

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Von der Mikroelektronik zur Mikrosystemtechnik	1
1.2	Was ist ein Mikrosystem?	4
1.3	Anwendungsfelder und Trends der Mikrosystemtechnik	5
1.4	Literatur	7
2	Basistechnologien der Mikrosystemtechnik	8
2.1	Reinraumtechnologie	8
2.2	Substrate und Materialien	13
2.2.1	Bulk-Materialien	13
2.2.2	Dünne Schichten	25
2.2.3	Wandlungseffekte	27
2.2.3.1	Mechanisch-elektrische Wandlung	28
2.2.3.2	Thermisch-elektrische Wandlung	30
2.2.3.3	Magnetisch-elektrische Wandlung	31
2.2.3.4	Optisch-elektrische Wandlung	33
2.2.4	Literatur	35
2.3	Dünnschichttechnologie	37
2.3.1	Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten	37
2.3.1.1	Beschichtungsmethoden	37
2.3.1.2	Ionenimplantation	51
2.3.1.3	Charakterisierungsmethoden für dünne Schichten	56
2.3.1.4	Literatur	63
2.3.2	Lithographie	65
2.3.2.1	Prinzip und Anwendungen der Lithographie	65
2.3.2.2	Verfahrensführung	67
2.3.2.3	Belichtungsverfahren und –Apparaturen	74
2.3.2.4	Resists	81
2.3.2.5	Maskenherstellung	86
2.3.2.6	Komplexe Resisttechnologien	90
2.3.3	Ätzen	95
2.3.3.1	Naßätzen	97
2.3.3.2	Trockenätzen	101
2.3.3.3	Lift-Off-Technik	104
2.3.3.4	Literatur	104
2.4	Dreidimensionale Mikrostrukturierungsmethoden	106
2.4.1	LIGA-Technik mit Röntgentiefenlithographie	106

2.4.2	UV-LIGA	110
2.4.3	Laser-LIGA	114
2.4.4	Anisotrope Ätztechniken für Silizium	115
2.4.4.1	Anisotropes Naßätzen von Silizium	115
2.4.4.2	Ätzstopppverfahren	118
2.4.4.3	Anisotropes Plasmaätzen	120
2.4.5	Photostrukturierung von Glas	122
2.4.6	Mikrofunkenerosion	123
2.4.7	Literatur	124
3	Grundstrukturen und Anwendungen	128
3.1	Mikromechanische Grundstrukturen und Fertigungsprozesse	128
3.1.1	Ätzgruben in Silizium	129
3.1.2	Design-Regeln	134
3.1.3	Membranen	136
3.1.4	Zungen und Biegebalken	140
3.1.5	Spitzen und Spitzenarrays	142
3.1.6	Mesa-Strukturen	145
3.1.7	Dreidimensionale teilbewegliche Mikrostrukturen	146
3.1.8	Trocken-Ätztechniken für mikromechanische Grundstrukturen	147
3.1.9	Literatur	149
3.2	Mikrooptische Grundstrukturen und Fertigungsprozesse	151
3.2.1	Freistrahlsstrukturen	152
3.2.2	Glasfaserkompatible mikrooptische Strukturen	163
3.2.3	Lichtleitende Strukturen	166
3.2.4	Elektrooptische Bauelemente	173
3.2.5	Literatur	178
3.3	Mikrosensoren, Mikroaktoren und Fertigungsprozesse	181
3.3.1	Thermische Mikrosensoren	181
3.3.1.1	Berührende Temperatursensoren	181
3.3.1.2	Thermische Sensoren zur berührungslosen Temperaturmessung	185
3.3.1.3	Vakuum-Mikrosensoren	190
3.3.1.4	Flow-Sensoren	193
3.3.1.5	AC/DC-Thermokonverter	195
3.3.2	Druck- und Beschleunigungssensoren	196
3.3.2.1	Piezoresistive Drucksensoren	196
3.3.2.2	Aufbau und Funktion piezoresistiver Drucksensoren	200
3.3.2.3	Kapazitive Drucksensoren	204
3.3.2.4	Beschleunigungssensoren	205
3.3.3	Gassensoren	208
3.3.4	Chemisch sensitive Feldeffekt-Transistoren (CHEMFET's)	211
3.3.5	Teststrukturen	213
3.3.6	Aktoren	215

3.3.7	Literatur	226
3.4	Mikrofluidische Grundstrukturen und Fertigungsprozesse	229
3.4.1	Filter	230
3.4.2	Mischer und Wärmetauscher	231
3.4.3	Fluidkanäle und Düsen	233
3.4.4	Mikropumpen und –ventile	233
3.4.5	Fluidverstärker und –schalter	236
3.4.6	Durchflußsensoren	237
3.4.7	Chemische Analysensysteme	238
3.4.8	Mikroreaktoren	239
3.4.9	Literatur	242
4	Systemintegration	245
4.1	Aufbau von Mikrosystemen	245
4.1.1	Mikroelektronik - technologische Basis der Mikrosystemtechnik	247
4.2	Monolithische Integration	248
4.2.1	Mikrosensoren/-aktoren auf der Basis der CMOS –Technologie	248
4.2.2	CMOS-basierte komplexe Integrationsprozesse	253
4.2.3	Integration auf der Basis der Bipolaren Prozesstechnologie	255
4.2.4	Anwendung der Opferschicht-Technologie	256
4.3	Hybride Integration von Mikrosystemen	259
4.3.1	Substratherstellung durch Dünn- und Dickschichttechnik	259
4.3.2	Bauelemente in Dünn- und Dickschichttechnik	261
4.3.2.1	Herstellung und Eigenschaften von Dickschicht-Bauelementen	262
4.3.2.2	Herstellung und Eigenschaften von Dünnschicht-Bauelementen	265
4.3.3	SMD-Bauelemente	268
4.3.4	Ungehäuste Halbleiterbauelemente (Chip-and-Wire-Technik)	270
4.4	Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)	272
4.4.1	Bedeutung der AVT für die Mikrosystemtechnik	272
4.4.2	Chipbearbeitung	274
4.4.3	Chipmontage (<i>Die bonding</i>)	275
4.4.4	Bonden von Silizium	281
4.4.4.1	Anodisches Bonden	281
4.4.4.2	Silicon Direct Bonding (SDB), Silicon Fusion Bonding (SFB)	282
4.4.5	Elektrische Kontaktierung	282
4.4.5.1	Drahtbonden	282
4.4.5.2	Tape-Automated-Bonding (TAB)	285
4.4.5.3	Flip-Chip-Technik	287
4.4.5.4	Ball-Grid-Arrays (BGA)	288
4.4.5.5	Beamlead-Kontaktierung	289
4.4.5.6	Multi-Chip-Stapel	289
4.4.6	Literatur	290

4.5	Systemsimulation	292
4.5.1	Einordnung	292
4.5.2	Modellierungs- und Simulationsebenen	293
4.5.3	Auswahl des Systemsimulators	294
4.5.4	Modellierungsansätze	294
4.5.5	Beschreibungsmittel	300
4.5.5.1	Mathematische Verhaltensbeschreibung	300
4.5.5.2	VHDL-AMS	301
4.5.5.3	Modelica	304
4.5.6	Anwendungsbeispiel: Beschleunigungssensor	307
4.5.7	Automatische Modellgenerierung	311
4.5.8	Simulatorkopplung: Prinzip	318
4.5.9	Simulatorkopplung: Anwendungsbeispiel	321
4.5.10	Literatur	324
4.6	Zuverlässigkeit und Qualitätssicherung von Mikrosystemen	327
4.6.1	Begriffsdefinitionen	327
4.6.2	Testmethoden	331
4.6.3	Bewertung und Berechnung von Ausfallraten	333
4.6.4	Identifikation von Ausfallmechanismen	340
4.6.5	Qualitätssicherung	354
4.6.6	Literatur	361
5	Beispiele komplexer Mikrosysteme	363
5.1	AFM-Meßkopf	363
5.2	Miniatur-Ellipsometer	369
5.2.1	Theoretische Grundlagen	369
5.2.2	Komponenten des Miniaturellipsometers	371
5.2.3	Aufbau des Gesamtsystems	375
5.3	Thermopile-Arrays für Wärmebildsysteme	377
5.3.1	Entwurf und Simulation	377
5.3.2	Technologie: Design und Herstellung	385
5.3.3	Integration: Ausleseelektronik, ASIC	386
5.3.4	Aufbau und Verbindungstechnik	386
5.3.5	Test	388
5.3.6	Anwendungsbeispiel: Fahrzeuginnenraumüberwachung	390
5.4	Literatur	390
	Sachwortverzeichnis	392