voltage Two-Axis Electromagnetically Actuated Micromirror with Bulk Silicon Mirror Plates and Torsion Bars. Proc. 15th IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (2002) S. 540 - 543.
- [CHU98] Chung, S.-J., Hein, H., Schulz, J.: Strukturprofilsimulation dicker Schichten in der optischen Lithographie mit DNQ-Novolak-basierenden Photoresists. *Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6111* (1998).
- [CHU01] Chu, P.B. et al.: MOEMS - Enabling Technologies for Large Optical Cross Connects. MOEMS and Miniaturized Systems II, Proc. SPIE, Vol. 4561 (2001) S. 55-65.
- [CLA97] Clariant AZ9200 Photoresist - High Resolution Thick Resist, Product Data Sheet (1997).
- [CON99] Conédéra, V., Le Goff, B., Fabre, N.: Potentialities of a New Positive Photoresist for the Realization of Thick Moulds. *J. Micromech. Microeng.* 9 (1999) S. 173-175.
- [CUG03] Cugat, O.: Permanent Magnets for MAGMAS (MAGnetic Micro-Actuators & Systems), in *Microsystems Technology*, Boussey, J. (Ed.) Ch. 8, Kogan Page Limited, London (2003) S. 195-212.
- [CUL03] Cullmann, E.: MA6 LH350 HBO350W/S. Datenblatt, Süss MicroTec, April 2003 (persönliches Gespräch)
- [DAM93] Dammel, R.: Diazonaphthoquinone-based Resists. SPIE Optical Engineering Press, Volume TT 11, Bellingham, Washington, USA (1993).
- [DAN00] Daniel, J.H., et al.: Large Area MEMS Fabrication with Thick SU-8 Photoresist Applied to an X-ray Image Sensor Array. *Micromachining and Microfabrication Process Technology VI*, Proc. SPIE, Vol. 4174 (2000) S. 40-48.
- [DEG94] Degussa AG: Copper Plating Solution 837. Product Data Sheet (1994).

- [DEL01] Dellmann, L. et al.: 4x4 Matrix Switch Based on MEMS Switches and Integrated Waveguides. Proc. 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '01 / Eurosensors XV, Munich, Germany, June 10-14 (2001) S. 1332-1343.
- [DEW00] Dewa, A.S. et al.: Development of a Silicon Two-axis Micromirror for an optical Cross-connect. Tech. Dig. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 4-8 (2000) S. 93-96.
- [DIB00] DiBari, G.A.: Nickel Alloys, Cobalt, and Cobalt Alloys, in: Schlesinger, M., Paunovic, M.: Modern Electroplating, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc. (2000) S. 555-583.
- [DOW97] The Dow Chemical Company: Processing Procedures for Photosensitive Cyclotene Advanced Electronics Resins (Photo-BCB), Processing Procedures. (1997).
- [EDW00] Edwards, T.L. et al.: Rapid Tooling using SU-8 for Injection Molding Microfluidic Components. Proc. SPIE, Vol. 4177 (2000) S. 82-89.
- [EYR98] Eyre, B., Blosiu, J., and Wiberg, D.: Taguchi Optimization for the Processing of EPON SU-8 Resist. Proc. MEMS 98, The 11th Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, January 25-29 (1998) S. 218-222.
- [FIS95] Fischer, R.: Elektrische Maschinen. 9. Auflage, Hanser-Verlag (1995).
- [FIS01] Fisher, K. et al.: A Latching, Bi-stable Optical Fiber Switch Combining LIGA Technology with Micromachined Permanent Magnets. Proc. 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators Transducers '01, Eurosensors XV, Munich, Germany, June 10-14 (2001) S. 1340-1343.
- [FLU96] Fluitman, J.H.J., Guckel, H.: Micro Actuator Principles. Proc. Actuator '96, 5th Int. Conf. on New Actuators, 26-28 June 1996, Bremen, Germany (1996) S. 23-28.
- [FÖH01] Föhse, M, Kohlmeier, T., Gatzel, H.H.: Thinfilm Technologies to Fabricate a Linear Microactuator. Sensors and Actuators A91 (2001) S. 145-149.
- [FÖH03] Föhse, M., Gatzel, H.H.: Optimizing the Magnetic Properties of Electroplated Permalloy for Flux Guides in Micromotors. Magnetic Materials, Processes, and Devices VII and Electrodeposition of Alloys, Proceedings of the International Symposia, Electrochemical Society Proceedings Volume 2002-27 (2003) S. 125-136.
- [FUJ97] Fujita, H., Toshiyoshi, H.: Micro-optical Devices, in *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication*. Rai-Choudhury, P. (Ed.) Vol. 2, Ch. 8, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (1997) S. 299-378.

- [FUJ98] Fujita, H.: Microactuators and Micromachines, Proc. of the IEEE, Vol. 86, No. 8, (1998) S. 1721-1732.
- [FUL98] Fullin, E. et al.: A New Basic Technology for Magnetic Micro-Actuators. 12th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Jan. 25-29 (1998) S. 143-147.
- [FRA03] Frank, T.: Untersuchungen zum Einsatz elektromagnetischer Mikroaktoren, Dissertation, Technische Universität Ilmenau (2003).
- [FRE82] Frechet, J.M.J., Ito, H., Willson, C.G.: Sensitive Deep UV Resists Incorporating Chemical Amplification, Proc. Microcircuit Engineering, Grenoble, France, October 5-8 (1982) S. 280.
- [FRE99] French, P. J.: Integration of MEMS Devices (Invited Paper). Conf. On Design, Characterization, and Packaging for MEMS and Microelectronics, Queensland, October 1999, SPIE Vol. 3893 (1999) S. 59-67.
- [GAR01] Gardner, J.W., Varadan, V.K., Awadelkarim, O.O.: Microsensors, MEMS and Smart Devices, John Wiley & Sons Ltd (2001).
- [GAT96] Gatzen, H.H., Maetzig J.C.: Nanogrinding. Precision Engineering, Journal of the ASPE, Vol. 21, No. 2/3 (1996) S. 134-139.
- [GAT98] Gatzen, H. H., Rissing, L.H., Zielke S.A.: Inductive Microtransformer Exploiting the Magnetoelastic Effect. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 4 (1998) S. 1378-1380.
- [GAT00] Gatzen, H.H. et al.: A Novel Variable Reluctance Micromotor for Linear Actuation. Proc. Actuator 2000, Bremen, Germany (2000) S. 363-366.
- [GAT02] Gatzen, H.H., Morsbach, C., Karyazin, A.: High Precision Machining of a Longitudinal Bearing for a Linear Microactuator, Proc. Euspen Intern. Conf., Eindhoven, The Netherlands (2002) S. 325.
- [GAT03a] Gatzen, H.H. et al.: An Electromagnetically Actuated Bi-stable MEMS Optical Microswitch. Proc. 12th Int. Conf. On Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers '03, June 8-12, Boston, MA, USA (2003) S. 1514-1517.
- [GAT03b] Gatzen, H.H.: Advances in European Magnetic MEMS Technology. Magnetic Materials, Processes, and Devices VII and Electrodeposition of Alloys, Proceedings of the International Symposia, Electrochemical Society Proceedings Volume 2002-27 (2003) S. 90-108.
- [GER97] Gerlach, G., Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik. Hanser-Verlag, (1997).
- [GHA99] Ghantasala, M.K., Sood, D.K., Zmood, R.B.: A Micro Magnetic Bearing for Friction Minimization in Micromachines. Proc. SPIE Conf. on Electronics and Structures for MEMS, SPIE Vol. 3891 (1999).

- [GHA00] Ghantasala, M.K. et al.: Design and Fabrication of a Micro Magnetic Bearing. *Smart Mater. Struct.* 9 (2000) S. 235-240.
- [GOB93] Gobet, J. et al.: Electrodeposition of 3D Microstructures on Silicon. *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 3 (1993) S. 123-130.
- [GOD02] Goodmann, P.: A Guide to Microelectromechanical Systems. ERA report, ISBN 0-7008-0754-3 (2002).
- [GUC93] Guckel, H. et al.: Design and Testing of Planar Magnetic Micromotors Fabricated by Deep X-ray Lithography and Electroplating. *Proc. Transducers '93, Yokohama, Japan*; (1993) S. 76-79.
- [GUC96] Guckel, H. et al.: Electromagnetic Linear Actuators with Inductive Position Sensing. *Sensors and Actuators, A* (1996) S. 386-391.
- [GUC98a] Guckel, H.: High-Aspect-Ratio Micromachining Via Deep X-ray Lithography, *Proc. of the IEEE*, Vol. 86, No. 8 (1998) S. 1586-1593.
- [GUC98b] Guckel, H., Fischer, K., Stiers, E.: Closed Loop Controlled, large Throw, Magnetic Linear Microactuator with 1000 μm Structural Height, *IEEE* (1998) S. 414-418.
- [GUE97] Guerin, L.J. et al.: Simple and Low Cost Fabrication of Embedded Microchannels by using New Thick-film photoplastic. 9th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, *Transducers '97, Chicago, Vol. 2* (1997) S. 1419-1421.
- [GUE98] Guérin, L.J. et al.: High Aspect Ratio Planar Coils Embedded in SU8 Photoepoxy for MEMS Applications, *Micro-Technologies, Proc. Eurosensors XII, 13-16 September (1998)* S. 11-14.
- [HEI98] Heimann, B., Gerth, W., Popp, K.: *Mechatronik*. Carl Hanser Verlag, Leipzig (1998).
- [HOR95] Hornbeck, L.J.: Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence For a Bright Future. *Proc. SPIE Micromachining and Microfabrication '95, Austin, Texas, October 24, Vol. 2639* (1995) p. 2.
- [HOU02] L. Houlet et al.: Movable Vertical Mirror Arrays for Optical Microswitch Matrixes and Their Electro-magnetic Actuation. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum electronics*, 8 (2002) S. 58-63.
- [JEH99] Jehn, A. et al.: *Galvanische Schichten*, Expert Verlag (1999).
- [JUD94] Judy, J.W. et al.: Magnetic Microactuation of Polysilicon Flexure Structures. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, June 13-16 (1994)* S. 43-48.

- [JUD96] Judy, J.W., Muller, R.S.: Batch-Fabricated, Addressable, Magnetically Actuated Microstructures. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, June 2-6 (1996) S. 187-190.
- [JOU02] Jourain, A. et al.: Investigations of the Hermeticity of BCB-Sealed Cavities for Housing (RF-)MEMS Devices. Proc. 15th IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (2002) S. 677-680.
- [KAL95] Kallenbach, E. et al.: Magnetische Mikroaktuatoren - Entwicklungsstand und Perspektiven. 15. Int. Kolloquium Feinwerktechnik, Mainz, 25./26. September (1995) S. 120-127.
- [KAL00] Kallenbach, E. et al.: State and Trends in the Development of Magnetic Microactuators. Proc. MICRO.tec 2000, Vol. 2 (2000) S. 589-591.
- [KÄM96] Kämper, K.P. et al.: Electromagnetic Permanent Magnet Micromotor with Integrated Micro Gear Box. Proc. Actuator 96, 5th Int. Conf. On New Actuators, Bremen, Germany, June 26-28 (1996) S. 429-432.
- [KLÖ98] Klöpzig, M.: A Novel Linear Micromachined Electromagnetic Actuator Including Magnetic Suspension, 6th International Conference on New Actuators, Actuator '98, Bremen, Germany, June 17-19 (1998) S. 548-551.
- [KÖH99] Köhler, M.: Etching in Microsystem Technology, WILEY-VCH-Verlag (1999).
- [KOH02a] Kohlmeier, T., Gatzen, H.H.: Challenges in Using Photosensitive Embedding Material to Planarize Multilayer Coils for Actuator Systems, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 242-245 (2002) S. 1149-1152.
- [KOH02b] Kohlmeier, T. et al.: Application of UV Depth Lithography and 3D-Microforming for High Aspect Ratio Electromagnetic Microactuator Components. Microsystem Technologies 8 4/5 (2002) S. 304-307.
- [KOH02c] Kohlmeier, T., Budde, T., Gatzen, H.H.: Electromagnetic Bearing System for Integration in a Linear Microactuator, Proc. 16th European Conference on Solid-State Transducers, Eurosensors XVI, Prague, Czech Republic, September 15-18 (2002) S. 1217-1220.
- [KOH03] Kohlmeier, T., Gatzen, H.H.: Ni Electroplating in SU-8 Micromolds for Fabricating Self Supporting Microstructures. Magnetic Materials, Processes, and Devices VII and Electrodeposition of Alloys, Proceedings of the International Symposia, Electrochemical Society Proceedings Volume 2002-27 (2003) S. 137-148.
- [KOH04] Kohlmeier, T. et al.: An Investigation on Technologies to Fabricate Microcoils for Miniaturized Actuator Systems, Microsystem Technologies 10 (2004) S. 175-181.

- [KOU03] Kourouklis, C., Kohlmeier, T, Gatzel, H.H.: The Application of Chemical-Mechanical Polishing for Planarizing a SU-8/Permalloy Combination Used in MEMS Devices, Sensors and Actuators A, 106 (2003) S. 268-271.
- [KRI99] Kripper, P., Mohr, J., Saile, V.: Electromagnetically Driven Microchopper for Integration into Microspectrometers Based on the LIGA Technology. SPIE Conf. On Miniaturized Systems with Micro-Optics and MEMS, Santa Clara, SPIE Vol. 3878 (1999) S. 144-154.
- [KUA00] Kuan, N., Liepmann, D., Pisano, A.P.: Fabrication and Packaging of Microfluidic Devices with SU-8 Epoxy. Micro-electro-mechanical Systems (MEMS), MEMS-Vol. 2, ASME (2000) S. 591-594.
- [KUM90] Kumar, S., Cho, D.: A Proposal for Electrical Levitating Micromotors. Sensors & Actuators A24, 1990.
- [LAB95a] LaBianca, N., und Gelorme, J.D.: High Aspect Ratio Resist for Thick Film Applications. Proc. SPIE Vol. 2438 (1995) S. 846-849.
- [LAB95b] LaBianca, N.C. et al.: High Aspect Ratio Optical Resist Chemistry for MEMS Applications. Electrochemical Society Proc., Vol. 95-18 (1995) S. 386-396.
- [LEE95] Lee, K.Y. et al.: Micromachining Applications of a High Resolution Ultrathick Photoresist. J. Vac. Sci. Technol., B 13 (1995) S. 3012-3016.
- [LEE97] Lee, J. et al.: Planarization Techniques for Vertically Integrated Metallic MEMS on Silicon Foundry Circuits. J. Micromech. Microeng., Vol. 7 (1997) S. 44-54.
- [LEY95] Leyendecker et al.: Untersuchungen zum Stofftransport bei der Galvanoformung von LIGA-Strukturen. Dissertation, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5594 (1995).
- [LI99] Li, X. et al: High-Aspect-Ratio Electroplated Structures with 2 μm Beamwidth. Microelectromechanical Systems (MEMS) - 1999, ASME, MEMS-Vol. 1 (1999) S. 25-30.
- [LIA99] Liakopoulos, T. M., Ahn, C. H.: A Micro-fluxgate Magnetic Sensor using Micro-machined Planar Solenoid Coils, Sensors and Actuators A, Vol. 77 (1999) S. 66-72.
- [LIN00] Ling, Z., Lian, K., Jian, L.: Improved Patterning Quality of SU-8 Microstructures by Optimizing the Exposure Parameters, Proc. SPIE Vol. 3999 (2000) S. 1019-1027.
- [LIN01] Lin, H.-Y. et al.: High Resolution Micromachined Scanning Mirror, Proc. 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '01 / Eurosensors XV, Munich, Germany, June 10-14 (2001) S. 1310-1313.

- [LIU01] Liu, S. et al.: A Micromachined Optical Switch with a Vertical SU-8 Mirror, Proc. SPIE Vol. 4601 (2001) S. 354-359.
- [LOE95] Löchel, B. et al.: Micro Coils Fabricated by UV Depth Lithography and Galvanoplatin. The 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '95 / Eurosensors IX, Stockholm, June 25-29 (1995) S. 264-267.
- [LOE98] Loechel, B. et al.: Influence of Resist Baking on Pattern Quality of Thick Photoresist. Karl Süss Report, Vol. 11 (1998) S. 5-13.
- [LOE00] Loechel, B.: Thick-layer Resists for Surface Micromachining, J. Micromech. Microeng., 10 (2000) S. 108-115.
- [LOR97] Lorenz, H. et al.: SU-8: A Low-cost Negative Resist for MEMS, J. Micromech. Microeng., Vol. 7 (1997) S. 121-124.
- [LOR98a] Lorenz, H. et al.: High-Aspect-Ratio, Ultrathick, Negative-tone Near-UV Photoresist and its Applications for MEMS, Sensors and Actuators A, Vol. 70 (1998) S. 33-39.
- [LOR98b] Lorenz, H., Laudon, M., Renaud, P.: Mechanical Characterization of a New High-Aspect-Ratio Near UV-Photoresist, Microelectronic Engineering, Vol. 41/42 (1998) S. 371-374.
- [LOR98c] Lorenz, H. et al.: Fabrication of Photoplastic High-aspect Ratio Microparts and Micromolds using SU-8 UV Resist, Microsystem Technologies 4 (1998) S. 143-146.
- [LUT99] Lutwyche, M. et al: Planar Micromagnetic x/y/z Scanner with Five Degrees of Free-dom. Magnetic Materials, Processes, and Devices: Applications to Storage and Microelectromechanical Systems (MEMS), Romankiw, L.T.; Krongelb, S.; Ahn, C.H.; Eds., Vol. 98-20, The Electrochemical Society, Pennington, NJ (1999) S. 423-433.
- [MAD02] Madou, M.J.: Fundamentals of Microfabrication, Second Edition, CRC Press, New York (2002).
- [MCC01] MicroChem Corp.: NANOTM SU-8 Negative Tone Photoresists-Formulations 2-25, Product Data Sheet (2001).
- [MCC02] MicroChem Corp.: OmniCoat for Stripping SU-8 and SU-8 2000 Series Photoresists, Processing Guidelines (2002).
- [MEH93] Mehdizadeh, S. et al.: The Influence of Lithographic Patterning on Current Distribution in Electrodeposition: Experimental Study and Mass-Transfer Effects, J. Electrochem. Soc., Vol. 140, No. 12, December (1993) S. 3497-3505.

- [MIC98] Michel, F.: Electromagnetic Driving Units for Complex Microrobotic Systems. SPIE Conference on Microrobotics and Micromanipulation, Boston (1998) S. 93-101.
- [MOR88] Moreau, W.A.: Semiconductor Lithography - Principles, Practices, and Materials, Plenum Press, N.Y. (1988).
- [MUL00] Muller, R.S.: MEMS: Quo Vadis in Century XXI. Microelectronic Engineering 53 (2000) S. 47-54.
- [NEA97] Neagu, C.R.: Characterization of a Planar Microcoil for Implantable Microsystems. Sensors and Actuators. A., Vol. 62 (1997) S. 599-611.
- [NIE99] Nienhaus, M. et al.: Design and Realization of a Penny-shaped Micro-motor. Symposium on Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS, Paris, France, SPIE Vol. 3680 (1999) S. 592-600.
- [OHN96] Ohnstein, T.R. et al.: Tunable IR Filters with Integral Electromagnetic Actuators, Proc. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, June 2-6 (1996) S. 196-199.
- [OHN98] Ohnmacht, M., Hahn, D., Büttgenbach, S.: A Double Layer, Double-Coil Proximity Sensor Fabricated by UV Depth Lithography. Proc. Eurosensors XII, Southampton, Vol. 1 (1998) S. 15-18.
- [OHN00] Ohnmacht, M., Seidemann, V., Büttgenbach, S.: Microcoils and Microrelays - an Optimized Multilayer Fabrication Process, Sensors and Actuators A, Vol. 83, No. 1 (2000) S. 124-129.
- [OHN02] Ohnmacht, M.: Mikrotechnische Herstellung von Spulen und induktiven Sensoren, Dissertation, TU-Braunschweig (2002).
- [OSU98] O'Sullivan, E.J. et al.: Integrated, Variable-Reluctance Magnetic Minimotor. IBM Journal of Research and Development, Vol. 42, No. 5 (1998).
- [OTA96] Ota, H. et al: Coil Winding Process for Radial Gap Type Electromagnetic Devices with Cylindrical Stator, Proc. 9th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (1996) S. 325-330.
- [PAR98] Park, J, Y; Allen, M,G: Development of Magnetic Material and Processing Techniques Applicable to Integrated Micromagnetic Devices. J. Micro-mech. Microeng. 8 (1998) S. 307-316.
- [PAT02] Patterson, P.R. et al.: Scanning Micromirror with Angular Comb Drive Actuation. Proc. 15th IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (2002) S. 544-547.
- [PET82] Peterson, K.E.: Silicon as a Mechanical Material, Proc. IEEE, Vol. 70 (1982) S. 420-257.

- [PIS92] Pister, K.S.J., Judy, M.W., Burgett, S.R., and Fearing, R. S.: Microfabricated Hinges. *Sensors and Actuators A*, Vol. 33 (1992) S. 249-256.
- [PU02] Pu, C., Wu, C.: Technologies for Large-Scale Optical Switching: Recent Advances and Future Prospects, *Proc. SPIE Vol. 4907* (2002), S. 23-30.
- [QUE99] Quemper, J.-M.; et al.: Permalloy Electroplating Through Photoresist Molds. *Sensors and Actuators* 74 (1999) S. 1-4.
- [RAI97] Rai-Choudhury, P.: *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication*, Vol. 2: Micromachining and Microfabrication. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (1997).
- [RAM03] Ramasubramanian, M. et al.: Electroplating and Performance Evaluation of High Moment NiFe Films. *Magnetic Materials, Processes, and Devices VII and Electrodeposition of Alloys*, Proceedings of the International Symposia, Electrochemical Society Proceedings Volume 2002-27 (2003) S. 298-306.
- [REH01] Rehder, J. Rombach, P., Hansen, O.: Magnetic Flux Generator for Balanced Membrane Loudspeaker. *Proc. 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '01 / Eurosensors XV*, Munich, Germany, June 10-14 (2001) S. 11610-13.
- [REI98] Reichl, H.: *Direktmontage*. Springer-Verlag, Berlin (1998).
- [REY01] Reyne, G. et al.: Electromagnetic Remote Control and Down Scaling Advantages and Examples for MOEMS. *Device and Process Technologies for MEMS and Microelectronics II*, *Proc. SPIE Vol. 4592* (2001) S. 205 - 215.
- [ROG95] Rogge, B. et al.: Fully Batch Fabricated Magnetic Microactuator Using a Two Layer LIGA Process. *Proc. 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '95 / Eurosensors IX*, Stockholm, June 25-29 (1995) S. 320-323.
- [ROG96] Rogge, B., Schulz, J., Mohr, J.: *Entwicklung, Optimierung und Test von elektromagnetischen Linearaktoren basierend auf LIGA-Mikrotechnik*. Forschungszentrum Karlsruhe, wissenschaftlicher Bericht FZKA 5793 (1996).
- [ROM70] Romankiw, L.T., Croll, I.M., Hatzakis, M.: Batch Fabricated Thin Film Magnetic Recording Head. *IEEE Trans. Mag. Vol. 6, No. 4* (Sep. 1970) S. 729.
- [ROM80] Romankiw, L.T.: Use of AZ-Type Photoresist as Insulation in Multiturn Thin Film Recording Heads, *IBM Technical Disclosure Bulletin* (1980) S. 2584-2585.

- [ROM89] Romankiw, L.T.: Thin Film Inductive Heads; From One to Thirty One Turns, Proceeding of the Symposium on Magnetic Materials, Processes, and Devices, Hollywood, FL, (1989) S. 39-53.
- [ROM97a] Romankiw, L.T., O'Sullivan, E.J.M., Plating Techniques, in *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication*. Rai-Choudhury, P., (Ed.), Vol. 2, Ch. 5, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (1997) S. 197-298.
- [ROM97b] Romankiw, L.T.: A Path from Electroplating Through Lithographic Masks in Electronics to LIGA in MEMS, *Electrochim. Acta* (1997).
- [ROT00] Rothuizen, H. et al.: Fabrication of a Micromachined Magnetic x/y/z Scanner for Parallel Scanning Probe Applications, *Microelectronic Eng.* 53 (2000) S. 509-512.
- [ROT02] Rothuizen, H. et al.: Compact Copper/Epoxy-based Electromagnetic Scanner for Scanning Probe Applications, Proc. 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2002, Las Vegas, Nevada, USA, Jan. 20-24 (2002) S. 582-585.
- [ROT99] Roth, S. et al.: High Aspect Ratio UV Photolithography for Electroplated Structures, *J. Micromech. Microeng.* 9 (1999) S. 105-108.
- [ROY95] Roy, S.; Mehregany, M.: Fabrication of Electrostatic Nickel Microrelays by Nickel Surface Micromachining. *IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, Amsterdam, The Netherlands, Jan. 29 - Feb. 2 (1995) S. 353-357.
- [RUA01] Ruan, M., Shen, J., Wheeler, C.B.: Latching Micromagnetic Relays, *IEEE J. Microelectromech. Systems*, Vol. 10, Dezember (2001) S. 511-517.
- [RUB01] Rub, R.A.; Gupta, S.; Ahn, C.H.: High Directional Sensitivity of Micromachined Magnetic Fluxgate Sensors. Proc. 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '01 / Eurosensors XV, Munich, Germany, June 10-14 (2001) S. 148-151.
- [RUH01] Ruhmann, R. et al.: Reduction of Internal Stress in a SU-8-like Negative Tone Photoresist for MEMS Applications by Chemical Modification. Proc. SPIE Vol. 4345 (2002) S. 502-510.
- [SAD00] Sadler, D.J., Liakopoulos, T.M., Ahn, C.H.: A Universal Electromagnetic Microactuator Using Magnetic Interconnection Concepts, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 4 (2000) S. 460-468.
- [SAD99] Sadler, D.J. et al.: A New Magnetically Actuated Microvalve for Liquid and Gas Control Applications, Proc. 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '99, Sendai, Vol. 2 (1999) S. 1812-1815.

- [SCH99] Schlaak, H.: Mikrorelais in Mikrotechnologie - Grenzen und Potentiale, Kontaktverhalten und Schalten, VDE-Fachtagung, Karlsruhe, S. 79-90, 1999.
- [SCH00] Schlesinger, M., Paunovic, M.: Modern Electroplating. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc. (2000).
- [SCH02] Schiffer, M., Laible, V., Obermeier, E.: Design and Fabrication of 2D Lorentz Force Actuated Micromirrors. Proc. MOEMS, Lugano, Switzerland (2002) S.163-164.
- [SEI99] Seidemann, V., Ohnmacht, M., Büttgenbach, S.: An Optimized Multilayer Fabrication Process for High Aspect Ratio Electromagnetic Devices and Microsystems (MEMS). 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '99, Sendai, Vol. 1 (1999) S. 102-105.
- [SEI00] Seidemann, V., Büttgenbach, S.: An Optimized Fabrication Process for Micro-coils Utilizing UV-Depth-Lithography and BCB, Proc. World Microtechnologies Congress (MICRO.tec 2000), Hannover, Vol. 1 (2000) S. 69-72.
- [SEI01] Seidemann, V., Büttgenbach, S.: Novel Fabrication Process for 3D Meander-shaped Microcoils in SU-8 Dielectric and their Application to Linear Micromotors. Proc. SPIE Conf. MEMS Design, Fabrication, Characterization, and Packaging, Edinburgh, Vol. 4407 (2001) S. 304-309.
- [SEI02] Seidemann, V., Rabe, J., Feldmann, M., Büttgenbach, S.: SU8-micromechanical Structures with in situ Fabricated Movable Parts, Microsystem Technologies 8 (2002) S. 348-350.
- [SEI03] Seidemann, V.: Induktive Mikrosysteme: Technologieentwicklung und Anwendung. Dissertation, TU-Braunschweig (2003).
- [SEI04] Seidemann, V. et al.: High Aspect Ratio Spiral and Vertical Meander Micro Coils for Actuator Applications, Microsystem Technologies, Accepted for Publication.
- [SEN01] Senturia, S.D.: Microsystem Design. Kluwer Academic Publishers (2001) S. 8.
- [SHA97] Shaw, J.M. et al.: Negative Photoresists for Optical Lithography. IBM Journal of Research and Development, Vol. 41, No. 1/2 (1997) S. 81-94.
- [SHA03] Shaw, M. et al.: Improving the Process Capability of SU-8, Microsystem Technologies 10 (2003) S. 1-6.
- [SHE02] Shen, S-C., Pan, C.-T. Chou, H.-P.: Electromagnetic Optical Switch for Optical Network Communication, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 239 (2002) 610-613.

- [SHI90] Shibayama, Y, Saito, M.: Influence of Water on Photochemical Reaction of Positive Type Photoresist, Japanese Journal of Appl. Phys., Vol. 29, No. 10 (1990) S. 2152.
- [SPI76] Spiller, E. et al.: X-Ray Lithography for Bubble Devices, Solid State Technology, Vol. 19, No. 4, Apr, (1976) S. 62-67.
- [STÖ02] Stölting, H.-D., Kallenbach, E.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe, 2. Auflage, Hanser Verlag (2002).
- [STR96] Strandjord, A.J.G. et al.: Process Optimization and Systems Integration of a Copper/Photosensitive Benzocyclobutene MCM-D: Dielectric Processing, Metallization, Solder Bumping, Device Assembly, and Testing, The Int. J. of Microcircuits and Electronic Packaging, Vol. 19 (1996) S. 260-280.
- [STR97] Strandjord, A.J.G. et al.: Photosensitive Benzocyclobutene for Stress-Buffer and Passivation Applications (One Mask Manufacturing Process), Proc. Electronics Components and Technology Conference (1997) S. 1260-1268.
- [SYM02] Syms, R.R.A., Scaling Laws for MEMS Mirror-Rotation Optical Cross Connect Switches, Journal of Lightwave Technology, Vol. 20, No. 7 (2002) S. 1084-1094.
- [TAY94] Taylor, W. P; Allen, M. G.: An Integrated Electromagnet for the use as a Micro-relay Driving Element, Proc. ISHM '94 (1994) S. 524-529.
- [TAY97] Taylor, W. P, Allen, M.G: Integrated Magnetic Microrelays: Normally Open, Normally Closed, and Multi-Pole Devices. Proc. Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '97, Chicago, USA, June 16-19 (1997) S. 1149-1152.
- [TAY98] Taylor, W. P; Brand, O.; Allen, M. G.: Fully Integrated Magnetically Actuated Micromachined Relays, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 7, No. 2 (1998) S. 181-191.
- [THI00] Thielicke, E., Obermeier, E.: Microactuators and their Technologies, Mechatronics 10 (2000) S. 431-455.
- [THO94] Thompson, L.F., Willson, C.G., Bowden, M.J., Introduction to Microlithography. Second Edition, ACS (1994).
- [THO98] Thorpe, J., Steenson, D., Miles, R.: High Frequency Transmission Line using Micromachined Polymer Dielectric. Electronic Letters, Vol. 34 (1998) S. 1237-1238.
- [TIL99] Tilmans, H.A.C. et al.: A Fully-Packaged Electromagnetic Microrelay. Proc. 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Orlando, USA (1999) S. 25-30.

- [TOS96] Toshiyoshi, H. and Fujita, H.: Electrostatic Micro Torsional Mirrors for an Optical Switch Matrix. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, No. 4, Dec. (1998).S. 231-237.
- [VES00] Vestergaard, R.K., Bouwstra, S.: Electroplated Compliant Metal Micro-actuators with Small Feature Sizes using a Removable SU-8 Mould. *Microsystem Technologies* 6 (2000) S. 214-217.
- [VET00] Vettiger, P. et al.: The "Millipede"-More than one Thousand Tips for Future AFM Data Storage. *IBM J. Res. Develop.* 44 (2000) S. 323-340.
- [VIT00] Vitale, S.A. et al: Etching Chemistry of Benzocyclobutene (BCB) Low-k Dielectric Films in F_2+O_2 and Cl_2+O_2 High Density Plasmas. *J. Vac. Sci. Technol. A* 18 (6) (2000) S. 2770-2778.
- [VÖL00] Völklein, F, Zetterer, T: Einführung in die Mikrosystemtechnik. Vieweg-Verlag (2000).
- [WAT95] Watanabe, Y. et al.: A New Fabrication Process of a Planar Coil Using Photosensitive Polyimide and Electroplating. *Proc. 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '95/Euroensors IX*, Stockholm, Schweden, June 25-29 (1995).
- [WAT02] Wang, Z.F. et al.: Development of a New 1x4 Micro Optical Switch. *Proc. Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS*, SPIE Vol. 4755 (2002) S. 544-548.
- [WID96] Widmann, D., Mader, H.: *Technologie hochintegrierter Schaltungen*. 2. Auflage, Springer-Verlag (1996).
- [WIL96] Williams, K.R., Muller, R.S.: Etch Rates for Micromachining Processing. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, No. 4 (1996) S. 256-269.
- [WIL97] Wilson, C.G., Dammel, R.A., Reiser, A.: Photoresists: A Historical Perspective. *SPIE*, Vol. 3049 (1997) S. 28-41.
- [WOL97] Wolf, J.; et al.: System Integration for High Frequency Applications. *International Symposium on Microelectronics* (1997).
- [XU98] Xu, M. et al.: Microfabricated Transformer for High-Frequency Power or Signal Conversion. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 4 (1998) S. 1369-1371.
- [YAN97] Yan, G.-R. et al.: Chemical-Mechanical Polishing of Parylene N and Benzocyclobutene Films. *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 144, No. 9 (1997).
- [YAO95] Yao, J.J.; Chang, M.F.: A Surface Micromachined Miniature Switch for Telecommunications Applications with Signal Frequencies from DC up to 4 GHz. *Proc. 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Trans-*

ducers '95 / Eurosensors IX, Stockholm, Schweden, June 25-29 (1995) S. 384-387.

- [YAS99] Yasseen, A.A. et al.: A Rotary Electrostatic Micromotor 1x8 Optical Switch, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics 5, 1 (1999) S. 26-32.
- [YOU95] Younse, J.M.: Projection Display Systems Based on the Digital Micromirror Device (DMD), Proc. SPIE Conference on Microelectronic Structures and Micromechanical Devices for Optical Processing and Multimedia Applications, Austin, Texas, October 24, Vol. 2641 (1995) S. 64-75.
- [ZAV97] Zavracky, P.M., Majumder, S., McGruer, N.E.: Micromechanical Switches Fabricated Using Nickel Surface Micromachining, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 6, No. 1 (1997) S. 3-9.
- [ZHA99] Zhang, J. et al.: Taguchi Optimization for SU-8 Photoresist and its Applications in Microfluidic Systems. Proc. SPIE Conf. on Photonics Technology into the 21st Century: Semiconductors, Microstructures, and Nanostructures, Singapore, SPIE Vol. 3899 (December 1999) S. 440-447.
- [ZHA01a] Zhang, J., Tan, K. L., Gong, H.Q.: Characterisation of the Polymerization of SU-8 Photoresist and its Application in Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS). Polymer Testing 20 (2001) S. 693-701.
- [ZHA01b] Zhang, J. et al.: Polymerization Optimization of SU-8 Photoresist and its Applications in Microfluidic Systems and MEMS. J. Micromech. Microeng. 11 (2001) S. 20-26.

Patente

- [AND94] Andricacos, P.C. et al.: Multi-compartment Electroplating System. U.S. Patent 5312532A (1994).
- [GAT01] Gatzen, H.H.: Magnetisch angetriebene Schwenkplattform mit Rast. Deutsche Patentanmeldung 10204026, Internationale Patentanmeldung WO2003/064315A3.