

---

# 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

<b>3 Halbleiterbauelemente</b>	<b>81</b>
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 Freiwerdezeit	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	<b>Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungsbau- elementen</b> .....	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
<b>5</b>	<b>Zerstörungsmechanismen in Leistungsbauelementen .....</b>	<b>285</b>
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
<b>6</b>	<b>Durch Bauelemente verursachte Schwingungseffekte und elektromagnetische Störungen .....</b>	<b>325</b>
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
<b>7</b>	<b>Leistungselektronische Systeme .....</b>	<b>345</b>
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
<b>Anhang</b>	.....	361
A1	Beweglichkeiten in Silizium .....	361
A2	Beweglichkeiten in 4H-SiC .....	362
A3	Thermische Parameter wichtiger Materialien .....	363
A4	Elektrische Parameter wichtiger Materialien .....	364
<b>Bibliography</b>	.....	365
<b>Sachverzeichnis</b>	.....	377

Halbleiter-Leistungsbaulemente

Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit

Lutz, J.

2012, XXII, 383 S. 298 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-29795-3