

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	1
<b>1 Halbleiterphysik</b>	5
1.1 Grundbegriffe . . . . .	5
1.1.1 Definition des Halbleiters . . . . .	5
1.1.2 Idealer Halbleiter, Elektronen und Löcher . . . . .	5
1.1.3 Energiespektrum der Elektronen . . . . .	8
1.2 Halbleiter-Eigenleitung . . . . .	10
1.2.1 Statistik der Ladungsträgerkonzentration bei Eigenleitung . . . . .	10
1.2.2 Fermi-Niveau und Bandlücke . . . . .	16
1.3 Störstellenleitung durch Dotierung . . . . .	17
1.3.1 n-Dotierung . . . . .	18
1.3.2 p-Dotierung . . . . .	22
1.3.3 Temperaturverhalten dotierter Halbleiter . . . . .	25
1.3.4 Reduktion der Bandlücke bei hohen Dotierungen . . . . .	28
1.4 Rekombinationsvorgänge, Lebensdauer . . . . .	29
1.4.1 Dielektrische Relaxation (Majoritätsträger) . . . . .	29
1.4.2 Lebensdauer von Ladungsträger-Paaren . . . . .	30
1.4.3 Rekombination mittels Rekombinationszentren . . . . .	32
1.4.4 Auger-Rekombination . . . . .	35
1.4.5 Physikalische Modellbildung und Lebensdauern . . . . .	37
1.4.6 Stoßionisation und Lawineneffekt . . . . .	39
1.5 Streuprozesse freibeweglicher Ladungsträger . . . . .	42
1.5.1 Arten von Streuprozessen . . . . .	43
1.5.2 Driftgeschwindigkeiten und Beweglichkeiten . . . . .	43
1.5.3 Streuung am Gitter und an Verunreinigungen . . . . .	46
1.5.3.1 Gitterstreuung . . . . .	46
1.5.3.2 Störstellenstreuung . . . . .	47
1.5.3.3 Kombinationen von Gitter- und Störstellenstreuung . . . . .	47
1.5.4 Elektronen-Löcher-Streuung . . . . .	49
1.5.4.1 Herkömmliche Theorie . . . . .	49
1.5.4.2 Theorie nach Mnatsakanov . . . . .	51

1.6	Grundgleichungen der Halbleiterbauelemente . . . . .	54
	G. Wachutka	
1.6.1	Problemstellung . . . . .	54
1.6.2	Elektrische Ladung und elektrisches Potential . . . . .	55
1.6.3	Trägerbilanzgleichungen . . . . .	56
1.6.4	Isotherme Stromtransportmodelle . . . . .	59
1.6.4.1	Stromtransport durch Drift im elektrischen Feld . . . . .	59
1.6.4.2	Stromtransport durch Trägerdiffusion . . . . .	60
1.6.4.3	Kombiniertes Drift-Diffusions-Modell . . . . .	60
1.6.5	Theoretische Begründung des Drift-Diffusions-Modells . . . . .	61
1.6.6	Elektrothermisches Transportmodell . . . . .	64
1.6.7	Einfluß statischer Magnetfelder (Hall-Effekt) . . . . .	66
1.7	Exemplarische Anwendungen der Halbleiter-Modellgleichungen .	68
1.7.1	Elektrische Leitfähigkeit dotierter Halbleiter . . . . .	68
1.7.2	Lebensdauer von Minoritätsträgern . . . . .	70
<b>2</b>	<b>Diode</b>	<b>73</b>
2.1	Ungestörter pn-Übergang . . . . .	73
2.1.1	Schottkysche Parabelnäherung . . . . .	76
2.1.2	Linearer pn-Übergang . . . . .	81
2.1.3	Berechnung über das Stromdichte-Gleichgewicht . . . . .	83
2.2	pn-Übergang mit äußerer Spannung . . . . .	85
2.2.1	pn-Übergang bei Beanspruchung in Sperrrichtung . . . . .	85
2.2.2	pn-Übergang bei Beanspruchung in Durchlaßrichtung . . . . .	87
2.2.3	Trägerdichteverlauf in der Raumladungszone . . . . .	88
2.3	Dioden-Kennlinie . . . . .	92
2.4	Grenzen des pn-Übergangs im Sperrzustand . . . . .	103
2.4.1	Thermischer Durchbruch . . . . .	103
2.4.2	Statischer Lawinendurchbruch . . . . .	105
2.4.3	Zener-Effekt (innerer Feldeffekt) . . . . .	106
2.5	Leistungsdiode – Einführung . . . . .	106
2.6	Silizium-Leistungsdioden . . . . .	120
	J. Lutz	
2.6.1	Einleitung . . . . .	120
2.6.2	Aufbau von Si-Leistungsdioden . . . . .	121
2.6.3	Kennlinie der pin-Diode . . . . .	123
2.6.4	Sperrspannung der pin-Diode . . . . .	124
2.6.4.1	Dreiecksförmiger Feldverlauf . . . . .	126
2.6.4.2	Trapezförmiger Feldverlauf . . . . .	130
2.6.5	Durchlaßverhalten . . . . .	132
2.6.5.1	Ladungsträgerverteilung in der niedrig dotierten Zone . . . . .	132
2.6.5.2	Berechnung der Durchlaßspannung in Hallscher Näherung . . .	135
2.6.5.3	Berücksichtigung der Emitter-Rekombination durch eine effektive Trägerlebensdauer . . . . .	138

2.6.5.4	Berücksichtigung des in Emittergebietten rekombinierenden Stroms . . . . .	139
2.6.5.5	Temperaturabhängigkeit der Durchlaßkennlinie . . . . .	142
2.6.6	Relation zwischen gespeicherter Ladung und Durchlaßspannung	143
2.6.7	Rekombinationszentren . . . . .	145
2.6.7.1	Gold und Platin als Rekombinationszentren . . . . .	145
2.6.7.2	Strahlungsinduzierte Rekombinationszentren . . . . .	147
2.6.8	Einschaltverhalten von Leistungsdioden . . . . .	149
2.6.9	Abschaltverhalten von Leistungsdioden . . . . .	153
2.6.9.1	Definitionen zum Abschaltverhalten von Leistungsdioden . . . .	153
2.6.9.2	Durch Leistungsdioden erzeugte Schaltverluste . . . . .	159
2.6.9.3	Schutzbeschaltung von Dioden . . . . .	162
2.6.9.4	Vorgang beim Abschalten von Leistungsdioden . . . . .	171
2.6.10	Moderne schnelle Dioden mit optimiertem Schaltverhalten . . .	178
2.6.10.1	Dioden mit Dotierungsstufe in der niedrig dotierten Zone . . . .	178
2.6.10.2	Dioden mit Anodenstrukturen zur Verbesserung des Abschaltverhaltens . . . . .	179
2.6.10.3	EMCON-Diode . . . . .	182
2.6.10.4	CAL-Diode . . . . .	184
2.6.10.5	Hybrid-Diode . . . . .	186
2.6.10.6	Tandem-Diode . . . . .	188
2.6.10.7	MOS-gesteuerte Dioden . . . . .	189
2.6.11	Ausblick . . . . .	194
2.7	Dynamischer Avalanche	195
	J. Lutz	
2.7.1	Dynamischer Avalanche in schnellen Dioden . . . . .	196
2.8	Höhenstrahlung . . . . .	205
<b>3</b>	<b>Bipolarer Transistor (Injektionstransistor)</b>	<b>207</b>
3.1	Bipolarer Signaltransistor . . . . .	207
3.2	Transistor-Modelle . . . . .	215
3.2.1	Ebers-Moll-Modell . . . . .	215
3.2.2	Gummel-Poon-Modell . . . . .	218
3.3	Bipolarer Leistungstransistor . . . . .	226
3.3.1	Einführung . . . . .	226
3.3.2	Hochinjektions- und Rekombinationseinflüsse beim Leistungstransistor . . . . .	231
3.3.3	Basisaufweitung durch Abbau der Basis-Kollektor-Raumladungszone . . . . .	237
3.3.4	Quasisättigung und Modellbildung . . . . .	240
3.3.5	Basisaufweitung durch Geschwindigkeitsbeschränkung der Ladungsträger . . . . .	244
3.3.6	Basiswiderstand und Emitterrandverdrängung . . . . .	245
3.3.7	Sperrverhalten des Leistungstransistors . . . . .	247

3.3.8	Schaltverhalten des Leistungstransistors . . . . .	249
3.3.9	„Second Breakdown“ beim Leistungstransistor . . . . .	256
3.4	Abschließende Bemerkungen zum Leistungstransistor . . . . .	261
<b>4</b>	<b>Thyristor</b> . . . . .	<b>262</b>
4.1	Prinzip des Thyristors . . . . .	262
4.2	Zwei-Transistor-Ersatzschaltbild des Thyristors . . . . .	268
4.2.1	Blockierbereich . . . . .	270
4.2.2	Sperrbereich . . . . .	274
4.2.3	Durchlaßbereich . . . . .	277
4.3	Dynamisches Verhalten des Thyristors . . . . .	279
4.3.1	Überkopfzünden . . . . .	280
4.3.2	Einschalten mit Steuerstrom . . . . .	280
4.3.3	Phänomenologische Darstellung des Einschaltvorgangs . . . . .	284
4.3.4	Zündausbreitungseffekt, $dI/dt$ -Grenzen . . . . .	285
4.3.5	Ausschalten durch Abkommutieren des Anodenstromes . . . . .	288
4.3.6	$dU/dt$ -Grenzen, Emitterkurzschlüsse, Freiwerdezeit, GATT . . . . .	293
4.4	Dimensionierung von Thyristoren . . . . .	296
4.4.1	Auslegung der Spannungsfestigkeit . . . . .	296
4.4.2	Durchlaß- und Schaltverluste . . . . .	299
4.5	Frequenzthyristor, Dimensionierungskriterien . . . . .	301
4.6	Unsymmetrischer Thyristor (ASCR) und rückwärtsleitender Thyristor (RCT) . . . . .	303
4.7	Zünd-, Ansteuerschaltungen und Steuersätze . . . . .	306
4.7.1	Zündschaltungen . . . . .	306
4.7.2	Steuersätze . . . . .	310
4.8	Aktuelle Entwicklungen bei hochsperrenden Thyristoren . . . . .	315
	H.-J. Schulze, F.-J. Niedernostheide	
4.8.1	Einleitung . . . . .	315
4.8.2	Integration der Ansteuer- und Schutzfunktionen . . . . .	317
4.8.2.1	Lichtzündung und Amplifying-Gate-Struktur . . . . .	317
4.8.2.2	Überspannungsschutzfunktion . . . . .	320
4.8.2.3	$dU/dt$ -Schutzfunktion . . . . .	322
4.8.2.4	Freiwerdeschutzfunktion . . . . .	323
4.8.3	Herstellung . . . . .	324
4.8.4	Elektrische Eigenschaften . . . . .	325
4.8.4.1	Durchlaß-, Sperr- und Ausschaltverhalten . . . . .	326
4.8.5	Integrierte Funktionen . . . . .	328
4.8.5.1	Lichtzündung und Überspannungsschutz . . . . .	328
4.8.5.2	$dU/dt$ -Schutz . . . . .	329
4.8.5.3	Freiwerdeschutz . . . . .	329
4.9	Diac und Triac . . . . .	333

<b>5</b>	<b>Abschaltbare bipolare Halbleiter (GTO, GCT)</b>	<b>337</b>
5.1	Einleitung GTO . . . . .	337
5.1.1	Anodenshorts beim GTO . . . . .	342
5.1.2	Einfluß der Gate-Kathoden-Struktur ( $p_2$ -Basis) beim GTO . . . . .	344
5.2	Beschaltung des GTO . . . . .	346
5.3	GTO und Gate-Elektronik . . . . .	349
5.4	Grundschaltung zum Erzeugen des Gatestroms . . . . .	349
5.5	Experimentelle Ein- und Ausschaltvorgänge von Klein-GTOs . . . . .	353
5.6	Hochleistungs-GTOs . . . . .	359
	H. Grüning	
5.6.1	Eigenschaften von Hochleistungs-GTOs . . . . .	363
5.6.1.1	Haltestrom . . . . .	364
5.6.1.2	Zündstrom . . . . .	364
5.6.1.3	Durchlaßkennlinien . . . . .	365
5.6.1.4	Einschaltvorgang und Einschaltverluste . . . . .	366
5.6.1.5	Gate-Abschaltstrom und Speicherzeit . . . . .	369
5.6.1.6	Ausschaltverluste und Beschaltung . . . . .	370
5.6.1.7	Konsequenzen für den Aufbau von Hochleistungs-GTO-Umrichtern . . . . .	371
5.6.2	Grenzverhalten des GTO . . . . .	375
5.6.2.1	Einfluß der lateralen Struktur . . . . .	375
5.6.2.2	Skalierverhalten der GTOs . . . . .	377
5.6.2.3	Stromverteilung während des Abschaltvorganges . . . . .	378
5.6.2.4	Beeinflussung der Abschaltfähigkeit mittelgroßer GTOs durch veränderte Ansteuerung . . . . .	379
5.6.2.5	Beeinflussung der Abschaltfähigkeit großer GTOs durch veränderte Ansteuerung . . . . .	382
5.6.2.6	Beeinflussung der Einschaltfähigkeit durch veränderte Ansteuerung . . . . .	385
5.7	Gate Commutated Thyristor GCT . . . . .	391
	H. Grüning	
5.7.1	Aufbau einer niederinduktiven Ansteuerung . . . . .	394
5.7.2	Auswirkungen auf den Gültigkeitsbereich des Zwei-Transistor-Ersatzschaltbildes . . . . .	396
5.7.3	Auswirkungen auf den Hauptkreis des Spannungszwischenkreisumrichters . . . . .	397
5.7.4	Wafer-Design asymmetrischer GCTs . . . . .	399
5.7.5	Rückwärts leitende GCTs . . . . .	400
5.7.6	Rückwärts sperrende GCTs . . . . .	402
5.7.6.1	Realisierung durch Einbau einer separaten Diode ins GCT-Gehäuse . . . . .	402
5.7.6.2	Realisierung eines monolithischen, rückwärts sperrenden GCT . . . . .	403
5.7.7	Eigenschaften von asymmetrischen und rückwärts leitenden GCTs . . . . .	404
5.7.7.1	Haltestrom . . . . .	405
5.7.7.2	Zündstrom . . . . .	405
5.7.7.3	Durchlaßkennlinien . . . . .	406
5.7.7.4	Einschaltvorgang und Einschaltverluste . . . . .	407

5.7.7.5	Gate-Abschaltstrom und Speicherzeit . . . . .	409
5.7.7.6	Ausschaltverluste und Schaltgeschwindigkeit . . . . .	412
5.7.8	Eigenschaften von rückwärts sperrenden GCTs . . . . .	414
5.7.8.1	GCT mit getrennter Diode . . . . .	414
5.7.8.2	Monolithisch integrierter GCT . . . . .	415
5.7.8.3	Auswirkungen auf die Anwendung . . . . .	416
5.7.9	Grenzverhalten des GCT . . . . .	419
5.7.10	Einordnung des GCT . . . . .	427
<b>6</b>	<b>Unipolare Bauelemente</b> . . . . .	<b>429</b>
6.1	Feldeffekt-Transistoren (Einführung) . . . . .	429
6.2	Aufbau und Funktion des JFET . . . . .	430
6.3	Grundlegende Dimensionierungsregeln für den JFET . . . . .	434
6.4	Metal-Insulator-Semiconductor-Struktur (MIS) . . . . .	438
6.5	Schottky-Diode . . . . .	450
6.5.1	Vereinfachte Bänderstruktur des Metall-Halbleiter-Übergangs . . . . .	450
6.5.2	Stromtransport . . . . .	452
6.5.3	Kennliniengleichung . . . . .	453
6.5.4	Schaltverhalten, Nennwerte . . . . .	456
6.6	MOSFET und Leistungs-MOSFET (Einführung und prinzipielle Funktion) . . . . .	458
6.6.1	MOSFET (Einführung) . . . . .	458
6.6.2	Vom Signal- zum Leistungs-MOSFET . . . . .	458
6.7	Schaltverhalten des Leistungs-MOSFET . . . . .	470
6.7.1	Theorie des Schaltverhaltens . . . . .	470
6.7.2	Schaltverhalten in der Praxis . . . . .	477
6.8	Auslegungsüberlegungen zum Leistungs-MOSFET . . . . .	487
6.9	Ansteuerung und Schutz von Leistungs-MOSFETs . . . . .	488
6.9.1	Ansteuerschaltungen . . . . .	488
6.9.2	Schutzbeschaltungen . . . . .	491
6.10	Kompensationsbauelemente . . . . .	494
	G. Deboy	
6.10.1	Einleitung . . . . .	494
6.10.2	Konzepte für Hochvoltschalter und deren theoretische Betrachtung . . . . .	494
6.10.3	Kompensationsbauelemente, theoretische Überlegungen . . . . .	499
6.10.4	Herstelltechnologie für Kompensationsbauelemente . . . . .	504
6.10.5	Eigenschaften von Kompensationsbauelementen . . . . .	506
6.10.6	Vorteile von Kompensationsbauelementen in der Applikation . . . . .	511
6.11	Static-Induction-Transistor (SIT) . . . . .	514
6.12	Monolithische Bidirektionale Schalter (MBS) . . . . .	520
	R. Sittig	
6.12.1	Einleitung . . . . .	520
6.12.2	Struktur des Monolithischen Bidirektionalen Schalters . . . . .	521
6.12.3	Funktion der Stegstrukturen . . . . .	522

6.12.4	Sperrverhalten . . . . .	524
6.12.5	Durchlaßverhalten . . . . .	527
6.12.6	Strombegrenzung und Pinch-Off . . . . .	531
6.12.7	Abschaltverhalten . . . . .	533
6.12.8	Abschätzungen zum dynamischen Avalanche . . . . .	536
6.12.9	Versuch einer zusammenfassenden Beurteilung . . . . .	538
<b>7</b>	<b>Kombinationen von uni- und bipolaren Leistungsbauelementen</b>	<b>540</b>
7.1	Einführung und Überblick . . . . .	540
7.2	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) . . . . .	550
7.2.1	Prinzipielle Struktur des IGBT . . . . .	550
7.2.2	Sperr- und Blockierbetrieb, reale Bauformen des IGBT . . . . .	552
7.2.3	Verhalten im Durchlaßbetrieb . . . . .	554
7.2.4	Analyse des Schaltverhaltens von IGBTs . . . . .	560
7.2.5	Experimentelle Schaltvorgänge . . . . .	570
7.2.6	Latch-Up . . . . .	576
7.2.7	Ansteuerung und Schutz von IGBTs . . . . .	577
7.2.8	Typische Daten von IGBTs . . . . .	578
7.3	IGBT-Abwandlungen . . . . .	579
7.4	Neue Entwicklungen bei IGBTs . . . . .	594
	A. Porst	
7.4.1	Einleitung . . . . .	594
7.4.2	Statische Eigenschaften . . . . .	595
7.4.3	Dynamisches Verhalten . . . . .	600
7.4.3.1	Ausschalten . . . . .	600
7.4.3.2	Einschalten . . . . .	606
7.4.4	Verhalten im Kurzschlußfall . . . . .	608
7.4.5	Zusammenfassung . . . . .	615
<b>8</b>	<b>Smart-Power-Bauelemente</b>	<b>617</b>
	Ch. Xu	
8.1	Laterale Leistungsbauelemente und Smart-Power-Ansatz . . . . .	617
	D. Schröder	
8.2	Power-IC-Technologien . . . . .	623
8.2.1	Smart-Discrete-Technologie . . . . .	623
8.2.2	BCD-Technologie . . . . .	625
8.2.3	HV-CMOS-Technologie . . . . .	627
8.2.4	Weitere Technologien . . . . .	630
8.2.5	Montagetechnik . . . . .	632
8.3	Power-IC-Funktionen . . . . .	633
8.3.1	Schutzfunktionen . . . . .	633
8.3.1.1	Übertemperaturschutz . . . . .	633
8.3.1.2	Kurzschluß-Schutz . . . . .	636

8.3.2	Diagnose und Current-Sense . . . . .	640
8.3.3	EMV-optimiertes Schalten . . . . .	645
8.3.4	Weitere Funktionen . . . . .	647
8.4	Entwurfsmethodik . . . . .	648
8.5	Hochstrom-PROFET . . . . .	650
8.6	Verhaltensmodelle . . . . .	653
8.7	Zuverlässigkeiten . . . . .	656
8.8	Ausblick über die weitere Entwicklung . . . . .	659
<b>9</b>	<b>Silizium-Carbid SiC und andere Materialien</b>	<b>661</b>
9.1	Einführung . . . . .	661
9.1.1	Beweglichkeit von Ladungsträgern in SiC . . . . .	667
9.1.2	Anisotrope Beweglichkeit . . . . .	671
9.1.3	Sättigungsgeschwindigkeiten . . . . .	672
9.1.4	Unvollständige Ionisation . . . . .	673
9.1.5	Stoßionisation . . . . .	680
9.1.6	Diffusionsspannung . . . . .	680
9.1.7	Lebensdauer von Minoritätsträgern . . . . .	681
9.2	SiC-Bauelemente-Technologie . . . . .	683
9.2.1	Defekte bei SiC, zusätzlich zu MPD . . . . .	685
9.2.2	Zuverlässigkeit der SiC-MOS-Strukturen . . . . .	686
9.3	Schnelle SiC-Dioden . . . . .	687
9.3.1	SiC-Schottky-Dioden . . . . .	687
9.3.2	SiC Merged-pin-Schottky-Diode (MPS-Diode) . . . . .	690
9.3.3	Bipolare SiC-pn-Dioden . . . . .	692
9.3.4	Zusammenfassung und Ausblick SiC-Dioden . . . . .	694
9.4	Steuerebare SiC-Leistungshalbleiter . . . . .	695
9.4.1	Steuerebare unipolare Leistungshalbleiter . . . . .	696
9.4.2	Steuerebare bipolare Leistungshalbleiter . . . . .	700
9.4.3	Bipolare SiC-Transistoren . . . . .	700
9.4.4	Bipolare SiC-JFETs . . . . .	702
9.4.5	SIASFET . . . . .	703
9.4.6	MOS-gesteuerte unipolare Leistungshalbleiter . . . . .	704
<b>10</b>	<b>Aufbau- und Verbindungstechnik in der Leistungselektronik</b>	<b>706</b>
	U. Scheuermann	
10.1	Einleitung . . . . .	706
10.2	Grundlagen der Aufbau- und Verbindungstechnik . . . . .	707
10.2.1	Thermische Eigenschaften von Leistungskomponenten . . . . .	707
10.2.2	Elektrische Eigenschaften von Leistungskomponenten . . . . .	720
10.2.3	Zuverlässigkeit von Leistungskomponenten . . . . .	728
10.3	Architektur von Leistungskomponenten . . . . .	738



10.3.1	Diskrete Leistungsgehäuse . . . . .	740
10.3.1.1	Die TO-Familie und ihre Verwandten . . . . .	740
10.3.1.2	Die Scheibenzelle . . . . .	744
10.3.2	Leistungsmodule . . . . .	749
10.3.3	Intelligente Leistungsmodule . . . . .	761
10.3.4	Leistungselektronische Subsysteme und Systeme . . . . .	768
10.4	Zukünftige Herausforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik . . . . .	772
<b>11</b>	<b>Physikalische Modelle für die Schaltungssimulation</b>	<b>778</b>
	H. Kuhn	
11.1	Einführung . . . . .	778
11.1.1	Simulation und Modelle in der Leistungselektronik . . . . .	779
11.1.2	Schaltungssimulation und Modellbildung . . . . .	781
11.1.3	Physikalische Modelle . . . . .	783
11.2	Modell der Leistungsdiode . . . . .	784
11.2.1	Modularer Modellaufbau . . . . .	784
11.2.2	Modellierung der Randzonen . . . . .	787
11.2.3	Modellierung der Driftzone . . . . .	791
11.2.4	Gesamtmodell . . . . .	804
11.2.5	Anwendung des Diodenmodells . . . . .	806
11.3	Modelle für GTO und GCT . . . . .	807
11.3.1	GTO und GCT: Gemeinsamkeiten und Unterschiede . . . . .	807
11.3.2	GCT: Modularer Modellaufbau . . . . .	809
11.3.3	GCT: Modellierung der Pufferschicht . . . . .	811
11.3.4	Modellierung des Wide-Base-Transistors (p-Basis) . . . . .	815
11.3.5	GCT: Gesamtmodell . . . . .	818
11.3.6	GCT: Simulation von Schalttransienten und Kennlinie . . . . .	820
11.3.7	Anwendung: Serienschaltung von GCTs . . . . .	832
11.4	Modellierung des IGBT . . . . .	834
11.4.1	Vorbemerkungen . . . . .	834
11.4.2	IGBT – Modularer Modellaufbau . . . . .	835
11.4.3	MOSFET-Steuerkopf . . . . .	837
11.4.4	IGBT: Gesamtmodell . . . . .	844
11.4.5	Modellvalidierung . . . . .	845
<b>12</b>	<b>Hochdynamische Stromerfassung in der Leistungselektronik</b>	<b>849</b>
	P. Hofer-Noser, N. Karrer	
12.1	Einführung . . . . .	849
12.2	Anforderungen an Strommeßgeräte für die Leistungselektronik . . . . .	850
12.3	Übersicht über die bekanntesten Strommeßverfahren . . . . .	851
12.4	Meßgeräte für die hochfrequente Strommessung . . . . .	852
12.4.1	Koaxialer Meßwiderstand (Coaxial Shunt) (DC... GHz) . . . . .	852

12.4.2	Impulsübertrager (CT) (Hz... MHz) . . . . .	854
12.4.3	Eta-Prinzip (DC-CT) (DC... MHz) . . . . .	863
12.4.4	Kompensationswandler (Closed Loop Probe) (DC... MHz) . . . . .	867
12.4.5	Rogowskigürtel (Rogowski Coil) (Hz... MHz) . . . . .	868
12.4.6	Luft-CT (Air Cored CT) (Hz... MHz) . . . . .	871
12.4.7	HOKA-Prinzip (HOKA Principle) (DC... MHz) . . . . .	873
12.5	Übertragungsfunktion und Signalverzögerung . . . . .	876
12.6	Ausblick . . . . .	878
12.7	Strommessung in der Praxis . . . . .	878

## Variablenübersicht 884

Kapitel 1 . . . . .	884
Kapitel 2 . . . . .	887
Kapitel 3 . . . . .	891
Kapitel 4 . . . . .	894
Kapitel 5 . . . . .	897
Kapitel 6 . . . . .	899
Kapitel 7 . . . . .	903
Kapitel 8 . . . . .	905
Kapitel 9 . . . . .	907
Kapitel 10 . . . . .	909
Kapitel 11 . . . . .	910
Kapitel 12 . . . . .	913

## Literaturverzeichnis 915

Allgemeine Literatur . . . . .	915
Kapitel 1 (Halbleiterphysik) . . . . .	918
Kapitel 2 (Diode) . . . . .	923
Kapitel 3 (Bipolarer Transistor) . . . . .	928
Kapitel 4, 5 (Thyristor, GTO, GCT) . . . . .	932
Kapitel 6 (Unipolare Bauelemente) . . . . .	940
Kapitel 7 (IGBT, MCT, FCTh, SITH) . . . . .	946
Kapitel 8 (Smart-Power-Bauelemente) . . . . .	955
Kapitel 9 (Silizium-Carbid SiC) . . . . .	963
Kapitel 10 (Aufbau- und Verbindungstechnik) . . . . .	972
Kapitel 11 (Physikalische Modelle) . . . . .	978
Kapitel 12 (Hochdynamische Stromerfassung) . . . . .	982

## Stichwortverzeichnis 984