

W. Menz, J. Mohr

# Mikrosystemtechnik für Ingenieure

2., erweiterte Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Einführung in die Mikrostrukturtechnik</b>	<b>1</b>
1.1	Was ist Mikrostrukturtechnik ?	1
1.2	Von der Mikrostrukturtechnik zur Mikrosystemtechnik	9
<b>2</b>	<b>Die Parallelen zur Mikroelektronik</b>	<b>15</b>
2.1	Die Herstellung von Einkristallscheiben	15
2.1.1	Herstellung von Silizium- Einkristallen	17
	Tiegelziehverfahren (Czochralski-Verfahren)	19
	Zonenziehverfahren (Float-Zone-Verfahren)	19
2.1.2	Herstellung von GaAs-Einkristallen	22
	Bridgman- und Gradient Freeze-Verfahren	23
	LEC-Verfahren	24
2.2	Technologische Grundprozesse	24
2.2.1	Schichtabscheidung	25
	Chemische Abscheidung (CVD)	26
	Epitaxie	26
	Physikalische Abscheide-Verfahren (PVD-Verfahren)	28
2.2.2	Schichtmodifikation	28
	Thermische Oxidation	28
	Diffusion	29
	Ionenimplantation	30
2.2.3	Schichtstrukturierung (Lithographie)	32
2.2.4	Schichtabtragung (Ätzen)	33
2.3	Aufbau- und Verbindungstechnik	35
2.3.1	Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik	35
2.3.2	Hybridtechniken	36

	Dickschichttechnik	36
	Bestücken und Löten der Schaltung	37
	Montage und Kontaktierung ungehäuster Halbleiterbauelemente	38
2.4	Reinraumtechnik	39
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Materialien der Mikrotechnik</b>	<b>43</b>
3.1	Einige Grundlagen aus der Festkörperphysik	43
3.1.1	Das Elektron im feldfreien Raum	46
3.1.2	Das Elektron in einem Potentialtopf	47
3.1.3	Das Elektron im periodischen Feld eines Kristalls	50
3.2	Kristalle und Kristallographie	54
3.2.1	Gitter und Gittertypen	55
3.2.2	Stereographische Projektion	57
3.2.3	Der Silizium-Einkristall	61
3.2.4	Reziprokes Gitter und Kristallstrukturanalyse	64
	Die Laue-Methode	68
	Die Bragg-Methode	68
	Die Debye-Scherrer-Methode	69
3.3	Methoden zur Bestimmung der Kristallstruktur	71
3.3.1	Röntgenstrahlbeugung	71
3.3.2	Elektronenstrahlbeugung	73
3.4	Grundbegriffe der Elektrochemie und der galvanischen Abscheidung	74
3.4.1	Die elektrochemische Phase	74
	Das elektrochemische Zweiphasensystem	76
3.4.2	Polarisation und Überspannung	76
	Die Doppelschicht an der Phasengrenze	77
	Die Struktur der Doppelschicht	78
3.4.3	Mechanismus der kathodischen Metallabscheidung aus	
	Lösungen einfacher Salze	79
	Migration	80
	Diffusion	80
	Konvektion	81
	Stofftransportvorgänge während der Mikrogalvanoformung	84
3.5	Werkstoffe der Mikrosystemtechnik	84
3.5.1	Kunststoffe	86
	Die Ordnung der Makromoleküle	86
	Polymere für die Lithographie	88
	Flüssigkristalle	89
	Flüssigkristalline Polymere	90
	Gele	92
	Elektorrheologische Flüssigkeiten	94

3.5.2	Keramik	96
	Keramik als Substrat	96
	Keramik als Material für Aktoren	97
	Keramik als Material für Gassensoren	98
3.5.3	Metalle	98
	Magnetostriktive Metalle	99
	Formgedächtnis-Legierungen	102
<b>4</b>	<b>Basistechnologien der Mikrotechnik</b>	109
4.1	Grundlagen der Vakuumtechnik	109
4.1.1	Die mittlere freie Weglänge	110
4.1.2	Die Wiederbedeckungszeit	111
4.1.3	Die Einteilung der technischen Vakua	112
4.2	Vakuum-Erzeugung	113
4.2.1	Pumpen für Grob- und Fein-Vakuum	114
	Verdränger-Vakuumpumpen	114
4.2.2	Hochvakuum- und Ultrahochvakuum-pumpen	116
	Treibmittel-Vakuumpumpen	118
	Gasbindende Vakuumpumpen	119
4.3	Vakuummessung	120
4.3.1	Druckmeßdose	121
4.3.2	Wärmeleitungsvakuummeter	121
4.3.3	Reibungsvakuummeter	121
4.3.4	Ionisationsvakuummeter mit unselbständiger Entladung (Glühkathode)	122
4.3.5	Ionisationsvakuummeter mit selbständiger Entladung (Penning-Prinzip)	123
4.4	Eigenschaften von Dünnschichten	123
4.4.1	Strukturzonen-Modelle	124
4.4.2	Haftfestigkeit der Schicht	126
4.5	Physikalische Beschichtungstechniken	128
4.5.1	Aufdampfen	128
4.5.2	Sputtern (Zerstäuben)	130
4.5.3	Ionenplattieren	132
4.5.4	Clusterstrahltechnik	132
4.6	Chemische Beschichtungstechniken	135
4.6.1	CVD-Verfahren	135
4.6.2	Epitaxie	139
	Homo-Epitaxie	140
	Hetero-Epitaxie	140

XII *Inhaltsverzeichnis*

	GaAs-Epitaxie	141
4.6.3	Plasmapolymerisation	141
4.7	Strukturierung von Dünnschichten mit Trockenätzprozessen	142
4.7.1	Physikalische und chemische Ätztechniken	145
	Sputterätzen	145
	Ionenstrahlätzen	146
	Charakteristika der rein physikalischen Ätzprozesse	147
	Barrel-Ätzen	148
4.7.2	Kombination chemischer und physikalischer Ätzprozesse	149
	Plasmaätzen	150
	Reaktives Ionenätzen	150
	Reaktives Ionenstrahlätzen	151
	Kryo-Ätztechniken	151
	Charakteristika des reaktiven Ionen- und Ionenstrahl-Ätzens	152
4.8	Analyse von Dünnschichten und Oberflächen	153
4.8.1	Elektronenstrahl-Mikroanalyse (EPM)	154
4.8.2	Auger-Elektronenspektroskopie (AES)	155
4.8.3	Photoelektronenspektroskopie (ESCA)	157
4.8.4	Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS)	157
4.8.5	Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS)	158
4.8.6	Ionen-Streuspektroskopie (ISS)	158
4.8.7	Rutherford-Rückstreuungsspektroskopie (RBS)	158
<b>5</b>	<b>Lithographie</b>	161
5.1	Überblick und Historie	161
5.2	Resists	161
5.3	Verfahren der Lithographie	164
5.4	Computer Aided Design (CAD)	166
5.4.1	CAD-Entwurf	166
5.4.2	Organisation des Entwurfs (Hierarchie, Layers)	168
5.5	Elektronenstrahlolithographie	169
5.5.1	Gaußscher Strahl	170
5.5.2	Schreibstrategie beim Gaußschen Strahl	172
5.5.3	Geformter Strahl	174
5.5.5	Postprozessor	176
5.5.6	Proximity-Effekt	177
5.6	Optische Lithographie	180
5.6.1	Masken	180
	Maskenreparatur	181
5.6.2	Schattenprojektion	182

5.6.3	Abbildende Projektion	183
	Ganzscheiben-Belichtung	184
	Step- und Repeat-Verfahren	185
5.6.4	Weiterentwicklungen	185
5.6.5	Optische Lithographie für die Mikromechanik	187
5.7	Ionenstrahlolithographie	189
5.8	Röntgenlithographie	189
5.8.1	Masken	190
5.8.2	Röntgenquellen	191
5.8.3	Synchrotronstrahlung	192
5.8.4	Einsatz der Röntgenlithographie	194
<b>6</b>	<b>Die Silizium-Mikromechanik</b>	<b>197</b>
6.1	Strukturierung durch naßchemische Tiefenätztechnik	198
6.1.1	Anisotrope Ätzverfahren	198
	Dotierungsabhängigkeit der Siliziumätzrate	201
	pn-Übergang als Ätzstoppschicht	202
	Mechanismus des Silizium-Ätzens	203
6.1.2	Isotropes Ätzen	205
6.1.3	Das SCREAM-Verfahren	205
6.1.4	Reaktives Ätzen von Silizium mit Halogenen und Edelgasen	207
6.2	Mikromechanische Grundstrukturen durch anisotropes Ätzen	209
6.2.1	Ätzgruben	209
6.2.2	Mesas	213
6.2.3	Membranen	213
6.2.4	Zungen	214
6.2.5	Brücken	214
6.2.6	Kombinierte Strukturen	215
6.2.7	Die Simulation von Ätzstrukturen	216
6.3	Die Silizium- Oberflächen-Mikromechanik (OMM)	218
6.4	Anwendungen für mikromechanische Komponenten	221
6.4.1	Sensorik	221
	Drucksensoren	221
	Beschleunigungssensoren	224
	Chemische Sensoren	225
6.4.2	Aktoren	227
<b>7</b>	<b>Das LIGA-Verfahren</b>	<b>231</b>
7.1	Überblick	231
7.2	Maskenherstellung	233
7.2.1	Prinzipieller Aufbau einer Maske	233

	Absorber	233
	Trägerfolie	234
7.2.2	Herstellung der Trägerfolien	235
7.2.3	Strukturierung des Resists für Röntgenzwischenmasken	236
	Optische Lithographie	237
	Direkte Elektronenstrahlolithographie	237
	Reaktives Ionenätzen	238
	Vergleich der Strukturierungsmethoden zur Herstellung von Zwischenmasken	238
7.2.4	Goldgalvanik für Röntgenmasken	240
7.2.5	Herstellung von Arbeitsmasken	240
7.2.6	Justieröffnungen in Röntgenarbeitsmasken	241
7.3	Röntgentiefenlithographie	242
7.3.1	Herstellung von dicken Resistschichten	242
7.3.2	Strahleninduzierte Reaktionen und Entwicklung des Resists	244
7.3.3	Anforderungen an die absorbierte Strahlendosis	247
7.3.4	Einflüsse auf die Strukturqualität	251
7.4	Die galvanische Abscheidung	256
7.4.1	Galvanische Abscheidung von Nickel für die Mikrostrukturherstellung	256
7.4.2	Messung der Elektrolytkomponenten	261
7.4.3	Formeinsatzherstellung für die Mikroabformung	264
7.4.4	Galvanische Abscheidung weiterer Metalle und Legierungen	265
7.5	Kunststoffabformung im LIGA-Verfahren	267
7.5.1	Herstellung von Mikrostrukturen im Reaktionsgießverfahren	267
7.5.2	Herstellung von Mikrostrukturen im Spritzgießverfahren	271
7.5.3	Herstellung von Mikrostrukturen durch Prägeverfahren	276
7.5.4	Herstellung von metallischen Mikrostrukturen aus abgeformten Kunststoffstrukturen (zweite Galvanoformung)	280
	Zweite Galvanoformung mit Hilfe elektrisch leitfähiger Kunststoffe	282
	Zweite Galvanoformung durch Beschichtung der Kunststoffstrukturen	284
7.6	Variationen und ergänzende Schritte der LIGA-Technik	285
7.6.1	Opferschichttechnik	285
7.6.2	3D- Strukturierung	288
	Gestufte Strukturen	288
	Geneigte Strukturen	289
	Konische Strukturen und Strukturen mit sphärischer Oberfläche	289
7.6.3	Herstellung lichtleitender Strukturen durch Abformung	290

7.7	Anwendungsbeispiele	292
7.7.1	Starre metallische Mikrostrukturen	292
	Filter für das Ferne Infrarot	293
	Steckverbindungen	294
	Mikrospulen	295
	Mikrozahnräder, Mikrogetriebe	297
7.7.2	Bewegliche Mikrostrukturen, Mikrosensoren, Mikroaktoren	297
	Beschleunigungssensoren	297
	Elektrostatischer Linearantrieb	300
	Elektromagnetischer Linearaktor	301
	Mikroturbine, Strömungssensoren, Mikrofräser	303
	Mikromotoren	305
7.7.3	Fluidische Mikrostrukturen	307
	Mikropumpen nach dem LIGA-Verfahren	307
	Mikrofluidische Schalter	308
	Mikrofluidische Linearaktoren	310
7.7.4	LIGA-Strukturen für optische Anwendungen	311
	Einfache optische Elemente – Linsen, Prismen	311
	Mikrooptische Bank	312
	Lichtleitende Strukturen – Mikrospektrometer	317
<b>8</b>	<b>Alternative Verfahren der Mikrostrukturierung</b>	<b>319</b>
8.1	Mechanische Mikrofertigung	319
8.1.1	Herstellungsverfahren und Primärstrukturen	320
8.1.2	Anwendungsbeispiele	324
	Mikrowärmeübertrager	324
	Mikroreaktoren	326
	Mikrobehälter für Zellkulturen	327
	Mikropumpen	327
	Röntgenverstärkerfolien	330
8.2	Dickschicht-Mikrotechnik	331
8.3	Laserunterstützte Verfahren	334
<b>9</b>	<b>Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT)</b>	<b>337</b>
9.1	Hybridtechniken	338
9.1.1	Substrate und Pasten	338
9.1.2	Schichterzeugung	341
	Trocknen und Einbrennen der Pasten	342
9.1.3	Bestücken und Lötten der Schaltung	342
9.1.4	Montage und Kontaktierung ungehäuster Halbleiterbauelemente	344
9.2	Drahtbond-Techniken	345
9.2.1	Thermokompressionsdrahtbonden (Warmpreßschweißen)	345

9.2.2	Ultraschalldrahtbonden (Ultraschallschweißen)	346
9.2.3	Thermosonicdrahtbonden (Ultraschallwärmeschweißen)	346
9.2.4	Ball-Wedge-Bonden (Kugel-Keil-Schweißen)	347
9.2.5	Wedge-Wedge-Bonden (Keil-Keil-Schweißen)	348
9.2.6	Vor- und Nachteile der einzelnen Drahtbondverfahren	349
9.2.7	Prüfverfahren und Alternativen	350
9.3	Neue Kontaktierungstechniken	350
9.3.1	Die TAB-Technik	351
9.3.2	Die Flip-Chip-Technik	352
9.3.3	Entwicklung neuer Kontaktierungssysteme	354
9.4	Kleben	355
9.4.1	Isotropes Kleben	355
9.4.2	Anisotropes Kleben	357
9.5	Anodisches Bonden	358
9.6	Das Modulkonzept der Mikrosystemtechnik	361
<b>10</b>	<b>Systemtechnik</b>	<b>367</b>
10.1	Definition eines Mikrosystems	367
10.2	Sensoren	369
10.3	Aktoren	374
10.4	Datenverarbeitung	375
10.4.1	Signalverarbeitung für Sensoren in Mikrosystemen	376
10.4.2	Neuronale Datenverarbeitung für Sensorarrays	378
	Delta Lernregel	380
	Lernregel von Hopfield	380
	Backpropagation	381
10.5	Schnittstellen von Mikrosystemen	384
10.5.1	Die IE-Übertragung	386
	Elektrische Mikro-/Makroankopplungen	386
	Optische Mikro-/Makroankopplungen	387
	Mechanische Mikro-/Makroankopplungen	388
	Die Ultraschallübertragung	389
10.5.4	Die S-Übertragung	390
	Fluidische Mikro-/Makroankopplungen	390
	Fluidische Mikrokomponenten	390
10.6	Entwurf, Simulation und Test von Mikrosystemen	392
10.7	Systemintegration	394

<b>11</b>	<b>Das Potential der Mikrosystemtechnik in der Medizin</b>	397
11.1	Einleitung	397
11.2	Anwendungen der Mikrosystemtechnik	400
11.2.1	Patientengeräte	400
11.2.2	Laborgeräte	400
11.2.3	Implantate	401
11.3	Die minimal-invasive Therapie (MIT)	402
11.3.1	Mikrokomponenten	405
	Fluidische Komponenten	405
	Pumpen	406
	Mikrospektrometer	406
11.3.2	Interface Technologie	407
11.3.3	Mikrosysteme in der Medizin	408
11.4	Ausblick	413
	<b>Literatur</b>	415
	<b>Register</b>	425