

Handbuch aktiver elektronischer Bauelemente

von
Leonhard Stiny

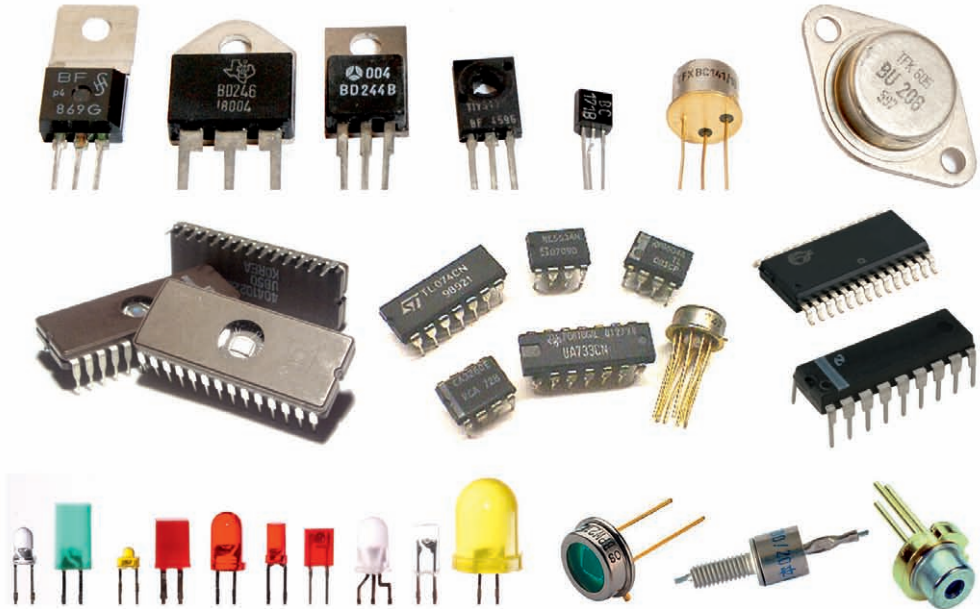
1. Auflage

Franzis Verlag, Poing 2009

Verlag C.H. Beck im Internet:
www.beck.de

ISBN 978 3 7723 5116 7

Leonhard Stiny



Handbuch aktiver elektronischer Bauelemente

Aufbau, Strukturen, Wirkungsweise, Eigenschaften und praktischer Einsatz diskreter und integrierter Halbleiter-Bauteile

Vorwort

Dieses Buch stellt allen, ob in Ausbildung, Lehre, Studium oder Beruf, detailliertes, umfangreiches und in der Elektronikpraxis anwendbares Wissen über aktive elektronische Bauelemente zur Verfügung. Dabei werden nicht nur die im eigentlichen Sinne aktiven, sondern alle auf Halbleitern basierenden Bauteile behandelt. Das Werk vermittelt ausführliche Kenntnisse über Aufbau, Eigenschaften, Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten dieser Bauelemente. Es kann als Lehrbuch im Studium, in der beruflichen Fortbildung, zum Selbststudium und als Nachschlagewerk in der Laborpraxis verwendet werden. Das Buch bildet eine Brücke zwischen den physikalischen Grundlagen von Halbleiter-Bauelementen und deren ingenieurtechnischen Anwendungen in der Praxis der modernen Elektronik. Dabei werden auch neueste Bausteine der Computertechnologie behandelt.

Damit der Anwender elektronische Bauelemente in Schaltungen zu fehlerfreien und betriebssicheren Funktionseinheiten, Baugruppen oder Geräten zusammenfügen kann, muss er die Wirkungsweise dieser Bauelemente verstanden haben. Nur das Wissen über ihre Kenngrößen und speziellen Eigenschaften ermöglicht es, entsprechend Datenblattangaben und Herstellerunterlagen die optimalen Bauteile für eine bestimmte Anwendung auszuwählen. Sowohl für die Analyse elektronischer Schaltungen als auch bei der Schaltungsdimensionierung sind Kenntnisse von Aufbau und Funktionsweise der eingesetzten Bauelemente der Halbleiterelektronik unbedingt erforderlich.

Die theoretischen und physikalischen Grundlagen der Halbleitertechnik werden als Grundgerüst vermittelt. Auf dieser Basis werden für alle Halbleiter-Bauelemente Aufbau und Wirkungsweise erläutert, spezifische Merkmale, Daten, Kenngrößen und Charakteristiken angegeben und deren Bedeutung erklärt. Für die verschiedenen Typen von Bauteilen werden übersichtlich die Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungen aufgezeigt. Dabei werden alle technischen Aspekte von der Herstellung bis zum Einsatz betrachtet. Durch zahlreiche Abbildungen wird eine Vorstellung von Aufbau und Aussehen der Bauelemente vermittelt. Viele Tabellen und Beispiele mit Berechnungen unterstützen die Auswahl, Dimensionierung und Anwendung von elektronischen Halbleiter-Bauelementen. Einen in der Praxis verwertbaren Nutzen liefern in diesem Werk allgemein gehaltene, für jeden Einsatzfall gültige Beschreibungen, welche auf spezielle Ansätze leicht anpassbar und erweiterbar sind. So findet man Formeln für den täglichen Gebrauch in der Laborpraxis, aber auch ihre Herleitungen, um den theoretischen Hintergrund komplexer Sachverhalte verständlich zu machen.

An dieser Stelle sei noch auf mein Werk »Handbuch passiver elektronischer Bauelemente« (Franzis Verlag) hingewiesen, welches alle Aspekte dieser großen Gruppe von Bauteilen der Elektronik behandelt.

Haag a. d. Amper, im Juni 2009

Leonhard Stiny

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
2	Grundlagen der Halbleiter	21
2.1	Halbleiter im Periodensystem der Elemente	21
2.2	Halbleiter zwischen Nichtleiter und Leiter	23
2.3	Aufbau der Atome	23
2.3.1	Bohrsches Atommodell	24
2.3.2	Elektronenpaarbindung, Kristallgitter	25
2.3.3	Schalenmodell und Wechselwirkung	28
2.3.4	Bändermodell und Fermi-Statistik	29
2.4	Direkte und indirekte Halbleiter	36
2.4.1	Quanten und Wellen	36
2.4.2	Direkte Rekombination	38
2.4.3	Indirekte Rekombination	38
2.5	Eigenleitung	39
2.5.1	Eigenleitungsdichte	40
2.5.2	Ladungsträgerlebensdauer	43
2.5.3	Beweglichkeit	44
2.6	Störstellenleitung	45
2.6.1	Dotieren	45
2.6.2	Störstellenleitung im Bändermodell	47
2.6.3	Allgemeines zu dotierten Halbleitern	48
2.6.4	Einfluss der Temperatur auf dotierte Halbleiter	49
2.6.5	Auswirkung der Temperatur auf Halbleiterbauelemente	50
3	Der pn-Übergang	51
3.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	51
3.1.1	Der ideale abrupte pn-Übergang	51
3.1.2	Diffusion und Rekombination im pn-Grenzgebiet	52
3.1.3	Ladungsträgerdichte	53
3.1.4	Raumladungsdichte	55
3.1.5	Diffusionsspannung	55
3.1.6	Sperrschichtweite	57
3.1.7	Sperrschichtkapazität	58
3.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Übergangs	58
3.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	59
3.2.1	Äußere Spannung in Sperrrichtung	59

3.2.2	Äußere Spannung in Flussrichtung.....	64
3.3	Durchbruchmechanismen beim pn-Übergang	68
3.3.1	Lawinen-Durchbruch.....	68
3.3.2	Zener-Durchbruch.....	70
3.3.3	Überlappung von Lawinen- und Zener-Effekt.....	72
3.3.4	Thermischer Durchbruch (2. Durchbruch).....	72
3.3.5	Durchgriff (punch-through)	73
3.4	Schaltverhalten des pn-Übergangs	75
3.4.1	Einschaltvorgang	75
3.4.2	Aus- und Umschaltvorgang	76
3.5	Gesamtkennlinie des pn-Übergangs	78
3.6	Halbleiter-Metall-Übergang.....	79
4	Halbleiterdioden	81
4.1	Ausführung.....	81
4.2	Aufbau.....	81
4.3	Elektrische Funktion	82
4.4	Bauarten.....	83
4.5	Verhalten einer Diode	84
4.5.1	Kennlinienbereiche.....	84
4.5.2	Näherungen für die Diodenkennlinie.....	87
4.5.3	Beschreibung durch Gleichungen	90
4.5.4	Bestimmung der Diodenparameter mit Regressionsverfahren	92
4.5.5	Kleinsignalverhalten von Dioden	94
4.5.6	Schaltverhalten von Dioden.....	97
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter.....	101
4.6.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes.....	101
4.6.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung.....	102
4.6.3	Zusammenfassung: Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter..	103
4.7	Kenn- und Grenzdaten von Dioden.....	103
4.7.1	Grenzspannungen	104
4.7.2	Grenzströme	104
4.7.3	Sperrstrom	104
4.7.4	Maximale Verlustleistung	105
4.8	Auszüge aus Datenblättern von Dioden	105
4.8.1	Silizium-Epitaxial-Planar-Diode 1N 4148	105
4.8.2	Silizium-Diffusions-Dioden 1N 4001...1N 4007.....	109
4.9	Herstellungsmethoden für pn-Übergänge.....	111
4.9.1	Legierungstechnik	111
4.9.2	Planartechnik	112
4.10	Aufbau von Halbleiterdioden	115
4.10.1	Einzeldiode.....	115
4.10.2	Integrierte Diode.....	120

4.11	Diodentypen	121
4.11.1	Schaltdiode, Universaldiode	121
4.11.2	Gleichrichterdiode	121
4.11.3	Schottky-Diode	121
4.11.4	Suppressordiode	122
4.11.5	Temperatursensoren	125
4.11.6	DIAC	125
4.11.7	Zenerdiode, Z-Diode	129
4.11.8	Avalanchediode	131
4.11.9	Stromregeldiode	131
4.11.10	Leuchtdiode (Lumineszenzdiode, LED)	132
4.11.11	Organische Leuchtdiode (OLED)	144
4.11.12	Laserdiode (LD)	149
4.11.13	Fotodiode	160
4.11.14	Solarzelle	170
4.11.15	Kapazitätsdiode (Varaktor-Diode)	180
4.11.16	pin-Diode	186
4.11.17	Tunneldiode (Esaki-Diode)	189
4.11.18	Rückwärtsdiode (Backwarddiode)	195
4.11.19	Gunndiode	196
4.11.20	IMPATT-Diode	202
4.11.21	TRAPATT-Diode	205
4.11.22	BARITT-Diode	206
4.11.23	DOVETT-Diode	207
4.11.24	Ladungsspeicherungsdiode	207
4.11.25	Speicherschaltodiode (Step-Recovery-Diode)	208
4.11.26	Magnetdiode	209
5	Bipolare Transistoren	213
5.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	213
5.2	Grundsätzlicher Aufbau des Transistors	216
5.3	Richtung von Strömen und Spannungen	217
5.4	Betriebszustände (Arbeitsbereiche)	218
5.4.1	Aktiver Zustand (Normalbetrieb, Vorwärtsbetrieb)	218
5.4.2	Gesättigter Zustand (Sättigungsbetrieb)	219
5.4.3	Gesperrter Zustand (Sperrbetrieb)	219
5.4.4	Inverser Zustand (Inversbetrieb, Rückwärtsbetrieb)	219
5.5	Signaldynamik und Signalgröße	220
5.6	Funktionsweise	220
5.7	Die drei Grundschaltungen des Bipolartransistors	226
5.8	Einsatz als Verstärker oder Schalter	226
5.8.1	Verstärkerbetrieb	227
5.8.2	Schalterbetrieb	228

5.9	Kennlinien des Transistors.....	229
5.9.1	Eingangskennlinie	229
5.9.2	Ausgangskennlinie	233
5.9.3	Steuerkennlinien	239
5.9.4	Rückwirkungskennlinie.....	241
5.9.5	Vierquadranten-Kennlinienfeld	242
5.10	Durchbruchspannungen und Grenzströme.....	245
5.10.1	Durchbruch 1. Art.....	245
5.10.2	Durchbruch 2. Art.....	246
5.10.3	Grenzströme	247
5.11	Maximale Verlustleistung	247
5.11.1	Statischer Betrieb	247
5.11.2	Pulsbetrieb	250
5.12	Erlaubter Arbeitsbereich	251
5.13	Rauschen beim Bipolartransistor	252
5.13.1	Allgemeines zum Rauschen	252
5.13.2	Beschreibung stochastischer Signale	254
5.13.3	Rauschquellen beim Bipolartransistor	262
5.13.4	Rauschzahl.....	265
5.14	Beschreibung durch Gleichungen	268
5.15	Abhängigkeiten der Stromverstärkung.....	270
5.15.1	Abhängigkeit der Stromverstärkung vom Arbeitspunkt.....	270
5.15.2	Abhängigkeit der Stromverstärkung von der Grundschialtung.....	271
5.15.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen ..	273
5.16	Dynamisches Schaltverhalten des Bipolartransistors.....	275
5.16.1	Schaltzeiten	276
5.17	Modelle und Ersatzschaltungen des Bipolartransistors.....	279
5.17.1	Die physikalische Ersatzschaltung.....	281
5.17.2	Die formale Ersatzschaltung	291
5.17.3	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild.....	306
5.18	Aufbau und Herstellungserfahren von Bipolartransistoren	308
5.18.1	Spitzentransistor	308
5.18.2	Legierungstransistor	309
5.18.3	Mesatransistor	309
5.18.4	Planartransistor.....	310
5.19	Hetero-Bipolartransistor (HBT)	316
5.20	Darlington-Transistor	320
5.20.1	Verlauf der Stromverstärkung	321
5.20.2	Schaltverhalten	324
5.20.3	Kleinsignalverhalten	325
5.20.4	Weitere Besonderheiten des Darlington-Transistors.....	325

6	Feldeffekttransistoren	327
6.1	Allgemeine Eigenschaften.....	327
6.2	Funktionsprinzip und Klassifikation.....	328
6.2.1	Praxis mit Feldeffekttransistoren.....	332
6.2.2	Unterschiede zwischen unipolaren und bipolaren Transistoren	333
6.3	Die drei Grundsaltungen des Feldeffekttransistors	334
6.4	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des Sperrschicht-FET	335
6.4.1	JFET ohne äußere Spannung	335
6.4.2	U_{GS} variabel, U_{DS} klein und konstant	336
6.4.3	U_{DS} variabel, $U_{GS} = 0$	337
6.4.4	U_{DS} und U_{GS} variabel	339
6.4.5	Kennlinien des JFET, Beschreibung durch Gleichungen	340
6.4.6	Temperaturabhängigkeit der JFET-Parameter.....	345
6.5	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des MOSFETs.....	346
6.5.1	MOS-Kondensator, Grundlagen des MOSFETs	346
6.5.2	Aufbau eines n-Kanal-MOSFETs	349
6.5.3	Wirkungsweise des n-Kanal-MOSFETs, Anreicherungstyp.....	351
6.5.4	Wirkungsweise des n-Kanal-MOSFETs, Verarmungstyp.....	355
6.5.5	Kennlinien des MOSFETs, Beschreibung durch Gleichungen	357
6.5.6	MOSFET als steuerbarer Widerstand	362
6.5.7	Temperaturabhängigkeit der MOSFET-Parameter	365
6.6	Modelle und Ersatzschaltungen des Feldeffekttransistors.....	367
6.6.1	Statisches Verhalten.....	367
6.6.2	Dynamisches Verhalten	368
6.6.3	Kleinsignalmodell.....	369
6.7	Grenzdaten und Sperrströme	374
6.7.1	Durchbruchspannungen	374
6.7.2	Grenzströme	375
6.7.3	Sperrströme.....	376
6.7.4	Maximale Verlustleistung	376
6.7.5	Erlaubter Arbeitsbereich	377
6.8	Der FET als Schalter	377
6.8.1	Schaltstufen mit FET	377
6.8.2	Dynamisches Verhalten von FET-Schaltstufen	379
6.9	Rauschen beim Feldeffekttransistor.....	380
6.10	Spezielle Bauformen von Feldeffekttransistoren	381
6.10.1	Leistungs-MOSFETs	381
6.10.2	Intelligente Leistungs-FETs.....	387
6.10.3	Weitere Bauformen von FETs.....	388
6.11	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT).....	394
6.11.1	Struktureller Aufbau	395
6.11.2	NPT- und PT-Struktur.....	395
6.11.3	Funktionsweise.....	398

6.11.4	IGBT Latch-Up	400
6.11.5	Kennlinien	402
6.11.6	Schaltverhalten	404
6.11.7	Trench-IGBT	407
7	Thyristoren	409
7.1	Einteilung der Thyristoren	409
7.2	Einrichtungs-Thyristortriode (Thyristor)	410
7.2.1	Grundlagen der Funktionsweise	410
7.2.2	Aufbau	412
7.2.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	414
7.2.4	Der Zündvorgang	417
7.2.5	Löschen des Thyristors	422
7.2.6	Kennlinie des Steuerkreises	422
7.2.7	Temperaturabhängigkeit	424
7.2.8	Dynamische Eigenschaften	424
7.2.9	Spannungs- und Stromgrenzwerte	429
7.2.10	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor	429
7.2.11	Zusammenfassung der Eigenschaften von Thyristoren	432
7.2.12	Vergleich von Thyristor und mechanischem Schalter	432
7.3	Spezielle Bauformen des Thyristors	433
7.3.1	Zweirichtungs-Thyristordiode (TRIAC)	433
7.3.2	Einrichtungs-Thyristortetrode	436
7.3.3	Asymmetrisch sperrende Thyristoren	436
7.3.4	Gate Turn-Off Thyristor (GTO)	437
7.3.5	MOS-gesteuerter Thyristor (MCT)	440
7.3.6	Lichtgesteuerter Thyristor (LTT)	442
7.3.7	Feldgesteuerter Thyristor (FCT)	443
7.3.8	Gate-Commutated Thyristor (GCT, IGCT)	444
7.3.9	Unijunction-Transistor (UJT)	445
8	Operationsverstärker	449
8.1	Allgemeines, Überblick	449
8.2	Schaltsymbol, Anschlüsse	450
8.3	Ausführungsformen	451
8.4	Betriebsspannungen	452
8.5	Operationsverstärker-Typen	453
8.5.1	Normaler Operationsverstärker	454
8.5.2	Transkonduktanz-Verstärker	455
8.5.3	Transimpedanz-Verstärker	456
8.5.4	Strom-Verstärker	456
8.6	Der normale Operationsverstärker	457
8.6.1	Begriffsdefinitionen	457

8.6.2	Differenzverstärkung, Leerlaufspannungsverstärkung V_0	459
8.6.3	Übertragungskennlinie	460
8.6.4	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	461
8.6.5	Eingangswiderstände	463
8.6.6	Ausgangswiderstand	465
8.6.7	Eingangsströme	466
8.6.8	Offsetspannung	468
8.6.9	Verstärkungseinstellung durch Gegenkopplung	471
8.6.10	Verstärkungs-Bandbreiteprodukt	472
8.6.11	Frequenzgangkorrektur	474
8.6.12	Spannungsbereich und Stromaufnahme	487
8.6.13	Temperaturbereich	488
8.6.14	Anstiegsgeschwindigkeit	488
8.6.15	Maximale Ausgangsspannung	490
8.6.16	Einschwingzeit (Settling Time)	490
8.6.17	Zeitverzögerung nach Überlast	491
8.6.18	Rauschen	491
8.7	Der ideale Operationsverstärker	494
8.8	Interner Aufbau von Operationsverstärkern	495
8.8.1	Übersicht	495
8.8.2	Die Eingangsstufe (Differenzverstärker)	496
8.8.3	Die Koppelstufe	501
8.8.4	Die Ausgangsstufe	502
8.9	Tipps zum praktischen Einsatz von Operationsverstärkern	503
9	Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen	505
9.1	Allgemeines zu integrierten Schaltungen	505
9.1.1	Definition und Arten der Integration	505
9.1.2	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen	511
9.1.3	Einteilung integrierter Schaltungen	512
9.2	Kenngrößen digitaler Schaltkreise	517
9.2.1	Betriebsspannung	517
9.2.2	Pegelbereiche und Übertragungskennlinie logischer Schaltungen	518
9.2.3	Spannungspegel, Störabstand	519
9.2.4	Lastfaktoren	521
9.2.5	Ausgangsstufen	521
9.2.6	Schaltzeiten	522
9.2.7	Verlustleistung	523
9.3	Logikbaureihen	524
9.3.1	Übersicht bipolare Schaltkreisfamilien	524
9.3.2	Übersicht MOS-Schaltkreisfamilien	524
9.4	Bipolare Schaltkreisfamilien	525
9.4.1	RTL	525

9.4.2	DTL	526
9.4.3	ECL	527
9.4.4	I ² L	530
9.4.5	TTL	531
9.5	MOS-Schaltkreisfamilien	547
9.5.1	Vorteile von MOSFETs in integrierten Schaltungen	547
9.5.2	PMOS-Technologie	547
9.5.3	NMOS-Technologie	547
9.5.4	CMOS-Technologie	549
9.5.5	BICMOS-Logik	558
10	Halbleiterspeicher	561
10.1	Einteilung digitaler Halbleiterspeicher	561
10.2	Allgemeiner Aufbau der Speicherbausteine	562
10.2.1	Speicherorganisation	563
10.2.2	Der Adressdekoder	565
10.2.3	Die Speicherzelle	567
10.2.4	Aufbau von Speicherbausteinen, Zusammenfassung	567
10.2.5	Busleitungen, Steuersignale	568
10.2.6	Kenndaten	569
10.3	Einteilung der Tabellenspeicher	571
10.4	Einteilung der Festwertspeicher	571
10.4.1	Masken-ROM	571
10.4.2	Mit Programmiergerät programmierbare PROMs	573
10.4.3	In der Schaltung lösch- und programmierbare PROMs	578
10.4.4	MRAM (Magnetic Random Access Memory)	587
10.4.5	FRAM (Ferroelectric Random Access Memory)	591
10.5	Einteilung der flüchtigen Speicher	595
10.5.1	Statisches RAM (SRAM)	596
10.5.2	Dynamisches RAM (DRAM)	600
11	Anwendungsspezifische integrierte Bausteine	611
11.1	Einsatz von ASICs	611
11.2	Einteilung von ASICs	612
11.2.1	Full-Custom-ASIC	612
11.2.2	Standardzellen-ASIC	613
11.2.3	Gate Array	614
11.2.4	Programmierbare Logikbausteine	614
11.3	Entwurfsablauf eines ASIC	616
11.3.1	Vorüberlegungen	616
11.3.2	Schaltungsentwicklung	618
11.3.3	Schaltungseingabe	620
11.3.4	Simulation	622

11.3.5	Layout	624
11.3.6	Entwurfsprüfung	626
11.3.7	Fertigung	627
11.3.8	Mechanischer Aufbau	628
11.3.9	Test	629
11.4	Einteilung programmierbarer Logikbausteine.....	634
11.4.1	Übersicht und Begriffe	634
11.4.2	Architektur anwenderprogrammierbarer Logikschaltkreise.....	635
11.4.3	PAL	640
11.4.4	GAL.....	645
11.4.5	CPLD.....	648
11.4.6	FPGA.....	653
12	Literaturverzeichnis	661
	Stichwortverzeichnis.....	665

3 Der pn-Übergang

Ein pn-Übergang entsteht durch Zusammenfügen von p- und n-leitendem Halbleitermaterial, er ist die Grenzfläche (Grenzschicht) zwischen einer n-dotierten und einer p-dotierten Zone innerhalb eines monokristallinen Halbleiters. Seine Eigenschaften beruhen auf der sich ausbildenden Raumladungszone am Kontakt von p- und n-leitendem Bereich.

Der pn-Übergang ist das Grundelement zahlreicher Halbleiter-Bauelemente, wie z. B. Diode, Sperrschicht-Feldeffekttransistor, Bipolartransistor, Thyristor oder Triac. Die an ihm auftretenden physikalischen Vorgänge werden hier nur soweit erklärt, wie sie für das Verständnis dieser Bauelemente erforderlich sind. Zunächst wird der pn-Übergang ohne äußere Spannung (im thermodynamischen Gleichgewicht), dann mit äußerer Spannung betrachtet.

3.1 Der pn-Übergang ohne äußere Spannung

3.1.1 Der ideale abrupte pn-Übergang

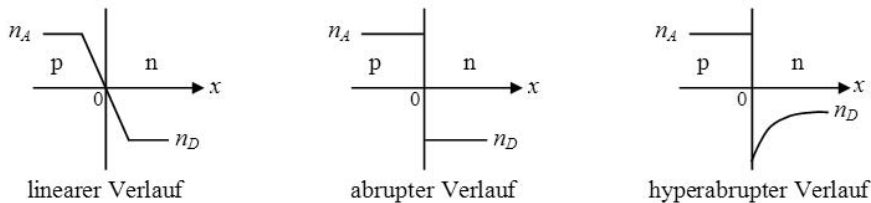


Abb. 23: Mögliche Dotierungsverläufe bei pn-Übergängen (linear, abrupt, hyperabrupt)

Bei einem pn-Übergang sind unterschiedliche Verläufe der Dotierung realisierbar. Hier wird hauptsächlich der abrupte Dotierungsverlauf behandelt.

Unabhängig von der Dotierung sind in einem Halbleiter wegen der Eigenleitung (intrinsic-Leitung) immer sowohl p- als auch n-Ladungsträger vorhanden. Sie haben folgende Dichten (der Index bezeichnet das Dotierungsgebiet):

- Elektronen im n-Gebiet (Majoritätsträger) n_n
- Elektronen im p-Gebiet (Minoritätsträger) n_p
- Löcher im p-Gebiet (Majoritätsträger) p_p
- Löcher im n-Gebiet (Minoritätsträger) p_n

In jedem Gebiet wird die Anzahl der freien Ladungsträger durch die Eigenleitungsdichte n_i bestimmt. Sie ist für jeden Werkstoff eine (temperaturabhängige) Konstante und beträgt für Silizium bei 300 K ca. $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

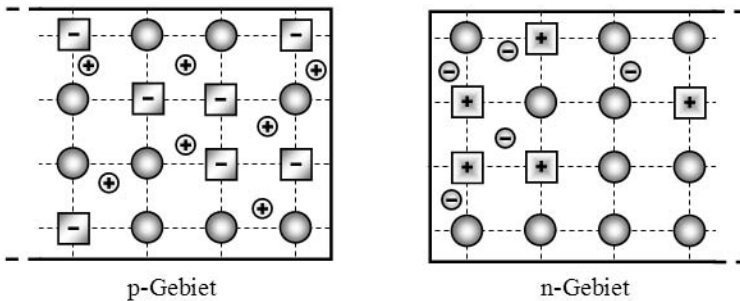
Für jedes Dotierungsgebiet gilt

$$n_n \cdot p_n = p_p \cdot n_p = n_i^2 \quad (3.1)$$

Es wird angenommen, dass ein scharfer (abrupter) Übergang vom p- in das n-Gebiet vorliegt. Beim idealen, abrupten pn-Übergang grenzt eine bis zur Grenzfläche homogen dotierte p-Zone an eine ebenfalls bis zur Grenzfläche homogen dotierte n-Zone. Die Dotierung des Halbleiterkristalls ändert sich an der Grenzfläche sprunghaft. Beiderseits des pn-Übergangs liegen erheblich unterschiedliche Konzentrationen der freien Ladungsträger vor. Vor dem Zusammenfügen sind beide Hälften des Halbleiterblocks für sich elektrisch neutral.



Abb. 24: Idealer, abrupter pn-Übergang (links) und Dotierungsverlauf, z. B. $n_A > n_D$ (rechts)



- ortsfestes negatives Akzeptor-Ion \ominus frei bewegliches Elektron
- + ortsfestes positives Donatoratom \oplus frei bewegliches Loch
- Halbleiteratom (z. B. Silizium)

Abb. 25: p- und n-dotierte, elektrisch neutrale Halbleiterblöcke vor dem Zusammenfügen

3.1.2 Diffusion und Rekombination im pn-Grenzgebiet

Werden p- und n-Gebiet zusammengefügt, so diffundieren als Folge des Konzentrationsunterschiedes und der thermischen Bewegung der Ladungsträger Elektronen vom n-Gebiet in das p-Gebiet und rekombinieren dort mit Löchern. Umgekehrt diffundieren Löcher aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet und rekombinieren dort mit Elektronen.

Wandern können nur freie Ladungsträger, die im gitterförmigen Aufbau des Halbleiters übrig bleibenden Atomrümpfe bilden ortsfeste Raumladungen (negativ im p-Gebiet und positiv im n-Gebiet).

Auf der p-Seite reduziert sich in einem schmalen Gebiet die Anzahl der Löcher (durch Abwandern und durch Rekombination mit eingewanderten Elektronen), ortsfeste negative Raumladungen (Akzeptoratomrumpfe) bleiben übrig. In diesem Gebiet hat sich die p-Zone negativ aufgeladen.

Auf der n-Seite reduziert sich in einem schmalen Gebiet die Anzahl der freien Elektronen (durch Abwandern und durch Rekombination mit eingewanderten Löchern). Die n-Zone hat sich in diesem Gebiet durch verbliebene ortsfeste positive Raumladungen (Donatoratomrumpfe) positiv aufgeladen.

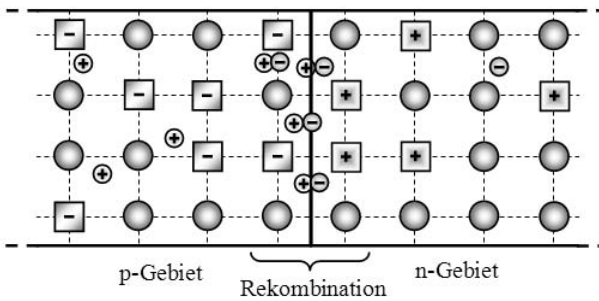


Abb. 26: Rekombination von Elektronen und Löchern im pn-Grenzgebiet aufgrund der Diffusion der freien Ladungsträger nach dem Zusammenfügen der Halbleiterblöcke

Durch die abfließenden Majoritätsträger wird sowohl im p- als auch im n-Gebiet das elektrische Gleichgewicht gestört. Das durch die Raumladungen entstehende elektrische Feld wirkt einer weiteren Diffusion entgegen und verhindert einen vollständigen Konzentrationsausgleich. Der Diffusionsvorgang begrenzt sich selbst, der pn-Halbleiter blockiert den Diffusionsstrom selbst an seiner Übergangsstelle. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein zwischen dem Bestreben, dem Konzentrationsgefälle folgend über den pn-Übergang zu diffundieren, und der entgegenwirkenden Kraft des elektrischen Feldes. Die elektrisch nicht kompensierten ortsfesten Ladungen stoßen die Majoritätsträger der jeweils anderen Seite des pn-Übergangs ab. Diese werden vom pn-Übergang weg in ihr Dotierungsgebiet zurückgedrängt. Die ortsfesten negativen Atomrumpfe auf der p-Seite stoßen die von der n-Seite kommenden Elektronen zurück, die ortsfesten positiven Atomrumpfe auf der n-Seite drängen die von der p-Seite kommenden Löcher zurück.

3.1.3 Ladungsträgerdichte

In der näheren Umgebung des pn-Übergangs tritt eine hochohmige Zone (fast) ohne frei bewegliche Ladungsträger auf, sie wird als **Verarmungszone** oder **Raumladungszone RLZ** bezeichnet. Dort befinden sich nur die verbliebenen ortsfesten Raumladungen. Da sich in der RLZ keine frei beweglichen Ladungsträger befinden oder durch sie hindurch wandern können, wird sie auch **Sperrschicht** (junction) oder **Grenzschicht** genannt. Sie ist der wirksame Teil eines pn-Übergangs, ohne äußere elektrische Beschaltung ist sie nicht leitend. In der Grenzschicht ergibt sich ein Zustand wie in einem Isolator, sie hat einen sehr hohen Widerstand.

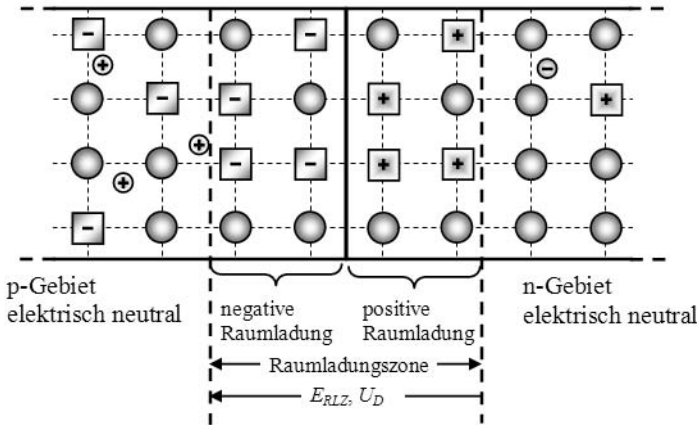


Abb. 27: Ausbildung der Raumladungszone ohne frei bewegliche Ladungsträger (Sperrschicht), mit Richtung des dadurch hervorgerufenen elektrischen Feldes E_{RLZ} und der resultierenden Diffusionsspannung U_D

Ein weiterer Fluss von Ladungsträgern über die Sperrschicht hinweg kommt erst wieder durch äußere Einflüsse zustande, wie das Anlegen einer Spannung an den Halbleiterblock, dessen Erwärmung oder Bestrahlung mit Licht.

Die Ausdehnung der Sperrschicht ist abhängig von der Dotierung der Zone und der intrinsischen Ladungsträgerdichte des Materials. Bei gleich hoher Dotierungsdichte in p- und n-Gebiet ist die Raumladungszone symmetrisch. Bei ungleichen Dotierungsdichten breitet sich die RLZ weiter in das weniger stark dotierte Gebiet aus.

In größerer Entfernung von der Grenzschicht bleiben die durch die Dotierung verursachten Ladungsträgerkonzentrationen erhalten. Außerhalb der Raumladungszone bleiben das p- und n-Gebiet elektrisch neutral, es wird dort als **Bahngebiet** bezeichnet.

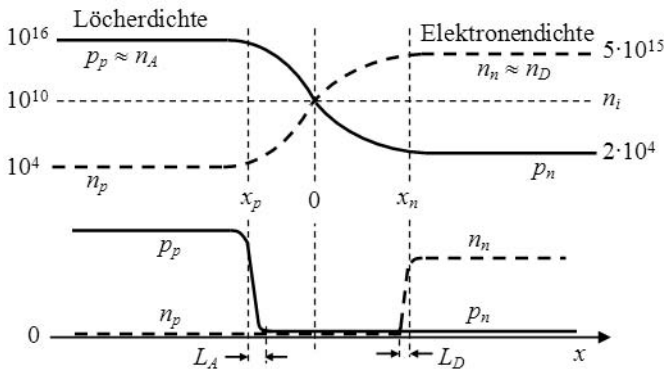


Abb. 28: Ladungsträgerdichte (pro cm^3) im logarithmischen Maßstab (oben) und linearen Maßstab (unten)

Die in Abb. 28 eingezeichneten Längen L_A und L_D werden als **Debye-Längen** bezeichnet. Die Debye-Länge gibt an, über welche Distanz die beweglichen Ladungsträger am pn-Übergang abgebaut werden. Die Debye-Länge beschreibt die Ausdehnung stationärer Raumladungen in einem Halbleiter, die Diffusionslänge die Ausdehnung einer neutralen Dichteabweichung. Die Diffusionslängen sind 100- bis 1000-mal größer als die Debye-Länge. Allgemein stellt die Debye-Länge die Eindringtiefe eines elektrischen Feldes in das Innere eines Materials dar.

Berechnung der Debye-Längen:

$$L_{A,D} = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot k \cdot T}{e^2 \cdot n_{A,D}}} \tag{3.2}$$

3.1.4 Raumladungsdichte

Die Raumladungsdichte hat beim abrupten pn-Übergang auf beiden Seiten des pn-Übergangs jeweils einen annähernd rechteckigen Verlauf. Sie lässt sich daher mit folgenden Gleichungen angeben:

$$\rho_p \approx -e \cdot n_A \text{ (ortsfeste negative Ladung in der p-Zone)} \tag{3.3}$$

$$\rho_n \approx e \cdot n_D \text{ (ortsfeste positive Ladung in der n-Zone)} \tag{3.4}$$

Die beiden Raumladungen Q_p und Q_n sind betragsmäßig gleich groß. Bei unterschiedlicher Raumladungsdichte auf den beiden Seiten des pn-Übergangs aufgrund unterschiedlicher Dotierungsdichte dehnen sie sich unterschiedlich weit aus ($x_p \neq x_n$).

$$x_p \cdot \rho_p = x_n \cdot \rho_n \tag{3.5}$$

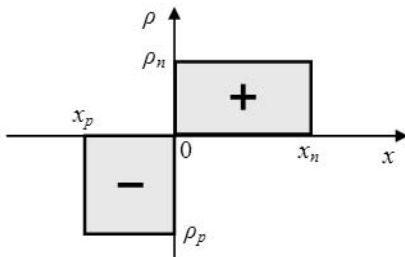


Abb. 29: Raumladungsdichte (linearer Maßstab)

3.1.5 Diffusionsspannung

Durch die Raumladungen wird ein elektrisches Feld hervorgerufen. Den Feldstärkeverlauf erhält man durch Integration der Raumladungsdichte

$$E(x) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_p}^x \rho(x) \cdot dx \tag{3.6}$$

Bei rechteckigem Verlauf der Raumladungsdichte ergibt sich ein dreieckförmiger Verlauf der Feldstärke.

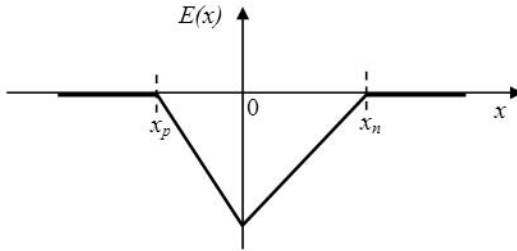


Abb. 30: Elektrische Feldstärke am pn-Übergang

Durch Integration der elektrischen Feldstärke erhält man den Verlauf des elektrischen Potentials.

$$\varphi(x) = - \int_{x_p}^x E(x) \cdot dx \quad (3.7)$$

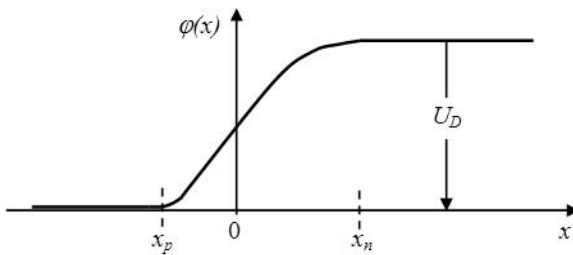


Abb. 31: Potenzialverlauf und Diffusionsspannung

Die gegenseitige Aufladung von p- und n-Zone führt zu einer elektrischen Spannung zwischen den Raumladungen der beiden Zonen. Man nennt diese Spannung, die dem Potenzialunterschied der ortsfesten Ladungen in der Grenzschicht entspricht, die **Diffusionsspannung** U_D . Die Diffusionsspannung wirkt einem völligen Konzentrationsausgleich durch den Diffusionsstrom entgegen, sie bildet eine Potenzialbarriere an der Sperrschicht, die einen weiteren Konzentrationsausgleich der beweglichen Ladungsträger durch Diffusion verhindert.

Es stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Diffusionsstrom

$$I_D = A \cdot e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \quad (A = \text{Sperrschichtfläche}) \quad (3.8)$$

und entgegengerichtetem Feldstrom

$$I_F = A \cdot \sigma \cdot E = A \cdot e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad (3.9)$$

ein. Durch Gleichsetzen der beiden Ströme ($I_D = -I_F$) und Integration der darin enthaltenen Feldstärke über die gesamte Raumladungszone erhält man die Diffusionsspannung:

$$U_D = - \int_{x_p}^{x_n} E(x) \cdot dx = \frac{D_n}{\mu_n} \cdot \int_{n_p}^{n_n} \frac{dn}{n} = \frac{D_n}{\mu_n} \cdot \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (3.10)$$

$$U_D = U_T \cdot \ln \frac{n_A \cdot n_D}{n_i^2} \quad (3.11)$$

$$\text{mit (nach Einstein) } U_T = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k \cdot T}{e} \quad (3.12)$$

Die **Temperaturspannung** U_T ist ein Spannungs-Äquivalent für die mittlere Energie der Elektronen bei der Temperatur T (mittlere Elektronenenergie = $e \cdot U_T = k \cdot T$).

Beispiel 3

$$\text{Für } T = 300 \text{ K ist } U_T = \frac{k \cdot T}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 300 \text{ K}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \approx 26 \text{ mV} .$$

Bei Germanium ($n_i = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) dotiert mit $n_A = n_D = 2,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ergibt die Diffusionsspannung $U_D = 0,026 \text{ V} \cdot \ln(10^6) = 0,36 \text{ V}$. Bei Silizium ($n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) dotiert mit $n_A = n_D = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ folgt $U_D = 0,026 \text{ V} \cdot \ln(10^{12}) = 0,72 \text{ V}$.

Die Diffusionsspannung hängt nur sehr wenig von der Dotierung ab, da der Zusammenhang logarithmisch ist. Bei einer Verzehnfachung der Dotierung ergibt sich lediglich eine Änderung um $0,026 \text{ V} \cdot \ln(100) = 0,12 \text{ V}$. Die im Beispiel oben ausgerechneten Zahlen sind typische Werte für diese beiden Halbleitersorten.

Die Diffusionsspannung in Germanium beträgt etwa 0,3 V und in Silizium etwa 0,7 V.

Die Diffusionsspannung kann von außen (an den äußeren Anschlüssen) nicht gemessen werden, da sie an den Grenzschichten Metall-Halbleiter in gleicher Größe, aber mit umgekehrter Polarität auftritt. Die Summe aller Diffusionsspannungen ergibt null.

3.1.6 Sperrschichtweite

Die Raumladungszone dehnt sich aus von x_p bis x_n . Diese Ausdehnung wird *Sperrschichtweite* W_S genannt. Ohne äußere Spannung beträgt die Sperrschichtweite:

$$W_{S0} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} \cdot \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right) \cdot U_D} \quad (3.13)$$

Die Sperrschichtbreite im p-Gebiet ist:

$$w_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot n_D \cdot U_D}{e \cdot n_A \cdot (n_A + n_D)}} \quad (3.14)$$

Die Sperrschichtbreite im n-Gebiet ist:

$$w_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot n_A \cdot U_D}{e \cdot n_D \cdot (n_A + n_D)}} \quad (3.15)$$

Durch Addition von w_p und w_n erhält man die gesamte Sperrschichtweite W_{S0} .

Beispiel 4

Für Silizium mit $\epsilon_r = 11,7$, $n_A = n_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, $U_D = 600 \text{ mV}$

$$\text{ist } W_{s0} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,7 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ As} \cdot 2 \text{ cm}^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \text{V} \cdot \text{cm}} \cdot \frac{1}{10^{15}}} \cdot 0,6 \text{ V} = 1,25 \text{ } \mu\text{m}$$

Die Sperrschichtdicken sind also sehr gering. Hieraus resultiert eine hohe mittlere Feldstärke in der Grenzschicht. Die Sperrschichtweite nimmt mit zunehmender Dotierung ab, die Feldstärke in der Sperrschicht folglich zu.

Für Dotierstoffkonzentrationen zwischen 10^{14} cm^{-3} und 10^{18} cm^{-3} ergeben sich Weiten der Raumladungszone von $>1 \text{ } \mu\text{m}$ bis zu etwa $0,01 \text{ } \mu\text{m}$. Dabei herrschen in der Raumladungszone maximale Feldstärken von 10^4 V/cm bis 10^6 V/cm .

3.1.7 Sperrschichtkapazität

In der Raumladungszone sind elektrische Ladungen enthalten. Der Raumladungszone kann daher eine Kapazität zugeordnet werden. In Anlehnung an einen Plattenkondensator kann die Größe der Kapazität angegeben werden:

$$C_s = \epsilon \cdot \frac{A}{W_s} \tag{3.16}$$

Mit der Sperrschichtweite W_{s0} ergibt sich eine auf die Sperrschichtfläche A bezogene Sperrschichtkapazität des spannungslosen pn-Übergangs von:

$$c_{s0} = \frac{C_{s0}}{A} = \frac{\epsilon}{W_{s0}} = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot e \cdot n_A \cdot n_D}{2 \cdot (n_A + n_D) \cdot U_D}} \tag{3.17}$$

C_{s0} wird auch als *Null-Kapazität* bezeichnet. Da die Sperrschichtweite mit zunehmender Dotierung abnimmt, nimmt die Null-Kapazität mit steigender Dotierung zu.

Beispiel 5

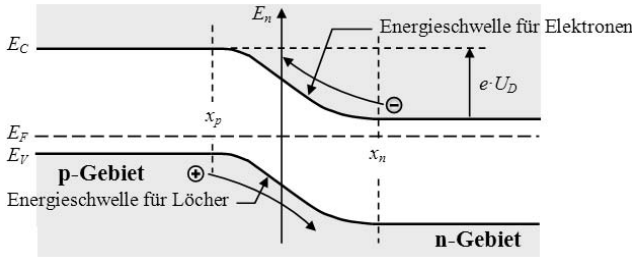
Für Silizium mit $W_{s0} = 1,25 \text{ } \mu\text{m}$ folgt $c_{s0} = \frac{C_{s0}}{A} \approx 8,3 \frac{\text{nF}}{\text{cm}^2}$. Für $A = 1 \text{ mm}^2$ ist

$$C_{s0} = 83 \text{ pF}.$$

3.1.8 Energiebänder-Modell des pn-Übergangs

Der pn-Übergang wird nun im Bändermodell betrachtet. Da sich die freien Elektronen im Leitungsband des n-Gebiets vorzugsweise in der Nähe der Leitungsbandkante aufhalten, können sie nicht in das energetisch höher liegende Leitungsband des p-Gebiets überwechseln. Die Elektronen, die vom n-Gebiet in das p-Gebiet wechseln wollen, müssen eine zusätzliche Energie aufnehmen, damit dies möglich ist. Diese Energie bzw. Energieschwelle beträgt $\Delta W = e \cdot U_D$, da die Elektronen gegen die Spannung U_D anlaufen müssen. Im Bändermodell muss folglich die n-Seite um diese Energie niedriger liegen als die p-Seite. Ähnliches gilt für die Löcher im Valenzband des p-Gebiets, die sich hauptsächlich an der Valenzbandkante aufhalten.

Das Fermi-Niveau E_F stellt sich beim spannungslosen pn-Übergang beiderseits der Grenzschicht auf gleiche Höhe ein.



E_n = Elektronenenergie, E_C = Leitungsbandkante, E_V = Valenzbandkante, E_F = Fermi-Niveau

Abb. 32: Energiebänder-Modell des spannungslosen pn-Übergangs

3.2 Der pn-Übergang mit äußerer Spannung

Durch das Anlegen einer äußeren Spannung befindet sich der pn-Übergang im thermodynamischen Ungleichgewicht.

3.2.1 Äußere Spannung in Sperrrichtung

Verbreiterung der Grenzschicht

Schließt man an den pn-Übergang eine äußere Spannung U_R so an, dass ihr Minuspol am p-Gebiet und ihr Pluspol am n-Gebiet liegt, so haben die äußere Spannung U_R (Index R: reverse voltage) und die Diffusionsspannung U_D den gleichen Richtungssinn. Die äußere Spannung addiert sich zu der Diffusionsspannung am pn-Übergang.

$$U_{pn} = U_D + U_R \tag{3.18}$$

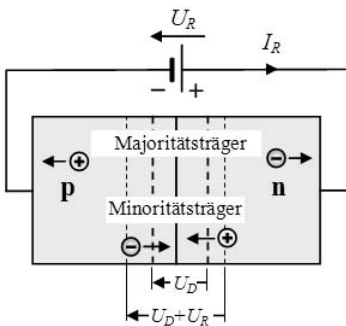


Abb. 33: Äußere Spannung am pn-Übergang in Sperrrichtung und Kraftwirkungen auf die Ladungsträger. Im Sperrbereich ist die äußere Spannung negativ.

Das von der externen Spannung verursachte elektrische Feld übt Kräfte auf die beweglichen Ladungsträger im Halbleiter aus.

Die Majoritätsträger werden von den jeweils angrenzenden Spannungspolen vom pn-Übergang weg zu den Anschlüssen nach außen gezogen. Freie Elektronen im n-Gebiet wandern in Richtung Pluspol von U_R und die Löcher im p-Gebiet wandern in Richtung Minuspol von U_R . Da die beweglichen Ladungsträger durch das äußere elektrische Feld von den Rändern der Grenzschicht abgezogen werden, verarmt die Grenzschicht noch stärker an beweglichen Ladungsträgern. Die ursprüngliche Sperrschicht (Raumladungszone) wird erheblich breiter und ihr Widerstand noch erhöht. Die externe Spannung vergrößert die durch U_D gebildete Potenzialbarriere, welche die Majoritätsladungsträger bei der Diffusion überwinden müssen, von U_D auf $(U_D + U_R)$. Diese Schwelle kann kaum ein Majoritätsladungsträger überwinden.

Die ortsfesten positiven Ladungen im n-Gebiet und die ortsfesten negativen Ladungen im p-Gebiet begrenzen die Verbreiterung der Sperrschicht, so dass sich diese nicht beliebig weit ausdehnen kann. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein zwischen der Wirkung der angelegten äußeren Spannung und der Raumladung der ortsfesten Ionen.

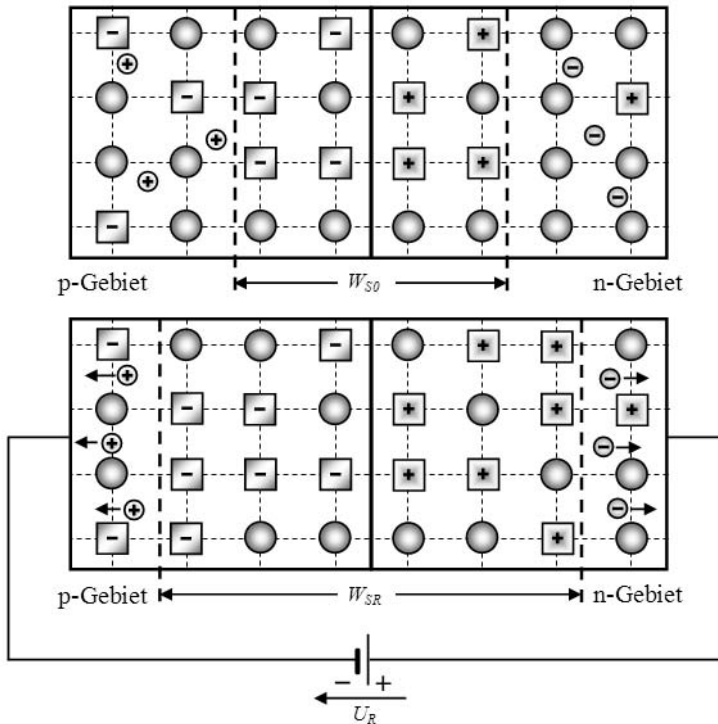


Abb. 34: Vergrößerung der Grenzschichtbreite von W_{S0} auf W_{SR} bei einem in Sperrrichtung gepolten pn-Übergang, ohne äußere Spannung (oben), mit Sperrspannung U_R (unten), Symbole siehe Abb. 25

Die *Minoritätsträger* werden vom jeweils angrenzenden Pol der äußeren Sperrspannung abgestoßen, vom jeweils entgegengesetzten Pol angezogen. Sie werden daher ins Kristallinnere in Richtung auf den pn-Übergang verschoben.

Für die Minoritätsträger stellen Diffusionsspannung und angelegte Sperrspannung keine Potenzialbarriere, sondern eine Beschleunigungsspannung dar. Die im Bereich der Raumladungszone (Grenzschicht) in geringer Anzahl vorhandenen oder dort durch (thermische) Paarbildung entstandenen Minoritätsträger werden von dem dort herrschenden elektrischen Feld beschleunigt und durch den pn-Übergang hindurch bewegt. Durch die Minoritätsträger wird daher ein kleiner Strom in Sperrrichtung, der *Sperrstrom* I_R , verursacht.

Zusammenfassung:

Liegt die äußere Spannung in Sperrpolung als sogenannte *Sperrspannung* am pn-Halbleiter an, so ist kein Strom von Majoritätsträgern über den pn-Übergang hinweg möglich. Der pn-Übergang sperrt, im äußeren Stromkreis fließt nur der aufgrund der geringen Konzentration von Minoritätsladungsträgern sehr kleine Feldstrom (Sperrstrom).

Sperr sättigungsstrom

Die Minoritätsträger werden durch das elektrische Feld in der Raumladungszone abgesaugt. Ihre Konzentration sinkt am Rand der Raumladungszone bereits bei kleinen Sperrspannungen auf annähernd null ab.

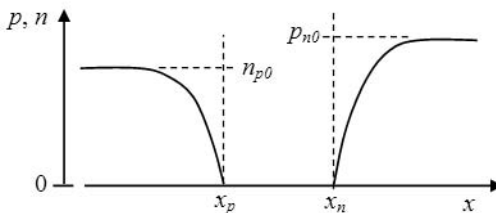


Abb. 35: Konzentration der Minoritätsträger außerhalb der Raumladungszone (linearer Maßstab), n_{p0} , p_{n0} = Minoritätsträgerdichten ohne äußere Spannung

Die Minoritätsträgerdichten an den Rändern der Raumladungszone lassen sich nach folgenden Gleichungen angeben:

$$n_p(x_p) = n_{p0} \cdot e^{-\frac{U_R}{U_T}} \quad \text{mit} \quad n_{p0} = \frac{n_i^2}{n_A} \quad (3.19)$$

$$p_n(x_n) = p_{n0} \cdot e^{-\frac{U_R}{U_T}} \quad \text{mit} \quad p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_D} \quad (3.20)$$

Für $U_R \gg U_T$ (z. B. $U_R > 0,5 \text{ V}$ bis 1 V) gehen diese Konzentrationen gegen null.

Bereits bei kleinen Sperrspannungen werden am Rande der Raumladungszone alle Minoritätsträger abgesaugt und die Minoritätsträgerdichte sinkt auf null. Selbst bei steigender Sperrspannung können daher keine zusätzlichen Minoritätsträger abgesaugt werden. Der Sperrstrom erreicht bei konstanter Temperatur bereits bei kleinen Sperrspannungen einen Sättigungswert, d. h. er ist von U_R nahezu unabhängig und steigt bei höhe-

ren Sperrspannungen nicht an. Im praktischen Betrieb erwärmt sich die Sperrschicht mit steigender Spannung, so dass der Sperrstrom mit U ansteigt.

Der Sperr sättigungsstrom berechnet sich zu

$$I_S = A \cdot e \cdot \left(p_{n0} \cdot \frac{L_p}{\tau_p} + n_{p0} \cdot \frac{L_n}{\tau_n} \right) \quad (3.21)$$

I_S = Sperr sättigungsstrom, A = Fläche des pn-Übergangs, $L_{p,n}$ = Diffusionslänge der Minoritätsträger, $\tau_{p,n}$ = Minoritätsträger-Lebensdauer, n_{p0}, p_{n0} = Minoritätsträgerdichten ohne äußere Spannung

oder mit $p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_D}$, $n_{p0} = \frac{n_i^2}{n_A}$, $\frac{L_n}{\tau_n} = \frac{D_n}{L_n}$ und $\frac{L_p}{\tau_p} = \frac{D_p}{L_p}$

$$I_S = A \cdot e \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D_n}{L_n \cdot n_A} + \frac{D_p}{L_p \cdot n_D} \right) \quad (3.22)$$

Bei $T = 300$ K beträgt der Sperr sättigungsstrom bei Silizium $I_S/A \approx 10^{-9}$ bis 10^{-11} A/mm².

Der Sperr sättigungsstrom ist proportional zum Quadrat der Eigenleitungskonzentration. Die Eigenleitungskonzentration hängt näherungsweise exponentiell von der Temperatur ab. Zudem tritt die Temperatur auch noch im Argument der exp-Funktion auf. Beide Umstände erklären die hohe Temperaturabhängigkeit vieler bipolarer Halbleiterbauelemente.

Der Sperrstrom ist von der Temperatur exponentiell abhängig.

Der Sperrstrom verdoppelt sich bei $\Delta T \approx 6$ °C in Silizium bzw. $\Delta T \approx 9$ °C in Germanium.

Der theoretische Sperr sättigungsstrom ist sehr gering, er liegt im Bereich von ca. 10^{-14} ... 10^{-9} Acm⁻². Während der theoretische Sperr sättigungsstrom das Verhalten der Kennlinie im Durchlassbetrieb einer Diode für niedrige Durchlassströme gut beschreibt, sind die im Sperrbereich tatsächlich gemessenen Ströme in der Regel sehr viel höher. Diese Diskrepanz ist auf die Vernachlässigung der Rekombination/ Generation in der Raumladungszone zurückzuführen.

Der Sättigungsstrom I_S wird von den Dotierungsverhältnissen und den Strukturen des pn-Übergangs bestimmt. Er ist somit ein charakteristischer Bauelementeparameter einer auf der Wirkungsweise des pn-Übergangs basierenden Halbleiterdiode.

Sperrschichtweite und Sperrschichtkapazität

Die Sperrschichtweite W_{SR} wächst mit größer werdender (negativerer) Sperrspannung U_R .

$$W_{SR} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} \cdot \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right) \cdot (U_D - U_R)} = W_{S0} \cdot \sqrt{\frac{U_D - U_R}{U_D}} \quad (3.23)$$

Ein pn- oder ein Metall-Halbleiter-Übergang besitzt eine spannungsabhängige Sperrschichtkapazität C_s , die von der Dotierung der aneinander grenzenden Gebiete, dem Dotierungsprofil, der Fläche des Übergangs und der anliegenden Spannung abhängt.

Die Sperrschichtkapazität eines gesperrten pn-Übergangs liegt typischerweise im Bereich kleiner 100 pF.

Die Sperrschichtkapazität sinkt mit größer werdender (negativerer) Sperrspannung.

Für einen abrupten pn-Übergang gilt:

$$c_s = \frac{C_s}{A} = \frac{\epsilon}{W_{SR}} = c_{s0} \cdot \sqrt{\frac{U_D}{U_D - U_R}} \quad (\text{gültig für abruptes Dotierungsprofil und } U_R < U_D) \quad (3.24)$$

c_{s0} = flächenbezogene Kapazität des spannungslosen pn-Übergangs [siehe Gl. (3.17)]

A = Sperrschichtfläche, U_D = Diffusionsspannung, $U_R < 0$ = Sperrspannung am pn-Übergang

U_D und c_{s0} nehmen mit steigender Dotierung zu. Bei Zimmertemperatur liegt U_D gewöhnlich im Bereich 0,5...1 Volt.

Der Kapazitätskoeffizient m_s (auch *Gradationsexponent* genannt) bezieht das Dotierungsprofil des pn-Übergangs mit ein. Für *abrupte* Übergänge mit einer sprunghaften Änderung der Dotierung gilt

$$m_s \approx \frac{1}{2}, \text{ für lineare Übergänge ist } m_s \approx \frac{1}{3}, \text{ für hyperabrupte Übergänge ist } m_s > \frac{1}{2}$$

(relevant bei Kapazitätsdioden, Standardwerte sind $m_s = 0,75$; $m_s = 1,0$; $m_s = 1,25$; $m_s = 1,5$). Unter Berücksichtigung von m_s gilt:

$$C_s = C_{s0} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{U_R}{U_D}\right)^{m_s}} \quad (\text{gültig für } U_R < U_D) \quad (3.25)$$

Für $m_s = \frac{1}{2}$ erhält man in Gl. (3.25) die Verhältnisse von Gl. (3.24).

Nähert sich U_R an U_D an, so sind die Voraussetzungen für Gl. (3.25) ab ca. $U_R = 0,5 \cdot U_D$ nicht mehr gültig. C_s nimmt dann im Vergleich zu Gl. (3.25) nur noch schwach zu. Es gilt jetzt folgende Gleichung für C_s :

$$C_s = C_{s0} \cdot \frac{1 - \alpha \cdot (1 + m_s) + \frac{m_s \cdot U_R}{U_D}}{(1 - \alpha)^{(1+m_s)}} \quad (\text{gültig für } U_R \geq \alpha \cdot U_D \text{ mit } \alpha \approx 0,4 \dots 0,7) \quad (3.26)$$

Für den *einseitig abrupten pn-Übergang* mit $n_A \gg n_D$ ist die Sperrschichtkapazität:

$$C_s = A \cdot \sqrt{\frac{\epsilon \cdot e}{2} \cdot \frac{n_D}{U_D - U_R}} \quad (3.27)$$

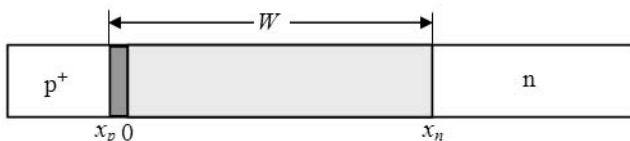


Abb. 36: Einseitig abrupter pn-Übergang

Beispiel 6

Zu Bestimmen sind bei der Temperatur $T = 300 \text{ K}$ die Werte der Sperrschichtkapazität für einen Silizium-pn-Übergang mit der Dotierung $n_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n_D = 8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ und einer Sperrschichtfläche $A = 0,001 \text{ cm}^2$ für die angelegten Spannungen $U_R = 0 \text{ V}$ und $U_R = -10 \text{ V}$.

Lösung

Nach Tabelle 1 ist bei $T = 300 \text{ K}$ für Silizium $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ und $\epsilon_r = 11,8$.

Nach Beispiel 3 ist bei $T = 300 \text{ K}$: $U_T \approx 26 \text{ mV}$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} = 8,854 \cdot 10^{-14} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{cm}}$$

Nach Gl. (3.11) ist die Diffusionsspannung $U_D = U_T \cdot \ln \frac{n_A \cdot n_D}{n_i^2}$

$$U_D = 0,026 \text{ V} \cdot \ln \frac{10^{16} \cdot 8 \cdot 10^{15}}{(1,5 \cdot 10^{10})^2} = 0,692 \text{ V}$$

Nach Gl. (3.17) und Gl. (3.24) ist: $C_S = A \cdot \underbrace{\frac{\epsilon \cdot e \cdot n_A \cdot n_D}{2 \cdot (n_A + n_D)}}_{c_{S0}} \cdot \sqrt{\frac{U_D}{U_D - U_R}}$

$$C_S = A \cdot \underbrace{\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot e \cdot n_A \cdot n_D}{2 \cdot (n_A + n_D)}}_K \cdot \sqrt{\frac{1}{U_D - U_R}}$$

$$K = 0,001 \cdot \sqrt{\frac{8,854 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 8 \cdot 10^{15}}{2 \cdot (10^{16} + 8 \cdot 10^{15})}} \left[\text{cm}^2 \cdot \sqrt{\frac{\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}}{\text{V} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}}} \right]$$

$$K = 1,927 \cdot 10^{-11} \left[\text{A} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{V}}} \right]$$

$$U_R = 0 \text{ V}: C_S = K \cdot \sqrt{\frac{1}{0,692 \text{ V}}} = 1,927 \cdot 10^{-11} \cdot 1,20 \left[\text{A} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{V}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{V}}} \right] = \underline{\underline{23,12 \text{ pF}}}$$

$$U_R = -10 \text{ V}: C_S = K \cdot \sqrt{\frac{1}{0,692 \text{ V} + 10 \text{ V}}} = 1,927 \cdot 10^{-11} \cdot 0,302 \left[\text{A} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{V}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{V}}} \right] = \underline{\underline{5,82 \text{ pF}}}$$

3.2.2 Äußere Spannung in Flussrichtung

Schließt man an den pn-Übergang eine äußere Spannung U_F (Index F: forward voltage) mit dem Pluspol am p-Gebiet und dem Minuspol am n-Gebiet an, so liegt die äußere Spannung U_F in Gegenrichtung zur Diffusionsspannung U_D , die externe Spannung wirkt der Diffusionsspannung entgegen. Die Potenzialdifferenz über dem pn-Übergang wird

abgebaut, die Potentialschwelle für Majoritätsträger wird reduziert. Am pn-Übergang wirkt die innere Spannung

$$U_{pn} = U_D - U_F \quad (3.28)$$

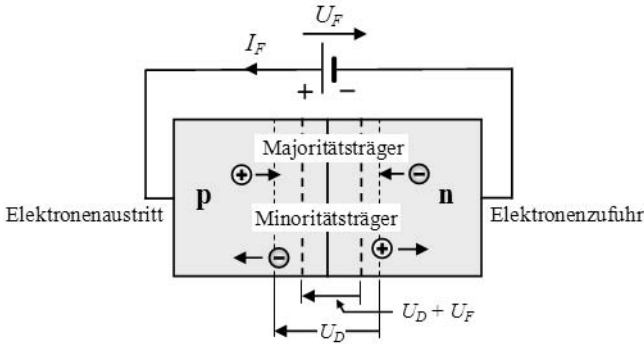


Abb. 37: Äußere Spannung am pn-Übergang in Flussrichtung und Ladungsträgerbewegung. Im Durchlassbereich ist die äußere Spannung positiv.

Zunächst gelingt es den schnellsten (energiereichsten) Majoritätsträgern, den Potenzialwall zu überwinden. Es fließt ein noch kleiner Majoritätsträgerstrom über den pn-Übergang. Mit wachsender äußerer Spannung, welche in dieser Polung als *Flussspannung* U_F bezeichnet wird, nimmt der Strom exponentiell zu, es fließt ein *Flussstrom* oder *Durchlassstrom*.

In der p-Zone fließt ein Löcherstrom, in der n-Zone ein Elektronenstrom. Die Majoritätsträger fließen von beiden Seiten zum pn-Übergang, sie durchdringen den pn-Übergang, dringen in das Nachbargebiet ein und rekombinieren beiderseits des pn-Übergangs mit den dortigen Majoritätsträgern. Es werden also frei bewegliche Ladungsträger, Elektronen aus der n-Zone und Löcher aus der p-Zone, von der äußeren Spannung in die Grenzschicht hineingetrieben, dadurch wird die Raumladung teilweise abgebaut, die Grenzschicht wird schmaler. Die elektrische Feldstärke zwischen den Raumladungsgebieten wird kleiner, die Potentialdifferenz an der Grenzschicht wird gegenüber dem stromlosen Zustand um den Betrag $e \cdot U_F$ verringert. Das Energiebändermodell des spannungslosen pn-Übergangs ist somit auf der linken Seite um den Betrag $e \cdot U_F$ abgesenkt worden.

Durch den Abbau der Potentialschwelle am pn-Übergang nimmt die Weite der Sperrschicht auf W_{SF} ab, in Gl. (3.23) ist statt $-U_R$ dann $+U_F$ einzusetzen.

Der Flussstrom über den pn-Übergang ist ein reiner Diffusionsstrom (wegen des existierenden Konzentrationsgefälles), kein Feldstrom. Durch den Abbau des elektrischen Feldes in der Grenzschicht wird das Gleichgewicht der inneren Strombilanz zugunsten der Diffusion verletzt. Durch die verstärkte Diffusion entsteht eine deutliche Anhebung der Ladungsträgerdichten gegenüber dem Gleichgewichtszustand. Für das Produkt aus Löcher- und Elektronendichte gilt nun:

$$n \cdot p = n_i^2 \cdot e^{\frac{U_F}{U_T}} \quad (3.29)$$

Die außen angelegte Flussspannung baut die dem Diffusionsstrom entgegenstehende Potentialdifferenz U_D maximal bis auf null ab. Der Aufbau einer Spannung mit umgekehrter Polarität über dem pn-Übergang ist nicht möglich. Bei $U_F = U_D$ ist die Grenz-

schicht vollständig abgebaut. Nähert sich die äußere Spannung U_F dem Wert U_D , verschwindet die Sperrschicht, und es ergibt sich ein extrem starker Stromanstieg. Diese Anhebung der Ladungsträgerdichte setzt sich in den Bahngebieten bis hin zu den äußeren Kontakten fort.

Ist die Dotierung von p- und n-Zone unterschiedlich hoch, so stellen sich entsprechend unterschiedlich hohe Majoritätsströme I_p (Löcher vom p- in das n-Gebiet) und I_n (Elektronen vom n- in das p-Gebiet) durch die Raumladungszone hindurch ein. Der Einfluss der Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren in der Raumladungszone auf den Gesamtstrom ist vernachlässigbar. Im Siliziumhalbleiter beeinflusst die Rekombination nur bei sehr geringen Spannungen $U_F < U_T$ den Gesamtstrom.

Da sich bei Flussbetrieb des pn-Übergangs zusätzliche eingewanderte Ladungen nahe der Raumladungszone aufhalten, spricht man von einer *Speicherladung* und von einer *Diffusionskapazität*.

Im Durchlassbetrieb werden die Bahngebiete durch Ladungsträger überschwemmt. Bei einer Erhöhung der Spannung werden zusätzliche Minoritätsträger in die Bahngebiete injiziert. Gleichzeitig muss eine entsprechende Anzahl von Majoritätsträgern von den Kontakten der äußeren Spannungsquelle nachgeliefert werden, damit die Neutralität in den Bahngebieten aufrecht erhalten bleibt. Diese mit einer Spannungsänderung verknüpfte Änderung der Ladungsträgerkonzentrationen in den Bahngebieten wird durch die Diffusionskapazität beschrieben. Im Gegensatz zu einer gewöhnlichen Kapazität, z. B. einem Plattenkondensator, ist die Diffusionskapazität nicht mit Flächenladungen auf zwei voneinander getrennten Elektroden verknüpft.

Eine Sperrschichtkapazität ist auch im Durchlassbetrieb vorhanden. Sie ist allerdings wesentlich kleiner (typisch im pF-Bereich) als die Diffusionskapazität mit einigen 100 pF bis einigen 100 nF.

Die Diffusionskapazität berechnet sich zu

$$c_D = \frac{e^2}{k \cdot T} \cdot A \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot e^{\frac{e \cdot U_F}{k \cdot T}} \quad (\text{einseitig abrupter Übergang}) \quad (3.30)$$

Für den zweiseitig abrupten pn-Übergang gilt:

$$c_D = \frac{e^2}{2 \cdot k \cdot T} \cdot A \cdot (L_p \cdot p_{n0} + L_n \cdot n_{p0}) \cdot e^{\frac{e \cdot U_F}{k \cdot T}} \quad (3.31)$$

Die *Diffusionskapazität steigt exponentiell mit der Spannung an*, ist also weit stärker spannungsabhängig als die Sperrschichtkapazität, die mit negativerer Sperrspannung sinkt. Bei Belastung in Sperrrichtung verschwindet c_D .

Näherungsweise gilt für die Diffusionskapazität:

$$C_D = \tau_T \cdot \frac{I_F}{U_T} \quad (3.32)$$

τ_T wird *Transitzeit* genannt. Die Transitzeit gibt an, wie lange es dauert, bis die Ladungsträger die Sperrschicht durchlaufen haben. Beim Silizium-pn-Übergang ist $\tau_T \approx 1 \dots 100 \text{ ns}$.

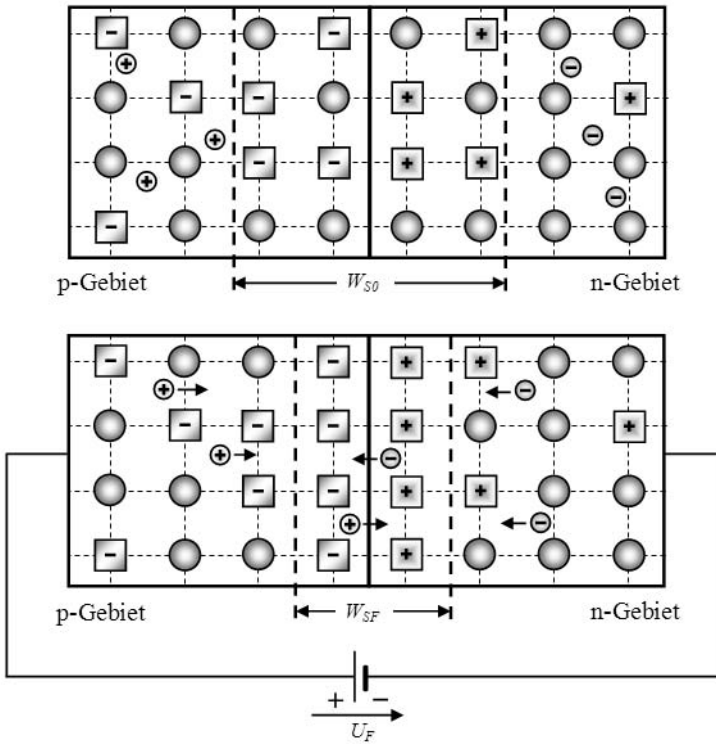


Abb. 38: Verkleinerung der Grenzschichtbreite bei einem in Flussrichtung gepolten pn-Übergang, ohne äußere Spannung (oben), mit Flussspannung (unten), Symbole siehe Abb. 25

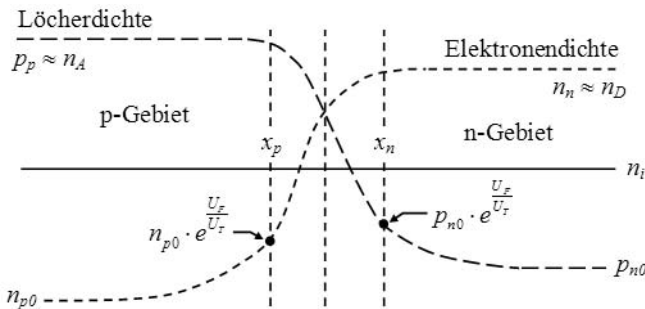


Abb. 39: Konzentration der Ladungsträger bei Flusspolung

Wird mit $U_F = U_D$ die Diffusionsspannung und somit die Grenzschicht vollständig abgebaut, so wird der Durchlassstrom nur noch durch die geringen Bahnwiderstände der p- und n-Zone begrenzt (*Bahnwiderstand* R_B = Widerstand des Halbleiterkristalls außerhalb des pn-Übergangs). Im Wesentlichen muss dann der Durchlassstrom durch einen ohmschen Widerstand R im äußeren Teil des Stromkreises auf einen zulässig kleinen Wert eingestellt werden.

3.3 Durchbruchmechanismen beim pn-Übergang

Ab bzw. oberhalb einer bestimmten Sperrspannung steigt der Sperrstrom eines in Sperrrichtung gepolten pn-Übergangs über den Sperrsättigungsstrom sehr steil an. Dieser sprunghafte Stromanstieg wird auch als Durchbruch bezeichnet, da er zur Zerstörung eines Halbleiterbauelements führen kann.

Bei Halbleiterbauelementen gibt es drei Durchbrucharten mit unterschiedlichen Ursachen:

- Lawinen-Durchbruch
- Zener-Durchbruch (Tunnel-Durchbruch)
- Thermischer Durchbruch.

Auch der sogenannte *Durchgriff* (*punch-through*) führt zu einem Durchbruch.

3.3.1 Lawinen-Durchbruch

Der Lawinen-Durchbruch ist der am häufigsten auftretende Effekt beim Durchbruch des pn-Übergangs, er wird auch **Avalanche-Effekt** genannt. Beim Lawineneffekt handelt es sich um eine Ladungsträgererzeugung durch *Stoßionisation*.

Elektronen, die innerhalb der Raumladungszone eines pn-Übergangs durch Paarbildung entstehen oder aus den angrenzenden Halbleiterzonen in die Raumladungszone eindiffundieren, werden durch ein elektrisches Feld innerhalb der Raumladungszone beschleunigt, sie nehmen kinetische Energie auf. Bei hohen Sperrspannungen verlieren stoßende Ladungsträger innerhalb der Raumladungszone nicht ihre gesamte Energie, sondern können diese über mehrere Stöße akkumulieren und dabei die Energie ΔE des Bandabstands erreichen. Bei hinreichend großer elektrischer Feldstärke nehmen die Elektronen soviel Energie auf, dass sie beim Zusammentreffen mit einem Gitteratom eine Elektronenpaarbindung aufbrechen und ein Elektron aus dem Gitterverband ausschlagen können.

Aus ursprünglich einem freien Elektron werden durch Stoßionisation zwei freie Elektronen und ein Loch. Bei ausreichend großer Sperrschichtweite können die beiden nun vorhandenen freien Elektronen erneut Energie aufnehmen, so dass sie ebenfalls zur Stoßionisation in der Lage sind. Dieser Vorgang kann sich mehrmals wiederholen. Ist die Feldstärke ausreichend groß, um die ersten Stoßionisationen auszulösen, so tritt bei geringem weiteren Anstieg der Sperrspannung ein lawinenartiger Anstieg der Konzentration freier Ladungsträger und damit des Sperrstroms auf. Beim Lawinendurchbruch steigt der Strom im Vergleich zum Zener-Durchbruch sehr abrupt mit der Spannung an. Die Durchbruchspannung U_{BR} wird erreicht, wenn jeder Ladungsträger innerhalb der Raumladungszone mindestens ein weiteres Elektron-Loch-Paar erzeugt.

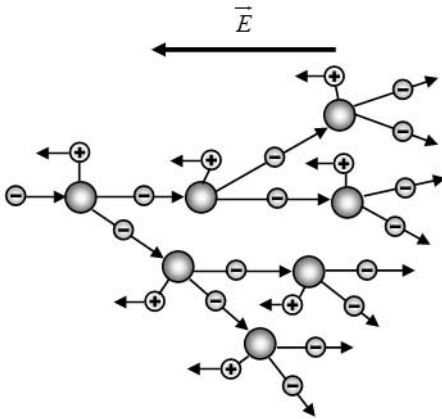


Abb. 40: Bildung einer Elektronenlawine durch Stoßionisation

Der Lawineneffekt benötigt

- eine hohe elektrische Feldstärke
- eine weite Raumladungszone und damit eine niedrige Dotierung.

Eine ausreichende Sperrschichtweite (wie z. B. in einer pin-Diode) ist erforderlich, damit ein Elektron beim Durchqueren der Raumladungszone mehrmals die zur Stoßionisation notwendige Energie aufnehmen kann. Die erforderliche große Sperrschichtweite tritt bei weniger stark dotierten Halbleitern mit Dotierungen bis maximal $10^{17} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ auf. *Je geringer die Dotierung ist, umso höher ist die Durchbruchspannung.* Grund ist die bei geringer Dotierung sehr weite Raumladungszone, über der erst eine hohe Spannung zum Durchbruch führt. Die Durchbruchspannung U_{BR} kann von ca. 4...8 V bis zu mehr als 1000 V durch die Dotierung variiert werden.

Da die freie Weglänge bzw. die Beweglichkeit der Ladungsträger mit steigender Temperatur abnimmt, besitzt die Durchbruchspannung beim Lawineneffekt einen positiven Temperaturkoeffizienten $\alpha_{UL} > 0$, näherungsweise ist $\alpha_{UL} \approx 0,1 \text{ \% / K}$. *Die Durchbruchspannung wird beim Lawinen-Durchbruch mit wachsender Temperatur größer.*

Die nächste Abbildung zeigt die messtechnisch gewonnenen Verhältnisse zwischen Durchbruchspannung und Ladungsträgerdichte.

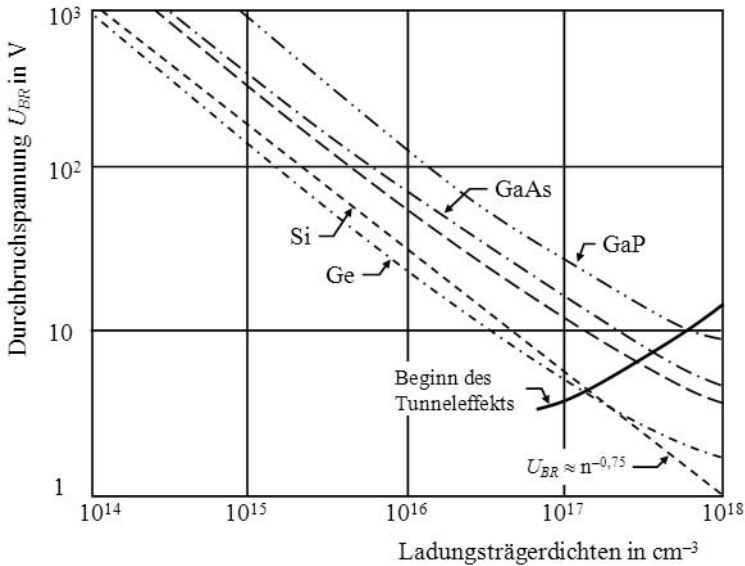


Abb. 41: Durchbruchspannung U_{BR} als Funktion der Dotierung der schwächer dotierten Seite eines unsymmetrischen pn-Übergangs mit abruptem Störstellenprofil [nach SZE, GIBBONS, Appl. Phys. Lett. 8 (1966), p. 111 u.f.]

Für eine stark unsymmetrisch dotierte Diode ($n_D \gg n_A$ oder umgekehrt) kann näherungsweise empirisch ermittelt werden:

$$U_{BR} = a \cdot \left(\frac{10^{17}}{n_D^{-1} + n_A^{-1}} \right)^{0,75} \quad n_D, n_A \text{ in } \text{cm}^{-3} \quad (3.33)$$

mit $a = 10,0 \text{ V}$ für Si, $a = 2,5 \text{ V}$ für Ge, $a = 12,5 \text{ V}$ für GaAs [Quelle wie Abb. 41]

3.3.2 Zener-Durchbruch

Bei niedrigeren Durchbruchspannungen und beidseitig sehr hoch dotierten Bahngebieten wird der Durchbruch durch den quantenmechanischen **Tunnel-Effekt** verursacht. Beim Tunnel-Effekt (Zener-Effekt) handelt es sich um eine Ladungsträgererzeugung in einem starken elektrischen Feld.

Ist bei sehr hoch dotierten Halbleitern die Sperrschichtweite zum Zustandekommen des Lawineneffektes zu gering ($W_{sr} < 0,1 \mu\text{m}$), so können in der Raumladungszone noch höhere Feldstärken auftreten als beim Lawineneffekt. Schon bei recht kleinen Sperrspannungen von $< 6 \text{ V}$ kann die Feldstärke in der Sperrschicht Werte von 100 kV/cm annehmen. Ab dieser Feldstärke werden die vom Feld auf die Valenzelektronen der Gitteratome wirkenden Kräfte so groß, dass Elektronen aus ihren Paarbindungen herausgerissen und ins Leitungsband befördert werden. Die Sperrschicht wird abgebaut. Dieser **Zener-Effekt** wird auch *innere Feldemission* genannt. Wie beim Lawineneffekt tritt beim Überschreiten einer bestimmten Durchbruchspannung ein steiler Anstieg des Sperr-

stromes auf. Beim Zener-Durchbruch werden in hoch dotierten Halbleitern infolge der hohen inneren Feldstärke Ladungsträger freigesetzt.

Der Zener-Effekt lässt sich am Energiebänder-Schema des pn-Übergangs erläutern. Bei Sperrspannung stehen den Valenzelektronen des p-Gebietes freie Plätze auf gleicher energetischer Höhe im räumlich benachbarten Leitungsband des n-Gebietes gegenüber. Bei der sehr geringen Sperrschichtweite können Valenzelektronen der p-Zone, auf gleichem Energieniveau bleibend, die verbotene Zone überqueren (»durchtunneln«) und auf freie Plätze des Leitungsbandes der n-Seite gelangen, welche die gleiche Energiehöhe aufweisen. Es tunneln dabei Elektronen unmittelbar vom Valenz- ins Leitungsband, dies wird als ZENER-Tunneln bezeichnet. Der Zener-Effekt ist ein Tunnel-Effekt.

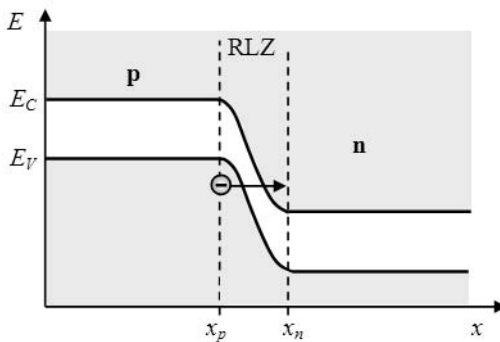


Abb. 42: Der Zener-Effekt im Energiebänder-Schema, Elektronen durchtunneln die verbotene Zone

Die Tunnelwahrscheinlichkeit steigt mit wachsender Feldstärke exponentiell an. Daraus folgt ein steiler Anstieg des Sperrstroms bei geringem Anstieg der Sperrspannung. Der Zener-Effekt tritt bei sehr hoher Dotierung ($> 10^{18}$ bis 10^{19} cm^{-3}) auf. Durch die Dotierung kann die Durchbruchspannung U_Z variiert werden. Zener-Dioden werden durch Dotierung auf eine wohldefinierte Durchbruchspannung eingestellt, auf die sie bei vorgegebenem Strom risikofrei geschaltet werden können.

Die Durchbruchspannung liegt beim Zener-Effekt bei Werten von $U_Z \leq 6,5 \text{ V}$. Bei Durchbruchspannungen unterhalb ca. $6,5 \text{ V}$ dominiert der Zener-Effekt, oberhalb ca. $4,5 \text{ V}$ der Lawineneffekt.

Da der Bandabstand (die Bandlücke) eines Halbleiters mit wachsender Temperatur geringer wird, hat die Durchbruchspannung einen negativen Temperaturkoeffizienten $\alpha_{UZ} < 0$, näherungsweise ist $\alpha_{UZ} \approx -0,1 \text{ \% / K}$. Die Durchbruchspannung wird beim Zener-Durchbruch mit wachsender Temperatur kleiner.

Ein pn-Übergang nimmt beim Zener- bzw. Lawineneffekt keinen Schaden, wenn der Durchbruch gleichmäßig auf der gesamten Fläche des pn-Übergangs stattfindet, so dass keine unzulässige lokale Überhitzung auftritt. Wird der Strom nach Überschreiten der Durchbruchspannung so begrenzt, dass die Stromwärme in der Sperrschicht keine Zerstörung der Kristallstruktur hervorruft, dann sind die Durchbruchvorgänge reversibel. Die Grenzschicht ist nach Unterschreiten der Durchbruchspannung wieder hergestellt.

Stichwortverzeichnis

Symbole

- 1. Moment 258
- 1/f-Grenzfrequenz 266
- 1/f-Rauschen 264, 266, 268, 380, 491
- 10/1000 μ s-Impuls 123, 124
- 2. Durchbruch 72, 73
- 2DEG 391
- 3 dB-Bandbreite 457
- 8/20 μ s-Impuls 123

A

- Abätzen 112
- Abblockkondensator 503
- Abfallzeit 78, 101, 220, 276, 278, 438, 490, 522
- Ableich-Potenzimeter 469
- Abklingzeit 438
- Ableitwiderstand 321, 324
- Abreißdiode 208
- Abschalt-Steuerstrom 437
- Abschaltthyristor 437
- Abschattung 174, 179f.
- Abschnürbereich 339f., 343f., 359, 361, 368f. 372, 375f., 403, 405
- Abschnürspannung 331, 339f., 342f., 345
- Abschnürung 339, 354
- Absorptionszone 169
- Abstimmdiode 180, 183
- Abstrahlcharakteristik 137, 139f., 156
 - Lambert'sche 144
- Abweichung, mittlere 253, 261
- Active Mode 568
- Address Access Time 570
- Address Setup Time 570
- Adressdekoder 565ff., 572
- Adressierung 563, 567, 597f., 609
- Advanced Low-Power-Schottky-TTL 541
- Advanced Schottky-TTL 542
- AIM-Verfahren 573
- air mass 175
- Akkumulation 347
- Akkumulator 17
- Aktivmatrix-Display 148
- Akzeptoratom 53, 115
- Akzeptor 22, 38, 46, 49f., 348, 353
- Al₂O₃-Keramik 506
- Alterung 174, 470, 494
- Aluminium 31, 45, 118, 134, 146, 315, 346, 350, 391
- Aluminiumgalliumarsenid 134
- Amplitude, mittlere 253
- Amplitudenbedingung 477, 479
- Amplitudenfrequenzgang 478, 481
- Amplitudengang 472f.
- Amplitudenmittelwert 260
- Amplitudenrand 479
- Anlaufbereich 343
- Anode 81, 125, 127f., 131f., 145ff., 196f., 199f., 409, 411ff., 432, 436ff., 440, 443f.
- Anodenkürzung 438
- Anregungsenergie 47, 146f.
- Anreicherung 347f., 352
- Anreicherungstyp 330, 349, 351f., 354f., 357f., 360ff., 550
- Anreicherungstyp, n-Kanal 357, 394, 402
- Anschlussdrähte 115, 251
- Anschlusskontakte 115, 505
- Ansprechzeit 122, 125, 143
- Ansteuerung, harte 445
- Anstiegsgeschwindigkeit 416, 425, 457, 488f., 494
- Anstiegsverzerrungen 488
- Anstiegszeit 276f., 426, 479, 490f., 544
- Antifuse-Technik 573f.
- Antisättigungsschaltung 279
- Anzeigen, optische 143
- Application Specific Integrated Circuit 517, 611
- Äquivalenztypen 215
- Arbeitsbereich, erlaubter 251f.

- Arbeitsgerade 165, 244, 280
 Arbeitspunkt 89, 94ff., 129, 141, 151, 158, 166, 177, 181, 188, 193, 195, 205, 220, 232, 236, 239, 241, 244f., 247, 264, 266ff., 270, 272f., 280, 285ff., 295ff., 304, 307, 325, 336ff., 342, 351f., 354ff., 359ff., 369, 405, 497, 519, 548
 temperaturunabhängiger 346
 Arbeitspunktstrom 268
 optimaler 267f.
 Arbeitswiderstand 227, 244, 290, 304, 378, 496, 501, 552
 Arbitrationslogik 600
 ASCR 436f.
 ASIC 517, 611ff., 616ff., 620, 624, 627, 653
 ASIC-Entwurf 616f., 620
 Asymmetrical Silicon-Controlled Rectifier 437
 Atombindung 25
 Atomdichte 25
 Atomhülle 24, 34
 Atomkern 24, 28
 Atommasse 21
 Atommodell, Bohrsches 24
 Atomrümpfe 50, 52f., 353
 Atom, Wertigkeit 34
 Ätzgräben 113
 Aufenthaltswahrscheinlichkeit 190f.
 Auffrischen 557, 568, 592
 Auger-Effekt 141
 Auger-Rekombination 141
 Ausbreitungsgeschwindigkeit 157
 Ausgangsaussteuerbarkeit 452ff., 457, 460, 504
 Ausgangskennlinie 233, 240, 242, 296, 337, 354, 356, 359, 362, 369
 Ausgangskennlinienfeld 229, 233ff., 238ff., 244ff., 290, 341, 343, 357f., 361, 370f., 377, 402
 Ausgangskreis 221ff., 225ff., 233, 244, 272
 Ausgangslastfaktor 521
 Ausgangsleistung 17, 141, 154, 158, 199, 201, 205, 207, 275, 489, 496, 502, 511, 547
 Ausgangsleitwert, differentieller 239
 Ausgangsruhepotenzial 449, 452, 469
 Ausgangsspannung 130, 148, 184f., 200, 227ff., 241, 259, 273, 295, 308, 378, 380, 454ff., 465, 468f., 471, 477f., 488ff., 494f., 497f., 501, 518ff., 526ff., 535f., 540, 544, 548, 655
 Ausgangsstrom 229, 236, 271, 455, 465, 491, 495f., 543f., 551
 maximaler 458
 Ausgangsstufe 481, 491, 496, 502, 533, 535
 Ausgangswiderstand 226, 239, 289f., 305f., 334, 344, 359, 369, 457, 465f., 482, 485f., 494f., 496, 502
 differentieller 288
 dynamischer 359, 361
 Ausgangs-Reflexionsfaktor 302
 Ausgangsamplitude, maximale 490
 Ausräumfaktor 278
 Ausräumstrom 77, 278f., 427, 434
 Ausräumzeit 78, 100, 427
 Ausschaltverhalten 426, 439
 Ausschaltzeit 276, 278
 Aussteuerung, lineare 227
 Aussteuerungsbereich 94, 469, 500
 Aussteuerungsgrenze 453
 Austrittsarbeit 31, 79f., 145, 148, 347
 Autokorrelationsfunktion 261
 Avalanche Induced Migration 573f.
 Avalanche-Diode 131
 Avalanche-Effekt 68, 131, 576, 580
 Avalanche-Fotodiode 169
 Avalanche-Rauschen 265
- B**
 Backwarddiode 195
 Bad Block Management 584f.
 Bad Blocks 584f.
 Bahngebiet 54, 77, 380, 404f., 446
 Bahnradien 24
 Bahnwiderstand 67, 88f., 91, 96, 105, 120, 181f., 193, 313, 316, 368, 371, 397, 422
 Ball 508, 515
 Bandabstand 21, 33, 35, 40f., 43, 47f., 71, 101, 132f., 138, 149, 152, 317f.
 Temperaturabhängigkeit 43
 Banddiagramm 30f.
 Bandgap-Referenz-Diode 125

- Bandkanten 31, 34, 37
 Bandlücke 29, 35, 38, 40, 71, 132f., 161, 269, 316, 391
 Bandübergang
 direkter 37
 indirekter 38
 Bänderdiagramm 30, 317
 Bändermodell 29, 37, 47, 58, 152, 161, 191f., 197
 bandgap 29
 Bandlückenbreite 148
 BARITT-Diode 206, 207
 Barium 31
 Bariumtitanat 591
 Barren 159
 Basis 5, 48, 144f., 150, 189, 216ff., 225ff., 231, 234ff., 241f., 244ff., 251, 263, 265, 269, 271ff., 275ff., 282f., 287ff., 296f., 300, 307ff., 313, 315ff., 320, 322, 324f., 327, 343, 367, 383, 389, 399, 401f., 410f., 417ff., 439, 442, 445, 466, 468, 497f., 525, 528, 530f., 533f., 536, 538ff., 555, 573, 591, 594, 596
 Basisbahnwiderstand 267f., 273, 275, 287, 290, 307, 315f.
 Basis-Emitter-Diode 216, 218, 234ff., 238, 245, 269, 308, 322, 325, 533, 555, 573
 Basis-Emitter-Verlustleistung 247
 Basis-Kollektor-Diode 216, 218, 222, 235ff., 245, 275, 533
 Basis-Kollektor-Grenzschicht 223, 236, 343
 Basis-Kollektor-Spannung 235
 Basisruhespannung 229
 Basis-Ruhestrom 244
 Basisschaltung 222ff., 226, 237, 271, 273f., 282, 284, 296f., 334, 418f.
 Basisvorspannung 229, 244
 Basisweiten-Modulation 235
 Batterien 17
 Bauelemente
 aktive 17, 213
 diskrete 19
 induktive 17
 lineare 17f.
 nicht lineare 19
 passive 17
 Baugruppe 17
 Bauteile, optoelektronische 122
 Belastungsschwankungen 130
 Beleuchtungsstärke 162, 165f., 168, 170, 574
 Benzolringe 22
 Bereich
 aktiver 154, 227, 235f., 277ff., 310, 316, 339, 343f., 405
 ohmscher 341, 343, 358
 parabolischer 341
 verbotener 29, 519
 Beschleunigungsdioden 540
 Besetzungsinversion 150ff.
 Besetzungswahrscheinlichkeit 31ff.
 energieabhängige 32
 beta cuttoff frequency 273
 Betrieb, invertierender 460
 Betrieb, nichtinvertierender 460
 Betriebsart 199, 200, 201, 218f., 341, 366, 533, 565, 595
 Betriebseigenschaften 234, 304
 Betriebsspannung 122f., 211, 213, 220, 235, 244, 332, 378, 447, 451, 453, 459f., 470, 496, 504, 517f., 523f., 530f., 537, 571, 581, 588, 595, 601
 abblocken 503, 535
 Schwankungen 130, 499, 518
 symmetrische 452, 496
 Betriebsspannungsdurchgriff 458, 470
 Betriebssperrspannung 122
 Betriebsstromaufnahme 458
 Betriebstemperatur 50, 177, 211, 421, 424, 470, 537
 Betriebsverhalten, Transistorvierpol 304
 Betriebsverstärkung 461, 471, 483
 Polstelle 477
 Betriebswellenlänge 135
 Beweglichkeit 44, 48, 50f., 167, 198f., 220, 329, 332, 345, 358, 365, 373, 389ff.
 BFL 525
 Biasstrom 466
 bidirektionale Thyristordiode 126
 BICMOS 515, 525, 545, 558f.
 BICMOS-Technologie 558f.
 Bindung, kovalente 25, 46
 Bindungslücke 46

- Bindungssystem, konjugiertes 22
 Bipolar Junction Transistor, BJT 214
 Bipolartransistor 51, 214, 218, 239, 252,
 262, 274, 281, 309, 316f., 320, 327f., 333f.,
 343f., 360, 366f., 370, 372ff., 380, 390,
 394, 401, 411, 457, 558
 Großsignalgleichungen 269
 rechnerische Behandlung 268
 bi-stable noise 264
 Bitleitung 564, 571ff., 576, 579, 582, 586f.,
 601f.
 Blockierbereich 127
 Blockierbetrieb 415, 420
 Blockierkennlinie 414f., 420ff.
 Blockierrichtung 415ff., 424, 427
 Blocktransfer 608
 Bode-Diagramm 475f., 478ff., 482, 484
 body diode 383
 body effect 350f.
 Bodydiode 350, 375, 383
 Boltzmann-Konstante 32, 41, 262, 269,
 492
 Boltzmann-Statistik 34
 Boltzmann-Verteilung 34
 Bonddraht 119, 136, 629
 Bottom-Up-Design 616f.
 Boundary Scan 632
 Bragg
 -Laser 155
 -Reflektor 155
 -Reflexion 155f.
 -Spiegel 156
 -Struktur 155
 breakdown 107, 122, 245, 251
 breakdown voltage 107, 122
 Brechungsindex 138, 152f.
 Brechungsindexführung 154
 Breitstreifendioden 154
 Brom 22
 Brückenschaltungen 413
 BSIM-Modell 367
 Buffer 521, 599f.
 Buffered FET Logic 525
 buffer-layer 395, 397
 Bulk 327, 332, 347, 349f., 352, 368, 371,
 383f.
 Bumps 509
 Burn-In 634
 burried layer 313f.
 Burrus-LED 137f.
 Burst Mode 608
 burst noise 264
 Burst-EDO-RAM 609
 Busleitung 536
 Bypass-Diode 179f.
- C**
- Cache 596, 608
 Cadmiumsulfid (CdS) 22
 CAD-Werkzeuge 616, 620ff., 628
 CAS-before-RAS-Refresh 607
 case temperature 247
 CAS-Zugriffszeit 605
 CC-OPV 456
 Chalkogenide 594f.
 channel 328
 Channel Hot Electron Injection 576
 Channel Hot Electron Process 576, 586
 Channeled Gate Array 614
 CHEI 576
 Chemical Vapor Deposition 347, 350
 CHE-Prozess 576, 586f.
 Chip 134, 159, 318, 387, 457, 505, 507ff.,
 512, 515f., 531, 536, 550, 558, 568, 571,
 574, 577f., 581, 585, 588, 593, 599f., 602,
 604f., 607, 611ff., 619, 626ff., 632, 653,
 656, 659
 Chip Select 536, 568
 Chip-Carrier 505
 Chlor 22
 chopper stabilized opamps 470
 Chopper-Stabilisierung 469
 clamping voltage 122
 CMOS 318, 332, 378ff., 387, 467, 470, 487,
 514f., 523ff., 529f., 545ff., 575, 582f., 592,
 594, 596, 625, 640, 655
 CMOS-Gatter 550, 553f., 556, 558
 CMOS-ICs 551
 CMOS-Inverter 378f., 551ff, 556
 CMOS-Schaltungstechnik, dynamische
 550
 CMOS-Schaltungstechnik, statische 549
 CMOS-Technologie 378, 487, 547, 549ff.,
 583, 594, 596

- CMRR 462f., 495
 Column Adress Strobe 602
 common mode gain 462
 common mode input resistance 464
 Common Mode Rejection Ratio 462
 Complex Programmable Logic Device 635
 Concurrent Refresh 607
 continuous current 247, 375
 Control 536
 Corner Analyse 623
 CPLD 635, 638, 640, 648f., 652
 Current Controlled RF-resistor 186
 current crowding 316
 Current Feedback Amplifier 456
 current limiter diode 131
 current mirror 499
 cut-off current 236
 cut-off region 219
 CVD-Prozess 350
 CV-OPV 456
 Czochralski-Verfahren 172
- D**
- Dangling Bonds 172
 Darlington
 komplementärer pnp 321
 nnp 320, 321
 Standard-pnp 321
 -Schaltung 320, 534
 komplementäre 320
 Standard 320
 -Transistor 320ff., 501, 534, 538
 komplementärer 325
 Data Valid to End of Write 570
 Datenblätter 105
 Datenbus 568, 572, 584, 598f., 610
 bidirektionaler 599
 Datenleitung 564, 597, 599, 601
 Datenspeicher 561, 565, 567, 571, 583
 Datenwort 563f., 572, 595
 Datenwortbreite 564, 567
 Dauereffektivstrom 429
 Dauerflussstrom, maximaler 104
 Dauergrenzstrom 110, 429
 Dauerstrom, maximaler 247, 375
 DBR-Laser 155f.
 DC current gain 272
 DCFL 525
 DC-Leerlaufverstärkung 459, 473
 DDR-SDRAM 609f.
 De Broglie 37
 Debye-Länge 55
 Defektelektron 39
 Defektmanagement 584
 Defektübergang 141
 Degradation 172, 575
 delay time 276
 delayed domain mode 201
 depletion type 330
 Depletionmode 330
 DFB-Laser 155
 DGFET 388
 DH-Struktur 138
 DIAC 125f., 435, 436
 Diamant 21, 27, 41
 -Struktur 27
 Diamond-Transistor 456
 Dichteabweichung 55
 Dichtefunktion 258
 Dickfilmtechnik 506
 Dickschichtschaltung 506f.
 Dickschichttechnik 506
 Die-Bonden 507
 Dielektrizitätskonstante
 absolute 358, 373
 relative 42, 358, 373
 differential input resistance 463
 Differenzansteuerung 463
 Differenzeingang 457, 478
 Differenzeingangsspannung 451
 Differenzeingangswiderstand 458, 463f.,
 495
 Differenzsignal 461ff.
 Differenzsteilheit 455
 Differenzverstärker 449, 451, 463, 492,
 496ff., 515, 527
 Differenzverstärkereingangsstufe 466
 Differenzverstärkung 454, 456, 458f., 463,
 465, 468, 495, 500f.
 Differenzialgleichungen, lineare 18

- Diffusion 45, 52f., 56, 60, 65, 79, 112ff.,
 152, 223, 310, 314, 350, 386, 395, 412,
 505
 doppelte 365
 einfache 365
 Diffusionskapazität 66, 76, 97, 99, 121,
 180, 273, 308
 Diffusionskonstante 42, 44
 Diffusionslänge 44, 55, 62
 Diffusionsspannung 54ff., 59, 61, 63f., 67,
 73, 85, 183, 345
 Diffusionsstrom 44, 53, 56, 65, 90, 193
 Diffusionstemperatur 113
 Diffusionszeit 113
 Diffusions-Planartechnologie 113
 DIMOS- Technologie 383
 Diode
 Herstellung 111
 ideale 87, 90
 integrierte 81, 120
 Kennlinie, linearisierte 88
 parasitäre 504
 Temperatureffekte 101
 Transient Voltage Suppressor 122
 Verhalten, statisches 87
 Wechselstromwiderstand 94
 Widerstand, differenzieller 95
 diode alternating current switch 125
 Diodenclusterschaltung 543
 Diodenlogik 83
 Diodentablette 115
 Diodenwechselstrom 96
 Diode-Transistor-Logik 526
 Dipoldomäne 200
 Direct Coupled FET Logic 525
 Direct Memory Access 607
 Dispersion 157
 Distributed-Bragg-Reflection-Laser 155
 Distributed-Feedback-Laser 155
 DMOS-Struktur 383ff.
 Domäne 199
 Domänengeschwindigkeit 199
 Domänenlöschbetrieb 200
 Domänenverzögerungsbetrieb 201
 Dominant-Pol-Kompensation 483
 Dominant-Pol-Korrektur 483
 Domino-Logik 558
 Donator 22, 38, 46f., 49f., 216, 391
 Donatoratome 53
 Doppelbasisdiode 445
 Doppelbindung 22
 Doppeldriftdiode 204f.
 Doppelheterostruktur 138, 151ff., 159
 Dotieren 23, 34, 45, 170
 Dotierstoffkonzentrationen 58, 115, 412
 Dotierung
 oxidative 22
 reduktive 22
 resultierende 48
 Dotierungsänderungen 114
 Dotierungsdichte 54f., 310, 391, 397
 Dotierungsgebiet 51ff.
 Dotierungsgrad 46
 Dotierungsprofil 62f., 114, 202, 414
 Dotierungsverlauf 51f.
 DOVETT-Diode 207
 DPRAM 600
 Drahtbonden 508f.
 Drain 327f., 335f., 338f., 341ff., 349ff.,
 359ff., 366, 368f., 374ff., 380ff., 388, 404,
 443, 548, 551, 556, 572, 575, 576f., 579f.,
 582, 586, 587
 Drain-Abschnürspannung 338, 355, 357,
 361
 Drain-Gate-Durchbruch 339, 341, 374
 Drain-Gate-Durchbruchspannung 374
 Drain-Pinch-off-Spannung 338
 Drain-Ruhestrom 360
 Drain-Sättigungsstrom 336, 338, 342f.,
 375
 Drainschaltung 334
 Drain-Source
 -Durchbruchspannung 375
 -Durchlasswiderstand 366
 -Leckstrom 376
 -Sättigungsspannung 343
 -Spannung 327, 336, 338f., 344, 354, 359,
 361, 363, 369, 375, 378, 404, 548, 576f.
 -Strecke 328, 339, 351, 353, 362, 366,
 374, 551
 -Widerstand, dynamischer 344
 Drain-Source Pinch-off Voltage 355, 357,
 361
 Drain-Source-Spannung, maximale 341

- Drainstrom
 maximaler 376
 minimaler 376
 DRAM 588, 592, 600ff., 605ff.
 DRC 627
 Dreischichtdiode 125f.
 Dreischichtstruktur 75
 Driftbeweglichkeit 44
 Driftgeschwindigkeit 198, 390
 Driftkompensation 468
 Driftstrom 44
 Driftzone 202, 204, 397, 401, 403
 Drive-R-Amplifier 456
 DSM-Laser 155
 DTL 524, 526f., 531, 540
 DTLZ-Logik 527
 Dual-Gate MOSFET 388f.
 Dual-Port-RAM 600
 Dunkelstrom 161f., 168
 Dünnschichttransistoren 145
 Dünnschichttransistoren 148
 Dünnschichttechnik 393, 506
 Dünnschichttransistoren 393
 Dünnschichtzellen 172
 Durchbruch 68ff., 83, 87, 89, 104f., 127,
 129f., 219, 235, 237, 245f., 251, 339, 341,
 374f., 381, 397, 527, 555, 573, 581
 1. Art 246
 2. Art 246, 251
 reversibler 1. 105
 zeitabhängiger 581
 Durchbruchbereich 78, 84f., 87, 104, 129f.
 Durchbruchkennlinie 129
 Durchbruchladung 581
 Durchbruchspannung 68ff., 79, 86f., 91,
 101, 104, 107, 117f., 121f., 125, 129f., 169,
 195, 237f., 246, 318, 374f., 386, 402, 414,
 416, 420, 436, 581
 Durchbruchvorgänge 71
 Durchgreiffeffekt 74f.
 Durchgreifspannung 74, 235
 Durchgriff 68, 73f., 397
 Durchgriffspannung 74
 Durchlassbereich 65, 75, 78, 85ff., 90f.,
 96ff., 103ff., 116, 127f., 192, 194, 221,
 229, 276f.
 Durchlassbetrieb 62, 66, 118, 132, 188,
 219, 404
 Durchlasskennlinie 85, 91, 125, 193, 220,
 414, 416, 420, 421
 Durchlassstrom 65, 67, 74f., 79, 83ff., 92,
 98f., 102, 106, 125, 127ff., 140f., 150, 193,
 221f., 335
 temperaturabhängiger 102
 Durchlassverzögerungszeit 76, 98
 Durchlassverzugszeit 98
 Durchlasswiderstand 74, 116ff., 121, 288,
 290, 381, 384ff., 397, 399, 407, 444
 Durchlasszustand 76, 125, 234, 278, 399f.,
 402, 423, 437, 445
 Durchlaufverzögerungszeit 640
 Durchschaltzeit 426
 Dynamic Random Access Memory 600
- E**
- E2PROM 578
 Early-Effekt 235, 269, 281, 290, 338, 344,
 355, 360, 498
 Early-Spannung 235, 239, 269, 318, 325,
 344, 361f., 364
 Ebers-Moll-Modell 281ff.
 Eckfrequenz 472
 ECL 514, 523f., 527ff., 542, 545, 558f., 640,
 642f.
 -Schaltkreise 527, 530, 542
 Edelgaskonfiguration 25f., 30
 EDO-RAM 609
 EEPROM 568, 578, 580ff., 614, 645, 657f.
 Effektivwert 259, 260, 264, 422, 429
 Eigenhalbleiter 40
 Eigenleitung 31, 35, 39, 48ff.
 Eigenleitungsbereich 49
 Eigenleitungsdichte 40ff., 48, 51
 Eigenleitungskonzentration 62
 Eigenschaften
 dynamische 220, 407, 424
 statische 220
 Eigenschwingungen 35
 Eindringtiefe, elektrisches Feld 55
 Einfachbindung 22
 Eingangsfehlspeisung 458, 468
 Eingangsfehlerstrom 467

- Eingangsgleichtaktspannung 462
 Eingangsimpedanz 194, 307, 334
 Eingangskapazität 372, 379, 464, 554, 555
 Eingangskennlinie 220, 229ff., 234, 244, 295, 341f., 357
 Eingangskennlinienfeld 229, 232, 243
 Eingangskreis 221ff., 225, 227, 229, 244f., 294ff., 378
 Eingangslastfaktor 521
 Eingangsleistung 17, 163, 275
 Eingangsrauschleistung 265
 Eingangsruhestrom 458, 466, 468, 495
 Eingangsschutz 387, 504
 Eingangsschwellenspannung 519
 Eingangsspannungsdifferenz 454f., 458
 Eingangsstufe 380, 466, 468, 481, 484, 496f., 502
 Eingangswiderstand, differenzieller 220, 288
 Eingangs-Reflexionsfaktor 302
 Eingangs-Schutzschaltung 554, 555
 Einmodenspektrum 157
 Einpressdiode 119
 Einpulschaltung, gesteuerte 430
 Einraststrom 416, 421, 432
 Einrichtungs-Thyristortetrode 436
 Einrichtungs-Thyristortriode 410
 Einrichtungsthyristordiode 127
 Einsatzspannung 352
 Einschaltstromsteilheit, kritische 422
 Einschaltverluste 425
 Einschaltverzögerung 276f., 279
 Einschaltverzugszeit 425
 Einschaltvorgang 75, 100, 425f., 441, 444
 Einschaltwiderstand 363, 366, 405
 Einschaltzeit 75, 98, 250, 276, 278, 416
 Einschaltzeitkonstante 277
 Einschalt-Basisstrom 277
 Einschnürung 246
 Einschwingzeit 489ff.
 Einstein-Beziehung 44
 Eintaktendstufe 496
 Einzelatom 28ff.
 Einzeltransistoren 215, 309ff., 320, 322, 324, 327, 370, 374ff., 450, 542, 626
 Electrically Erasable PROM 578
 Elektrisches Feld, Stärke 31
 Elektrolumineszenzstrahler 132
 Elektron
 Masse, durchschnittliche effektive 41
 Ruhemasse, freies 41
 Elektronenbahnen 24, 29
 Elektronenbeweglichkeit 42, 358, 390f.
 Elektronendichte 40, 48, 50, 65, 349, 391
 Elektronenfehlstelle 39
 Elektronenlawine 69
 Elektronenlücke 39
 Elektronenpaarbindung 25f., 68
 Elektronenschalen 24f., 29
 Elektronenstrom 65, 82, 221ff., 235, 238, 316, 399, 436
 Elektronenvolt 31
 Elektronen
 heiße 121
 -Sättigungsgeschwindigkeit 199
 Elektronengas, zweidimensionales 391
 Elektronentransfer-Bauelemente 197
 Elektronik 662
 Elektron-Loch-Plasma 399
 Element 21, 25, 45f., 199, 397, 410, 437, 553, 589, 620
 Elementarereignis 255
 Elementarladung 23, 163, 329
 Elementarteilchen 23, 32, 190
 Emission
 spontane 149
 stimulierte 149f., 152
 Emissionskoeffizient 90, 102
 Emitter 134, 145, 159, 216ff., 231, 234ff., 241f., 245f., 251, 263, 271ff., 276ff., 283, 285, 287ff., 294, 296f., 307ff., 312ff., 322, 324f., 327, 395, 398f., 401ff., 417, 419, 442, 447, 497f., 500f., 524, 527, 532, 534, 538, 540, 545
 Emitterbahnwiderstand 287
 Emitter-Basis-Durchbruchspannung 245
 Emitter-Basis-Grenzschicht 222, 235
 Emitter-Basis-Reststrom 238
 Emitterdiode 216, 218f., 223, 283, 290
 Emittereffizienz 317
 Emitter-Injektionswirkungsgrad 317
 Emitterrandverdrängung 315f.

- Emittterreststrom 238
 Emitterschaltung 218, 220, 224, 226ff.,
 234, 237, 239ff., 270f., 273ff., 284, 289f.,
 292ff., 300, 307f., 334, 372, 500f.
 Emittersperrschichtkapazität 277
 Empfindlichkeit, spektrale 164
 Enable 536, 568, 599
 Endstufe 496, 502, 540ff.
 Endurance 575, 585
 Energieabstand 30, 147
 Energiebänder 29
 Energielinien 24, 29
 Energieniveau 24, 28f., 35, 37, 47, 71, 132,
 142, 150, 151, 173, 191f.
 Energiequantelung 190
 Energiewerte 24, 28f., 32, 34, 36, 198
 Energiezufuhr 24, 35, 39, 46f., 49, 190
 Energie, potenzielle 24, 34
 Energiebänder-Schema 71
 ENFET 393
 enhancement type 330
 Enhancementmode 330
 Entladungen, statische 328, 333
 Entwurfsablauf 616, 619, 621
 Enzym-FET 393
 Epitaxial-Planartechnik 113, 120, 133
 Epitaxialschicht 133
 Epitaxialtechnik 133
 planare 310, 313
 Epitaxie 45, 112ff., 310f., 314, 384, 396,
 630
 Epitaxie-Insel 214
 Epitaxiezone 313
 EPLD 635, 638
 EPROM 517, 568, 574ff., 580ff., 614, 653,
 657f.
 Erasable Programmable Logic Device 635
 ERC 627
 Ereignis 255, 256f.
 günstiges 256
 Ergebnismenge 255
 Ergebnisraum 255f.
 Erholungszeit 100, 376, 383
 Erholzeit 78, 100, 491, 604
 Ersatzschaltung
 formale 281, 291
 physikalische 280f.
 Erwartungswert 253, 258f., 260, 491
 Esaki-Diode 194
 Esaki-Strom 192f.
 ESAKI-Tunneln 192
 ESD-Schutz 387
 ETOX-Zelle 587
 Evaluierungsphase 557f.
 Exemplarstreuungen 128, 131, 140, 292,
 333, 422, 459, 518
 Exziton 136, 146f.
- F**
- Fabry-Perot-Laser 153, 155
 Fabry-Perot-Resonator 155
 fall time 276
 FAMOS-Transistor 575ff.
 Fan-In 521, 534
 Fan-Out 521, 534
 Farbtemperatur 134
 FAST-Baureihe 543
 Fast-Page-Mode 608
 fast-recovery diode 208
 FCT 443f., 545f.
 FeFET 592
 Fehlerarten 629f.
 Fehlerwahrscheinlichkeit 253, 587
 Feldeffekttransistor 34, 51, 327f., 334, 341,
 374, 380, 443, 592
 organische 22
 Feldemission, innere 70
 Feldempfindlichkeit 211
 Feldoxid 350, 572
 Feldstärkedurchbruch 74, 397
 Feldstrom 44, 56, 61, 65
 Fenster, eingeztzte 133
 Fermi
 -Dirac-Verteilung 32, 34
 -Niveau 31ff., 59, 79f., 191
 -Statistik 29
 -Verteilungsfunktion 32
 Ferroelectric Random Access Memory 591
 Ferroelektrika 591
 Festkörper 29, 32f., 147, 172
 Festkörperphysik 36, 146, 662
 Festwertspeicher 571, 573f., 577

- FET
 ionensensitiver 392
 Logic Level 387
Field Effect Transistor, FET 214
Field Programmable Devices 634
Field Programmable Gate Array 635, 653
Field Programmable Logic Array 635
Field-Controlled Thyristor 443
Firmware 571, 583, 654, 656
Flachbandfall 347, 351, 355
Flächenbedarf 173, 407, 530, 547f., 582, 622
Flächendioden 111, 115ff.
Flächenstrahler 137ff.
Flankensteilheiten 522
Flash-EEPROM 581f.
Flash-EPROM 568, 581, 657, 658
Flash-Speicherezelle 582, 584, 645, 649
flicker noise 264
Flip-Chip-Bonden 509
Flipflop-Technik 563
Floating Gate 557, 575ff., 579ff., 584, 586f.
Floating Gate-EEPROM 579
Floorplanning 624
FLOTOX-EEPROM-Zelle 582
FLOTOX-Speicherezelle 579f.
Flussbereich 78, 81, 98f., 195
Flussbetrieb 66, 76, 88f., 150, 427
Flüssigkristall-Flachbildschirme 393
Flussspannung 65, 67, 85f., 90, 100, 192f., 322, 398, 416, 446, 526, 552, 555
Flussstrom 65, 139, 151, 341, 398
Formierungsstromstoß 115
forward region 218
Fotodiode 143, 159ff., 176
Fotoeffekt 160
Fotoelement 164, 166
Fotolack 112, 314f.
Fotolackmaske 114
Fotostrom 162f., 165f., 178
Fotovoltaikanlagen 166, 172
Fowler-Nordheim-Tunneleffekt 580, 586f.
Fowler-Nordheim-Tunnelung 582
FPGA 635, 639, 653f., 656ff.
 reprogrammierbare 654
FPLA 635
FRAM 591ff.
FRAM-Zelle 592f.
FREDFET 386
Freigabeeingang 536
Freilaufdiode 83, 179, 351, 383, 394, 404ff., 436
Freiwerdezeit 422, 427f. 434, 436f.
Fremdatome 26, 38, 45ff., 112f., 141, 172, 309
Frenkelexciton 147
Frequenzabstimmung 84, 184f.
Frequenzmodulation 180, 184
Frequenzvervielfachung 180
Frequenz kritische 477
Frequenzgang 459, 472ff., 480ff., 487, 490
Frequenzgangkorrektur 451, 472, 474, 476, 479ff., 484ff., 504
 angepasste 483
 mit nacheilender Phase 484
 mit voreilender Phase 484, 485
 universelle 483
Frequenzkompensation 459
Fresnelreflexion 153
Full Power Bandwidth 489f.
Full-Custom-ASIC 612f., 616
Full-Custom-Entwurf 612f., 617
Füllfaktor 178
Fünfschichtdiode 125f., 409
Funkelrauschen 253, 264, 491f.
Funktionsersatzschaltung 280f., 290
Funktionspeicher 561
Fusible Links 573, 635
Fuse-Technik 573
- G**
GA 561
GaAs-MESFET 389f.
gain-bandwidth-product 274
gain-guiding 154
Gajski-Diagramm 618
GAL 635, 637f., 645, 647f.
Galliumaluminiumarsenid (GaAlAs) 134
Galliumarsenid (GaAs) 22, 133
Galliumarsenidphosphid (GaAsP) 133f.
Galliumnitrid (GaN) 134
Galliumphosphid (GaP) 133f.
Galliumsulfid (GaS) 22
Galliumtellurid (GaTe) 22

- Gate 131, 327ff., 339, 345, 347f., 351ff.,
 361ff., 367f., 371ff., 378ff., 383ff., 387ff.,
 391f., 394f., 398ff., 402f., 405ff., 409, 411,
 414ff., 421f., 425, 430ff., 435, 437ff., 448,
 517, 550, 555, 557, 561, 572, 575ff., 582,
 584, 586f., 592, 601, 613f., 617, 625, 635,
 662
 Gateladungsdigramme 406
 Gatelänge 373
 Gateoxid 347, 350ff., 392, 555
 Gateschaltung 334, 388
 Gate-Abschnürspannung 337, 356
 Gate-Drain-Kapazität 373f.
 Gate-Gleichstrom 332
 Gate-Isolierung 329
 Gate-Kanal-Sperrschicht 335
 Gate-Oxidschicht 358, 373
 Gate-Pinch-off-Spannung 337
 Gate-Strom 335, 421
 Gate Array 517, 561, 613f., 617, 635
 Gate Turn Off Thyristor 422
 Gate-Commutated Thyristor 444
 Gate-Source Pinch-off Voltage 356
 Gate-Source-Durchbruch 367, 374
 Gate-Source-Durchbruchspannung 367,
 374
 Gate-Source-Kapazität 371f.
 Gate-Substrat-Durchbruch 555
 Gatteräquivalente 654f.
 GCT 444
 Gegenkopplung 293, 308, 326, 379, 458f.,
 461, 465f., 469, 471, 473f., 476ff., 481f.,
 485, 493f., 500f.
 elektrische 366
 thermische 345, 366
 Gegenkopplungsfaktor 465, 471
 Gegenkopplungswiderstände 467, 501,
 503
 Gegentakteingangswiderstand 463
 Gegentaktenstufe 380, 496, 534ff.
 Gegentaktschaltung 378
 Gegentaktsignal 463
 Gehäusebauformen 119f., 312
 Gehäusetemperatur 247f., 376
 Generation 35, 39f., 43, 62, 90, 161f., 173,
 265, 581, 588, 609, 631
 Generationsenergie 40
 Generic Array Logic 635
 Geometriedomäne 619
 Geometriefaktor 359
 Geradeausverstärkung 494
 Gesamtverlustleistung 247
 Geschwindigkeit, mittlere 44
 GG-Laser 154
 Giacoletto-Ersatzschaltbild 306f.
 Giant Magneto Resistance Effekt 588
 Gipfelspannung 446ff.
 Gipfelstrom 193, 447
 Gitteratom 68
 Gitterbaufehler 43
 Gitterfehler 45, 141
 Gitterschwingungen 36, 39, 133, 345, 365
 Gitterstörungen 38
 Gitterverband 68
 Glas 27, 119, 145f., 172, 507
 Gleichanteil 96, 253, 260, 431
 Gleichgewicht 40, 53, 65
 thermodynamisches 31f., 40, 51, 56
 Gleichrichter 83, 100, 109, 187, 429
 Gleichrichterdiode 83, 87, 104, 105, 121,
 208
 Gleichrichterdioden 83, 87, 104f., 121, 208
 Gleichrichterschaltung 118
 Gleichrichterzelle, steuerbare 409
 Gleichspannungsaussteuerung 463
 Gleichstrom-Kleinsignalerersatzschaltbild
 286, 369
 Gleichstromverstärkungsfaktor 218, 224,
 269f., 277
 Gleichstromwiderstand 94
 Gleichtaktaussteuerbarkeit 452, 458
 Gleichtaktaussteuerung 462, 467, 498
 Gleichtaktbetrieb 462
 Gleichtakteingangswiderstand 458, 463f.,
 495
 Gleichtaktsignal 462f.
 Gleichtaktspannung 462f., 496, 498
 Gleichtaktunterdrückung 458, 461ff.,
 494f., 498f.
 Gleichtaktverstärkung 461ff.
 Glue Logic 583f.
 Golddrahtdiode 111, 116f.
 Grabenstrukturen 381
 Gradationsexponent 63

- Granularität 654, 656
 Grenzdaten 103, 106, 245, 374, 377
 Grenzfläche 51f., 132, 153, 210, 352f., 380, 391, 578, 579, 581
 Grenzfrequenz 48, 141, 168f., 183, 194f., 226, 273ff., 287, 309, 318, 334, 373, 457, 459, 472ff., 480, 482f., 485, 488, 494f.
 Grenzlastintegral 110, 429
 Grenzsicht 51, 53f., 56ff., 65ff., 71, 221, 287, 316, 347f., 353, 434, 579
 Grenzspannungen 103f., 245, 374
 Grenzströme 103f., 245, 247, 374f.
 Grenzwerte 75, 109, 142f., 211, 234, 237, 239, 250f., 424, 518
 Großsignalaussteuerung 220, 488
 Großsignalbetrieb 280, 457
 Großsignalgleichungen MOSFET 360
 Großsignalmodelle 281
 Großsignalstromverstärkung 224
 Großsignalverstärkung 224
 Großsignal-Bandbreite 489f.
 Grundmaterial 113, 134f., 137, 309, 335, 349
 GTO 422, 437ff.
 GTO-Thyristoren 437, 445
 Gummel-Plot 270
 Gummel-Poon-Modell 281, 285f., 367
 Gunnediode 196f., 198, 201f.
 Gunn-Effekt 196f., 201
 Gunn-Element 196f., 199, 200, 205
 Gunnoszillator 199ff.
 Güte 178, 181f., 184
- H**
- Haftfehler 631
 Haftstellen 38, 579
 Halbbrücken 413
 Halbleiter 5, 17, 21ff., 31f., 33, 35f., 38ff., 43ff., 53, 55, 57, 60f., 72f., 75, 79f., 111ff., 125, 132f., 137, 144, 146, 160, 163, 186, 191, 196f., 316, 318, 328f., 346f., 349, 353, 391, 394, 409, 416, 457, 506, 571, 573, 578, 662f.
 direkte und indirekte 36
 eigenleitend 34
 entartete 47
 intrinsischer 40
 Leitfähigkeit, spezifische 45
 n-leitend 34
 organische 22
 p-leitend 34
 Halbleiter Element~ 21, 27, 39, 46
 Halbleiter I-III-VI~ 22
 Halbleiter III-V~ 22, 46, 196
 Halbleiter III-VI~ 22
 Halbleiter II-VI~ 22, 196
 Halbleiterblock 54
 Halbleiterdrucksensoren 329
 Halbleiterlaser 153
 Halbleiter-Laser 22, 48
 Halbleitermaterial 17, 21, 48, 50f., 74, 81, 117, 132, 135, 139, 172, 220
 Halbleiter-Oberfläche 31, 80, 137
 Halbleiterscheibe 111ff., 310, 313, 426
 Halbleitertablette 118
 Halbleiterträger 81, 215, 327
 Halbleiterspeicher 516, 561f.
 Halbwertsbreite 135f., 157
 Haltespannung 125f., 128, 414, 420, 435
 Haltestrom 125, 128f., 414, 416, 419ff., 430ff., 435, 437, 555
 Häufigkeit
 absolute 256
 relative 256f.
 HD-Struktur 137
 HE-Degradation 581
 Heisenbergsche Unschärferelation 191
 Helligkeitsmessung 166
 HEMT 318, 390ff.
 Heterojunction 316
 Heterojunction-Bipolartransistor 316
 Heterokontakt 390
 Heterostruktur 137, 316, 391
 Heteroübergang 316, 318, 390
 HEXFET 385
 HF-Schalter, gleichspannungsgesteuerter 188
 Hidden-Refresh 607f.
 High Electron Mobility Transistor 318, 390
 high side switches 387
 Highside-Schalter 387
 High-Speed-CMOS 514, 543
 High-Speed-TTL 538

- Hilfsbatterie 571
 Hilfsenergiequelle 17, 213
 Hochfrequenzanwendungen 116, 326, 391
 Höchsthochfrequenz-Diode 122
 Hochfrequenzschwingungen, parasitäre 366
 Hochinjektion 76, 285
 Höchsthochfrequenzelektronik 390
 Höckerspannung 447
 Höckerstrom 193
 Hohlraumresonator 199, 205, 207
 Hold-Time 523, 570
 HOMO 147f.
 Homo-Dioden-Struktur 137
 HOMO-LUMO-Abstand 148
 HOMO-LUMO-Lücke 147
 Homostruktur 137, 153f.
 Hot Spots 251
 Hot-Carrier-Diode 121
 h-Parameter 272, 293ff., 304f.
 aus Kennlinien 295
 Umrechnung 296ff.
 Hubdiode 526
 Hybrid- π -Modell 306
 Hybriddarstellung 292
 Hybridparameter 292f.
 Hybridschaltung 505
 Hybridtechnik 505
 Hyper Page Mode DRAM 609
 Hystereseschleife 591, 593
- I**
- I²L 524
 Idealitätsfaktor 90
 IGBT 394f., 397ff., 408, 661ff.
 IGBT-Konzepte 397
 IGCT 444
 IG-Laser 154
 IMPATT-Diode 201f., 205, 207
 Impuls 36ff., 104, 123, 133, 189f., 276, 433, 436
 Impulsänderung 38
 Impulsbelastbarkeit 122f.
 Impulsraum 36f.
 Impulsunschärfe 190
 Impulsverbreiterung 157
 impulse noise 264
 index-guiding 154
 Indiumantimonid (InSb) 22
 Indiumgalliumnitrid (InGaN) 134
 Indiumphosphid (InP) 22, 197
 Indiumsulfid (InS) 22
 Induktivitäten 17f., 209, 262, 427, 503, 509, 511
 Influenzladung 349
 Influenzwirkung 358
 Infrarot-Bereich 134
 Injektion, hohe 399
 Injektionsstrom 530
 Injektionstransistoren 530
 input bias current 466
 input noise current density 492
 input noise voltage 492
 input noise voltage density 492
 input offset current 467
 input offset voltage 468
 Instabilität, thermische 403
 integral diode 383
 integrated circuit 111, 310
 Integrated Gate-Commutated Thyristor 444
 Integration
 hybride 505
 monolithische 505, 509
 Integrationsgrad 512, 541f., 547
 Integrierte Injektions-Logik 524, 530
 Intensitätsmaximum 135
 Intensitätsmodulation 141
 Interdigitalstruktur 287, 316
 Interdigitaltransistor 316
 Interface-Schaltungen 521
 Interleave-Mode 609
 interstitiell 45
 Intrabandimpulsrelaxationszeit 198
 intrinsic stand-off ratio 446
 Intrinsic-Leitung 39
 Intrinsic-Zone 168f.
 intrinsisch 186, 391
 Inversbetrieb 218f., 282f., 310, 351, 533
 Inversdiode 383, 394, 403
 Inversion
 schwache 353
 starke 353
 Inversionsdichte 40

- Inversionskanal 353, 360, 383f.
 Inversionsschicht 347ff., 352, 354, 579
 Inversionszone 360
 Inversleitfähigkeit 403
 Inverter 378, 482, 523, 530, 548ff., 558
 Iod 22
 Ionen, ortsfeste 60
 Ionenimplantation 45, 112, 114, 310, 350, 383, 386, 542
 Ionenkonzentration 392
 Ionenstromdichte 115
 Ionisationsrate 202ff.
 Ionisierung 49, 150
 ISFET 392f.
 Isolationsstrom 341
 Isolator 21, 33, 35, 48, 53, 190, 329, 346, 351, 353, 578, 580, 588ff.
 Isolierschicht-Feldeffekttransistor 329
 Isolierschicht-FET 329
- J**
- JEDEC-Files 642
 Johnson noise 262
 junction 53, 106, 110
 Junction-FET 329, 335
- K**
- Kanal 328ff., 334ff., 340ff., 345, 347ff., 365f., 368, 374ff., 378ff., 382ff., 389ff., 395f., 399f., 403, 407, 416, 425, 440ff., 497, 501, 514, 524f., 547ff., 553f., 556ff., 572, 576ff., 587, 596, 609
 Kanalabschnürung 354
 Kanaldicke 340
 Kanaldotierung 340, 390
 Kanallänge 340, 357, 359, 373, 383ff., 390
 Kanallängen-Modulation 360f.
 Kanalquerschnitt 336, 352, 354f., 384
 Kanalquerschnitt, ungleichmäßiger 354, 356
 Kanalverdrängung 356
 Kanalwiderstand 328, 336, 355, 366, 378, 407
 Kanal-Leitwert 359
 Kantendefekte 113
 Kantenstrahler 137f., 153, 156
 Kapazitäten 17f., 180, 273, 279, 281, 286, 307, 310, 368, 379, 405, 472, 474f., 488, 505, 512, 523, 541, 550, 552, 557
 Kapazitätsdiode 63, 84, 180f., 183ff., 542
 Kapazitätskoeffizient 63
 Kathode 81, 83, 119f., 127f., 131f., 136, 146, 148, 196, 199, 409, 411, 413ff., 421f., 432, 436f., 440, 443f.
 Kenngröße, statische 220
 Kennlinien 17ff., 62, 78, 81, 83ff., 94f., 116, 125ff., 131f., 140ff., 151, 156, 158, 161f., 165, 166f., 176ff., 192f., 196, 198, 200, 202, 220f., 227, 229, 232ff., 238f., 241ff., 246, 280, 287, 290, 295, 340f., 344f., 351, 357, 361, 363, 368, 402f., 410, 414, 420, 422, 433, 435, 438, 446ff., 462, 470, 496, 501, 517, 548, 549
 statische 141, 220
 Kennlinienfelder 229, 357
 Kennwerte 110, 128, 135, 138, 142f., 168, 178, 234, 254, 259, 260, 421f., 424, 494f., 514, 517, 521, 524, 537, 541, 544, 640, 642f.
 Keramiksubstrat 506, 509
 Kippspannung 125f., 128f., 420f., 424f., 435f.
 Kippspannungsdifferenz 128
 Klammerdiode 119, 122
 Kleindiode 119
 Kleinsignalausgangswiderstand 239, 288, 359, 361
 Kleinsignalausgangswiderstand, differenzieller 369f.
 Kleinsignalaussteuerung 96, 220, 292, 488
 Kleinsignalbetrieb 247, 280, 287, 290, 372
 Kleinsignaleingangswiderstand 232, 288
 Kleinsignalersatzschaltbild 187f., 193, 289, 291, 369
 Kleinsignalgleichungen 288f., 292, 370
 Kleinsignalgröße 220, 473, 488f.
 Kleinsignalmodell, dynamisches 280, 371
 Kleinsignalmodell, statisches 96, 286f., 369
 Kleinsignalparameter 280, 288f.
 Kleinsignalstromverstärkung 220, 240, 267f., 272, 288
 Kleinsignalverhalten 94, 286, 325, 369, 371, 620

- Kleinsignalverstärker 234
 Kleinsignal-Kurzschluss 375
 Kleinsignal-Vorwärtssteilheit 340
 Klemmspannung 122f.
 Klirrfaktor 227, 291, 370
 Knickfrequenz 472, 475, 480
 Kniespannung 131, 236, 343, 355, 361
 Kohlenstoff 21
 Kohlenwasserstoff, polyzyklischer
 aromatischer 22
 Kollektor 216ff., 222ff., 233ff., 240ff.,
 245ff., 251, 265, 271ff., 276ff., 282ff.,
 288ff., 294, 307ff., 318, 320, 325, 327,
 343, 383, 395, 397f., 401ff., 406, 410f.,
 417f., 496f., 507, 530, 534f., 539
 Kollektorbahnwiderstand 287
 Kollektordiode 216, 218f., 223, 273, 283
 Kollektorrestspannung 236
 Kollektorreststrom 237, 269
 Kollektorschaltung 224, 226, 272, 296f.,
 334
 Kollektorsperrschichtkapazität 277
 Kollektorstrom 219, 223ff., 227, 232ff.,
 236f., 240f., 246, 251, 266f., 270ff., 276,
 278, 284, 294, 317, 322ff., 327, 399,
 402ff., 411, 418, 442, 497, 501, 530, 540
 Kollektorstromschweif 405
 Kollektor-Basis-Durchbruchspannung 245
 Kollektor-Basis-Grenzschicht 235
 Kollektor-Basis-Reststrom 222, 237
 Kollektor-Basis-Spannung 223, 245
 Kollektor-Emitter-Durchbruchspannung
 237, 246
 Kollektor-Emitter-Reststrom 238, 402
 Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung
 219, 236, 284, 325, 403
 Kollektor-Emitter-Spannung 229, 233f.,
 240ff., 246, 284, 288f., 294, 327, 343,
 402ff., 406
 Kollektor-Emitter-Verlustleistung 247
 Kommutierung 427
 Kommutierungsdiode 376
 Kommutierungsspannung 404f.
 Komparator 457, 461
 Kompensation
 äußere 480
 innere 480
 Kompensationskapazität 482, 486
 Kompensationsstrom 469
 Komplementärtechnik 332
 Komplementär-Transistoren 215
 Kondensatoren 17, 213, 262, 457, 503,
 511, 592, 604
 Konfiguration 589, 625, 653f., 657f.
 Konstantstromquelle 140, 178, 245, 497,
 499, 527f.
 Kontakt, ohmscher 80, 118
 Kontaktierung 111, 115, 171, 287, 346,
 385, 444, 509, 626
 Konzentrationsausgleich 53, 56
 Konzentrationsgefälle 53
 Koppelstufe 496, 501f.
 Kopplung 29, 295, 449, 576
 Korrekturfaktor 90f.
 Korrekturkapazität 481, 483
 Kristall 21, 26, 29, 30, 40, 46, 115f., 134,
 136f., 153, 156, 161, 167, 172, 197, 309,
 313, 350, 531
 Kristalldefekte 38
 Kristallgitter 22, 25, 27, 29ff., 35, 41, 45f.,
 112, 128, 133, 142, 173, 197, 309
 Kristallstruktur 27, 29, 71, 171, 591f., 594
 Kristalltemperatur 40
 Kühlkörper 118f., 247f., 312, 412f., 488
 Kühlung 72, 118, 159, 247, 412, 550
 Kunststoff 22, 119, 146
 Kupferindiumdiselenid (CuInSe₂) 22
 Kupferindiumgalliumsulfid (CuInGaS₂)
 22
 Kupferplumbid (CuPb) 134
 Kurzkanaleffekte 367
 Kurzschlussbetrieb 164, 166
 Kurzschlussfestigkeit 407, 502
 Kurzschlusssicherung 491
 Kurzschlussstrom 166, 168, 174, 178, 401,
 522
 Kurzschlussstromverstärkung 272
- L**
- Ladungspumpe 387
 Ladungsspeicherungsdiode 207f.
 Ladungssteuerungstheorie 285

- Ladungsträger 23, 31, 34, 37, 39ff., 43f.,
 46, 48ff., 59f., 65ff., 71, 73f., 77, 98, 118,
 141, 146ff., 152, 161ff., 168, 173, 180,
 186, 197, 202, 206ff., 210, 214, 216f.,
 221ff., 229, 236, 252, 262f., 273, 276ff.,
 309, 324, 327ff., 336, 343, 345, 347f., 350,
 353f., 358, 365, 373, 390f., 405, 419, 422,
 427, 434, 438, 443f., 446, 534, 540, 584,
 586, 588
 Ladungsträgerdichte 49f., 53f., 66, 69, 76,
 132, 153, 390
 Ladungsträgerdichte, intrinsische 40, 50
 Ladungsträgerinjektion 398
 Ladungsträgerinversion 352ff.
 Ladungsträgerlebensdauer 43
 Ladungsträgerzahl 50, 398
 Lag-Kompensation 483ff.
 Lambertstrahler 139
 Langzeitdrift 470
 Large Scale Integration 512
 large signal frequency response 489
 Laserbedingung 150, 153
 Laserdioden 149ff., 154ff.
 Lasereffekt 151
 Laserlicht 150, 152, 155
 Lasermethode 154
 Laserschwelle 151
 Laserstrahlung 150, 153, 156
 LASER 150
 Lastfaktoren 521
 Lastgerade 244f., 251, 548
 Lastkapazität 379f., 523, 535
 Lastminderungskurve 248f., 376
 Laststrom, nichtlückender 404
 Lastwiderstand 165f., 177, 227, 244, 305f.,
 369, 459, 548, 551, 596
 latch-up 400, 401, 407
 Latch-up-Effekt 555f.
 Lateraltransistor 314
 Laufzeitdiode 205f.
 Laufzeitmodus 199
 Lawinendurchbruch 68, 122, 202ff., 251
 Lawineneffekt 68ff., 130, 131, 169, 202,
 205, 207, 246
 Lawinen-Fotodiode 169
 Lawinenlaufzeitdiode 202
 Lawinenmultiplikation 202
 Lawinenzone 202ff.
 LCD 148
 LDMOS-FET 386
 LDMOS-Struktur 386
 Lead-Kompensation 484f.
 leakage current 122
 Lebensdauer 43, 118, 139, 141, 143, 145ff.,
 186, 207f., 432, 575, 580f., 658
 Leckstrom 351, 365, 376, 433, 551
 LED 132ff., 138ff., 146, 150, 153, 156ff.
 flächenemittierende 137
 weiße 134
 Leerlaufspannungsverstärkung 454, 458ff.,
 471, 474, 480, 494f.
 Legierungstechnik 111, 309
 Legierungsdiode 111
 Leistungsanpassung 166, 177f., 239
 Leistungsanschlüsse 413
 Leistungsbandbreite 489
 Leistungsdichte, spektrale 261f.
 Leistungsdichtespektrum 261, 491
 Leistungsdioden 75, 78, 83, 86, 88, 111,
 115, 118f.
 Leistungsendstufe 496
 Leistungsgleichrichter 122
 Leistungsmodule 403, 406
 Leistungsschalter 385, 387
 Leistungs-MOSFET 332, 363, 375, 378,
 381ff., 395, 397ff.
 Leistungs-MOSFETs 332, 363, 375, 378,
 381ff., 395, 397ff.
 Leitband 30, 41
 Leitfähigkeit 23, 35, 40, 45f., 49, 113, 186,
 209, 216, 317, 328ff., 336, 345, 352, 361,
 388, 390, 403f., 441, 446, 575, 581, 589,
 594
 Leitfähigkeitsmodulation 446
 Leitung, extrinsische 45
 Leitungsband 22, 30ff., 38ff., 47, 49, 58,
 70ff., 132f., 142, 146, 149f., 161, 192,
 197f., 589
 Leitungsbandkante 31f., 34, 47, 58f., 191
 Leitungselektronen 30, 38, 173, 192
 Leitwertmodulation 404
 Leitwertparameter 299
 Leseverstärker 572, 593, 595, 602ff., 642

- Lesevorgang 563, 570, 586, 590, 592, 597, 599, 600, 604
 Lese-Zykluszeit 570
 Leuchtdiode 38, 48, 133ff., 139ff., 144f., 150, 536
 organische 144f.
 Lichtausbeute 150
 Lichtempfindlichkeit 163, 168
 Lichtfarbe 133f.
 Lichtintensität 162, 170
 Lichtleistung, emittierte 159
 Lichtleitfaser 153
 Lichtquant 36, 132, 174
 Lichtverstärkung 150, 153
 Licht
 kaltes 139
 monochromes 139
 ultraviolettes 574, 577
 Light-Triggered Thyristor 442
 limited space charge accumulation mode 199
 linearer Mittelwert 258
 Linearität 17f., 185, 363
 Linearitätsrelation 18
 Linienbreite 135, 153, 157
 Linse 133, 139, 157
 liquid crystal display 148
 Loch 34ff., 38ff., 46f., 66, 68, 132, 141, 146f., 161ff., 169, 173, 202, 353
 Löcheranteil 219, 222, 235
 Löcherdichte 40, 48, 349
 Löcherleitung 46
 Löchersperrstrom 222
 Löcherstrom 65, 219, 221, 317, 401
 Logik
 langsame störsichere 527
 positive 526, 528
 ungesättigte 279, 529
 Logikblock 654f.
 Logikschaltungen 121, 333, 390, 530f., 550, 613
 Lookup Tables 655, 657
 Löschen 125, 409, 422, 574, 577ff., 582ff., 658
 Low-Power-Schottky-Technologie 537
 Low-Power-Schottky-TTL 540, 542
 Low-Power-TTL 538
 Low-Voltage-TTL 543
 LSA-Betrieb 199ff.
 LSI-Schaltungen 512
 LSL 527
 LSL-Technik 527
 LSTTL 540
 LTT 442f.
 Luftmasse 175
 Lumineszenz 81, 132
 Lumineszenzdiode 132
 LUMO 147
 LVS 627
- M**
- Magnetdiode 209ff.
 Magnetic Random Access Memory 587
 Magnetic Tunnel Junction 589
 Magnetowiderstandseffekt 588
 Magnetwiderstand 588
 Majoritätsträger 46, 51, 53, 60, 65, 73, 150ff., 194, 330, 348, 353, 399
 Makropotenzial 31
 Makrozellen 615, 635, 638f., 646, 648ff., 652
 Maskenfenster 115
 Masken-ROM 571f., 574
 Masse, effektive 34, 197
 Massenwirkungsgesetz 40
 Masserrückleitpfade 535
 Master Mode 657
 Materialien, amorphe 27
 Materialkonstante 31, 329
 Materiewelle 190
 Maximum Power Point 176ff.
 MCM 505, 510
 MCT 440ff.
 MCT-Zelle 440f.
 Medium Scale Integration 512
 Mehrschichtdiode 125, 128
 Mehrschichtdioden, Kennwerte 128
 Mehrsegmentanzeigen 143
 Memory Address Register 565
 Memory Data Register 565
 Merkregel 39, 136, 225
 Mesatransistor 309f.
 MESFET 389, 391
 Mesh-Zahl 506

- Metal Organic Chemical Vapor Deposition 389
 Metallatom 35
 Metall-Halbleiter-Feldeffekttransistor 389
 Metall-Halbleiterkontakt 32
 Metall-Halbleiter-Übergang 62, 79, 115, 121, 389
 Metallisierung 113, 383, 630
 Mikropress-Schweißverfahren 508
 Mikrowellen-Technik 48
 Mikrowellentransistoren 390
 Miller-Effekt 273, 308, 372, 379, 388, 481
 Minoritätsträger 46, 51, 61f., 66, 73ff., 150ff., 348, 354
 Minoritätsträger-Lebensdauer 62, 77
 Mischfarbe 134
 Mischkristall 318
 MISFET 329
 MIS-Struktur 346
 Mitkopplung 18, 366, 438, 441, 459, 461, 471, 476, 478
 Mitkopplungseffekt, thermischer 72
 Mittelwert
 arithmetischer 259f.
 linearer zeitlicher 260
 quadratischer 259f.
 Mixed-Signal-Anwendungen 559
 MNOS-Speicherzelle 578f.
 MOCVD-Prozess 389
 MOS-Feldeffekttransistor 329, 349, 399
 MOS-PROM 574
 Mode, longitudinale 155
 Modem 153
 MODFET 390
 Modulation Doped Field Effect Transistor 390
 Modulationsbandbreite 158
 Modulationsfrequenz 141
 Modulationsfrequenzen 158, 159
 Modulationskennlinie 141
 Molekülbildung 28
 Molybdän 115, 118, 412f.
 Moment 1. Ordnung 260
 Moment 2. Ordnung 260
 Momente 258, 590
 monochromatisch 157
 MOS-Arbeitsplätze 333
 MOS-Controlled Thyristor 440
 MOSFET 329ff., 341, 349ff., 355, 357f., 361f., 365ff., 374f., 377, 380, 382f., 386ff., 394f., 399, 401ff., 440, 496, 501, 514, 548, 550, 579, 601, 661
 n-Kanal, selbstsperrend 330
 selbstleitend 330, 376, 388
 MOS-ICs 332, 547
 MOS-Kondensator 346ff.
 MOS-Struktur 346, 395
 MPP-Tracker 177
 MRAM 587ff.
 MRAM-Zelle 588
 MROM 571
 MSI-Schaltungen 512
 Multi-Chip-Module 505, 510
 Multi-Bit-Zellen 587
 Multi-Emitter-Transistor 532f., 540
 Multi-Level-Zelle 587
 Multiplexer 515, 632, 639, 655, 657
 Multiplikationszone 169
 Musterfunktion 254, 259f.
- N**
- NAND-Flash 582ff., 587
 NAND-Gatter 527, 533, 536f., 541, 544, 553, 559, 583
 Netzgleichrichter 104
 Netzliste 614
 Neutronen 23f.
 n-Halbleiter 46, 49, 80, 115, 192
 Nichtidealitätsfaktor 90
 Nichtlinearitäten 185, 280, 500
 Niedriginjektion 75
 n-Kanal-IGBT 395
 NMOS 332, 378, 514, 524f., 547ff., 554, 575, 624
 NMOS-Technologie 525, 547, 549
 Noise Figure 265
 Non-Punch-Through-Struktur 395, 397
 non-volatile RAM 600
 NOR-Flash 582ff., 586
 Normalbetrieb 82, 131, 218, 227, 235, 245, 268ff., 282ff., 398, 504, 533, 581
 Normalform, disjunktive 615, 634
 normally-off Typen 330
 normally-on Typen 330

npn-Transistor 215, 217f., 220ff., 231f.,
234f., 239, 244ff., 276, 281f., 284ff., 310,
313ff., 321, 332, 350, 400, 417f., 438,
440ff., 497, 499f., 534
NPT-IGBT 396f., 403
NPT-Struktur 395f., 400
NROM-Zelle 587
Null-Kapazität 58
Nullkippspannung 414, 416, 420f., 424,
435
Nur-Lese-Speicher 567, 571
NVRAM 600
Nyquist noise 262

O

Oberflächen-Durchbrüche 412
Oberflächenemitterdioden 157
Oberflächenrekombination 141
Offsetabgleich 469
Offsetkompensation 467f.
Offsetspannung 454ff., 458, 468ff., 494f.,
497
Offsetspannungsdrift 458
Offsetspannungskompensation 451
Offsetstrom 467f., 497
OLED 144ff., 148
OLMCs 638, 645
Omnifet 387
One Time Programmable ROM 574
on-state resistance 366
open loop gain 459
Open-Collector-Ausgang 535, 599
Open-Collector-Stufen 521
Operational Transconductance Amplifier
455
Operationsverstärker 449ff., 459, 461ff.,
465ff., 472ff., 477f., 480f., 483f., 487f.,
491f., 494f., 504, 510, 515, 559, 626
idealer 463, 494
Typen 453f.
zerhackerstabilisierte 470
Optokoppler 143
OPV, Nutzungsgrenze 472
Organisation 561, 563f., 569, 582, 597f.
OTA 455
OTP-ROM 574
OUM 594f.

Output Disable 536
Output Enable 536, 568, 643
Output Logic Macrocells 638, 645
output resistance 465
Output Swing 490
overload recovery 491
Ovonic Unified Memory 594
Oxidation 112, 147, 350, 505, 507, 580,
630
Oxidschicht 313, 330, 346, 350, 353, 443,
575, 584ff., 614

P

Paarbildung 40, 61, 68, 74, 163
Pads 505, 508
Page-Mode 608
PAL 635ff., 640ff.
Parameterstreuung 623
partition noise 265
Passivmatrix-Displays 148
Pauli-Prinzip 28
peak current 247, 375
peak pulse power dissipation 123
peak surge forward current 104
peak surge reverse voltage 104
Pegelanpassstufen 521
Pegelanpassung 496, 521, 536, 568
Pegelbereiche 518f.
Pegelverschiebungsdioden 526, 533ff., 538
Pentacene 22
Periodensystem 21f.
Peripherie-Modus 658
Perowskitstruktur 591
Personalisierung 615, 657
p-Halbleiter 46, 49f., 192
phase margin 479
Phase-Change RAM 594
Phasenanschnittsteuerung 429ff., 433, 435
Phasenbedingung 477f.
Phasendrehung 475, 477f., 480, 484f.
Phasenrand 478f.
Phasenreserve 479, 483, 485f., 490
Phasenspielraum 479, 485
Phasensplitter 534, 540
Phasensplittertransistor 540
Phasenverlauf 475

- Phasenverschiebung 202, 204, 220, 326, 431, 474ff., 481, 494
 Phasenwechselfpeicher 594
 Phononen 35f., 38f., 198
 Phononenenergie 38
 Phononenenerzeugung 132
 Photon 35f., 38, 142, 147, 149f., 163, 190
 Photonenemission 151
 Photonenreflexion 152
 pinch-off voltage 331
 Pinch-off-Spannung 337, 340, 342
 pin-Dioden 69, 75, 118, 186ff., 203, 403
 PLA 517, 634ff., 640
 Placement 624f.
 Planar-Gate 407
 Planartechnik 111f., 115, 133, 171, 314, 340, 397, 412
 Planartransistor 310, 314
 Plancksches Wirkungsquantum 36, 41
 Plasma 206
 Platin 31
 PLD 517, 561, 614f., 634, 653
 PLED 145
 PMOS 514, 524, 547, 549, 601, 624
 PMOS-Technologie 547, 601
 pn-Diode 81, 84, 86, 117f., 120, 122, 181, 183, 186, 195, 216, 263, 282, 398
 pnp-Transistoren 215, 220f., 235, 314, 320f., 332, 514, 543
 pn-Übergang 32, 51ff., 55f., 58ff., 70ff., 81, 84f., 91, 98, 100, 111ff., 115ff., 120, 125, 132f., 137, 150ff., 161f., 167ff., 179f., 193, 196, 202, 208, 221, 225, 263, 282, 309, 314, 316, 329, 336, 339ff., 350, 375, 383, 389, 397, 403, 414ff., 424, 434, 438, 443, 445f., 574
 abrupter 52, 63
 einseitig abrupter 63
 Kennlinie 78
 spannungsloser 58f., 63, 65
 Pole-Splitting-Verfahren 481
 Polverschiebungen 482
 Polyacetylen 22
 Polymer 22, 147
 konjugiertes 145
 Polysilizium 350, 385, 575, 587
 Popcorn noise 264
 Popcornrauschen 253, 264
 Potenzialanpassung 496
 Potenzialbarriere 50, 56, 60f., 152, 189, 191, 206, 444, 577, 581
 power derating curve 249, 376
 power supply rejection rate 459
 PRAM 594
 Präzisionsmessverstärker 470
 Precharge-Phase 557f.
 PROFET 387f.
 Programmable Array Logic 614, 635, 637
 Programmable Gate Array 614
 Programmable Interconnect Point 657
 Programmable Logic Array 517, 614, 634, 636
 Programmable Logic Device 517, 561, 614, 634
 Programmierbare Logik 517, 614, 618, 634, 640
 Programmiergeräte 571, 573ff., 634, 642, 657, 658
 Programmierimpuls 573
 Programmierung 517, 571, 573f., 576, 578ff., 582, 584f., 589, 593, 614f., 634, 636, 639, 642, 649, 652, 656ff.
 Programmiervorgang 574, 578, 657
 Programmspeicher 571f., 582f.
 PROM 573f., 583, 614, 636
 bipolar 573
 propagation delay time 522
 Properties 621, 625
 Protonen 23f., 189
 Prozess
 fotolithografischer 112
 stationärer 254, 260
 stationärer ergodischer 260
 stationärer stochastischer 260
 stochastischer ergodischer 260
 Prozesskonstante 359
 Prozessparameter 623f.
 Prüfpfadtechnik 631
 psn-Dioden 118
 PT-IGBT 395ff., 403
 P_{tot} 105, 130, 143, 247, 376f.
 PT-Struktur 395
 Pufferkondensator 535
 PUJT 448

- Pulsbetrieb 205, 250ff.
 Pulsdauer 186, 247, 250, 375
 Pulsenergie, maximale 104
 Pulsfrequenz 104
 Pulsspitzenleistung 123
 Pulswiederholrate 247
 Pumpenergie, elektrische 154
 Pumpstrom 151
 punch-through 68, 73f., 235, 397
 Punch-Through-Struktur 395
 Punktmatrixdarstellungen 143
 p-Wanne 383, 395, 399, 401, 407, 554, 579
- Q**
- qcw-Betrieb 159
 Quant 146, 190
 Quanteneffizienz 147
 Quantenhypothese 36
 Quantenmechanik 24, 189, 662
 Quantentheorie 28, 189
 Quantenwirkungsgrad 150, 163f.
 Quantisierungsruschen 253
 Quarzglasfenster 577
 Quarzsand 21
 Quarzschicht 133
 Quellen, gesteuerte 18, 213
 Quellenwiderstand, optimaler 267f.
 quenched-domain mode 200
 Querstrom 487, 552, 555
 quiescent current 487
- R**
- Radikal-Anion 148
 Radikal-Kation 148
 Rail-to-Rail-Operationsverstärker 453
 Rail-to-Rail-OPVs 453, 460
 Rakel 506
 Rakeldruck 506
 Rakelgeschwindigkeit 506
 RAM, dynamisches 600
 RAM-Port 610
 Random Access Memory 595
 random telegraph signals (RTS noise) 264
 RAS-CAS-Verzögerung 602, 606
 RAS-only-Refresh 606f.
 RAS-Vorladezeit 604ff., 609
 RAS-Zugriffszeit 605f.
 Raumladungen 52, 53, 55f., 180
 Raumladungsdomäne 199f.
 Raumladungszone 51, 53f., 56ff., 60ff., 66, 68ff., 72, 74ff., 86, 90, 98, 118, 128, 133, 161f., 167ff., 180, 182, 187, 200, 202, 273, 318, 338, 347ff., 353f., 356, 381, 389, 397, 399, 414f., 444
 Rauschleistung 253, 262, 265, 545
 Rauschleistungsdichte 262
 Rauschmaß 265
 Rauschquellen 253, 262, 492f.
 Rauschquellen, überlagerte 262
 Rauschsignal 253, 260
 Rauschspannung 252, 254, 262f., 491, 492, 494
 Rauschspannung, effektive 262
 Rauschspannungsdichte 491ff.
 Rauschstrom 168, 252, 262ff., 491
 Rauschstromdichte 265, 491f.
 Rauschtemperatur 494
 Rauschen 116, 201, 205, 207, 252ff., 259, 261ff., 266, 287, 380, 391, 470, 487, 491f., 503, 546
 Gaterauschen 380
 Gauß verteiltes 262
 Generations-Rekombinationsrauschen 265, 380
 Kanalrauschen 380
 rosa 264
 thermisches 253, 262
 weißes 261, 266, 267
 Rauschspannung 254
 Rauschzahl 265f., 380, 391, 493
 frequenzabhängige 268
 ideale 380
 Minimierung 267
 optimale 267f.
 spektrale 266
 RCT 436
 RDRAM 609
 Reabsorption 137
 Read Cycle Time 570
 Read Enable 568
 Read Only Memory 571
 Readback 658
 Read-Diode 202f.
 Redoxpotenzial 148

- Reduktion 147, 461, 469, 581, 585, 630
 Referenzgehäusetemperatur 247
 Referenzumgebungstemperatur 247
 Reflexion 152, 155f., 163, 167, 175, 594
 Reflexionskoeffizient 153
 Reflexionsverluste 173
 Reflow-Lötung 509
 Refresh 557, 606, 607f.
 Refresh-Arten 606
 Register 563ff., 609, 619, 622, 632, 638, 642, 653, 655, 657
 Registertransferbeschreibung 618
 Register-Transferebene 619
 Regression, lineare 92
 Regressionsfunktion 92
 Reihenschwingkreis 101
 Rekombination 35f., 38ff., 43, 48, 50, 52f., 62, 66, 77, 90, 132f., 141, 146f., 149ff., 173f., 210, 265, 277f., 317, 353, 427
 direkte 38
 indirekte 38f.
 nicht strahlende 132, 141
 Rekombinationsstrom 90, 222, 271
 Rekombinationsvorgänge 90
 Rekombinationszentren 38, 163, 172
 Rekombinationszone 210
 Rekonfigurierbarkeit 657, 659
 repetitive peak forward current 104, 106, 109
 repetitive peak reverse voltage 104, 106
 Resonanzfrequenz 184f., 200
 Resonator, optischer 153
 Resonatorspiegel 153
 Reststrom 236ff., 337, 418
 Messung 237
 retention 574
 Reversdiode 383
 reverse current 87, 107
 reverse recovery time 78, 100, 107, 207, 434
 reverse region 219
 reverse voltage 59, 87, 106, 109
 reverse-conducting thyristor 436
 Reziprozitätsbedingung 283
 Richtwirkung 139
 rise time 107, 276
 ROM, maskenprogrammiert 571
 Row Adress Strobe 602
 RTL 524ff., 622
 Rückflussdämpfungen 303
 Rückkopplungsnetzwerk 461, 477, 485
 Rückstrom 77, 100, 317, 427, 432
 Rückstromfallzeit 101
 Rückstromspitze 429
 Rückwärtsbetrieb 219, 383, 403, 436f.
 Rückwärtsdiode 195f., 350, 375
 Rückwärtserholzeit 100, 107
 Rückwärtssperrspannung 403
 Rückwärtssteilheit 289
 Rückwärtsstrom 77f., 87, 104
 Rückwärtsstromverstärkung 219, 282
 Rückwärts-Durchbruchspannung 415
 Rückwärts-Spitzensperrspannung, periodische 429
 Rückwärts-Übertragungsfaktor 302
 Rückwirkungsfaktor, differenzieller 242, 288
 Rückwirkungskapazität 308, 372, 374
 Rückwirkungskennlinie 241
 Rückwirkungs-Kennlinienfeld 229
 Ruhestromkompensation 467
- S**
- safe operating area 251, 377, 381, 404
 Sägezahngenerator 447f.
 Sägezahnspannung 128, 447
 SAMOS 575
 SAM-Port 610
 Saphir 210
 Sättigung 122, 218, 236, 284, 308, 333, 338, 343, 354, 357, 360, 460, 469, 471, 488, 491, 500, 504, 527, 529, 537, 539
 Sättigungsbereich 219, 228, 236, 279, 343, 357, 359, 360, 371, 403, 500
 Sättigungsbetrieb 218f., 229
 Sättigungsgeschwindigkeit 198f., 204, 206, 373, 389
 Sättigungsspannung 236, 284, 333, 403, 460, 552
 Sättigungswert 61, 74, 116, 279
 Sättigungszustand 236
 Sättigungs-Driftgeschwindigkeit 389
 saturation region 219
 SBC-Technik 314

- Schalenmodell 28
 Schaltodiode 78, 100, 121, 208
 Schaltfrequenz 275, 378, 404, 411, 437, 439, 523, 535
 Schaltfrequenz, maximale 523
 Schaltgeschwindigkeit 270, 314, 394, 397, 404, 433, 436, 448, 559, 612, 622f.
 Schaltkreise, integrierte 19, 378, 449
 Schaltkreisfamilie 514, 517ff., 521, 524, 531, 649
 Schaltnetzteile 122, 382
 Schaltspannung 100, 128, 433, 531
 Schaltstrom 378, 394, 433
 Schaltstufe 377ff., 379, 518, 523, 530, 551, 553
 Schalttransistoren 122, 236, 378, 527
 Schaltverhalten 75, 97f., 275f., 316, 324, 378, 386, 404, 445, 522, 663
 Schaltverluste 397f., 407, 437, 445
 Schaltvorgänge 211, 220, 427, 548, 550
 Schaltzeichen 81ff., 121f., 126f., 129, 131f., 149, 160, 170, 180, 186, 189, 196, 208f., 215, 320, 394, 409, 437, 440, 443ff., 536
 Schaltzeiten 117, 168, 220, 276, 278f., 324, 332, 334, 379, 381, 386, 398, 445, 506, 514, 522f., 527, 531f., 534, 538f., 542, 640
 Schaltzeiten, Verkürzung 279
 Schaltzustände 228, 409, 518
 Schalten, hartes 404, 444
 Schalter, elektronischer 228, 409, 433
 Schalterbetrieb 228, 280, 363, 377, 379
 Schaltungen
 mit Bipolartransistoren, rauscharme 268
 integrierte 111, 148, 310, 431, 450, 457, 505, 559, 611ff., 626, 628
 kombinatorische 638
 sequenzielle 638
 Schaltungsfunktionen 515
 Schaltungssynthese 620, 622
 Scharmittel 258
 Schicht, vergrabene 313
 Schichtschaltungen 506
 Schieberegisterspeicher 595
 Scheibendiode 119
 Schleifen Transitfrequenz 485
 Schleifenverstärkung 471f., 477ff., 484f.
 Schleusenspannung 86, 88f., 322, 444, 555
 Schmelzpunkt 111
 Schnittfrequenz 478, 481
 Schonzeit 428
 Schottky-Diode FET Logic 525
 Schottky-Dioden 81, 86f., 100, 105, 118, 121, 208, 532, 540
 Anwendungsbereiche 122
 Eigenschaften 121
 Schottky-Feldeffekttransistor 389
 Schottky-Kontakt 79, 80, 111, 118, 121, 389, 391
 Schottky-Logik-Schaltkreise 122
 Schottky-TTL 515, 539f., 543, 643
 Schottky-Übergang 389
 Schraubdiode 119
 Schräganschliff 412
 Schreib-/Lese-Speicher 563f., 567, 595
 Schreib-/Löschzyklen 583, 585
 Schreibbefehl 567, 570, 578
 Schreibimpuls, Dauer 570
 Schreibvorgang 563, 570, 586, 590, 592f., 595ff., 599f., 605
 Schreibzyklus 570, 581, 606
 Schrotrauschen 253, 263f., 380
 Schrotrauschspannung 264
 Schutzdioden, integrierte 555
 Schutzfunktionen 387
 Schutzgasatmosphäre 412
 Schutzschaltungen 332, 387, 555, 655
 Schutzschicht 507
 Schweißstromverlauf 406
 Schwellenspannung 330, 349ff., 359, 361, 365, 378, 399, 402f., 405, 519, 550f.
 Schwellwertschalter 447
 Schwellwertspannung 352f.
 Schwingbedingung 477f.
 Schwingfrequenz, maximale 275, 316, 319, 373
 Schwingkreis 181, 184f., 194, 200, 207
 Schwingneigung 194, 456, 479, 486, 503
 Schwingung
 gedämpfte 101, 478
 selbsterregte 477f.
 stationäre 477
 Schwingungserzeugung 195, 199, 461
 SDFL 525
 SDHT 390

- SDRAM 609f.
- Sea of Gates 614, 655
- secondary breakdown 246
- Selectively Doped Heterojunction Field Effect Transistor 390
- Semi-Custom-Entwurf 613
- Settling Time 489f.
- Set-up-Time 523
- SHE-Prozess 577
- Shockley-Formel 90, 161
- shot noise 263
- SH-Struktur 137f.
- Sicherheitsabstand 519
- Siebdruckverfahren 506
- Siebsegmentanzeigen 143
- Signal
 - determiniertes 253
 - stochastisches 253
- Signaldioden 83
- Signallaufzeit, mittlere 522
- Signal-Rauschabstand 266
- Signalübergangszeiten 522
- Signalübertragung, differenzielle 529
- Signalverzögerungszeit 522
- Silan 113, 172
- Silberleitkleber 507
- silicon-controlled rectifier 409
- Silizium 21, 23, 25ff., 35, 39, 42, 44ff., 47f., 51, 57f., 62, 64, 66, 74, 79, 81f., 84, 86, 101f., 105, 109, 111ff., 121, 129, 133, 145, 148, 161, 163, 166, 170ff., 174, 180, 208ff., 215, 221, 247f., 269, 314, 325, 332, 335, 346f., 350, 359, 376, 380, 383, 392, 399, 412, 509, 525, 548, 573
- Siliziumdiode, diffundierte 113
- Siliziumnitrid 578
- Siliziumoxid 21
- Siliziumpulver 21
- Simulation 98, 285, 367, 617, 620, 622ff., 631
- Singleheterostruktur 137
- Single-Mode-Laser, dynamischer 155
- Single-Supply-Operationsverstärker 453
- SIPMOS-FETs 385f.
- SITh 443
- Slave-Mode 658
- SLDRAM 610
- Slew Rate 488ff., 494f.
- Small Scale Integration 512
- small signal current gain 272
- Smart Power Devices 387
- SMD 83, 119, 125, 134, 136f., 312, 452, 503, 505f., 510, 512, 516
- SMD-Bauteile 503, 505f.
- SMD-Gehäuse 452, 503, 516
- SMD-LED 134
- SMD-Transistoren 312
- SMOLED 145
- snap-off diode 208
- Solarpanel 174, 177
- Solarzelle 34, 166, 170ff.
- Solarzellen
 - amorphe 172, 178
 - monokristalline 172
 - polykristalline 172
- Sonnenlicht 143, 170, 174
- Source 131, 327ff., 334ff., 338ff., 349ff., 359, 362, 368f., 371ff., 380ff., 387f., 404ff., 548, 551, 556, 572, 575ff., 579, 582, 586f., 592
- Sourceschaltung 334, 369, 370, 372, 497
- Spaltenleitung 564, 576f., 597, 598
- Spannungsanstiegsgeschwindigkeit, kritische 424
- Spannungsanstiegsrate 488
- Spannungskomparator 461
- Spannungsnachlaufzeit 100, 427
- Spannungsquelle, spannungsgesteuerte 294, 465
- Spannungsrauschen 492f.
- Spannungsrückwirkung 229, 294, 296
- Spannungsspitzen 122f., 209, 387, 532
- Spannungsstabilisierung 130
- Spannungssteilheit 128, 434
- Spannungssteilheit, kritische 416, 422
- Spannungssteuerkennlinie 240f., 322, 333, 342, 369
- Spannungssteuerung 234, 244, 328, 333, 378, 381, 454f.
- Spannungstransienten 122
- Spannungsverhältnis, inneres 446
- Spannungswellen 301f.
- s-Parameter 293, 301ff.
- Spare Page 584

- Speicher
 bitorganisierter 563
 wortorganisierter 563
 Speichergate 575
 Speicherkapazität 569, 584, 587, 597f., 601f.
 Speicherladung 66, 333, 387, 404
 Speicherorganisation 563
 Speicherschaltodiode 208f.
 Speicherzeit 78, 100, 276, 278f., 380, 438, 529, 577, 580
 Speicherzeitkonstante 278
 Speicherzelle 562f., 567, 571f., 575ff., 587ff., 593, 595f., 598f., 602f., 605, 608, 655, 657
 Spektralbereich 134, 139, 143, 164
 Spektraldichte 261f.
 Spektrallinien 153
 Sperrbereich 59, 62, 78, 81, 83f., 86f., 91, 97, 103ff., 116, 127, 129, 184, 219, 228, 236, 238f., 357f., 376, 434, 527
 Sperrbetrieb 75, 77f., 88f., 118, 186, 188, 208, 218f., 229, 245, 399, 415, 427, 434
 Sperrkennlinie 72, 85, 126, 414, 420, 424
 Sperrreststrom 122
 Sperrrichtung 59ff., 66, 68, 74ff., 79, 82, 84f., 90f., 97, 99, 122, 126ff., 161, 169, 180, 204, 206ff., 218f., 222f., 227, 229, 236, 278f., 308, 313f., 329, 335f., 350, 376, 403, 414f., 418, 427
 Sperrsättigungsstrom 61f., 68, 78f., 86, 100, 102, 427
 Sperrschicht 51, 53f., 56, 58, 60, 62, 65f., 70f., 74, 76, 79, 99, 105f., 110, 115, 132, 161, 167f., 184, 190ff., 219, 221, 247f., 251, 273, 282, 289, 307, 327, 329f., 332ff., 338, 340, 342, 344, 350, 355f., 360f., 374ff., 380, 386, 389, 392, 399, 438, 488, 534, 573
 Sperrschichtberührungsspannung 74
 Sperrschichtbreite 57
 Sperrschichtfläche 56, 58, 63f., 116f., 170, 236
 Sperrschichtkapazität 58, 62ff., 66, 75ff., 84, 97ff., 116f., 143, 166, 168f., 180f., 183ff., 188, 273, 308f., 424, 538
 Sperrschichtladung 75, 98
 Sperrschichttemperatur 72, 106, 110, 229, 237, 247, 250
 Sperrschichtweite 57f., 62, 68ff., 91, 117, 180, 329, 336
 Sperrschicht-Feldeffekttransistor 329
 Sperrschicht-FET 329f., 332ff., 342, 350, 355, 361, 374ff., 380
 Sperrspannung 60ff., 66, 68, 70ff., 77, 83, 86f., 90, 98, 100f., 103ff., 116ff., 122, 127, 131, 143, 159, 165f., 168, 180ff., 184, 187, 192, 209, 219, 222f., 234, 237, 251, 277, 308, 336ff., 341, 366, 381, 386, 394, 397f., 404, 409, 412, 414f., 427ff., 434, 437, 439, 442
 maximale 104, 181, 366, 381
 Sperrspannungsfestigkeit 397, 540
 Sperrstrom 61f., 68, 72, 74, 77, 85ff., 91, 99, 101ff., 107, 110, 116, 121f., 127ff., 161f., 170, 181, 222f., 234, 236f., 271, 345, 351, 376, 380, 415, 420ff., 430, 432
 temperaturabhängiger 101
 Sperrstromanteil 219, 235
 Sperrverzögerungszeit 76, 78, 100, 387, 427, 434
 Sperrverzugszeit 100, 207, 208, 427
 Spin 590
 spin coating 145
 Spincoaten 145
 Spitzendiode 111, 115ff.
 Spitzenflussstrom 104
 periodischer 104
 Spitzensperrspannung 104, 106, 109, 421f.
 periodische 100, 104, 420, 422
 Spitzenstrom 247
 maximaler 375
 Spitzentransistor 308
 Split-Gate-Zelle 587
 SRAM-Speichermatrix 597
 SRAM-Speicherzelle 596
 SSI-Schaltungen 512
 Stabilisierung 84, 87, 122, 129, 450
 Stabilitätsbedingung 478, 480
 Stabilitätsprobleme 301, 454, 485
 Stabilitätsreserve 478
 Stacks 159
 Standard Burried Collector 314
 Standard-Leuchtdiode 136

- Standardabweichung 259, 261
- Standardschaltungen 517
- Standard-TTL 532f., 537ff.
- Standardzellen-Design 613
- standby current 122
- Stand-By Mode 568
- stand-off voltage 122
- static forward current transfer ratio 272
- Static-Induction Thyristor 443
- Status-Signal 387
- Steilheit 151, 241, 289, 299, 307f., 334, 342, 345f., 359f., 369, 370, 373, 383f., 388, 405, 425ff., 455f., 489
- Steilheitskoeffizient 358
- Steilheitsparameter 358, 361, 365, 501
- step-recovery-diode 208
- Steuerelektrode 127, 224, 327f., 340, 374, 413, 415, 432f.
- Steuergerate 575ff., 582, 584, 586f.
- Steuerkennlinie 239f., 342, 345, 384
- Steuerspannung 23, 240, 328, 330, 335, 350ff., 362ff., 378f., 398, 405, 415, 421, 423, 433, 576
- Steuerstrom 23, 214, 234, 236, 320, 328, 406, 417, 420, 422, 424, 435f.
- Steuerwinkel 431
- Stichprobenraum 255, 257
- Stichprobenumfang 255
- Stirnflächenreflexion 155
- Stochastik 254
- Störabstand 519ff., 524, 537, 551, 556
- storage time 276
- Störatome 45f., 48
- Störleitung 45
- Störniveaus 38
- Störsicherheit 506, 517, 519, 524f., 541, 549, 652
- Störspannungsabstand 520, 530
 - statischer 519f.
- Störspannungsspitzen 535
- Störstellen ionisierte 390f.
- Störstellenschöpfung 49f.
- Störstellenleitung 39, 45, 47, 49
- Störstellenreserve 49
- Störstellen-Leitfähigkeit 47
- Störstellentiefe 38
- Stoßionisation 68f., 72, 169, 202
- Stoßspitzensperrspannung 109, 118, 421
- Stoßstrom 110, 122, 422
- Stoßstromgrenzwert 429
- Strahlung
 - inkohärente 149
 - kohärente 150
- Strahlungserzeugung 38, 132
- Strahlungsfluss 135
- Strahlungsleistung 135, 139, 141f., 151, 159, 175
 - globale 175
 - spektrale 175
- Strahlungsmessung 187
- Streuparameter 301
- Streuprozesse 390, 391
- Streuung 175, 224, 259f., 325, 391
- Stromanstiegsgeschwindigkeit 416, 425, 432
- Stromanstiegsgeschwindigkeit, kritische 425
- Stromanstiegssteilheit 416
- Strombegrenzung 72, 129, 246, 387, 398, 436, 465, 504, 532, 583
- Strombegrenzerdiode 131
- Stromimpuls 199, 206, 378, 411, 573f., 589, 594
- Stromquellenbereich 343
- Stromrauschen 493
- Stromregeldiode 131
- Stromrichter 429
- Stromschweif 404f.
- Stromspegel 499, 501, 626
- Stromsteuerung 233, 245, 333, 456
- Stromtragfähigkeit 366, 397, 440
- Stromübertragungsfaktor 456
- Stromverstärker 235, 456, 457
- Strom-Steuerkennlinie 240, 245, 296
- Stromverstärkung 214, 218ff., 224, 226, 229, 235, 240, 266, 269ff., 281f., 284f., 289f., 293f., 296, 305ff., 314, 318, 320ff., 333, 372, 399, 401, 411, 419, 468, 497, 559
 - Basisschaltung 271
 - Emitterschaltung 271
 - inverse 219, 282
 - Umrechnung 272
- Stromverteilung, inhomogene 246, 420

- Stromverteilungsrauschen 253, 265, 266
 Strom-Zeit-Fläche, maximale 104
 Strukturdomäne 619
 Substrat 45, 81, 111, 113, 120, 145, 170,
 216, 313f., 327, 332, 340, 346ff., 375f.,
 383, 389, 393, 395, 397, 399, 401, 505f.,
 508f., 577ff., 582, 625, 629
 Substrat-Diode 120, 314
 Substratdotierung 50
 Substrate Hot Electron Process 577
 Substratstereoeffekt 351, 371
 Super-Beta-Schaltung 320
 Superpositionsprinzip 18
 Suppressordiode 122ff.
 supply voltage rejection ratio 470
 Surface Mounted Devices 512
 surge current 110, 122
 switching diode 121
 Symmetrieabweichung 128f.
 Systemkonstanten 571
 Systemtabellen 571
- T**
- Tabellenspeicher 561, 571
 Tailstrom 398
 Taktfrequenz, maximale 640
 Talspannung 447
 Talstrom 191, 193, 447
 Technik, biomedizinische 392
 TEGFET 390
 Teilverhältnis 446
 Telegrafien-Rauschen 264
 Temperatur 23f., 32, 35, 40f., 43, 48ff., 57,
 61, 62, 64, 69, 71ff., 79, 101ff., 112f., 115,
 128, 131, 145, 156, 159, 176f., 183, 229,
 231f., 236, 247f., 262f., 266, 270, 309, 311,
 333, 345, 365f., 376, 403, 424, 428, 468,
 470, 488, 497f., 503, 506, 508, 584, 626,
 634
 intrinsische 50
 Temperaturabhängigkeit 43, 49f., 62, 73,
 101ff., 125, 183, 231, 325, 333f., 345f.,
 365, 398, 424, 469, 498, 511, 541
 Temperaturbereiche 49, 515
 Temperaturdrift 231, 325, 468ff., 497
 Temperaturkoeffizient 72, 130f., 345,
 365f., 397, 448, 497
 Temperaturkompensationspunkt 346, 366
 Temperaturmessung 125
 Temperaturspannung 57, 78, 90, 161, 165,
 267, 269, 307
 Temperaturstrahler 139
 Temperaturverhalten 72, 156, 365, 633
 Temporn 113
 TEMPFET 387
 T-Ersatzschaltbild 290f.
 Test Access Port 632
 Testmuster 627, 630f., 634
 Tetracen 22
 Tetraeder 26, 27
 TFT-Displays 393
 TFT-Transistor 393
 thermal noise 262
 Thermischer Durchbruch 68, 72
 Thermosonic-Bonden 508
 Thin Film Transistor 148
 threshold voltage 331, 349, 352
 Through Hole Technology 512
 THT 452, 512
 Thyatron 409
 Thyristor 51, 126f., 387, 400f., 409ff.,
 414ff., 419f., 423ff., 427ff., 436ff., 445,
 448, 556
 abschaltbarer 437
 asymmetrisch sperrender 437
 feldgesteuerter 443
 lichtgesteuerter 442
 MOS-gesteuerter 440
 rückwärts leitender 436
 Thyristordioden 126, 409
 Thyristorstruktur, parasitäre 401
 Thyristortetrode 409, 436
 Thyristortrioden 409
 Thyristor-Ersatzschaltung 401
 Thyristorstruktur 555
 Time Dependent Dielectric Breakdown
 581
 TMR-Element 590
 Top-Down-Design 616f.
 Topfet 387
 Totem-Pole-Ausgang 521, 534
 Totem-Pole-Ausgangsschaltung 534
 Trägermaterial 210, 313, 395, 505
 Trägerstauereffekt 100, 427, 434

- Transferrgatter 556, 605, 610
 Transil 124f.
 Transimpedanzverstärker 166, 456
 Transistoren
 integrierte 215, 286, 310, 313
 lateraler 314
 Rauscheigenschaften 265
 vertikaler 314
 Transistor-Schaltstufe 275
 Transistor-Transistor-Logik 514, 532
 transit frequency 472
 transit time mode 199
 Transitfrequenz 268, 273ff., 277, 293, 307,
 319, 372, 390f., 472f., 480, 482f., 485
 Transitzgrenzfrequenz 273, 372ff.
 transition frequency 273
 Transitzeit 66, 199ff., 205f., 285
 Transitzeit-Betrieb 199f.
 Transitzeit-Betriebsart 199
 Transkonduktanz 358, 455
 Transkonduktanz-Koeffizient 358
 Transkonduktanz-Verstärker 455
 Transmissionsgatter 556f.
 Transportmodell 281, 285
 Transportstrom 285
 Transzorb 125
 TRAPATT-Diode 202, 205f.
 traps 38, 419, 579
 Treiber 312, 444f., 456, 515, 521, 535, 568
 Trench-Gate 407
 Trench-IGBT 407f.
 Trench-Isolation 314
 Trennverstärker 143, 482
 TRIAC 433ff.
 Triggerdiode, bidirektionale 125
 Trigger-Impuls 128
 triode alternating current switch 433
 Triodenbereich 341
 Tri-State-Ausgang 522, 536f., 645f.
 Tri-State-Ausgangsstufen 522
 TSE-Schutzbeschaltung 427
 TTL 387, 514f., 519, 521, 524f., 529ff., 549,
 552, 559, 568, 640, 642, 655
 TTL-Pegel 519
 TT-Modus 199f.
 tubs 554
 Tunnelbarriere 589f.
 Tunneldiode 189, 191ff., 198
 Tunneleffekt 70f., 189ff., 580
 Tunnelement, magnetoresistives 589
 Tunnelkontakt 589
 Tunnelmagnetwiderstand 589
 Tunnelstrom 191f., 195, 588
 Tunnelvorgang 190
 Tunnelwahrscheinlichkeit 71, 590
 Tunnelwiderstand, magnetischer 588
 Tunnel-Durchbruch 68
 Tunnel Injection 587
 Tunnel Release 587
 Tunneling Magneto Resistance Effekt 588
 turn off time 276
 turn on time 276
 TVS-Dioden 125
 Two Dimensional Electron Gas Field Effect
 Transistor 390
- U**
 Übergänge
 abrupte 63, 114
 hyperabrupte 63
 isotype 138
 lineare 63
 Übergangsbereich 127f., 132, 519
 Übergangskennlinie 414
 Übergangszeit 100
 Überhitzung, lokale 73, 316
 Überkopfzündung 416, 420, 427
 Überlagerungsfarbe 134
 Überlagerungssatz 18
 Überspannungsableiter, gasgefüllter 124
 Überspannungsspitzen 122
 Übersprechen 254, 518
 Übersteuerung 122, 277ff., 461, 468, 504
 Übersteuerungsbereich 219, 235f., 276,
 460
 Übersteuerungsfaktor 236, 277f.
 Übersteuerungsgrad 277
 Übersteuerungsgrenze 236, 277
 Übertragungsfunktion 475, 480ff.
 Übertragungsgleichungen 370, 454
 Übertragungskennlinie 239, 341f., 345f.,
 358ff., 362, 366, 402, 454f., 460f., 468f.,
 500f., 518f., 529, 539, 553

- Übertragungsteilheit 241, 342, 359f., 403, 455
 - Übertragungs-Kennlinienfeld 229
 - UCP-Zelle 587
 - UJT 327, 445ff.
 - ULSI-Schaltungen 512
 - Ultraschall 508
 - Ultrasonic-Bonden 508
 - Umgebungstemperatur 143, 174, 247f., 251, 376, 458, 488, 515, 544
 - Umladestromspitze 98ff.
 - Umladevorgänge 380, 534
 - UMOS-Struktur 384
 - Unijunction-Transistor 445
 - programmierbarer 448
 - Unipolartransistor 214, 327
 - unity gain bandwidth 472
 - unity gain frequency 273
 - Universaldiode 121
 - Unschärferelationen 189
 - Unterniveaus 29
 - UV-Bestrahlung 574, 578
- V**
- Vakuum 31
 - Vakuumenergie 31
 - Vakuum-Level 31
 - Vakuumniveau 31
 - Valenzband 30ff., 38ff., 47, 49, 58, 72, 132, 146, 149f., 161, 192, 198, 317
 - Valenzelektronen 21f., 25f., 29, 34f., 70f., 149, 151, 192
 - Varaktor 180, 601
 - Varaktordiode 542
 - Varianz 259f.
 - Varicap 180
 - Varistoren 125
 - VC-OPV 455f.
 - VCSEL 157
 - Verarmungstyp 330, 349f., 354ff., 361f., 383, 548, 579
 - Verarmungszone 53, 80, 203, 206, 336, 354, 577
 - Verbindungshalbleiter 22, 27, 38f.
 - Verdrahtungskanal 656
 - Verhalten
 - induktives 76
 - kapazitives 75
 - ohmsches 354, 356
 - Verhaltensdomäne 618
 - Verknüpfungslogik 583
 - Verlustleistung 72f., 75, 98, 105f., 119, 130, 143, 152, 158, 219, 247f., 250f., 311, 332, 362f., 366, 376, 378, 397ff., 415, 422f., 431, 434, 447, 488, 502, 504, 523, 525, 527, 529f., 540, 547, 549, 551, 558, 611
 - dynamische 523, 552
 - maximale 103, 105, 211, 245, 247, 250f., 311, 374, 376f., 542
 - maximale thermische 251
 - statische 248, 250, 523, 548f., 552
 - Verlustleistungshyperbel 251
 - Verschiebungsstrom 593
 - Versorgungsspannungsbereich 487, 551, 616, 623
 - Versorgungsspannungsunterdrückung 459
 - Verstärker 19, 155, 188, 194, 213, 224, 226ff., 236, 334, 340, 388, 449, 453, 455ff., 459, 471, 474, 477f., 483f., 487, 492, 500, 503f., 515f.
 - stromgegeggekoppelter 456
 - Verstärkerbetrieb 227, 236
 - Verstärkerwirkung 17
 - Verstärkung 153, 169, 194, 213, 218, 227, 241, 253, 316, 342, 359, 371, 388, 449, 456ff., 463ff., 471ff., 480ff., 488, 491, 494, 497, 501f., 605
 - Verstärkungs-Bandbreite-Produkt 274, 459, 473f., 483
 - Verstärkungsbereich 218, 501
 - Verstärkungsbereich, inverser 219
 - Verstärkungsbetrieb 219
 - Verstärkungseigenschaft 18
 - Verstärkungsführung 154
 - Verstärkungsreserve 479
 - Verteilung 32f., 45, 50, 135, 157, 221, 257f., 265, 309, 316, 585, 624
 - Verteilungsdichte 258ff.
 - Verteilungsdichtefunktion 258
 - Verteilungsfunktion 257f.
 - vertical cavity surface emitting diode 157
 - Vertikaltransistor 314
 - Very Large Scale Integration 512

- Verzerrungen 185, 227, 241, 291, 333, 500
 Verzögerungszeit 202, 379, 541, 544, 623
 VHDL 618, 621f., 656
 Vierpol 281, 291ff.
 Vierpoldarstellungen 293, 300
 Vierpolgleichungen 280, 292ff., 299ff.
 Vierpolparameter 233, 239, 242, 292ff.,
 300, 304
 Vierpoltheorie 292
 Vierquadranten-Kennlinienfeld 242ff.,
 295
 Vierschichtdiode 125ff., 409, 447
 Vierschichthalbleiterbauelement 395
 VLSI-Schaltungen 512
 VMOS-Struktur 383f.
 Vollaussteuerung 431, 455, 489
 Voltage Feedback Operational Amplifier
 454
 Vorladen 601, 605, 607
 Vorladeschaltkreis 603f.
 Vorwärtsbetrieb 218, 227, 436, 533
 Vorwärtssperrspannungsstabilität 402
 Vorwärtssperrzustand 395, 397ff., 402
 Vorwärts-Spitzensperrspannung,
 periodische 429
 Vorwärts-Übertragungsfaktor 302
 Vorwiderstand 84, 127ff., 140, 555
 VRAM 610
 VV-OPV 454, 457, 494
- W**
- wafer 111, 310
 Wafer 112, 115, 314, 397, 440, 614, 626ff.,
 630, 633
 Wahrscheinlichkeit 32ff., 38, 151, 190,
 198, 252, 256ff., 265, 623, 626f., 630
 Wahrscheinlichkeitsdichte 257f.
 Wahrscheinlichkeitstheorie 253f.
 Wannierexciton 147
 Wärmebewegung 112, 223, 262
 Wärmekapazität 118
 Wärmelehre 248
 Wärmeleitfolie 248
 Wärmeleitpaste 248
 Wärmestrom 248
 Wärmeübergangswiderstand 247f.
 Wärmewiderstand 73, 106, 110, 248, 251,
 488
 Wärmezufuhr 40
 Watt peak 178
 Wear-Leveling 584f.
 Wechselspannungsbetrieb 140, 434
 Wechselspannungsverstärkung 220
 Wechselspannungswiderstand,
 gleichstromgesteuerter 187
 Wechselstromeingangswiderstand 232
 Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild
 97, 306, 369, 371f.
 Wechselstromsteller 431, 435
 Wechselstromverstärkung 240, 271f.
 Wechselwirkung 25, 28f., 31, 38, 41, 142,
 150, 197, 588
 Wedge 508
 Wellengruppe 157
 Wellenlängenunsicherheit 135
 Wellenparameter 301
 Wellenvektor 36
 Wellenwiderstand 201, 301f., 529
 Wellenzahl 36f., 197
 Welle-Teilchen-Dualismus 190
 wells 554
 WE-Signal 568
 Widerstand 17, 19, 173, 187, 213, 221,
 273, 307, 324, 367, 377f., 385, 436, 467,
 472, 475, 503, 505f., 511, 529f., 532, 539,
 547, 619
 negativer differentieller 72, 193, 414, 420
 spezifischer 23
 steuerbarer 328, 341, 343, 362ff.
 Widerstandsrauschen 253, 262, 380
 Widerstands-Transistor-Logik 525
 Wiener-Khintchine-Theorem 261
 Wire-Bonden 508
 wired AND 83, 522
 Wired-OR-Verknüpfung 529
 Wirkungsgrad 139, 151, 158, 172ff., 179,
 199, 201, 205ff.
 Wortbreite 567, 569
 Wortleitung 564ff., 571f., 576f., 579, 586,
 590, 596ff., 601f., 604f., 642
 Write Cycle Time 570
 Write Enable 568, 603

Write Pulse Width 570

Wurtzit-Struktur 27

X

XIP 583

Y

Y-Diagramm 618ff.

ye-Leitwertmatrix 292

Y-Leitwert-Matrix 370

y-Parameter 299f., 303f., 306

Z

Z-Diode 84, 105, 122, 125, 129ff., 374, 527

Zeilenleitung 564, 576, 597f.

Zeitkonstante, thermische 250

Zenerbereich 130

Zener-Diode 71, 72, 84, 87, 125

Zenerdurchbruch 68, 70ff., 192

Zener-Effekt 70ff., 130f.

Zenerspannung 83, 126, 129f., 279

ZENER-Tunneln 71, 192

Zentralatom 26f.

ZEROPOWER-RAM 600

Zerstörung 68, 71f., 86f., 105, 118, 140,
179, 246, 252, 328, 366, 374, 387, 397,
402, 416, 573

Zerstörung, thermische 345, 416, 425, 553

Zinkblende-Struktur 27

Zinkoxid (ZnO) 22

Zinkselenid (ZnSe) 22

Zinksulfid (ZnS) 22

Zone, verbotene 29, 35, 47, 71f., 191f., 391

Zonenschmelzen 21

Zufallsexperiment 255f.

Zufallsgrößen 253, 259

Zufallsprozess 259

Zufallssignal 253f.

Zufallsvariable 254ff.

Zugriffszeit 569f., 575, 578, 582f., 587, 605

Zündausbreitungszeit 426

Zündbedingung 418f., 424

Zündbereich 421ff.

Zündeigenschaften 434

Zündimpuls 128, 416, 431f., 441, 444

Zündimpulsdauer 421

Zündimpulsgenerator 424

Zündimpulskette 421

Zündkreis 128

Zündspannung 126, 420f., 423, 447f., 555

Zündstrom 414, 416, 420f., 423f., 433

Zündverzögerungszeit 425

Zündverzugswinkel 431

Zündverzugszeit 423, 425f.

Zündwinkel 431

Zündzeit 422, 426

Zündzeitpunkt 431f.

Zünden 125, 401, 409, 416, 419, 423, 431,
555

Zustandsdichten, effektive 41, 43, 191

Zweirichtungsdiode 125

Zweirichtungsthyristordiode 126

Zweitor 292, 301, 302, 303

Zweiwegthyristor 433

Zwischenniveaus 38

Z-Zustand 522

Leonhard Stiny

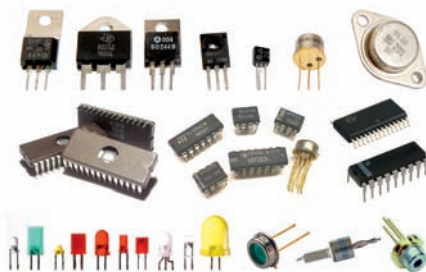
Handbuch aktiver elektronischer Bauelemente

Das Werk bietet ein umfangreiches Wissen über diskrete und integrierte Bauelemente der Halbleitertechnik. Es werden sowohl Standard-Bauelemente als auch neueste Bausteine der Mikroelektronik und Computertechnologie behandelt. Das Buch kann zum Selbststudium, in der Lehre, als Handbuch in der Elektronikpraxis und als ausführliches Nachschlagewerk eingesetzt werden.

Als kleinste Einheiten einer Schaltung werden elektronische Bauelemente zu Funktionseinheiten, Baugruppen oder Geräten zusammengefügt. Um entsprechend den Herstellerunterlagen die für eine bestimmte Anwendung optimalen Bauteile auswählen zu können, muss der Anwender die Wirkungsweise auch sehr komplexer Halbleiter-Bauelemente verstanden haben. Analyse und Entwurf elektronischer Schaltungen erfordern als Voraussetzung für fehlerfreie und betriebssichere Elektronikprodukte gründliche Kenntnisse von Aufbau und Funktionsweise der eingesetzten Bauelemente der Halbleiterelektronik. Bei einer Schaltungsauslegung müssen die Kenngrößen und speziellen Eigenschaften der eingesetzten Bauelemente berücksichtigt werden, um sowohl eine technisch als auch wirtschaftlich bestmögliche Lösung zu finden.

Dieses Buch bildet eine Brücke zwischen den physikalischen Grundlagen von Halbleiter-Bauelementen und deren ingenieurtechnischen Anwendungen in der Praxis der modernen Elektronik. Als Basis werden die theoretischen und physikalischen Grundlagen der Halbleitertechnik vermittelt. Darauf aufbauend, werden für alle Halbleiter-Bauelemente Aufbau und Wirkungsweise erläutert, spezifische Merkmale, Daten, Kenngrößen und Charakteristiken angegeben und deren Bedeutung erklärt. Für die verschiedenen Typen von Bauteilen werden übersichtlich die Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungen aufgezeigt. Allgemein gehaltene, für jeden Einsatzfall gültige Beschreibungen können auf spezielle Ansätze leicht angepasst, erweitert und so in der Praxis direkt angewendet werden.

Zahlreiche Abbildungen vermitteln eine Vorstellung von Aufbau und Aussehen der Bauelemente. Tabellarische Übersichten und Beispiele mit ausführlichen und nachvollziehbaren Berechnungen unterstützen die Auswahl, Dimensionierung und Anwendung von elektronischen Halbleiter-Bauelementen.



Aus dem Inhalt:

- Grundlagen der Halbleiter, pn-Übergang
- Aufbau, Eigenschaften und Funktion von Halbleiterdioden
- Diodentypen und ihre Anwendungen
- Bipolare Transistoren
- Transistortypen, Kenngrößen und Einsatzbereiche
- Feldeffekttransistoren
- Bauformen und Betrieb von FETs
- Thyristoren, Ausführungsformen und Kenndaten
- Operationsverstärker, Typen und praktischer Einsatz
- Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen
- Halbleiterspeicher, Einteilung und Verwendung
- Anwendungsspezifische integrierte Bausteine
- Und vieles mehr ...

Über den Autor:

Leonhard Stiny ist Dipl.-Ing. Univ. der Elektrotechnik. Vor dem Ruhestand war er als Abteilungsleiter in der Elektronikentwicklung tätig. Zurzeit ist er Dozent an der IHK München und Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Regensburg für das Fach „Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik“.

ISBN 978-3-7723-5116-7



Euro **49,95** [D]