

# **SENSORIK**

Band 10

## **Mikrosensorik und Mikroelektronik**

Vom physikalischen Effekt  
zur Grundstruktur  
und zum Mikrosystem

Prof. em. Dr. sc. techn. Hans Eigler

Mit 312 Bildern, 32 Tabellen  
und 542 Literaturstellen

# Inhaltsverzeichnis

---

## Vorwort

## Formelzeichen, Abkürzungen, Bezeichnungen

### I      Definitionen

1	<b>Begriffsbestimmung der Elektronik, der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik</b> .....	1
1.1	Objekte .....	1
1.2	Gegenstand, Ziele und Methoden, Definitionen .....	3
1.3	Arten von Bauelementen und Sensoren.....	7

### II     Naturwissenschaftliche Grundlagen

2	<b>Festkörper und ihre Eigenschaften</b> .....	13
2.1	Arten fester Körper und Kristallgitter.....	13
2.2	Klassifizierung nach der Bindung .....	19
2.3	Kurzer Abriß der physikalischen Eigenschaften .....	22
2.3.1	Mechanische Eigenschaften.....	22
2.3.2	Thermische Eigenschaften, Gitterschwingungen, Phononen, der Welle-Teilchen-Dualismus .....	23
2.3.2.1	Akustische und optische Gitterschwingungen .....	23
2.3.2.2	Dispersion und der Welle-Teilchen-Dualismus.....	26
2.3.2.3	Die Wärmeleitfähigkeit des Gitters .....	34
2.3.3	Elektronische Eigenschaften .....	37
2.3.3.1	Phänomene der Leitfähigkeit und Strahlung.....	37
2.3.3.2	Potentialbarrieren .....	38
2.3.3.3	Quantelung bei Atomen .....	42
2.3.3.4	Das Bändermodell, einfache Darstellung .....	43
2.3.3.5	Energieniveaus von Defekten und Dotanten in Halbleitern .....	49
2.3.3.6	Das Ohmsche Gesetz.....	52
2.3.3.7	Der Einfluß der Elektronen auf die thermischen, optischen und andere Eigenschaften und Erscheinungen, Wechselwirkungen.....	54
2.3.3.8	Elektronische Vorgänge in polykristallinen und amorphen Halbleitern und Dielektrika .....	64
2.3.4	Magnetische Eigenschaften .....	69
2.3.4.1	Überblick .....	69
2.3.4.2	Dünne magnetische Schichten und der magnetoresistive Effekt, bistabiles Verhalten .....	71
2.3.5	Polarisation in festen Dielektrika und Halbleitern .....	74
2.3.5.1	Überblick.....	74
2.3.5.2	Ioneneleitung .....	77
2.3.5.3	Thermische Relaxationspolarisation.....	81
2.3.5.4	Polarisation bei Ionenwanderung .....	84
2.3.5.5	Polarisation bei Schichtenfolgen und heterogenen Gemischen .....	87
2.3.5.6	Strukturpolarisation.....	91
2.3.6	Besondere Arten und Zustände von Dielektrika .....	91
2.3.6.1	Überblick .....	91
2.3.6.2	Elektrete .....	92
2.3.6.3	Ferroelektrika.....	96

2.3.6.4	Piezoelektrika .....	100
2.4	Teilchenstatistik .....	105
2.4.1	Die Fermi-Direc- und andere Verteilungen .....	105
2.4.2	Die Gleichgewichtsverteilung der Ladungsträger in einem Halbleiter .....	109
2.4.3	Beispiele für die Lage des Fermiiniveaus in Halbleitern .....	111
2.4.3.1	Eigenhalbleiter .....	111
2.4.3.2	Störstellenhalbleiter .....	111
2.4.3.3	Temperaturabhängigkeit der Fermienergie .....	113
2.4.3.4	Entartete Halbleiter .....	116
<b>3</b>	<b>Ladungsträgertransport .....</b>	<b>117</b>
3.1	Feldstrom .....	117
3.1.1	Der Leitungsmechanismus, die Boltzmann-Gleichung .....	117
3.1.2	Die Ladungsträgerkonzentration .....	120
3.1.2.1	Flache Donator- und Akzeptorniveaus, niedrige Ladungsträgerkonzentration	120
3.1.2.2	Tiefe Störstellen, hohe Ladungsträgerkonzentration .....	120
3.1.2.3	Temperaturabhängigkeit bei Störstellenhalbleitern und Eigenhalbleitern .....	121
3.1.3	Streumechanismen und Beweglichkeit .....	122
3.1.3.1	Relaxationszeit und Streumechanismen .....	123
3.1.3.2	Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Relaxationszeit .....	123
3.1.3.3	Streuung der Ladungsträger an Phononen .....	125
3.1.3.4	Streuung an ionisierten Störstellen .....	127
3.1.3.5	Streuung an neutralen Störstellen .....	129
3.1.3.6	Streuung an Versetzungen .....	130
3.1.3.7	Andere Streumechanismen .....	130
3.1.3.8	Gemischte Streuung und Zusammenfassung zur Beweglichkeit .....	130
3.1.3.9	Beweglichkeit der Ladungsträger in komplexen Halbleitern .....	132
3.1.4	Ohmsche Leitfähigkeit der Halbleiter .....	134
3.1.4.1	Eigenleitfähigkeit .....	134
3.1.4.2	Störstellenleitung .....	135
3.2	Diffusionsstrom .....	136
3.2.1	Ladungsträgertransport durch Diffusion .....	136
3.2.2	Die Einsteinbeziehung .....	138
3.3	Der Gesamtstrom in Halbleitern, Transportgleichungen .....	140
3.4	Überschußladungsträger in Halbleitern .....	140
3.4.1	Generation und Rekombination der Ladungsträger, ihre Lebensdauer und die Quasiferminiveaus .....	140
3.4.2	Die Kontinuitätsgleichung .....	143
3.4.2.1	Herleitung .....	143
3.4.2.2	Anwendungsbepiele .....	145
3.4.3	Arten der Rekombination .....	149
3.4.3.1	Direkte Rekombination, Bestimmung der Rekombinationsgeschwindigkeit .....	149
3.4.3.2	Rekombination über lokale Niveaus. Das Shockley-Read-Modell .....	151
3.4.3.3	Oberflächenrekombination .....	156
3.4.4	Wechselwirkung von Strahlung und Stoff .....	158
3.4.4.1	Hochenergetische Strahlung .....	158
3.4.4.2	Innerer Photoeffekt in Halbleitern .....	159
3.5	Thermoelektrische, galvanomagnetische und thermomagnetische Effekte .....	163
3.5.1	Thermoelektrische Erscheinungen .....	163
3.5.1.1	Überblick .....	163
3.5.1.2	Der Seebeck-Effekt .....	164
3.5.1.3	Der Peltier-Effekt und die Ableitung von Thomson .....	165
3.5.1.4	Herleitung der thermoelektrischen Koeffizienten .....	166
3.5.2	Der Halleffekt .....	171
3.5.2.1	Bewegung von Ladungsträgern in einem Magnetfeld, der Hallkoeffizient .....	171
3.5.2.2	Ableitung des Hallkoeffizienten mit Hilfe der Boltzmann-Gleichung .....	174

3.5.3	Weitere galvanomagnetische und thermomagnetische Effekte .....	175
3.5.3.1	Überblick .....	175
3.5.3.2	Änderung des Widerstandes im Magnetfeld .....	175
3.5.3.3	Ettinghausen-Effekt und Nernsteffekt .....	176
3.5.3.4	Thermomagnetische Effekte .....	176
3.6	Ladungsträgertransport in starken elektrischen Feldern .....	177
3.6.1	Schwache und starke Felder .....	177
3.6.2	Die Abhängigkeit der Beweglichkeit der Ladungsträger von der Feldstärke .....	178
3.6.3	Feldstärkeabhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration .....	180
3.6.3.1	Thermoelektrische Ionisierung nach Frenkel .....	180
3.6.3.2	Stoßionisation und Tunnelübergänge .....	182
3.6.4	Durchschlag von Festkörpern .....	186
3.6.4.1	Elektrischer und thermischer Durchschlag kompakter Halbleiter .....	186
3.6.4.2	Durchschlag dünner Schichten .....	187
3.6.5	Gunn-Effekt .....	195
3.6.5.1	Charakterisierung .....	195
3.6.5.2	Negativer differentieller Widerstand und stationäre Charakteristik der Driftgeschwindigkeit in Galliumarsenid .....	196
3.6.5.3	Nichtstationäre Driftgeschwindigkeit, Bildung von Domänen .....	198
<b>III</b>	<b>Grundstrukturen</b>	
<b>4</b>	<b>Oberflächenerscheinungen</b> .....	<b>201</b>
4.1	Oberflächenzustände, Feldeffekt, die MOS-Struktur .....	201
4.1.1	Entstehen von Oberflächenzuständen und ihre Ladung .....	201
4.1.2	Raumladung, Bänder, die MOS-Grundstruktur .....	203
4.1.2.1	Raumladung und Bandverbiegung, Poissons-Gleichung .....	203
4.1.2.2	Der MOS-Kondensator .....	204
4.1.3	Berechnung der Feldstärke und der Gesamtladung, Photokapazitätseffekt .....	208
4.1.4	Beispiele .....	210
4.1.4.1	Feldeffekt in Eigenhalbleitern .....	210
4.1.4.2	Feldeffekt in Störstellenhalbleitern .....	212
4.2	Die Änderung der Oberflächenleitfähigkeit beim Feldeffekt .....	216
4.2.1	Nichtgleichgewichtsladungsträgerkonzentration an der Oberfläche bei Ladungsträgergleichgewicht im Volumen .....	216
4.2.2	Abweichungen vom Ladungsträgergleichgewicht an der Oberfläche und im Volumen .....	216
4.2.3	Oberflächenüberschussleitfähigkeit .....	217
4.2.4	Relaxation der Überschussladungsträger .....	220
<b>5</b>	<b>Kontakte und Halbleiterübergänge</b> .....	<b>223</b>
5.1	Das System Metall-Vakuum/Dielektrikum-Metall .....	223
5.1.1	Austrittsarbeit; Elektronenaffinität .....	223
5.1.2	Schottky-Effekt und thermoelektronische Emission .....	225
5.2	Das System Metall-Halbleiter .....	230
5.2.1	Das Bändermodell des Metall-Halbleiter-Kontakts .....	230
5.2.2	Beschreibung der Raumladungsschicht .....	234
5.2.3	Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt .....	238
5.2.3.1	Leitungsmechanismus .....	238
5.2.3.2	Modellvorstellungen zur Strom-Spannungs-Kennlinie .....	239
5.2.3.3	Diffusionstheorie .....	240
5.2.3.4	Diodentheorie .....	242
5.2.4	Tunnelströme und ohmsche Metall-Halbleiter-Kontakte .....	251
5.2.5	Ladungsträgergeneration und -rekombination in der Raumladungszone .....	253

5.2.6	Minderheitsladungsträger im Metall-Halbleiter-Kontakt.....	255
5.2.6.1	Injektion .....	255
5.2.6.2	Übergangsprozesse .....	256
5.2.6.3	Differentielle Kapazität .....	257
5.2.6.4	Exakte Lösung der Poissons-Gleichung .....	271
5.3	Der pn-Übergang .....	273
5.3.1	Struktur und Einstellung des Gleichgewichtszustandes.....	273
5.3.1.1	Struktur .....	273
5.3.1.2	Vorgänge beim Bilden eines pn-Übergangs.....	273
5.3.1.3	Potential- und Feldverlauf in der Sperrsicht, Sperrsichtsbreite .....	275
5.3.2	Die Abhängigkeit der Sperrsichtsbreite von einer äußeren Spannung, die Sperrsichtskapazität.....	279
5.3.3	Injektion und Extraktion von Minderheitsladungsträgern.....	279
5.3.4	Gleichrichtung am pn-Übergang .....	282
5.3.4.1	Durchlaßstrom und Sperrstrom .....	282
5.3.4.2	Endliche Abmessungen der Bahngebiete .....	284
5.3.4.3	Rekombination und Generation im Übergang .....	286
5.3.5	Kapazitäten .....	289
5.3.5.1	die differentielle Sperrsichtskapazität.....	289
5.3.5.2	Die Diffusionskapazität.....	290
5.3.6	Dynamisches Verhalten .....	291
5.3.6.1	Kleinsignalbetrieb .....	291
5.2.6.2	Großsignalbetrieb .....	294
5.3.7	Thermische Stabilität und Durchbruchverhalten .....	299
5.3.7.1	Temperaturabhängigkeit der Strom-Spannungs-Kennlinie .....	299
5.3.7.2	Durchbruchverhalten .....	300
5.3.7.3	Einfluß der Grenze Halbleiter-Dielektrikum auf den pn-Übergang .....	303
5.3.8	Artverwandte Halbleiterübergänge .....	305
5.3.8.1	Heteroübergänge .....	305
5.3.8.2	Der pin-Übergang, Bändermodell und Strom-Spannungs-Kennlinie .....	312
5.3.8.3	p <sup>+</sup> p- und n <sup>+</sup> n-Übergänge, Bändermodell und Kontaktpotentialdifferenz, Ohmsche Kontakte .....	313
5.4	Strom-Spannungs-Kennlinie bei inhomogenen oder nichtkristallinen Halbleitern und Dünnschichtfolgen .....	315
5.4.1	Inhomogene Halbleiter .....	315
5.4.2	Raumladungsbegrenzte Ströme .....	317
5.4.3	Dynatron- und Lichtbogenkennlinie .....	318
5.4.4	Durchtunnelung dünner dielektrischer Schichten durch Elektronen .....	321
5.4.5	Resonanztunneleffekt bei Quanten-Wellen-Strukturen .....	322
5.3.6	Durchgang heißer Elektronen durch dünne Metallschichten .....	323
5.5	Grundelemente der Optoelektronik .....	325
5.5.1	Überblick .....	325
5.5.2	Sperrsichtphotodetektoren .....	326
5.5.3	Der Photoelektromagnetische Effekt .....	330
5.5.4	Strahlende Rekombination und stimuliert Strahlung bei pn-Übergängen .....	333
5.5.4.1	Lumineszenzdioden .....	333
5.5.4.2	Optische Generatoren .....	339
5.5.5	Optoelektronische Wellenleiter .....	347
5.5.5.1	Optische Wellenleitung .....	347
5.5.5.2	Vektorpotential und allgemeine Lösung der Feldgleichungen .....	351
5.5.5.3	Anwendungsbeispiel: Ebene Wellen .....	360
5.5.5.4	Lösung der Feldgleichungen für Filmwellenleiter .....	363
5.5.5.5	Oberflächenwellen .....	367
5.5.5.6	Störungen an der Oberfläche oder im Volumen .....	369
5.5.5.7	Streifenwellenleiter .....	371
5.5.5.8	Richtkoppler .....	381

5.6	Grundelemente der Mikroakustik .....	386
5.6.1	Volumenwellen, Oberflächenwellen, Konverter .....	386
5.6.2	Beschreibung akustischer Volumen- und Oberflächenwellen .....	389
5.6.2.1	Grundgleichungen und Volumenwellen .....	389
5.6.2.2	Lösung der Wellengleichung bei $\operatorname{div} D = 0$ .....	394
5.6.2.3	Lösung der Wellengleichung für den unendlichen isotropen Halbraum, die Rayleighwelle .....	395
5.6.2.4	Einfluß von Anisotropie und Piezoeffekt auf Oberflächenwellen .....	399
5.6.3	Ausbreitung von Oberflächenwellen auf realen Substraten .....	402
5.6.3.1	Überblick .....	402
5.6.3.2	Substrateffekte: Beugung, Beam Steering, Substratdämpfung .....	402
5.6.3.3	Übertragung von Störsignalen: Volumenwellen, elektrisches Übersprechen .....	405
5.6.3.4	Reflexion akustischer Oberflächenwellen: .....	406
5.6.3.5	Störeffektanalyse .....	408
5.6.3.6	Akustische Oberflächenwellen in Schichtfolgen .....	408
5.6.3.7	Akustische Oberflächenwellen in Wellenleitern .....	410
5.6.4	Anregung und Empfang akustischer Oberflächenwellen .....	411
5.6.4.1	Interdigitalwandler und ihre Charakteristika .....	411
5.6.4.2	Die mikroakustische Grundstruktur und komplexe Signalverarbeitungsbauelemente .....	418
<b>6</b>	<b>Grundelemente der Mikromechanik .....</b>	<b>425</b>
6.1	Tragwerke und deren statische Belastung, Statik und Elastostatik .....	425
6.1.1	Balken, Platten, Lager .....	425
6.1.2	Grundbelastungarten, Spannungen und Verformungen .....	427
6.1.2.1	Belastungarten und Lastfälle .....	427
6.1.2.2	Gleichgewicht, Freischneiden, Lösungsalgorithmus .....	427
6.1.2.3	Verschiebungen und Verzerrungen .....	429
6.1.2.4	Verallgemeinertes Hooksches Gesetz .....	430
6.1.2.5	Zweilachsiger (ebener) Spannungszustand .....	431
6.1.3	Biegen von Balken und Platten .....	435
6.1.3.1	Die Bernoulli Hypothese der Biegung, Definitionen .....	435
6.1.3.2	Spannungsverteilung bei der Biegung .....	438
6.1.3.3	Die Verformung bei Biegung, Gleichung der elastischen Linie .....	441
6.1.3.4	Biegen von Kreisscheiben und Kreisplatten .....	444
6.1.4	Torsion von Stäben .....	450
6.1.4.1	Übersicht, Definitionen .....	450
6.1.4.2	Kreiszylinder .....	450
6.1.5	Satz von Castigliano und seine Anwendung .....	451
6.1.5.1	Formulierung .....	451
6.1.5.2	Statisch bestimmt gelagerte Systeme .....	453
6.1.5.3	Statisch unbestimmt gelagerte Systeme .....	455
6.2	Dynamik .....	457
6.2.1	Übersicht und Definitionen .....	457
6.2.2	Schwingungen linearer Systeme .....	460
6.2.2.1	Übersicht und Definitionen .....	460
6.2.2.2	Schwingungen linearer Systeme mit einem Freiheitsgrad .....	461
6.2.2.3	Schwingungen linearer Systeme mit mehreren Freiheitsgraden .....	480
6.3	Elektro-mechanische Analogie .....	487
6.3.1	Analogien heterogener Systeme .....	487
6.3.2	Ersatzschaltung eines mechanischen Systems .....	489
<b>IV</b>	<b>Schaltungs- und Funktionselemente</b>	
<b>7</b>	<b>Transistoren .....</b>	<b>493</b>
7.1	Überblick .....	493

7.2	<b>Feldeffekttransistoren</b> .....	502
7.2.1	Sperrschiichtfeldeffekttransistoren .....	502
7.2.1.1	Beschreibung .....	502
7.2.1.2	Kennlinienfeld $I_D(U_{DS}; U_{GS})$ .....	503
7.2.1.3	Kleinsignalparameter .....	505
7.2.1.4	Kleinsignalersatzschaltbild, dynamisches Verhalten .....	506
7.2.1.5	MESFET und HEMT .....	508
7.2.2	<b>Feldeffekttransistoren mit isoliertem Gate</b> .....	509
7.2.2.1	Beschreibung .....	509
7.2.2.2	Schwellspannung .....	512
7.2.2.3	Stromgleichungen .....	515
7.2.2.4	Abweichungen vom einfachen Kennlinienmodell, Verbesserung der Modellierung, physikalische Effekte, Geometrieeinfluß .....	520
7.2.2.5	Modellgleichungen für Überschlagsrechnungen .....	528
7.2.2.6	Temperaturverhalten und Stabilität .....	530
7.2.2.7	Ersatzschaltbilder, Vierpolparameter, Grenzfrequenz .....	531
7.3	<b>Bipolartransistor</b> .....	535
7.3.1	Aufbau, Funktionsprinzip, Grundschaltungen und Betriebsarten .....	535
7.3.2	Transistorströme .....	537
7.3.2.1	Stromfluß und Stromverstärkung .....	537
7.3.2.2	Aktiver Betrieb .....	538
7.3.2.3	Aktiv-inverser und Sättigungsbetrieb .....	539
7.3.3	Physikalische Stromgleichungen und Ersatzschaltung .....	541
7.3.4	Stationäres Gleichstromverhalten, Kennlinienfelder .....	545
7.3.4.1	Basisschaltung .....	545
7.3.4.2	Emitterschaltung .....	546
7.3.4.3	Kollektorschaltung .....	547
7.3.5	Kleinsignalverhalten .....	548
7.3.5.1	Niederfrequenzersatzschaltung .....	548
7.3.5.2	Hochfrequenzersatzschaltung .....	550
7.3.5.3	Grenzfrequenzen .....	553
<b>8</b>	<b>Integrierte passive Schaltungs- und Speicherelemente</b> .....	555
8.1	Dioden .....	555
8.2	Widerstände und Verbindungen .....	556
8.2.1	Diffundierte und implantierte Widerstände .....	556
8.2.2	MOS-Widerstände .....	558
8.2.3	Dünne- und Dickschichtwiderstände .....	559
8.2.4	Verbindungsleitungen .....	560
8.3	Integrierte Kondensatoren .....	561
8.3.1	Kapazitäten .....	561
8.3.2	pn-Übergänge .....	562
8.3.3	MOS- und Filmkondensatoren .....	562
8.4	MOS-Speicherelemente .....	563
8.4.1	Kurzer Überblick über digitale elektronische Halbleiterspeicher .....	563
8.4.2	EPROM und EEPROM .....	564
<b>9</b>	<b>Grundstromkreise</b> .....	569
9.1	Auswahl und Klassifizierung .....	569
9.2	Grundstromkreise für den Schalterbetrieb .....	570
9.2.1	Hauptkenndaten eines elektronischen Schalters .....	570
9.2.2	Der Bipolartransistor als Schalter .....	573
9.2.2.1	Übersteuerungsschalter bei statischem Betrieb .....	573
9.2.2.2	Übersteuerungsschalter bei dynamischem Betrieb .....	575
9.2.2.3	Schaltstufe mit Bipolartransistoren nach dem Stromschaltbetrieb .....	577

9.2.3	Der MOS-Transistor als Schalttransistor .....	579
9.2.3.1	MOS-FET als Schalter .....	579
9.2.3.2	Statischer Betrieb von Invertern .....	580
9.2.3.3	Dynamischer Betrieb von Invertern .....	584
9.2.3.4	BiCMOS-Inverter .....	588
9.3	Grundstromkreise für den Verstärkerbetrieb .....	588
9.3.1	Einstellung des Arbeitspunktes in Verstärkerstufen, Überblick .....	588
9.3.2	Grundstromkreis für den Bipolartransistor .....	589
9.3.2.1	Einstellung des Arbeitspunktes .....	589
9.3.2.2	Die Stromversorgungsschaltung und ihre Stabilisierungswirkung .....	590
9.3.2.3	Arbeitspunktstabilisierung bei analogen integrierten Schaltungen .....	592
9.3.3	Grundstromkreis für Feldeffekttransistoren .....	594
9.3.3.1	Verstärkerstufen .....	594
9.3.3.2	Arbeitspunkt .....	596
<b>10</b>	<b>Rauschen elektronischer Bauelemente .....</b>	<b>599</b>
10.1	Elementare Rauschprozesse .....	599
10.1.1	Rauschen, Rauschquellen, Beschreibung .....	599
10.1.2	Thermisches Rauschen .....	604
10.1.3	Schrotrauschen .....	605
10.1.3.1	Beschreibung .....	606
10.1.3.2	Photonen- oder Quantenrauschen in Lumineszenz- und Laserdioden .....	608
10.1.4	Stromverteilungsrauschen .....	609
10.1.5	Generations-Rekombinations-Rauschen, 1/f-Rauschen und Stoßrauschen .....	609
10.2	Rauschmodelle .....	612
10.2.1	Bipolartransistor .....	612
10.2.1.1	Rauschersatzschaltung für niedrige und mittlere Frequenzen .....	612
10.2.1.2	Allgemeiner rauschender Vierpol, Rauschoptimierung .....	613
10.2.2	Feldeffekttransistoren .....	617
10.2.2.1	Sperrschichtfeldeffekttransistoren .....	617
10.2.2.2	Feldeffekttransistoren mit isoliertem Gate .....	619
10.2.3	Kurzer Vergleich des Rauschens bei Dioden und Transistoren .....	621
<b>11</b>	<b>Mikrosensoren .....</b>	<b>623</b>
11.1	Kurzdefinition, Anforderungen, Einteilung .....	623
11.2	Temperatursensoren .....	625
11.2.1	Sensorprinzipien .....	625
11.2.2	HalbleiterTemperatursensoren .....	626
11.2.2.1	Polykristalline Halbleiterwiderstände .....	626
11.2.2.2	Silizium-Thermometer .....	629
11.2.2.3	Dioden und Transistoren als Temperatursensoren .....	632
11.2.3	Beispiele für weitere Temperatursensoren .....	633
11.2.4	Schaltungen .....	635
11.3	Strahlungsempfindliche Sensoren .....	637
11.3.1	Sensorprinzipien .....	637
11.3.2	Halbleiter-Teilchendetektoren .....	642
11.3.3	Photoempfänger von Ultraviolet bis zum nahen Infrarot .....	646
11.3.3.1	Photowiderstände .....	646
11.3.3.2	Photodioden .....	648
11.3.4	Infrarot-Sensoren .....	656
11.3.5	Faseroptische und integrierte optische Sensoren .....	662
11.3.5.1	Lichtwellenleiter der Faseroptik und der integrierten Optik .....	662
11.3.5.2	Meßgrößen und Einstellung faseroptischer und integrierter optischer Sensoren .....	668
11.3.5.3	Beispiele für bisher entwickelte faseroptische und integrierte optische Sensoren und ihr Meßprinzip .....	669

11.4	Magnetfeld-Mikrosensoren .....	681
11.4.1	Sensorwerkstoffe und Sensorprinzipien, Anwendungen .....	681
11.4.2	Verschiedene Magnetfeld-Mikrosensoren .....	684
11.4.2.1	Hallsensoren .....	684
11.4.2.2	Magnetowiderstände .....	685
11.4.2.3	Magnetodioden .....	687
11.4.2.4	Magnetotransistoren .....	690
11.4.2.5	Weitere Arten von Magnetfeld-Mikrosensoren .....	695
11.5	Nichtoptische chemische Mikrosensoren .....	696
11.5.1	Sensorwerkstoffe und Sensorprinzipien .....	696
11.5.2	Chemowiderstände .....	697
11.5.2.1	Änderung der Oberflächenleitfähigkeit von Metalloxiden .....	697
11.5.2.2	Ändeung der Oberflächenleitfähigkeit von Dielektrika .....	699
11.5.3	Elektrochemische Sensoren, Feststoffelektrolyte .....	700
11.5.4	Potentiometrische Sensoren mit ionenempfindlicher Phasengrenze und verschiedenen polarisierbaren Elektroden .....	701
11.5.4.1	Ionensensitiver Feideeffektransistor, Aufbau und elektrochemische Prozesse .....	701
11.5.4.2	pH-Empfindlichkeit bei polarisierbaren Elektroden, site-binding-Modell .....	705
11.5.4.3	Ionenempfindlichkeit .....	706
11.5.4.4	Ionenselektivität .....	706
11.5.4.5	Ionenempfindliche Membranen mit unpolarisierbaren Elektroden .....	708
11.5.5	MOS-Strukturen mit oberflächenaktivem Gate .....	709
11.5.5	Amperometrische Sensoren .....	709
11.6	Mikrodruckaufnehmer .....	710
11.6.1	Überblick .....	710
11.6.2	Piezowiderstand von Halbleitern .....	711
11.6.2.1	Streifenstrukturen .....	711
11.6.2.2	Piezoresistive Widerstände auf Membranplatten .....	716
11.6.3	Beispiele für die Gestaltung piezoresistiver und kapazitiver Druck- und Beschleunigungssensoren .....	717
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	721
<b>Glossar</b>	.....	743
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	759