

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolf-Joachim Fischer (Hrsg.)

unter Mitarbeit von

Dr.-Ing M. Plötner, Dr.-Ing. Norkus,  
Dipl.-Ing. J. Oswald, Dr.-Ing. S. Rzepka,  
Dr. rer. nat. B. Adolphi, Dr.-Ing. T. Hoffmann,  
Dr.-Ing. habil. P. Schwarz, Dipl.-Inf. Ing. I. Jossa,  
Dipl.-Ing. U. Marschner

# Mikrosystemtechnik

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
<b>1 Einleitung</b>	13
<b>2 Anwendungsgebiete</b>	21
2.1 Medizintechnik	21
2.1.1 Cochlear-Implant-Mikrosystem	22
2.1.2 Multifunktionaler Herzkatheter	23
2.1.3 Bildgebende Ultraschallkatheter	23
2.2 Verkehrstechnik	25
2.2.1 Airbagsystem	27
2.2.2 Reifenüberwachungssystem	29
2.3 Umwelttechnik	30
2.3.1 Personendosimeter	30
2.3.2 Schadgasanalytensystem	32
2.4 " Häüstechnik	33
2.5 Fertigungs- und Verfahrenstechnik	35
<b>3 Technologie</b>	39
3.1 Verfahren	39
3.1.1 Einleitung, Verfahrensübersicht	39
3.1.2 Physikalische Dampfabscheidung (PVD)	41
3.1.2.1 Definition und Klassifizierung der PVD-Verfahren	41
3.1.2.2 PVD-Verfahren ohne Plasmaunterstützung	43
3.1.2.3 PVD-Verfahren mit Plasmaunterstützung	47
3.1.2.4 Reaktive PVD-Verfahren	50
3.1.3 Chemische Dampfabscheidung (CVD)	50
3.1.3.1 Definition und Grundlagen der CVD-Verfahren	50
3.1.3.2 Thermisch gestützte CVD	51
3.1.3.3 Plasmagestützte CVD (PECVD)	52
3.1.4 Naßchemische Metallabscheidung	55
3.1.4.1 Grundlagen und Verfahrensübersicht	55
3.1.4.2 Außenstromlose naßchemische Metallabscheidung	56
3.1.4.3 Galvanische Metallabscheidung	57
3.1.5 Naßätzen	64
3.1.5.1 Grundlagen und Verfahrensübersicht	64
3.1.5.2 Elektrochemisches Ätzen	69
3.1.5.3 Anisotropes Kristallätzen	71
3.1.6 Trockenätzen	77
3.1.6.1 Grundlagen und Verfahrensübersicht	77
3.1.6.2 Plasmaätzprozesse	78

3.1.6.3	Anisotropes Tiefenätzen mittels RIE	83
3.1.7	Ionenstrahlverfahren	87
3.1.7.1	Grundlagen und Verfahrensübersicht	87
3.1.7.2	Ionenstrahlätzen	89
3.1.7.3	Ionenstrahlabscheidung	92
3.1.8	Laserstrahlverfahren	93
3.1.8.1	Grundlagen der Lasertechnik	93
3.1.8.2	Lasergestützte Materialabscheidung	93
3.1.8.3	Laserablation	94
3.1.8.4	Laserfotolithografie	97
3.2	Prozeßabläufe und Techniken	98
3.2.1	Mikroelektronik	98
3.2.2	Mikromechanik	98
3.2.3	Volumenmikromechanik	100
3.2.3.1	Einordnung und Grundprinzip	100
3.2.3.2	Ätzstopptechniken für das anisotrope Si-Naätzen	101
3.2.3.3	2-Seiten-Lithografie	104
3.2.3.4	Freiätzen der Mikrostrukturen und typische Prozeßfolgen der klassischen Volumenmikromechanik	105
3.2.4	Oberflächenmikromechanik	106
3.2.4.1	Einordnung und Übersicht	106
3.2.4.2	Opferschichttechnik	107
3.2.4.3	Typische Prozeßfolgen der Si-Oberflächenmikromechanik	109
3.2.5	Oberflächennahe Volumenmikromechanik	112
3.2.6	Mikrogalvanik und LIGA-Verfahren	116
<sup>1</sup> 3.2.6.1	Einordnung und typische Prozeßfolgen der Mikrogalvanik	116
3.2.6.2	LIGA-Technik	117
3.3	Aufbau- und Verbindungstechnik	120
3.3.1	Vereinzeln	120
3.3.2	Fügen und Verbinden	120
3.3.2.1	Kleben	121
3.3.2.2	Löten	127
3.3.2.3	Schweißen	134
3.3.2.4	Kraft- und formschlüssige Verbindungen	142
3.3.3	Umhüllen und Verschließen	143
3.3.3.1	Hermetikgehäuse	144
3.3.3.2	Plastumhüllungen	145
	Werkstoffe der Mikrosystemtechnik	149
4.1	Physikalische Grundlagen der Werkstoffeigenschaften	149
4.1.1	Einteilung der Werkstoffe in Eigenschaftsgruppen	149
4.1.2	Chemische Bindungen in Festkörpern	150
4.1.2.1	Atombindung (kovalente, homöopolare Bindung)	150
4.1.2.2	Ionenbindung (heteropolare, polare, elektrostatische Bindung)	152
4.1.2.3	Metallbindung	152
4.1.2.4	Nebervalenzbindungen	153
4.1.3	Kristallstrukturen	153
4.1.4	Zusammenhang zwischen Bindungstyp und Kristallstruktur	154
4.2	Nutzbare Effekte	157
4.2.1	Nachweis von Kernstrahlung und harter Röntgenstrahlung	158
4.2.2	Chemisch sensitive Schichten (Gassensorschichten)	159
4.2.3	Effekte elektrischer Polarisation in Festkörpern	163
4.3	Basismaterialien (Substratwerkstoffe)	165

4.3.1	Silizium	166
4.3.1.1	Mechanische Eigenschaften	166
4.3.1.2	Chemische Eigenschaften	167
4.3.2	Keramik	169
4.3.3	Quarz und Glas	171
4.3.4	Piezoelektrische Materialien	172
4.3.5	Organische Polymere	173
4.4	Werkstoffe der Aufbau- und Verbindungstechnik	175
4.4.1	Kontaktflächenmetallisierung	175
4.4.2	Bonddrähte	177
4.4.2.1	Gold	178
4.4.2.2	Aluminium	179
4.4.3	Lote	180
4.4.4	Klebstoffe	183
4.4.4.1	Polymerisationsklebstoffe	184
4.4.4.2	Polyadditionsklebstoffe	184
4.4.4.3	Polykondensationsklebstoffe	185
4.4.4.4	Füllstoffe	185
4.5	Sonderwerkstoffe	186
4.5.1	Formgedächtnislegierungen	186
4.5.1.1	Gitterumwandlungen	186
4.5.1.2	Nutzbare Effekte	187
4.5.1.3	Quantifizierung der nutzbaren Effekte	188
4.5.1.4	Materialbeispiele	189
4.5.2	Werkstoffe für optische Signalübertragungen	190
4.5.2.1	Prinzip der optischen Signalübertragung	190
4.5.2.2	LWL-Werkstoffe	190
4.5.2.3	Schichtherstellung	191
4.5.3	Farbfilter	192
4.5.4	Elektrisch leitfähige Polymere	194
4.5.4.1	Leitungsmechanismus	194
4.5.4.2	Grundbausteine elektrisch leitfähiger organischer Materialien	194
<b>Wandlerprinzipien</b>		197
5.1	Mechanische Wandler	197
5.1.1	Grundlagen der Mechanik	197
5.1.1.1	Elastostatik	198
5.1.1.2	Kinetik	205
5.1.1.3	Schwingungen von Balken und Platten	207
5.1.1.4	Dynamik in bewegten Bezugssystemen	210
5.1.2	Mechanische Sensoren	211
5.1.2.1	Grundprinzipien von Sensoren	211
5.1.2.2	Drucksensoren	217
5.1.2.3	Siliziummikrofone	220
5.1.2.4	Beschleunigungssensoren	223
5.1.2.5	Drehratensensoren	227
5.1.3	Mechanische Aktoren	229
5.1.3.1	Grundprinzipien von Aktoren	229
5.1.3.2	Lichtmodulatoren	232
5.1.3.3	Mikromotoren	237
5.1.3.4	Mikrorelais	240
5.1.4	Mikromechanische Filter	240

5.2	Magnetische Wandler	245
5.2.1	Grundlagen	245
5.2.2	Magnetische Sensoren	248
5.2.2.1	Hall-Sensoren	248
5.2.2.2	Fluxgate-Sensoren	252
5.2.2.3	Magnetoresistive Sensoren	258
5.2.2.4	Magnetische Mikroaktoren	260
5.2.3	Mikrospulen	263
5.3	Thermische Wandler	265
5.3.1	Grundlagen	265
5.3.2	Thermische Flußsensoren	267
5.3.3	Thermische Strahlungssensoren	269
5.3.4	Temperatursensoren	271
5.4	Wandler für ionisierende Strahlungen	274
5.4.1	Grundlagen	274
5.4.1.1	$\alpha$ -Strahlung	274
5.4.1.2	$\beta$ -Strahlung	275
5.4.1.3	$\gamma$ -Strahlung	275
5.4.1.4	Röntgenstrahlung	275
5.4.1.5	Neutronenstrahlung	276
5.4.2	Strahlungssensoren	277
5.4.2.1	Halbleiterdioden	277
5.4.2.2	Modifizierte dRAM-Zellen	278
5.4.2.3	$\alpha$ -Strahlungspersonendosimeter	279
5.5	Optische Wandler	279
5.5.1	Grundlagen	279
5.5.2	Strahlungssensoren im sichtbaren Bereich	282
5.5.2.1	Fotodioden	282
5.5.2.2	Bildsensoren	284
5.6	Chemische Wandler	291
5.6.1	Grundlagen	291
5.6.2	Chemische Sensoren	292
5.6.2.1	Passive chemische Sensoren	292
5.6.2.2	Chemisch sensitive Feldeffekttransistoren	294
5.6.2.3	Mikroelektroden	294
5.6.2.4	SAW-Sensoren	295
5.6.2.5	Chemosensorarrays	297
5.7	Biologische Wandler	298
5.7.1	Grundlagen	298
5.7.2	Biologische Sensoren	299
	Energieversorgung und Energiespeicherung	303
6.1	Batterien	303
6.1.1	Elektrochemische und physikalische Grundlagen	304
6.1.2	Lithiumbatterien	307
6.1.3	Dünnschichtbatterien	308
6.1.4	Zink-Sauerstoff-Batterien	308
6.1.5	Silberchlorid-Magnesium-Batterien	308
6.1.6	Intelligente Batterien	308
6.2	Solarzellen	310
6.2.1	Grundlagen	310
6.2.2	Aufbau und Technologie von Solarzellen	311
6.2.3	Schaltungen mit Solarzellen	313
6.2.4	Leistungsabgabe in Abhängigkeit der Beleuchtungsverhältnisse	315

6.3	Optische Übertragung	317
6.4	Energieübertragung mit Mikrowellen	317
6.5	Thermogeneratoren	318
6.6	HF-Energieübertragung	320
6.7	Mikroelektrische Generatoren	324
6.8	Doppelschichtkondensatoren	324

## **Modellierung und Simulation von MikroSystemen** . . . . . 327

7.1	Technologie- und Bauelementesimulation	327
7.1.1	Rechenverfahren	327
7.1.1.1	Finite-Differenzen-Methode	329
7.1.1.2	Finite-Elemente-Methode	331
7.1.1.3	Beispiel: Temperaturverteilung in einer Strömung	334
7.1.2	Technologiesimulation	334
7.1.2.1	Technologiesimulation der Mikroelektronik	334
7.1.2.2	Halbleitertechnologiemodelle	336
7.1.2.3	Spezielle Technologiemodelle	343
7.1.3	Bauelementesimulation	343
7.1.3.1	Was ist ein Bauelement?	343
7.1.3.2	Device Simulation	345
7.1.3.3	Modelle nichtelektrischer Bauelemente	346
7.1.3.4	Feldgrößenkopplung	349