

Gerald Gerlach
Wolfram Dötzel

Einführung in die Mikrosystemtechnik

Ein Kursbuch für Studierende

mit 169 Bildern, 49 Beispielen sowie 54 Aufgaben

Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	13
1.1	Was ist ein Mikrosystem?.....	16
1.2	Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik	20
1.3	Anwendungsfelder und Entwicklungstrends.....	22
1.4	Beispiel Drehratensensor	23
1.4.1	Aufbau und Funktion	24
1.4.2	Funktionskomponenten und -elemente.....	26
2	Skalierung und Ähnlichkeit	31
2.1	Skalierung	31
2.2	Ähnlichkeit und Kennzahlen	37
3	Werkstoffe.....	43
3.1	Übersicht	43
3.2	Einkristallines Silizium.....	47
3.2.1	Beschreibung der Orientierung von Flächen und Richtungen im Kristall.....	48
3.2.2	Oberflächeneigenschaften bei verschiedener Orientierung.....	55
3.2.3	Anisotrope elastische Eigenschaften	56
3.2.4	Festigkeit	59
3.2.5	Siliziumscheiben	63
3.3	Gläser	67
3.3.1	Allgemeine Eigenschaften von Glas	68
3.3.2	Viskoelastisches Verhalten	69
3.3.3	Gläser in der Mikrosystemtechnik	71
3.4	Polymere	73
3.4.1	Thermoplastische Werkstoffe in der Mikrosystemtechnik.....	74
3.4.2	Fotoresist.....	77
3.5	Dünnschichten	79
3.5.1	Siliziumoxid, Siliziumnitrid	82
3.5.2	Elektrisch leitende Schichten.....	84
3.5.3	Polysiliziumschichten	84
3.6	Materialeigenschaften im Vergleich	85

4	Mikrotechnische Fertigungsverfahren.....	88
4.1	Überblick	88
4.2	Reinheit in der Fertigung.....	94
4.2.1	Reinraumtechnik.....	95
4.2.2	Waferreinigung.....	99
4.3	Lithografie.....	101
4.3.1	Prinzip.....	101
4.3.2	Lithografischer Prozess	102
4.3.3	Minimal strukturierbare Linienbreiten	105
4.3.4	Doppelseitenlithografie.....	106
4.3.5	Lithografie in stark profilierten Strukturen.....	106
4.4	Schichtherstellung.....	107
4.4.1	Überblick	107
4.4.2	Schichtkonformität.....	109
4.4.3	Thermische Oxidation.....	109
4.4.4	Aufdampfen.....	111
4.4.5	Sputtern.....	113
4.4.6	Chemische Gasphasenabscheidung.....	115
4.4.7	Vergleich	117
4.5	Schichtstrukturierung.....	118
4.5.1	Grundlagen	118
4.5.2	Nassätzen	120
4.5.3	Trockenätzen	120
4.5.4	Lift-off-Prozess	123
4.6	Anisotropes nasschemisches Tiefenätzen	123
4.6.1	Prinzip.....	124
4.6.2	Anisotrope Ätzlösungen.....	125
4.6.3	Ätzraten.....	126
4.6.4	Ätzstopppverfahren.....	129
4.6.5	Ätzfiguren	131
4.6.6	Entwurf von Ätzmasken.....	140
4.7	Dotierung.....	142
4.7.1	Diffusion	142
4.7.2	Ionenimplantation.....	146
4.7.3	Vergleich der Dotierungsverfahren	148
4.8	Verbindungsverfahren.....	149
4.8.1	Eutektisches Bonden	150
4.8.2	Anodisches Bonden.....	151
4.8.3	Siliziumdirektbonden.....	152

4.8.4	Vergleich der Verbindungsverfahren	152
4.9	Isolationstechniken	153
4.9.1	SIMOX-Verfahren	154
4.9.2	BESOI-Verfahren.....	155
4.9.3	Smart-Cut-Verfahren	157
4.10	Oberflächenmikromechanik.....	158
4.10.1	Prinzip	158
4.10.2	Herstellung von Hohlräumen	161
4.10.3	Haften beweglicher Strukturen	164
4.10.4	Vergleich von Volumen- und Oberflächenmikromechanik.....	167
4.11	Oberflächennahe Mikromechanik	167
4.11.1	Prinzip	168
4.11.2	Verfahren	168
4.12	HARMST	171
4.12.1	Begriffsbestimmung.....	171
4.12.2	LIGA-Verfahren.....	171
4.13	Miniaturisierte klassische Verfahren.....	173
4.13.1	Mikrospritzgießen	175
4.13.2	Mikroheißprägen	178
4.13.3	Mikrozerspanen.....	179
4.14	Auswahl von mikrotechnischen Fertigungsverfahren.....	182
5	Aufbau- und Verbindungstechnik	190
5.1	Aufgaben und Anforderungen	190
5.1.1	Aufgaben	190
5.1.2	Zuverlässigkeitsgerechtes Packaging	194
5.2	Funktionen der Aufbau- und Verbindungstechnik	195
5.2.1	Mechanische Verbindungen	196
5.2.2	Elektrische Verbindungen.....	200
5.2.3	Wärmeabführung	201
5.2.4	Verkapselung und Gehäusung	202
6	Funktions- und Formelemente der Mikrosystemtechnik.....	209
6.1	Mechanische Elemente.....	209
6.1.1	Empfindlichkeit in Nutzrichtung.....	212
6.1.2	Querempfindlichkeit	215
6.1.3	Eigenfrequenz	216
6.1.4	Dämpfung	216
6.1.5	Güte	218

6.1.6	Amplitudengang.....	218
6.1.7	Spannung an der Einspannstelle.....	219
6.2	Fluidische Elemente.....	224
6.2.1	Kennzahlen und Modellsysteme.....	224
6.2.2	Elementtypen.....	228
6.2.3	Fluidische Schnittstellen.....	231
6.2.4	Entwurf mikrofluidischer Elemente und Komponenten.....	231
6.3	Thermische Elemente.....	236
6.3.1	Thermisch-elektrische Analogien.....	237
6.3.2	Grundgleichungen für den Wärmetransport.....	237
6.3.3	Ersatzschaltungen.....	242
7	Sensoren und Aktoren.....	250
7.1	Umkehrbare und parametrische Wandler.....	251
7.1.1	Umkehrbare Wandler.....	251
7.1.2	Parametrische Wandler.....	258
7.1.3	Stationäre umkehrbare Wandler.....	260
7.2	Wandler für Sensoren und Aktoren.....	263
7.2.1	Elektrostatische Wandler.....	263
7.2.2	Piezoelektrische Wandler.....	269
7.2.3	Elektrodynamische Wandler.....	272
7.2.4	Thermomechanische Wandler.....	278
7.2.5	Piezoresistive Wandler.....	286
8	Entwurf von Mikrosystemen.....	306
8.1	Entwurfsmethoden und Werkzeuge.....	306
8.2	Systeme mit konzentrierten Parametern.....	313
8.2.1	Verhaltensbeschreibung elektromechanischer Systeme.....	313
8.2.2	Analyse des statischen Verhaltens elektromechanischer Systeme.....	314
8.2.3	Analyse elektromechanischer Systeme bei harmonischen Lasten.....	317
8.2.4	Transiente Analyse elektromechanischer Systeme.....	321
8.3	Systeme mit verteilten Parametern.....	324
8.3.1	Verhaltensbeschreibung mittels analytischer Modelle.....	324
8.3.2	Numerische Methoden auf der Basis der Finiten-Elemente-Methode.....	327
8.3.3	Makromodellierung komplexer Systeme durch Ordnungsreduktion.....	329
9	Einfluss technologischer Prozesse auf Mikrosystemeigenschaften.....	338
9.1	Parameterbasierter Mikrosystementwurf.....	338
9.2	Robuster Mikrosystementwurf.....	342

Anhang A Physikalische Konstanten.....	351
Anhang B Koordinatentransformation	352
B.1 Elastische Koeffizienten	353
B.2 Piezoresistive Koeffizienten	356
Anhang C Eigenschaften von Siliziumoxid- und Siliziumnitrid-Schichten	359
Anhang D Nomenklatur von Dünnschichtprozessen	361
Anhang E Haftung bei oberflächen-mikromechanischen Strukturen	364
E.1 Kapillarkräfte.....	364
E.2 Kritische Länge von Biegefedern	365
Symbolverzeichnis.....	367
Abkürzungsverzeichnis.....	375
Stichwortverzeichnis	380