

Markus Glück

# **MEMS in der Mikrosystemtechnik**

**Aufbau, Wirkprinzipien,  
Herstellung und Praxiseinsatz  
mikroelektromechanischer  
Schaltungen und Sensorsysteme**

Mit 92 Abbildungen und 6 Tabellen



**Teubner**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b> .....	11
1.1 Historische Entwicklung der MEMS.....	12
1.2 Rasant wachsende Märkte mit enormen Potenzialen .....	15
1.2.1 Mikrosysteme für die Mobilität .....	17
1.2.2 Prozess- und Anlagensicherheit im Maschinenbau.....	18
1.2.3 Medizintechnik und Pharmazie .....	18
1.2.4 Umwelt- und Klimatechnik.....	19
1.2.5 Haushaltsanwendungen, Facility Management .....	20
<b>2 Grundlagen</b> .....	21
2.1 Grundlagen der Sensorik.....	21
2.1.1 Messwerterfassung und dynamisches Schaltverhalten.....	23
2.1.2 Fehlerangaben und Fehlerkenngrößen .....	26
2.2 Grundlagen der Werkstofftechnik .....	27
2.2.1 Aggregatzustände .....	27
2.2.2 Chemische Bindungen .....	27
2.2.3 Elektrische Eigenschaften der Festkörper.....	29
2.2.4 Halbleitermaterialien und Bändermodelle .....	30
2.3 Kristalline Festkörper.....	38
2.3.1 Elementarzellen und Gitter.....	39
2.3.2 Kristallrichtungen und Ebenen .....	41
2.3.3 Kristallstrukturen.....	43
2.4 Grundlagen der Halbleiterphysik .....	48
2.4.1 Elektrische Leitfähigkeit und Stromfluss in Halbleitern.....	48
2.4.2 PN Übergang .....	57
2.5 Silizium – wichtigster Basiswerkstoff der Mikrosystemtechnik.....	62
<b>3 Herstellungsverfahren der MEMS Fertigung</b> .....	65
3.1 Herstellung von Siliziumscheiben.....	66
3.1.1 Kristallziehen – Czochralski Tiegelziehverfahren .....	67
3.1.2 Zonenreinigung und Scheibenherstellung.....	68
3.2 Herstellung von MEMS und mikroelektronischen Schaltungen.....	69
3.2.1 Strukturierung mittels Fotolithographie.....	69
3.2.2 Dotierung und Ionenimplantation .....	72
3.2.3 Oxidation und Passivierung .....	74
3.2.4 Ätztechnik .....	77

3.2.5 Reinigungsprozesse.....	80
3.2.6 Metallisierung .....	82
3.2.7 LIGA Verfahren und Mikrogalvanik .....	84
3.2.8 Aufbau- und Verbindungstechnik, Packaging .....	87
<b>4 Temperatursensoren .....</b>	<b>93</b>
4.1 Thermoelemente .....	93
4.2 Thermowiderstände .....	95
4.2.1 Ohmsche Temperatursensoren aus metallischen Leitern .....	95
4.2.2 Halbleiter Temperatursensoren .....	98
4.2.3 Heißeleiter (NTC Widerstände).....	102
4.2.4 Kaltleiter (PTC Widerstände) .....	102
4.3 Thermiodioden .....	103
4.4 Ohmsche Widerstandsmessungen der Materialmesstechnik .....	104
<b>5 Magnetfeldsensoren.....</b>	<b>107</b>
5.1 Hall-Effekt, Magnetowiderstandseffekt, Feld- und Rasterplatte.....	108
5.2 Einfache Mikrosensoren zur Magnetfeldbestimmung .....	115
5.2.1 Hall-Spannungsbetrieb.....	115
5.2.2 Hall-Strombetrieb .....	116
5.2.3 Doppelelektrodenanordnungen als Magnetfeldsensor .....	117
5.2.4 Corbino Scheibe.....	118
<b>6 Strahlungssensoren und Fotodetektoren .....</b>	<b>119</b>
6.1 Grundlagen der Strahlungsmessung.....	121
6.2 Fotodioden.....	122
6.2.1 Aufbau und Wirkungsweise von Fotodioden .....	122
6.2.2 Verbesserung der Quantenausbeute, PIN Diode .....	125
6.2.3 Lawinenfotodioden (APD).....	128
6.2.4 MOS Diode als Fotodetektor .....	129
6.3 Infrarotmesstechnik .....	131
6.4 Fotoleiter .....	133
6.5 Materialien für die Detektion von Licht .....	136
<b>7 Mikro-Elektro-Mechanische Sensorsysteme .....</b>	<b>139</b>
7.1 Piezowiderstandseffekt, Dehnungsmessstreifen .....	141
7.2 Piezoelektrischer Effekt.....	144
7.3 Druckmesstechnik .....	145
7.4 Beschleunigungssensoren .....	149
7.5 Mikrofone.....	152
7.6 Strömungs- und Flusssensoren .....	153

<b>7.7 Mikromechanische Aktuatoren</b> .....	156
7.7.1 Grundprinzipien mikroelektromechanischer Aktuatoren .....	156
7.7.2 Lichtmodulatoren und Spiegel.....	157
7.7.3 Mikromotoren.....	160
<b>8 Chemische Sensoren</b> .....	163
<b>9 Systemintegration und Datenübertragung</b> .....	169
9.1 Bussysteme in Sensorik und Automatisierungstechnik.....	169
9.2 Innovative Funksensorik .....	172
9.3 RFID Technik (Radio Frequency Identification).....	179
<b>10 Energieversorgung</b> .....	185
10.1 Batterien.....	185
10.2 Solarzellen .....	188
10.3 Energieautarke Sensorsysteme .....	192
<b>Anhang</b>	
Symbolverzeichnis .....	195
Literatur- und Quellenverzeichnis .....	201
Stichwortverzeichnis .....	207