

Inhaltsverzeichnis

1	Besonderheiten leistungselektronischer Halbleiterbauelemente	1
2	Halbleiterphysikalische Grundlagen	5
2.1	Eigenschaften der Halbleiter, physikalische Grundlagen	5
2.1.1	Kristallgitter	5
2.1.2	Bandstruktur und Ladungsträger	6
2.1.3	Der dotierte Halbleiter	11
2.1.4	Majoritätsträger und Minoritätsträger	13
2.1.5	Beweglichkeiten	14
2.1.6	Driftgeschwindigkeit bei hohen Feldern	17
2.1.7	Diffusion freier Ladungsträger	18
2.1.8	Generation, Rekombination und Trägerlebensdauer	18
2.1.9	Stoßionisation	25
2.1.10	Grundgleichungen der Halbleiter-Bauelemente	27
2.1.11	Erweiterte Grundgleichungen	28
2.1.12	Neutralität	29
2.2	pn-Übergänge	30
2.2.1	Der stromlose pn-Übergang	30
2.2.2	Strom-Spannungs-Kennlinie des pn-Übergangs	37
2.2.3	Sperrverhalten des pn-Übergangs	41
2.2.4	Der pn-Übergang als Emitter	48
2.3	Kurzer Exkurs in die Herstellungstechnologie	53
2.3.1	Kristallzucht	53
2.3.2	Neutronendotierung zur Einstellung der Grunddotierung	55
2.3.3	Epitaxie	57
2.3.4	Diffusion	58
2.3.5	Ionenimplantation	63
2.3.6	Oxidation und Maskierung	68
2.3.7	Randstrukturen	69
2.3.8	Passivierung	73
2.3.9	Rekombinationszentren	74

3 Halbleiterbauelemente	81
3.1 pin-Dioden	81
3.1.1 Aufbau der pin-Diode	81
3.1.2 Kennlinie der pin-Diode	82
3.1.3 Dimensionierung der pin-Diode	84
3.1.4 Durchlassverhalten	88
3.1.5 Berechnung der Durchlassspannung	91
3.1.6 Emitter-Rekombination und effektive Trägerlebensdauer	94
3.1.7 Emitter-Rekombination und Durchlassspannung	97
3.1.8 Temperaturabhängigkeit der Durchlasskennlinie	101
3.1.9 Relation von gespeicherter Ladung und Durchlassspannung	102
3.1.10 Einschaltverhalten von Leistungsdioden	103
3.1.11 Definitionen zum Ausschaltverhalten von Leistungsdioden	106
3.1.12 Durch Leistungsdioden erzeugte Schaltverluste	111
3.1.13 Vorgang beim Abschalten von Leistungsdioden	115
3.1.14 Moderne schnelle Dioden mit optimiertem Schaltverhalten	123
3.1.15 MOS-gesteuerte Dioden	133
3.1.16 Ausblick	139
3.2 Schottky-Dioden	140
3.2.1 Zur Physik des Metall-Halbleiter-Übergangs	140
3.2.2 Kennliniengleichung des Schottky-Übergangs	142
3.2.3 Aufbau von Schottky-Dioden	144
3.2.4 Ohm'scher Spannungsabfall des unipolaren Bauelements	145
3.2.5 Schottky-Dioden aus SiC	148
3.3 Bipolare Transistoren	153
3.3.1 Funktionsweise des Bipolartransistors	154
3.3.2 Aufbau des Leistungstransistors	156
3.3.3 Kennlinie des Leistungstransistors	157
3.3.4 Sperrverhalten des Leistungstransistors	157
3.3.5 Stromverstärkung des Bipolartransistors	160
3.3.6 Basisaufweitung, Feldumverteilung und zweiter Durchbruch	164
3.3.7 Grenzen des Silizium-Bipolartransistors	167
3.3.8 SiC Bipolartransistoren	168
3.4 Thyristoren	169
3.4.1 Aufbau und Funktionsweise	169
3.4.2 Kennlinie des Thyristors	172
3.4.3 Sperrverhalten des Thyristors	173
3.4.4 Die Funktion von Emitterkurzschlüssen	175
3.4.5 Zündarten des Thyristors	176
3.4.6 Zündausbreitung	177
3.4.7 Folgezündung – Amplifying Gate	179
3.4.8 Löschen des Thyristors und Freierdezeit	180

3.4.9	Der Triac	182
3.4.10	Der abschaltbare Thyristor (GTO)	183
3.4.11	Der Gate Commutated Thyristor (GCT)	189
3.5	MOS Transistoren	190
3.5.1	Funktionsweise des MOSFET	190
3.5.2	Aufbau von Leistungs-MOSFETs	193
3.5.3	Kennlinienfeld des MOS-Transistors	195
3.5.4	Kennliniengleichung des MOSFET-Kanals	196
3.5.5	Der Ohm'sche Bereich	199
3.5.6	Kompensationsstrukturen in modernen MOSFETs	200
3.5.7	Schalteigenschaften des MOSFET	204
3.5.8	Schaltverluste des MOSFET	208
3.5.9	Sicherer Arbeitsbereich des MOSFET	210
3.5.10	Die inverse Diode des MOSFET	211
3.5.11	SiC Feldeffektbauelemente	214
3.5.12	Ausblick	214
3.6	IGBTs	216
3.6.1	Funktionsweise	216
3.6.2	Die Kennlinie des IGBT	218
3.6.3	Das Schaltverhalten des IGBT	219
3.6.4	Die Grundtypen PT-IGBT und NPT-IGBT	221
3.6.5	Ladungsträgerverteilung im IGBT	225
3.6.6	Erhöhte Ladungsträgerinjektion in modernen IGBTs	227
3.6.7	Die Wirkung der „Löcherbarriere“	232
3.6.8	Kollektorseitige Buffer-Schichten	234
3.6.9	Der beidseitig sperrfähige IGBT	235
3.6.10	Der bidirektional leitende IGBT	236
3.6.11	Ausblick	238
4	Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungsbau- elementen	239
4.1	Problematik der Aufbau- und Verbindungstechnik	239
4.2	Gehäuseformen	240
4.2.1	Scheibenzellen	242
4.2.2	Die TO-Familie und ihre Verwandten	244
4.2.3	Module	247
4.3	Physikalische Eigenschaften der Materialien	251
4.4	Thermisches Ersatzschaltbild und thermische Simulation	253
4.4.1	Transformation zwischen thermodynamischen und elektrischen Größen	253
4.4.2	Eindimensionale Ersatzschaltbilder	257
4.4.3	Dreidimensionales Netzwerk	259
4.4.4	Der transiente thermische Widerstand	260

4.5	Parasitäre elektrische Elemente in Leistungsmodulen	261
4.5.1	Parasitäre Widerstände	261
4.5.2	Parasitäre Induktivitäten	263
4.5.3	Parasitäre Kapazitäten	266
4.6	Zuverlässigkeit	268
4.6.1	Anforderungen an die Zuverlässigkeit	268
4.6.2	Heißsperrdauertest und Gate-Stress-Test	270
4.6.3	Heißlagerung, Tieftemperaturlagerung	271
4.6.4	Sperrtest bei feuchter Wärme	272
4.6.5	Temperaturwechseltest	272
4.6.6	Lastwechseltest	273
4.6.7	Ausblick	282
5	Zerstörungsmechanismen in Leistungsbauelementen	285
5.1	Thermischer Durchbruch – Ausfälle durch Übertemperatur	285
5.2	Überschreiten der Sperrfähigkeit	287
5.3	Stoßstrom	289
5.4	Dynamischer Avalanche	293
5.4.1	Dynamischer Avalanche in bipolaren Bauelementen	293
5.4.2	Dynamischer Avalanche in schnellen Dioden	296
5.5	Überschreiten des abschaltbaren Stroms in GTOs	305
5.6	Kurzschluss und Überstrom in IGBTs	306
5.6.1	Kurzschluss I, II and III	306
5.6.2	Thermische und elektrische Belastung im Kurzschluss	311
5.6.3	Abschalten von Überströmen und dynamischer Avalanche	314
5.7	Ausfälle durch Höhenstrahlung	317
5.8	Ausfallanalyse	321
6	Durch Bauelemente verursachte Schwingungseffekte und elektromagnetische Störungen	325
6.1	Schaltungs- und bauelementbedingte Schwingungseffekte	325
6.1.1	Frequenzbereich elektromagnetischer Störungen	325
6.1.2	Oberschwingungen bzw. Harmonische	326
6.2	LC-Schwingungen	327
6.2.1	Abschalt-Oszillationen bei parallel geschalteten IGBTs	327
6.2.2	Abschalt-Oszillationen bei snappigen Dioden	330
6.3	Trägerlaufzeit-Oszillationen	332
6.3.1	Plasma Extraction Transit Time (PETT) Oszillationen	333
6.3.2	Impact Ionisation Transit Time (IMPATT) Oszillationen	340
7	Leistungselektronische Systeme	345
7.1	Begriffsbestimmung und Merkmale	345
7.2	Monolithisch integrierte Systeme – Power IC's	347

7.3	Auf Leiterplattenbasis integrierte Systeme	351
7.4	Hybride Integration	353
Anhang	361
A1	Beweglichkeiten in Silizium	361
A2	Beweglichkeiten in 4H-SiC	362
A3	Thermische Parameter wichtiger Materialien	363
A4	Elektrische Parameter wichtiger Materialien	364
Bibliography	365
Sachverzeichnis	377