

# Inhalt

## 1 Transistoren mit besonderen Eigenschaften

1.1 Feldeffekt-Transistoren. . . . .	1
1.1.1 Einführung und Übersicht . . . . .	1
1.1.2 Sperrschicht-FET . . . . .	2
1.1.2.1 Aufbau. 1.1.2.2 Wirkungsweise und Kennlinien. 1.1.2.3 Kenngrößen. 1.1.2.4 Berechnung der Kennlinien	
1.1.3 MOS-FET . . . . .	11
1.1.3.1 MOS-FET vom Verarmungstyp. 1.1.3.2 MOS-FET vom Anreicherungs- typ. 1.1.3.3 Kennlinien	
1.1.4 Temperaturverhalten . . . . .	19
1.1.4.1 Temperaturabhängigkeit des Gate-Stroms. 1.1.4.2 Temperaturabhängig- keit des Drain-Stroms	
1.1.5 Durchbruchspannungen . . . . .	22
1.1.5.1 Gate-Durchbruchspannung. 1.1.5.2 Drain-Source-Durchbruch- spannung	
1.1.6 Kapazitäten und Hochfrequenzverhalten . . . . .	24
1.1.6.1 Ersatzschaltung. 1.1.6.2 Frequenzabhängige Leitwertparameter. 1.1.6.3 Schaltverhalten	
1.1.7 Rauschen . . . . .	31
1.1.7.1 Rauschquellen im FET. 1.1.7.2 Rauschzahl und Rauschspannung	
1.1.8 Doppel-Gate-FET . . . . .	34
1.1.9 Anwendungen . . . . .	35
1.1.9.1 Kleinsignalverstärkung. 1.1.9.2 Konstantstromquellen. 1.1.9.3 Ge- steuerte Widerstände. 1.1.9.4 Digitale Schaltungen. 1.1.9.5 Hochfrequenz- Schaltungen	
1.2 Unijunction-Transistoren . . . . .	67
1.2.1 Aufbau . . . . .	67
1.2.2 Wirkungsweise, Kennlinien und Kenngrößen . . . . .	67
1.2.3 Temperaturverhalten . . . . .	70
1.2.4 Temperaturstabilisierung der Höckerspannung . . . . .	72
1.2.5 Anwendungen . . . . .	73
1.2.5.1 Sägezahngenerator. 1.2.5.2 Triggerimpulsgenerator. 1.2.5.3 Zeitver- zögerungsschaltung	
1.3 Lawinen-Transistoren . . . . .	80
1.3.1 Durchbruchverhalten bipolarer Transistoren . . . . .	80
1.3.2 Betrieb als Lawinen-Transistor . . . . .	82
1.3.3 Anwendung als Impulsgenerator . . . . .	86

## VIII Inhalt

### 2 Thyristoren

2.1 Allgemeine Übersicht . . . . .	89
2.2 Trigger-Dioden . . . . .	91
2.2.1 Rückwärts sperrende Trigger-Diode . . . . .	91
2.2.1.1 Wirkungsweise, Kennlinien und Kenngrößen. 2.2.1.2 Anwendung als Triggerimpuls-Generator	
2.2.2 Bidirektionale Trigger-Diode (DIAC) . . . . .	95
2.3 Thyristor-Dioden . . . . .	96
2.3.1 Rückwärts sperrende Thyristor-Diode (Vierschicht-Diode) . . . . .	96
2.3.1.1 Wirkungsweise. 2.3.1.2 Kennlinie und Kenngrößen. 2.3.1.3 Anwendungen	
2.3.2 Bidirektionale Thyristor-Diode (Fünfschicht-Diode) . . . . .	101
2.4 Thyristor-Trioden . . . . .	102
2.4.1 Rückwärts sperrende Thyristor-Triode (Thyristor) . . . . .	102
2.4.1.1 Wirkungsweise. 2.4.1.2 Kennlinie. 2.4.1.3 Kenngrößen der Anoden-Kathoden-Strecke. 2.4.1.4 Kennlinien und Kenngrößen der Gate-Kathoden-Strecke. 2.4.1.5 Schaltverhalten. 2.4.1.6 Technischer Aufbau und Kühlung. 2.4.1.7 Anwendungen	
2.4.2 Bidirektionale Thyristor-Trioden (TRIAC) . . . . .	135
2.4.2.1 Kennlinie. 2.4.2.2 Triggerung in den vier Betriebszuständen. 2.4.2.3 Kenngrößen. 2.4.2.4 Technologischer Aufbau. 2.4.2.5 Anwendungen	
2.5 Thyristor-Tetroden . . . . .	153
2.5.1 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	153
2.5.2 Kennwerte . . . . .	154
2.5.3 Anwendungsbeispiel . . . . .	155

### 3 Optoelektronische Bauelemente

3.1 Grundlagen der Optoelektronik . . . . .	157
3.1.1 Eigenschaften optischer Strahlung . . . . .	157
3.1.1.1 Wellencharakter des Lichts. 3.1.1.2 Teilchencharakter des Lichts	
3.1.2 Thermische Strahlungsquellen . . . . .	161
3.1.2.1 Absorption und Emission. 3.1.2.2 Raumwinkelabhängige Strahlung. 3.1.2.3 Spektrale Energieverteilung des schwarzen Strahlers	
3.1.3 Radiometrische und photometrische Größen . . . . .	166
3.1.3.1 Photometrische Größen. 3.1.3.2 Umrechnung radiometrischer in photometrische Größen. 3.1.3.3 Farbtemperatur und Normlicht-A	
3.1.4 Wechselwirkung von Licht mit Halbleitern . . . . .	170
3.1.4.1 Photoleiter. 3.1.4.2 Photoemitter	
3.2 Photowiderstände als Strahlungsempfänger . . . . .	172
3.2.1 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	173
3.2.2 Kennlinien und Kenngrößen . . . . .	175
3.2.2.1 Empfindlichkeit. 3.2.2.2 Dynamische Eigenschaften. 3.2.2.3 Grenzwerte	
3.2.3 Anwendungen . . . . .	179
3.2.3.1 Dämmerungsschalter. 3.2.3.2 Helligkeitssteuerung von Lampen	
3.3 Photodioden als Strahlungsempfänger . . . . .	181
3.3.1 PN-Übergang unter Lichteinwirkung . . . . .	181

3.3.2	Aufbau und Kennlinien. . . . .	184
3.3.2.1	Kennlinienfeld. 3.3.2.2 Photoelement. 3.3.2.3 Solarzelle	
3.3.3	Kenngrößen . . . . .	188
3.3.3.1	Statische Kenngrößen. 3.3.3.2 Dynamische Kenngrößen. 3.3.3.3 Richt- charakteristik	
3.3.4	Photo-PIN-Dioden . . . . .	193
3.3.5	Photo-Lawinen-Dioden . . . . .	193
3.3.5.1	Wirkungsweise und Kennlinien. 3.3.5.2 Verstärkung-Bandbreite-Pro- dukt	
3.3.6	Photo-Duo-Dioden . . . . .	197
3.3.6.1	Aufbau und Wirkungsweise. 3.3.6.2 Kennwerte und Kennlinien	
3.3.7	Schaltung mit Photodioden . . . . .	199
3.4	Phototransistoren als Strahlungsempfänger . . . . .	202
3.4.1	Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	202
3.4.2	Statische Kennlinien und Kenngrößen . . . . .	203
3.4.3	Dynamisches Verhalten . . . . .	206
3.4.3.1	Ersatzschaltung. 3.4.3.2 Kurzschlußgrenzfrequenz. 3.4.3.3 Grenz- frequenz bei Belastung. 3.4.3.4 Schaltzeiten. 3.4.3.5 Verbesserung des Schalt- und Frequenzverhaltens	
3.4.4	Anwendungen . . . . .	215
3.4.4.1	Einfaches optisches Relais. 3.4.4.2 Optisches Relais mit Schmitt-Trigger	
3.5	Photothyristoren als Strahlungsempfänger . . . . .	218
3.5.1	Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	219
3.5.2	Kennwerte . . . . .	220
3.5.3	Anwendung . . . . .	220
3.6	Photo-FET als Strahlungsempfänger . . . . .	221
3.7	Lumineszenz-Dioden als Strahlungssender . . . . .	222
3.7.1	Lichterzeugung in Halbleitern . . . . .	222
3.7.1.1	Direkte und indirekte Halbleiter. 3.7.1.2 PN-Übergang als Lichtemitter	
3.7.2	GaAs-Lumineszenz-Dioden . . . . .	226
3.7.2.1	Herstellung und Aufbau. 3.7.2.2 Abgestrahltes Spektrum. 3.7.2.3 Wirk- ungsgrad und Quantenausbeute. 3.7.2.4 Statische Kennlinien. 3.7.2.5 Schalt- verhalten	
3.7.3	GaP-Lumineszenz-Dioden . . . . .	233
3.7.3.1	Herstellung und Dotierung. 3.7.3.2 Abgestrahlte Leistung, Quanten- ausbeute und Lichtstärke. 3.7.3.3 Weitere Kennwerte	
3.7.4	GaAsP-Lumineszenz-Dioden . . . . .	239
3.7.4.1	Strahlungserzeugung im Mischkristall aus GaAs und GaP. 3.7.4.2 Her- stellung und Aufbau. 3.7.4.3 Abgestrahlte Leistung, Quantenausbeute und Lichtstärke. 3.7.4.4 Weitere Kennwerte	
3.7.5	Lumineszenz-Dioden als Anzeigeelemente . . . . .	243
3.7.5.1	Sieben-Segment-Anzeige. 3.7.5.2 Anzeige mit 7 · 5-Diodenmatrix	
3.8	Optoelektronische Koppler . . . . .	247
3.8.1	Optokoppler aus Lumineszenz-Diode und Photodiode . . . . .	247
3.8.2	Optokoppler aus Lumineszenz-Diode und Phototransistor . . . . .	248
3.8.2.1	Kennwerte. 3.8.2.2 Photo-Darlington-Optokoppler	

## **X Inhalt**

3.8.3	Photothyristor-Optokoppler . . . . .	249
3.8.4	Optokoppler-Strahlschranken . . . . .	250
3.8.4.1	Strahlschranken ohne Schwellwertschalter. 3.8.4.2 Strahlschranke mit Schwellwertschalter	
3.8.5	Optokoppler-Gleichstromrelais . . . . .	252
3.8.6	Optokoppler-Wechselstromrelais . . . . .	253
3.9	Laser-Dioden . . . . .	254
3.9.1	Strahlungserzeugung durch stimulierte Emission . . . . .	254
3.9.2	Resonator und Laser-Bedingung . . . . .	255
3.9.2.1	Resonator. 3.9.2.2 Laser-Bedingung	
3.9.3	Aufbau und Kennwerte . . . . .	257
3.9.3.1	Aufbau. 3.9.3.2 Kennwerte	
3.9.4	Informationsübertragung . . . . .	260
<b>4</b>	<b>Magnetoelektronische Bauelemente</b>	
4.1	Hall-Generatoren . . . . .	263
4.1.1	Hall-Effekt . . . . .	263
4.1.2	Aufbau und Kennwerte . . . . .	265
4.1.2.1	Aufbau. 4.1.2.2 Kennwerte	
4.1.3	Anwendungen . . . . .	268
4.1.3.1	Messung von Magnetfeldstärken. 4.1.3.2 Kontaktlose Schalter. 4.1.3.3 Hall-Multiplikator	
4.2	Feldplatten . . . . .	272
4.2.1	Magneto-Widerstand . . . . .	272
4.2.2	Aufbau und Kennwerte . . . . .	273
4.2.3	Anwendungen . . . . .	274
4.3	Magnet-Dioden . . . . .	277
4.3.1	Aufbau und Kennwerte . . . . .	277
4.3.2	Anwendungen . . . . .	279
<b>5</b>	<b>Spannungsabhängige Widerstände</b>	
5.1	Aufbau und Kennwerte . . . . .	281
5.1.1	Kennlinie . . . . .	281
5.1.2	Gleichstromwiderstand und differentieller Widerstand . . . . .	282
5.1.3	Verlustleistung . . . . .	283
5.2	Anwendungen . . . . .	284
<b>6</b>	<b>Temperaturabhängige Widerstände</b>	
6.1	Heißeleiter . . . . .	287
6.1.1	Aufbau und Kennwerte . . . . .	287
6.1.1.1	Aufbau. 6.1.1.2 Heißeleiter-Widerstand. 6.1.1.3 Strom-Spannungs-Kennlinie. 6.1.1.4 Erholzeit	
6.1.2	Anwendungen . . . . .	293
6.1.2.1	Temperaturmessung. 6.1.2.2 Kompensationsschaltungen. 6.1.2.3 Verzögerungsschaltungen	

<b>6.2 Kaltleiter.</b>	<b>297</b>
6.2.1 Aufbau und Kennwerte	297
6.2.1.1 Aufbau. 6.2.1.2 Kaltleiter-Widerstand. 6.2.1.3 Strom-Spannungskennlinie. 6.2.1.4 Verlustleistung	
6.2.2 Anwendungen	302
6.2.2.1 Überstromsicherung. 6.2.2.2 Temperaturstabilisierung. 6.2.2.3 Flüssigkeits-Niveaufühler	
 <b>Anhang</b>	
1 Weiterführende Bücher und Literatur	305
2 Normblätter	306
3 Schaltzeichen	306
4 Übersichtstafel	308
5 Formelzeichen	310
 <b>Sachverzeichnis</b>	<b>317</b>