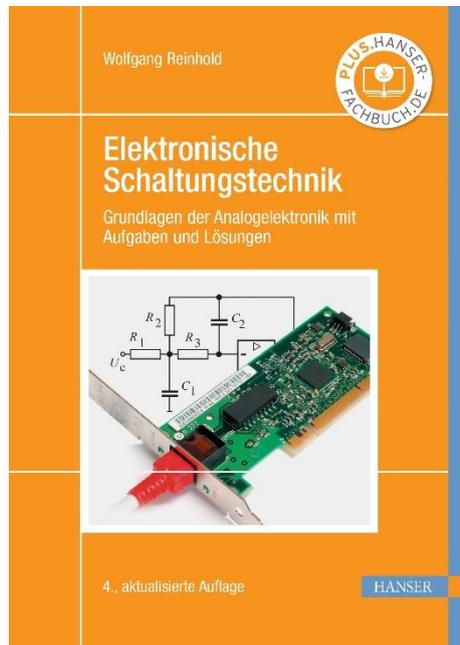


HANSER



Leseprobe

zu

Elektronische Schaltungstechnik

von Wolfgang Reinhold

Print-ISBN: 978-3-446-47650-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-47782-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476509>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Das Fachgebiet elektronische Schaltungstechnik umfasst einen sehr umfangreichen Teil der Elektronik. Dieses Buch legt den Schwerpunkt auf die Schaltungsprinzipien zur Erzeugung und Verarbeitung analoger Signale. Durch diese Konzentration eröffnet sich die Möglichkeit, dem Studierenden die Einarbeitung in das Gesamtgebiet anhand einer durchgängigen Systematik zu erleichtern. Ziel der Darstellung ist die Herausarbeitung schaltungstechnischer Grundkonzepte zur Realisierung der wichtigen funktionellen Baugruppen elektronischer Systeme. Auf Basis geeigneter mathematischer Methoden zur Schaltungsberechnung werden die notwendigen Abstraktionen der Bauelemente- und Schaltungsmodellierung abgeleitet, um ein anschauliches Verständnis und das ingenieurtechnische Handwerkszeug zur Schaltungsanalyse und Schaltungssynthese zu vermitteln. Ausgehend von den klassischen Grundschaltungen für Signalverstärker und elektronische Schalter werden systematisch die wichtigsten Aspekte der analogen Signalverarbeitung aufgezeigt.

In einer Reihe von Beispielen erhält der Leser Anregungen zur Nutzung des Netzwerkanalysators PSpice, um auch komplexe Zusammenhänge bei der Schaltungsanalyse anschaulich darstellen zu können. Mein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Robert Heinemann. Mit der von ihm im Rahmen seines Buches „PSPICE – Einführung in die Elektroniksimulation“ bereitgestellten PSpice-Demoversion konnten die Simulationen sehr komfortabel durchgeführt werden.

Dieses Lehrbuch wendet sich hauptsächlich an Studenten der Elektrotechnik an Technischen Hochschulen und Fachhochschulen. Wegen seiner straffen und übersichtlichen Darstellung kann es aber auch als einführende Literatur für Universitätsstudenten empfohlen werden. Vorausgesetzt werden lediglich Grundkenntnisse der Elektrotechnik und Mathematik. Zahlreiche Beispiele und Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen erleichtern die Einarbeitung in den Stoff und fördern die Selbstständigkeit.

Mein herzlicher Dank gilt den Kollegen der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der HTWK Leipzig für anregende Diskussionen sowie Frau Werner und Frau Kaufmann vom Carl Hanser Verlag für die Unterstützung bei der Gestaltung des Buches.

Leipzig, im Mai 2010

Wolfgang Reinhold

Vorwort zur 4. Auflage

Dieses Buch wurde als Grundlagenlehrbuch für die Ausbildung von Schaltungstechnikern an Hochschulen konzipiert. Die erfreulich hohe Resonanz auf die bisherigen Auflagen hat bestätigt, dass die enthaltenen Inhalte und deren Darstellung einen fundierten Einstieg in die Analogelektronik ermöglichen.

In dieser 4. Auflage wurde insbesondere der Abschnitt Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler erweitert. Es werden neue systemtechnische Entwicklungen auf diesem Gebiet beschrieben sowie die daraus erzielbaren verbesserten Systemeigenschaften aufgezeigt. Die daraus resultierenden Wertebereiche für Auflösung und Übertragungsgeschwindigkeit der Datenwandler werden in grafischen Diagrammen und Tabellen in übersichtlicher Form dargestellt. Dies bietet einen guten Einstieg für die Entwicklung der Schnittstellen zwischen analogen und digitalen Systemen.

Die Lösungen zu den Übungsaufgaben des Buches sowie weitere nützliche Materialien liegen nun auf dem Server des Hanser Verlages und sind über den Hinweis auf Seite 1 des Buches zu finden.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Frau Christina Kubiak und Herrn Frank Katzenmayer und dem gesamten Team vom Carl Hanser Verlag für die hervorragende langjährige Zusammenarbeit bei der Überarbeitung des Buches.

Leipzig, im Februar 2023

Wolfgang Reinhold

Inhalt

1	Physikalische Grundlagen der Halbleiterelektronik	13
1.1	Leitfähigkeit von Halbleitern	13
1.1.1	Eigenleitung	13
1.1.2	Halbleiter mit Störstellen	15
1.2	Ladungsträgergeneration in Halbleitern	19
1.3	Ladungsträgertransport in Halbleitern	20
1.4	Aufgaben	21
2	Berechnungsmethoden elektronischer Schaltungen	22
2.1	Analysemethoden und -werkzeuge zur Schaltungsberechnung	23
2.1.1	Ersatzschaltbilder	25
2.1.2	Groß- und Kleinsignalanalyse	26
2.1.3	Kleinsignalersatzschaltung	27
2.2	Vierpoldarstellung	28
2.3	Zusammenschaltung von Vierpolen	32
2.4	Vierpole mit äußerer Beschaltung	33
2.5	Darstellung des Übertragungsverhaltens	34
2.6	Signalflussdarstellung	36
2.7	Computergestützte Netzwerkanalyse	37
2.8	Aufgaben	39
3	Halbleiterdioden	41
3.1	pn-Übergang	41
3.1.1	Wirkprinzip	41
3.1.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	45
3.1.3	Ladungsspeicherung	46
3.2	Kleinsignalverhalten	47
3.3	Schaltverhalten	50
3.4	Temperaturverhalten	52
3.5	Spezielle Dioden und ihre Anwendungen	53
3.5.1	Gleichrichterdiode	53
3.5.2	Z-Diode	56
3.5.3	Kapazitätsdiode	58
3.5.4	Tunneldiode	60
3.5.5	Schottky-Diode	60
3.6	Mikrowellendioden	61
3.6.1	IMPATT-Diode	61
3.6.2	Gunn-Diode	62
3.7	Aufgaben	63

4	Bipolartransistoren	65
4.1	Wirkprinzip	65
4.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	67
4.3	Nutzbarer Betriebsbereich	72
4.4	Bipolartransistor als Verstärker	74
4.4.1	Kleinsignalmodell des Bipolartransistors	75
4.4.2	Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens des Bipolartransistors	78
4.5	Temperaturverhalten von Bipolartransistoren	83
4.6	Arbeitspunktabhängigkeit der Stromverstärkung	85
4.7	Bipolartransistor als elektronischer Schalter	86
4.7.1	Schaltung eines Transistorschalters	86
4.7.2	Stationäres Schaltermodell des Bipolartransistors	87
4.7.3	Dynamisches Verhalten eines Transistorschalters	88
4.8	Aufgaben	91
5	Thyristoren	95
5.1	Aufbau und Wirkungsweise	95
5.2	Thyristorvarianten	97
5.3	Anwendungen von Thyristoren	98
5.4	Aufgaben	101
6	Feldeffekttransistoren	102
6.1	MOSFET	103
6.1.1	Wirkprinzipien verschiedener MOSFET-Typen	103
6.1.2	Strom-Spannungs-Kennlinie eines MOSFET	104
6.1.3	Ableitung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines MOSFET	108
6.1.4	MOSFET als Verstärker	110
6.1.4.1	Kleinsignalmodell des MOSFET	110
6.1.4.2	Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens	113
6.1.4.3	Effekte bei integriertem MOSFET	114
6.1.5	MOSFET als elektronischer Schalter	115
6.1.6	Thermisches Verhalten des MOSFET	117
6.2	Sperrschicht-FET	118
6.2.1	Strom-Spannungs-Kennlinie eines SFET	119
6.2.2	Kleinsignalverhalten eines SFET	119
6.3	SFET als Verstärker	120
6.4	Aufgaben	122
7	Rauschen elektronischer Bauelemente	125
7.1	Widerstandsrauschen	125
7.2	Diodenrauschen	127
7.3	Transistorrauschen	128
7.4	Rauschspannung	129
7.5	Rauschfaktor	130
7.6	Aufgabe	132

8	Operationsverstärker	133
8.1	Der ideale Operationsverstärker	133
8.2	Aufbau eines Operationsverstärkers	134
8.3	Statische Kenngrößen realer Operationsverstärker	135
8.4	Dynamische Kenngrößen realer Operationsverstärker	139
8.5	Verstärkerschaltungen mit Operationsverstärker	140
8.5.1	Grundsaltungen eines Spannungsverstärkers	141
8.5.2	Kompensation von Offsetspannung und Offsetstrom des Operationsverstärkers	142
8.6	Dynamisches Verhalten von Operationsverstärkerschaltungen	143
8.7	Rauschen in Operationsverstärkern	145
8.8	Moderne Operationsverstärkertypen	146
8.9	Aufgaben	148
9	Optoelektronische Bauelemente und Halbleitersensoren	150
9.1	Fotosensoren	150
9.2	Leuchtdioden	153
9.3	Optokoppler	156
9.4	Spezielle Halbleitersensoren	156
9.4.1	Temperatursensoren	156
9.4.2	Magnetfeldsensoren	158
9.4.3	Piezowandler	159
9.5	Aufgaben	160
10	Lineare Verstärkergrundsaltungen	162
10.1	Allgemeines Kleinsignalmodell eines Spannungsverstärkers	162
10.2	Einstufige Verstärker mit Bipolartransistoren	164
10.2.1	Emitterschaltung	165
10.2.2	Basisschaltung	173
10.2.3	Kollektorschaltung (Emitterfolger)	175
10.2.4	Vergleich der einstufigen Transistorverstärkerschaltungen	177
10.3	Einstufige Verstärker mit Feldeffekt-Transistoren	178
10.4	Grundsaltungen mit mehreren Transistoren	179
10.4.1	Kaskodeschaltung	179
10.4.2	Differenzverstärker	181
10.4.3	Stromspiegel	185
10.4.4	Differenzverstärker mit Stromspiegellast	188
10.4.5	Transistor-Stromquellen	189
10.4.6	Darlington-Schaltung	192
10.4.7	Leistungsendstufen	193
10.5	Frequenzverhalten von Verstärkerstufen	199
10.6	Kopplung von Verstärkerstufen	200
10.7	Aufgaben	201

11	Gegenkopplung	206
11.1	Allgemeines Modell der Gegenkopplung	206
11.2	Schaltungsarten der Gegenkopplung	208
11.3	Effekte der Gegenkopplung	209
11.3.1	Einstellung eines definierten Übertragungsfaktors	209
11.3.2	Linearisierung des Übertragungsfaktors	209
11.3.3	Parameterempfindlichkeit	211
11.3.4	Einfluss der Gegenkopplung auf Ein- und Ausgangsimpedanz	212
11.3.5	Übertragungsbandbreite	214
11.3.6	Miller-Effekt	215
11.3.7	Bootstrap-Effekt	216
11.3.8	Gezielte Beeinflussung des Frequenzganges eines Verstärkers	216
11.4	Anwendungen der Gegenkopplungsvarianten	217
11.4.1	Operationsverstärkerschaltungen mit Gegenkopplung	217
11.4.2	Transistorschaltungen mit Gegenkopplung	219
11.5	Stabilität rückgekoppelter Verstärker	222
11.6	Frequenzgangkorrektur von Verstärkern	225
11.7	Aufgaben	227
12	Schaltungen mit Operationsverstärkern	229
12.1	Lineare Verstärker	229
12.1.1	Nicht invertierender Verstärker	229
12.1.2	Invertierender Verstärker	230
12.2	Rechenschaltungen	231
12.2.1	Addierer	231
12.2.2	Subtrahierer	232
12.2.3	Differenzierer	235
12.2.4	Integrator	238
12.2.5	Multiplizierer	241
12.2.6	Dividierer	242
12.3	Nichtlineare Schaltungen	242
12.4	Komparatoren und Schmitt-Trigger	243
12.5	Stromquellen	245
12.6	Schaltungstechnik mit modernen Operationsverstärkern	246
12.6.1	VC-OPV und seine Anwendung	246
12.6.2	CV-OPV als Hochfrequenz-Baublock	248
12.6.3	CC-OPV und seine Anwendung als idealer Transistor	250
12.7	Elektronische Regler	251
12.7.1	P-Regler	252
12.7.2	PI-Regler	252
12.7.3	PID-Regler	253
12.8	Aufgaben	256

13	Filterschaltungen	257
	13.1 Filtereigenschaften und Kennwerte	257
	13.2 Passive Filter	262
	13.3 Aktive RC-Filter	266
	13.3.1 Tiefpässe 2. Ordnung	266
	13.3.2 Hochpässe 2. Ordnung	271
	13.3.3 Bandpässe 2. Ordnung	274
	13.3.4 Bandsperren 2. Ordnung	278
	13.4 Universalfilter	280
	13.5 SC-Filter	281
	13.5.1 SC-Integrator	281
	13.5.2 Schaltungsrealisierung von SC-Filtern	283
	13.6 Aufgaben	284
14	Schwingungserzeugung	286
	14.1 Sinusoszillatoren	286
	14.1.1 Zweipoloszillatoren	286
	14.1.2 Vierpoloszillatoren	289
	14.1.2.1 Grundstruktur und Schwingbedingung	289
	14.1.2.2 RC-Oszillatoren	290
	14.1.2.3 LC-Oszillatoren	293
	14.1.2.4 Quarzoszillatoren	295
	14.2 Impulsoszillatoren	298
	14.2.1 Funktionsgeneratoren	298
	14.2.2 Relaxationsoszillatoren	299
	14.2.2.1 Dreieck-Rechteck-Generator	299
	14.2.2.2 Kippschaltungen	300
	14.3 Aufgaben	302
15	Frequenzumsetzer	303
	15.1 Amplitudenmodulation	304
	15.1.1 AM-Modulatoren	305
	15.1.2 AM-Demodulatoren	307
	15.2 Frequenzmodulation	310
	15.2.1 FM-Modulatoren	313
	15.2.2 FM-Demodulatoren	314
	15.3 Phasenmodulation	315
	15.3.1 PM-Modulatoren	316
	15.3.2 PM-Demodulatoren	317
	15.4 Mischer	317

16	Stromversorgungseinheiten	321
16.1	Gleichrichterschaltungen	321
16.2	Spannungsstabilisierung	325
16.2.1	Ungeregelte Stabilisierungsschaltungen	326
16.2.2	Kontinuierliche Spannungsregler	326
16.2.3	Diskontinuierliche Spannungsregler	328
16.2.3.1	Drosselregler	329
16.2.3.2	Ladungspumpen	333
16.3	Erzeugung von Referenzspannungen	335
16.3.1	Referenzspannungsquellen mit Z-Dioden	335
16.3.2	Bandgap-Referenz	336
16.4	Schaltnetzteile	338
16.5	Aufgaben	341
17	Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler	342
17.1	Kennwerte von A/D- und D/A-Wandlern	343
17.1.1	Stationäre Kennwerte	343
17.1.2	Dynamische Kennwerte	346
17.2	A/D-Wandlungsverfahren	347
17.2.1	A/D-Wandlung nach dem Zählverfahren	349
17.2.2	A/D-Wandlung mit sukzessiver Approximation	350
17.2.3	A/D-Wandlung nach dem Parallelverfahren	351
17.2.4	Folding-Interpolating A/D-Wandler	352
17.2.5	A/D-Wandlung nach dem Pipeline-Verfahren	353
17.2.6	Sigma-Delta-Wandler	354
17.3	D/A-Wandlungsverfahren	356
17.3.1	D/A-Wandlung nach dem Zählverfahren	358
17.3.2	D/A-Wandlung nach dem Wägeverfahren	358
17.3.3	D/A-Wandlung nach dem Parallelverfahren	362
17.3.4	Fehlerkorrigierende D/A-Wandlung	362
17.4	Aufgaben	363
	Formelzeichen	365
	Literatur	369
	Index	373

1

Physikalische Grundlagen der Halbleiterelektronik

Ziel dieses Kapitels ist es, aufzuzeigen, weshalb Halbleiter als Basismaterial elektronischer Bauelemente und damit der gesamten Mikroelektronik so hervorragend geeignet sind.

■ 1.1 Leitfähigkeit von Halbleitern

Für die Entwicklung neuartiger elektronischer Bauelemente mit ganz speziellen elektrischen Eigenschaften ist es wichtig, dass die Leitfähigkeit dieser Strukturen gezielt eingestellt werden kann und Möglichkeiten gefunden werden, diese auch während des Betriebs wunschgemäß zu steuern. Bei Metallen liegt diese Leitfähigkeit im Bereich $10^6 \dots 10^8$ S/m. Sie ist jedoch kaum steuerbar. Silizium, heute der wichtigste Halbleiter, weist im reinen Kristallzustand eine Leitfähigkeit von ca. $3 \cdot 10^{-4}$ S/m auf, was einem guten Isolator entspricht und sich damit eigentlich nicht zur Realisierung elektronischer Bauelemente eignet. Sein Vorteil ist jedoch, dass es technische Möglichkeiten gibt, die Leitfähigkeit bis in den Bereich von $3 \cdot 10^5$ S/m gezielt zu verändern.

Die Leitfähigkeit eines Stoffes wird von der Dichte (Anzahl pro Volumeneinheit) seiner frei beweglichen Elektronen bestimmt.

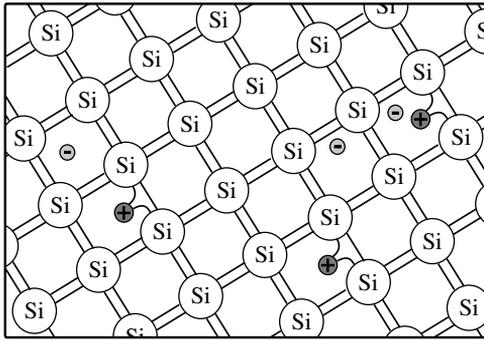
Halbleiter unterscheiden sich von metallischen Leitern durch ihren kristallinen Aufbau, die Bindungsverhältnisse zwischen den Atomen, die Leitungsmechanismen und die Leitfähigkeit.

Kristalline Struktur. Halbleiter, wie Silizium und Germanium, besitzen eine stabile kristalline Struktur, in der jedes Atom vier gleich weit entfernte Nachbaratome besitzt (Diamantgitter). Die kovalente Bindung zwischen diesen Atomen bezieht alle Valenzelektronen dieser 4-wertigen Materialien ein. Für eine Doppelbindung zwischen zwei benachbarten Atomen liefert jeder Partner ein Valenzelektron. Dieser feste Bindungszustand existiert insbesondere bei der Temperatur von 0 K. Der Halbleiter verhält sich dann wie ein Isolator. Es existieren keine freien Elektronen, die einen Stromfluss bewirken könnten.

1.1.1 Eigenleitung

Mit dem Begriff Eigenleitung wird der unbeeinflusste Leitfähigkeitszustand eines reinen kristallinen Halbleiters bezeichnet.

Durch Wärmezufuhr geraten die Atome, und somit das gesamte Kristallgitter, in Schwingungen. Dies führt zum Aufbrechen einzelner Bindungen. Ein Elektron, das aus seiner Atombin-



⊖ Elektron ⊕ Loch

Bild 1.1 Schematische Darstellung der Atombindungen im Siliziumkristall bei Eigenleitung

dung herausgelöst wurde, kann sich im Kristallgitter frei bewegen. Da es negativ geladen ist, hinterlässt es eine positiv geladene ungesättigte Bindung, ein „Defektelektron“ oder „Loch“. Der Vorgang stellt die Generation eines Elektronen-Loch-Paares dar (Bild 1.1). Die ungesättigte Bindung ist in der Lage, freie Elektronen, die sich in unmittelbarer Nähe aufhalten, einzufangen. Durch diese Rekombination eines Elektrons mit einem Loch wird der neutrale Zustand der Bindung wiederhergestellt.



Die Elektronendichte n_0 und die Löcherdichte p_0 in einem ungestörten Halbleiter sind immer gleich groß. Dieser Wert wird als Eigenleitendichte n_i bezeichnet.

$$n_i = n_0 = p_0 \tag{1.1}$$

Die Eigenleitendichte ist ein statistischer Mittelwert. Sie wird von der Kristalltemperatur und der materialbedingten Generationsenergie W_g zum Aufbrechen der Bindung bestimmt. Im technisch nutzbaren Temperaturbereich ist nur ein sehr geringer Teil der Valenzelektronen frei beweglich (siehe Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1 Parameter wichtiger Halbleitermaterialien

	Si	Ge	GaAs
Atome je Volumeneinheit	$4,99 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$	$4,43 \cdot 10^{22}$
Bandabstand W_g	1,11 eV	0,67 eV	1,43 eV
Eigenleitendichte n_i bei 300 K	$1,5 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^6$

Die Temperaturabhängigkeit der Eigenleitendichte ergibt sich nach der Fermi-Dirac-Statistik zu

$$n_i^2 = n_{i0}^2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \exp \left(- \frac{W_g(T - T_0)}{k T T_0} \right) \tag{1.2}$$

n_{i0} n_i bei der Bezugstemperatur T_0
 k Boltzmann-Konstante ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K)

Der Exponentialterm bestimmt das Verhalten.

Ladungsträgerlebensdauer. Freie Ladungsträger besitzen zwischen Generation und Rekombination eine mittlere Lebensdauer τ von einigen Mikrosekunden. Dieser Wert wird entscheidend von der Qualität der kristallinen Struktur des Halbleiters und der Größenordnung möglicher Verunreinigungen des Materials beeinflusst.

Aufgrund der Braunschen Bewegung legen die Ladungsträger in dieser Zeit eine mittlere Wegstrecke L , die sogenannte Diffusionslänge zurück.

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (1.3)$$

D Diffusionskonstante der Ladungsträger

Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes im Halbleiter kann diese ungerichtete Bewegung der Ladungsträger eine Vorzugsrichtung erhalten.

Bändermodell. Der energetische Zustand der Ladungsträger wird im Bändermodell grafisch verdeutlicht.

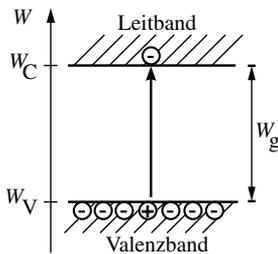


Bild 1.2 Bändermodell eines Eigenhalbleiters

Sind Valenzelektronen an der Atombindung beteiligt, besitzen sie eine feste Bindungsenergie $W = W_V$. Sie befinden sich im Valenzband des Bändermodells. Sind sie aus der Atombindung herausgelöst, befinden sie sich im Leitband. Sie besitzen dann eine Energie $W \geq W_C$. Für diesen Übergang vom Valenzband ins Leitband muss ihnen mindestens die Energie W_g zugeführt worden sein. Ein Elektron kann keinen energetischen Zustand in der *verbotenen Zone* zwischen Valenzband und Leitband einnehmen.

1.1.2 Halbleiter mit Störstellen

Das Einbringen von Fremdatomen in das Kristallgitter (Störstellen) ermöglicht die gezielte Erzeugung freier Elektronen und Löcher und somit die Beeinflussung der Leitfähigkeit des Halbleiters [1.1].

Donatoren (5-wertige Störstellen) führen zu einem Energieniveau W_D innerhalb der verbotenen Zone mit einem sehr geringen Abstand zur Leitbandkante W_C . Entsprechend reicht eine sehr geringe Energiezufuhr aus, um diese Störstelle zu ionisieren. Das Störatom gibt sein 5. Valenzelektron in das Leitband ab. Es entsteht ein frei bewegliches Elektron und eine ortsfeste positiv ionisierte Störstelle, aber kein Loch. Im Halbleiter herrscht Elektronenüberschuss. Man spricht von einem n-Halbleiter (siehe Bilder 1.3 und 1.5).

Akzeptoren (3-wertige Störstellen) bewirken ein Energieniveau W_A innerhalb der verbotenen Zone nahe der Valenzbandkante. Ein Valenzbandelektron braucht nur eine sehr kleine

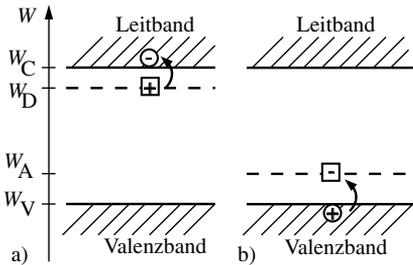


Bild 1.3 Bändermodell eines a) n-Halbleiters und b) p-Halbleiters

Energiestufe zu überwinden, um dieses Energieniveau zu besetzen und die Störstelle negativ zu ionisieren. Es hinterlässt im Valenzband ein Loch. Die Elektronendichte im Leitband bleibt unverändert. Im Halbleiter entsteht ein Überschuss an frei beweglichen Löchern. Ein p-Halbleiter liegt vor.

Tabelle 1.2 Bandabstand ΔW der Energieniveaus wichtiger Störstellenmaterialien bei Silizium

Akzeptor $\Delta W = W_A - W_V$		Donator $\Delta W = W_C - W_D$	
B	0,045 eV	P	0,044 eV
In	0,160 eV	As	0,049 eV
Al	0,057 eV	Sb	0,039 eV

Störstellenerschöpfung. Bei den gebräuchlichen Halbleitern sind im technisch relevanten Temperaturbereich alle vorhandenen Störstellen ionisiert. Es herrscht Störstellenerschöpfung. Da die Dichte der in einen Halbleiter eingebrachten Störstellen (Akzeptordichte N_A , Donatordichte N_D) genau festgelegt werden kann, besitzt die Dichte der ionisierten Störstellen (N_A^- bzw. N_D^+) und die Dichte der beweglichen Ladungsträger (p bzw. n) bei Störstellenerschöpfung einen definierten Wert. Es gilt im p-Halbleiter $p = N_A^- = N_A$ bzw. im n-Halbleiter $n = N_D^+ = N_D$.

Störstellenreserve. Bei Störstellenreserve sind nicht alle Störstellen ionisiert. Gewöhnlich ist das nur bei extrem niedrigen Temperaturen der Fall, bei phosphordotiertem Silizium z. B. bis ca. 70 K.

Wird ein Halbleiter mit Donatoren und Akzeptoren dotiert, so erfordert die Ladungsneutralität:

$$p + N_D^+ = n + N_A^-$$

Die Störstellenart mit der höheren Konzentration dominiert und bestimmt den Leitfähigkeitstyp. Bei $N_D > N_A$ liegt ein n-Halbleiter mit $n_n = N_D - N_A$ vor. Bei $N_A > N_D$ ergibt sich ein p-Halbleiter mit $p_p = N_A - N_D$.

Massenwirkungsgesetz. Nach dem Massenwirkungsgesetz ist in einem nach außen hin neutralen Halbleiter (Thermodynamisches Gleichgewicht), unabhängig von seiner Störstellendichte, das Produkt aus Elektronen- und Löcherdichte eine Materialkonstante. Es gilt

im p-Halbleiter:
$$n_p \cdot p_p = n_i^2 \tag{1.4}$$

im n-Halbleiter:
$$n_n \cdot p_n = n_i^2 \tag{1.5}$$

Im n-Halbleiter überwiegen die Elektronen und stellen somit die *Majoritätsträger* dar. Die Löcher bilden hier die *Minoritätsträger*. Praktisch sinnvolle Störstellendichten beinhalten einen Unterschied zwischen Majoritäts- und Minoritätsträgerdichten von mehr als 10 Größenordnungen.

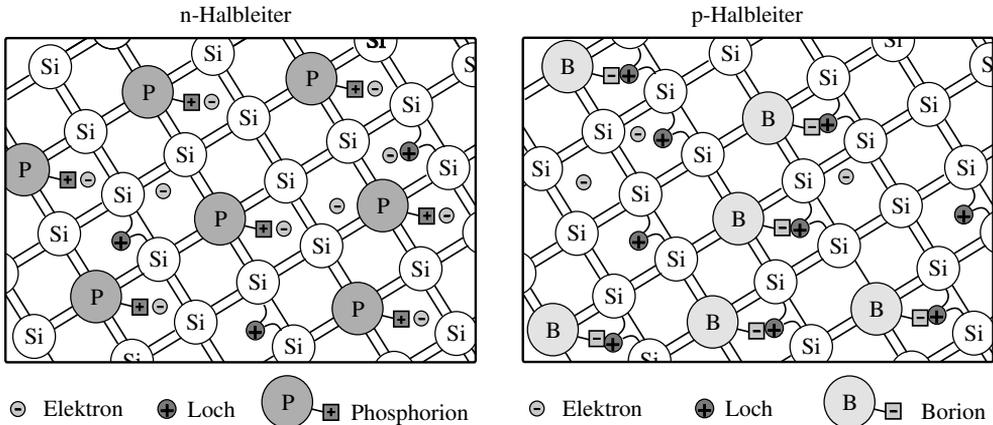


Bild 1.4 Schematische Darstellung der Ladungen im n-Halbleiter bzw. p-Halbleiter

Beispiel 1.1

Ein Si-Halbleiter ist mit einer Akzeptorendichte von $N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ dotiert. Wie groß sind Löcher- und Elektronendichte bei Raumtemperatur und Störstellenschöpfung?

Lösung:

Die Eigenleitendichte von Silizium beträgt bei Raumtemperatur (300 K) $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Damit folgt

$$p_p = N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad \text{und}$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} = 7,5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}.$$

■

Beispiel 1.2

Bei welcher Temperatur erreicht die Eigenleitendichte eines Siliziumhalbleiters den Wert $n_i^2 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$?

Lösung:

$$n_i^2 = n_{i0}^2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \cdot e^{\frac{W_g(T-T_0)}{kTT_0}}$$

Eine analytische Auflösung dieser nichtlinearen Gleichung nach T ist nicht möglich. Bei hohen Temperaturen dominiert der Exponentialterm diese Gleichung jedoch sehr stark, sodass bei 300 K die Näherung

$$n_i^2 \cong n_{i0}^2 \cdot e^{\frac{W_g(T-T_0)}{kTT_0}}$$

gerechtfertigt ist. Die Auflösung dieser Gleichung liefert:

$$T \cong \frac{T_0}{1 - \frac{k T_0}{W_g} \ln \frac{n_i^2}{n_{i0}^2}}$$

Mit den Werten $T_0 = 300 \text{ K}$, $n_{i0} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $W_g = 1,11 \text{ eV}$ und $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws} \cdot \text{K}^{-1}$ ergibt sich $T = 509 \text{ K}$.



Leitfähigkeit. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit κ eines Halbleiters wird durch die frei beweglichen Ladungsträger beider Ladungsträgerarten bestimmt. Es gilt:

$$\kappa = e \mu_n n + e \mu_p p \tag{1.6}$$

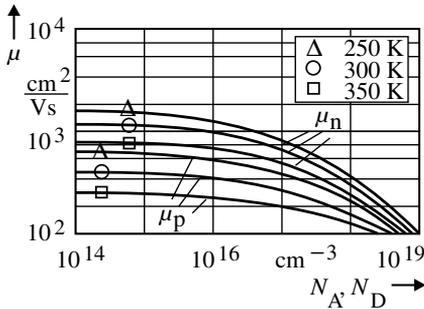


Bild 1.5 Beweglichkeit der Elektronen und Löcher im Silizium

Als Proportionalitätsfaktoren treten die Elementarladung eines Elektrons $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ und die Beweglichkeiten der Löcher μ_p und Elektronen μ_n auf. Die Beweglichkeiten sind Materialkenngrößen. Sie werden vom Abstand der Atome im Kristallgitter, von der Qualität der Kristallstruktur, der Dichte der Störstellen und der Stärke der temperaturabhängigen Gitterschwingungen beeinflusst. Bild 1.5 verdeutlicht zwei Einflüsse.

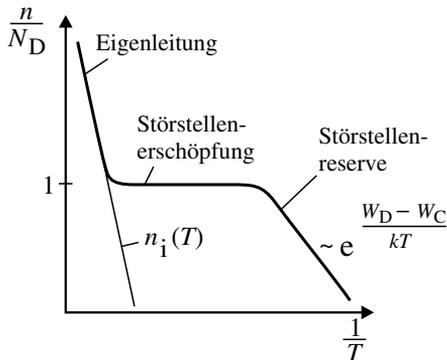


Bild 1.6 Temperaturabhängigkeit der Majoritätsträgerdichte im Halbleiter

Nutzbarer Temperaturbereich. Der sinnvolle Einsatz von Halbleiterbauelementen erfordert i. Allg. eine definierte Leitfähigkeit. Diese liegt nur bei Störstellenerschöpfung vor. Außerdem darf die Majoritätsträgerdichte nicht durch temperaturbedingt generierte Eigenleitungsladungsträger beeinflusst werden.

■ 1.2 Ladungsträgergeneration in Halbleitern

Die Generation von Elektronen-Loch-Paaren im Halbleiter ist auf drei Mechanismen zurückzuführen:

- thermische Generation G_{th} ,
- Fotogeneration G_{ph} ,
- Stoßionisation G_{Av} .

Bei thermischer Generation erfolgt die Energiezufuhr $\Delta W_{\text{th}} = W_{\text{g}}$ an das entstehende freie Elektron ausschließlich durch die thermische Energie des Halbleiters. Die Nettogenerationsrate G_{th} nach der Shockley-Reed-Beziehung (1.7) (häufig auch Nettorekombinationsrate R) ist nur dann verschieden von null, wenn die Ladungsträgerdichte von n_i abweicht. Ein Anstieg oder ein Sinken der Ladungsträgerdichte zum Gleichgewichtszustand hin ist damit verbunden.

$$G_{\text{th}} = -R = \frac{n_i^2 - np}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (1.7)$$

τ_p, τ_n Löcher- bzw. Elektronenlebensdauer
 n_1, p_1 Materialkenngrößen

Ein wichtiger Sonderfall liegt bei starker Verarmung von beweglichen Ladungsträgern vor ($n, p \ll n_i$).

$$G_{\text{th}} = \frac{n_i}{\tau_s} \quad \text{mit} \quad (1.8)$$

$$\tau_s = \frac{\tau_p n_1 + \tau_n p_1}{n_i} \quad (1.9)$$

τ_s Ladungsträgerlebensdauer in einer Verarmungszone

Einfallendes Licht verursacht eine Generation, wenn die Frequenz f des Lichtes der Beziehung (1.10) genügt. Die Energie eines Lichtquants W_{ph} muss größer als die Breite der verbotenen Zone sein.

$$W_{\text{ph}} = h \cdot f \geq W_{\text{g}} \quad (1.10)$$

h Plancksches Wirkungsquantum

Die Generationsrate in der Tiefe x des Halbleiters ist proportional zum Photonenstrom Φ_{g} , der in den Halbleiter eindringt.

$$G_{\text{ph}} = \beta(\lambda) \Phi_{\text{g}} \cdot e^{-\beta(\lambda)x} \quad (1.11)$$

$\beta(\lambda)$ Absorptionskoeffizient des Halbleiters

Werden Ladungsträger durch ein elektrisches Feld im Halbleiter sehr stark beschleunigt, kann ihre kinetische Energie ausreichen, um bei einem Aufprall auf ein Gitteratom ein weiteres Elektronen-Loch-Paar zu erzeugen, d. h. eine bestehende Bindung aufzubrechen. Die Generationsrate bei dieser Stoßionisation wächst mit der Feldstärke und den Ladungsträgerdichten. Der Generationsvorgang kann zur lawinenartigen Ladungsträgervervielfachung führen. Die Leitfähigkeit des Halbleiters wird extrem groß. Meist führt ein unerwünschtes Auftreten dieser Stoßionisation zum Ausfall elektronischer Bauelemente.

Ladungsträgerkontinuität. In einem infinitesimalen Volumenelement des Halbleiters muss sowohl für Elektronen als auch für Löcher stets die Bilanzgleichung der Ladungsträgerkontinuität erfüllt sein. In eindimensionaler Form gilt für den Elektronenstrom \vec{I}_n sowie den Löcherstrom \vec{I}_p an jeder Stelle x :

$$\frac{d\vec{I}_p(x)}{dx} = -eA \left(\frac{dp(x)}{dt} - G \right) \quad (1.12)$$

$$\frac{d\vec{I}_n(x)}{dx} = eA \left(\frac{dn(x)}{dt} - G \right) \quad (1.13)$$

mit $G = G_{th} + G_{ph} + G_{Av}$

Auf der Grundlage dieser Vorgänge und Gleichungen ist eine Berechnung der Leitfähigkeit eines Halbleiters möglich.

■ 1.3 Ladungsträgertransport in Halbleitern

Der Transport von Ladungsträgern erfolgt im Halbleiter durch zwei Mechanismen.

- Aufgrund ihrer elektrischen Ladung werden Elektronen und Löcher durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Es entsteht ein feldstärkeabhängiger Stromanteil (Feldstrom).
- Inhomogene Ladungsträgerdichteverteilungen verursachen einen Diffusionsstrom mit dem Ziel der Gleichverteilung der Ladungsträger im Halbleiter. Ursache hierfür ist die thermische Energie der Ladungsträger. Der Diffusionsstromanteil ist proportional zum Dichtegradienten.

Aus der Summe beider Anteile ergibt sich für den Elektronen- bzw. Löcherstrom in eindimensionaler Form:

$$\vec{I}_n = eA \left(n(x)\mu_n \vec{E}(x) + \frac{d(n(x) \cdot D_n)}{dx} \right) \quad (1.14)$$

$$\vec{I}_p = eA \left(p(x)\mu_p \vec{E}(x) - \frac{d(p(x) \cdot D_p)}{dx} \right) \quad (1.15)$$

D_n, D_p Diffusionskoeffizienten der Elektronen bzw. Löcher
 A Querschnittsfläche des Halbleiters

Die Diffusionskoeffizienten sind proportional zu den Beweglichkeiten.

$$D_n = \mu_n U_T \quad D_p = \mu_p U_T \quad (1.16)$$

Proportionalitätsfaktor ist die Temperaturspannung:

$$U_T = \frac{kT}{e} \quad (1.17)$$

Ein Ladungsträgertransport ist im physikalischen Sinn eine Bewegung von frei beweglichen Elektronen. Diese entspricht einem Stromfluss an der entsprechenden Stelle des Halbleiters.

Eine Erweiterung der bereits im Abschnitt 1.1.1 eingeführten Modellvorstellung eines positiv geladenen Loches besteht darin, dieses Loch als bewegliche Ladung aufzufassen. Eine Berechtigung für diese Überlegung ergibt sich, wenn man davon ausgeht, dass im thermodynamischen Gleichgewichtszustand des Halbleiters bei einer mittleren Rekombinations-Generations-Rate R nach Shockley-Reed an einigen Orten Löcher „vernichtet“ und an anderen Orten Löcher generiert werden, wobei deren Gesamtzahl (Löcherdichte) unverändert bleibt. Dies lässt sich als Löcherbewegung interpretieren. Diese Modellvorstellung erleichtert die späteren Betrachtungen erheblich. Physikalisch haben sich jedoch Elektronen bewegt, indem eine ungesättigte Bindung ein Elektron eingefangen hat und eine andere Bindung aufgebrochen wurde.

Aus diesen Gleichungen sind die Zusammenhänge zwischen Strom und Spannung an einem elektronischen Halbleiterbauelement berechenbar.

■ 1.4 Aufgaben

Aufgabe 1.1

Wie groß ist die Löcher- bzw. Elektronendichte in einem Siliziumhalbleiter bei $T = 250$ K, $T = 300$ K und $T = 350$ K, wenn Eigenleitung vorliegt?

Aufgabe 1.2

Wie groß ist die Leitfähigkeit eines Siliziumhalbleiters bei einer Donatordichte von $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ und im undotierten Halbleiter bei $T = 300$ K?

Aufgabe 1.3

Bestimmen Sie die Diffusionslänge eines Elektrons in einem mit $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dotiertem Siliziumhalbleiter bei $T = 300$ K, wenn die mittlere Ladungsträgerlebensdauer $0,2 \mu\text{s}$ beträgt!

Aufgabe 1.4

Welche Frequenz und Wellenlänge benötigt einfallendes Licht, damit in einem Siliziumhalbleiter Fotogeneration eintritt?

Aufgabe 1.5

In einem mit Bor dotierten Halbleiter ($N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) wird Phosphor mit einer Konzentration von $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ eingebracht. Welche Elektronen- und Löcherdichte besteht vor bzw. nach der Phosphordotierung?

2

Berechnungsmethoden elektronischer Schaltungen

Die in diesem Buch behandelten elektronischen Schaltungen umfassen ausschließlich Lösungen zur Verarbeitung kontinuierlicher Signale. Diese Signale sind i. Allg. Ströme und Spannungen, deren Informationsgehalt durch stetige Zeitfunktionen beschreibbar ist. Elektronische Schaltungen realisieren signalverarbeitende Funktionen durch Netzwerke aus elektronischen Bauelementen. Die wichtigsten Funktionseinheiten sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt. Sie werden durch charakteristische Baugruppen realisiert. Durch Zusammenschalten solcher Funktionseinheiten lassen sich komplexe signalverarbeitende Systeme zusammensetzen.

Tabelle 2.1 Funktionseinheiten der Analogtechnik

Funktion	Schaltung
Signalverstärkung	Spannungsverstärker – Breitband-V. – Leistungs-V. – Instrumentations-V. – Isolations-V. – Hochfrequenz-V. – Operationsverstärker
Signalerzeugung	Oszillatoren: LC-, RC-, Quarz-Oszillatoren Signalgeneratoren: Sinus-, Rechteck-, Dreieck-, Sägezahn-G. Konstantstrom-, Konstantspannungs-, Referenzspannungsquellen Gesteuerte Quellen Gesteuerte Oszillatoren: Spannungsgesteuerte Oszillatoren (VCOs), digital gesteuerte Oszillatoren (DCOs)
Signalverknüpfung	Summierer, Multiplizierer, Dividierer, Modulator, Demodulator
Signalformung	Filter, Integrator, Differenzierer, Logarithmierer
Signalwandlung	A/D- und D/A-Wandler, U/I- und I/U-Wandler, Q/U-Wandler, U/f-Wandler
Signalaufnahme	Sensoren
Signalausgabe	Aktoren, Anzeigeelemente
Betriebsspannungsversorgung	Gleichrichter, Siebglied, Spannungsregler, Schaltnetzteile, DC/DC-Wandler

Für alle wichtigen Funktionseinheiten existieren zahlreiche schaltungstechnische Umsetzungen, bei denen sich die funktionelle Qualität und der Bauelementeaufwand proportional verhalten. In den meisten Fällen werden die Funktionsgruppen durch die Kombination von typischen analogen Grundsaltungen realisiert. Die Kenntnis dieser universell einsetzbaren Baublöcke gehört zum wichtigsten Handwerkszeug des Schaltungstechnikers. Zu ihnen gehören Verstärkerstufen, Differenzstufen, Stromspiegel, Referenzspannungsquellen, Stromquellen und Leistungsstufen.

Schaltungssynthese. Für analoge Schaltungen ist eine automatische Schaltungssynthese zu einer vorgegebenen Systemfunktion mittels Software, wie sie für digitale Schaltungen existiert.

Index

A

A-Betrieb 193
AB-Betrieb 198
Abfallzeit 52, 91
Abtastfilter 261
Abtastfrequenz 347
Abtast-Halte-Glied 350
Abtastrate 346
Abwärtswandler 329
Addierer 231
Admittanzmatrix 29
A/D-Wandler 342
aktiver Bereich 69
Akzeptoren 15
AM-Demodulator 307
AM-Modulator 305
Amplitudenbedingung 222, 290
Amplitudenfrequenzgang 35, 258
Amplitudenmodulation 304
Anreicherungs-Typ 103
Anstiegszeit 90
aperiodischer Grenzfall 288
Apertur-Fehler 346
Arbeitsbereich, sicherer 72
Arbeitspunkteinstellung 73, 165
Arbeitspunktstabilisierung 83, 171
Arbeitspunktverschiebung 75
Arbeitspunktwahl 170, 175, 177
Atombindung 14
Auflösung 342, 356
Aufwärtswandler 331
Ausgangskennlinie 68
Ausgangsleitwert 111, 120
Ausgangswiderstand 76, 177
Ausschaltfaktor 90
Aussteuerbereich 170, 175, 177
automatische Verstärkungssteuerung 147

B

Backgatesteilheit 114
Bahnwiderstand 48

Bandabstand 16
Bandbreite 199, 215, 226
Bändermodell 15
Bandgap-Referenz 336
Bandmittenfrequenz 199
Bandpass 262
– 2. Ordnung 274 f.
Bandsperre 262, 278
– 2. Ordnung 278
Basisbahnwiderstand 79
Basisschaltung 80, 173, 177
Basisstromspeisung 74
Basisweite 65
–, elektronische 71, 85
B-Betrieb 196
Besselfilter 260
Besselfunktion 311
Betriebsbereich, nutzbarer 46, 72, 106
Betriebsparameter 33, 163
Beweglichkeit 18
Bipolartransistor 65
– als elektronischer Schalter 86
– als Verstärker 74
Biquad 261
Bodediagramm 35
Body-Effekt 114
Bootstrap-Effekt 216
Bootstrap-Kapazität 216
Brückengleichrichter 322
Butterworthfilter 260, 280

C

Carson-Bandbreite 312
Cauerfilter 260
CC-OPV 147
CMOS-Inverter 116
CMRR 183
Colpitts-Oszillator 313
Current Conveyor Typ II 148
Current-Feedback-OPV 147
CV-OPV 147, 248

D

Darlington-Schaltung 192
 D/A-Wandler 342
 –, fehlerkorrigierender 362
 D/A-Wandlungsverfahren 356
 Depletion-MOSFET 106
 Depletion-Typ 103
 Dezimierer 354
 Diac 98
 Diamond-Transistor 148, 250
 differenzielle Nichtlinearität 343
 Differenzierer 235
 Differenzverstärker 181, 188
 Differenzverstärkung 135, 182
 Diffusionskapazität 46, 48
 Diffusionslänge 15
 Diffusionsspannung 43
 Diffusionsstrom 20, 43
 Diode, thermische 158
 Diodenkennlinie 25, 69
 Diodenrauschen 127
 Diodensättigungsstrom 44, 52
 Diskriminator 314
 Dividierer 242
 DMOS-FET 117
 Donatoren 15
 Draindurchbruch 107
 Drainschaltung 178
 Driftquelle 84
 Driftverstärkung 172
 Drosselregler 329
 Dual-Slope-Verfahren 349
 Dunkelstrom 151
 Dunkelwiderstand 150
 Durchbruch 72
 Durchbruchspannung 45
 Durchflusswandler 339

E

Early-Effekt 70, 111
 Early-Spannung 70
 Ebers-Moll-Ersatzschaltbild 68
 Ebers-Moll-Modell 68
 Eigenleitung 13
 Eigenleitungsdichte 14
 Eingangskennlinie 68 f.
 Eingangswiderstand 76, 177
 Einschaltverzögerung 89
 Einschwingverhalten 224

Einweggleichrichter 321
 Einweggleichrichterschaltung 53
 Elektrometerverstärker 216, 230
 Elementarladung 18
 elliptische Filter 260
 Emitterfolger 175
 Emitterschaltung 77, 80, 165, 177
 –, Kleinsignalersatzschaltbild 166
 Empfindlichkeit, spektrale 150
 Enhancement-Typ 103
 ENOB 345
 Epitaxie-Planar-Transistor 65
 ER-Inverter 115
 Ersatzschaltbild 25
 –, h -, y -, π - 32
 – zur Arbeitspunkteinstellung 73

F

Feldeffekttransistor 102
 Feldstrom 20
 Fensterkomparator 245
 Fermipotenzial 109
 FET 102
 Filter, elliptische 260
 –, passive 262
 Filterapproximation 259, 284
 Filterkatalog 267
 Filterrealisierung 261
 Filterschaltung 257
 Filtertoleranzschema 259
 Flash-Wandler 351
 Flussspannung 45
 FM-Demodulator 314
 FM-Modulator 313
 Fotodiode 151
 Fotogeneration 19, 150 f.
 Fotosensor 150
 Fotostrom 151
 Fototransistor 152
 Fotowiderstand 150
 Freilaufdiode 55
 Frequenzgang 81, 139, 199, 216
 Frequenzgangkompensation 227
 Frequenzgangkorrektur 225
 Frequenzhub 316
 Frequenzmodulation 310
 Frequenzumsetzer 303
 Funkelrauschen 127
 Funktionsgenerator 298

G

Gatedurchbruch 106

Gateschaltung 178
 Gegenkopplung 206 f.
 Gegentaktwandler 340
 Generation 14
 –, thermische 19
 Gleichrichterdiode 53
 Gleichrichterschaltung 321
 Gleichstromwiderstand 46
 Gleichtaktunterdrückung 135, 183
 Gleichtaktverstärkung 135, 183
 Grenzfrequenz 82, 113, 151, 214, 257
 – des Transistors 80
 Großsignalersatzschaltung 50
 Großsignalanalyse 26
 Gruppenlaufzeit 258
 GTO-Thyristor 98
 Gummel-Poon-Modell 88
 Gunn-Diode 62
 Gunn-Effekt 62
 Güte 263
 Gütefaktor 275

H

Hall-Effekt 158
 Hall-Element 159
 Hall-Spannung 159
 Heißleiter 156
 HF-Ersatzschaltbild 78
 Hochfrequenz-Kleinsignalmodell 78
 Hochfrequenzverhalten 112
 Hochpass, 1. Ordnung 274
 – 2. Ordnung 271
 Hüllkurvendetektor 314
 Hybridmatrix 29
 Hysterese 243

I

IGFET 103
 Impedanzmatrix 29
 Impulsoszillator 298
 Impulszündung 98
 instabile Rückkopplung 207
 integrale Nichtlinearität 343
 Integrator 238
 integrierter Schaltregler 333
 Intrinsic-Zone 54
 Inversbetrieb 67
 Invershybridmatrix 29
 Inverter 115
 invertierender Wandler 332

J

JFET 103
 Jitterfehler 346

K

Kaltleiter 157
 Kanalabschnürung 105
 Kanalladung 108
 Kanallängenverkürzung 111
 Kanalrauschen, thermisches 128
 Kanalstrom 109
 Kapazitätsdiode 58, 313
 kapazitive Kopplung 200
 Kaskodeschaltung 179
 –, Betriebsparameter 180
 Kettenmatrix 29, 32
 Kettenschaltung 32
 Kirk-Effekt 85
 Klasse-A-Verstärker 193
 Klasse-AB-Verstärker 198
 Klasse-B-Verstärker 196
 Kleinsignalanalyse 27
 Kleinsignalersatzschaltbild 27
 – des pn-Übergangs 48
 Kleinsignalersatzschaltung 27
 Kleinsignalmodell 75 f., 162
 – der Diode 48
 – des MOSFET 110
 Kleinsignalverhalten 47, 119
 Klirrfaktor 28, 311
 Kollektorschaltung 175, 177
 –, Betriebsparameter 176
 Komparator 243
 Konstantstromquelle 191
 Kopplung, direkte 200
 –, kapazitive 200
 –, *RC*- 200

L

Ladungspumpe 333
 –, integrierte 335
 Ladungsspeicherung 46
 Ladungsträgerlebensdauer 15, 19
 Ladungsträgertransport 20
 Laserdiode 154
 Laufzeit 47
 Lawinendurchbruch 46
 Lawineneffekt 56
 Lawinenvervielfachung 61
LC-Oszillator 293

Leistungsbilanz 28, 194
 Leistungsendstufe 193
 Leistungsschalter 332
 Leitfähigkeit 13, 18
 Leitwertmatrix 81
 Leitwertparameter 110
 Leuchtdiode 153
 Linearisierung 209
 Linearität 28
 Linearitätsfehler 343
 Löcherdichte 21
 Logarithmierer 243

M

Magnetfeldsensor 158
 Magnetwiderstand 158
 Majoritätsträger 17
 MESFET 118
 Mikrowellendiode 61
 Miller-Effekt 215
 Miller-Kapazität 226
 Minoritätsträger 17
 Mischer 317
 MISFET 103
 Mitkopplung 206 f., 222, 290
 Mittelpunktgleichrichter 322
 Modulationsgrad 304
 Modulationsindex 310
 Modulator 354
 Monotonie 346
 MOSFET 103
 – als elektronischer Schalter 115
 –, Kleinsignalmodell 110
 –, selbstleitender 103
 –, selbstsperrender 103
 MSB 350
 Multiplizierer 241

N

Nachlaufsynchronisation 308
 Nachziehfehler 346
 Nettogenerationsrate 19
 Nettorekombinationsrate 19
 NF-Verhalten 48
 NF-Verstärkung 139
 Nichtlinearität, differenzielle 343
 –, integrale 343
 Niederfrequenz-Kleinsignalmodell 76
 Niederfrequenzverhalten 111

NTC-Widerstand 156
 Nyquistkriterium 222

O

Offsetfehler 343
 Offsetspannung 136
 Offsetspannungsdrift 201
 Operationsverstärker 133
 –, frequenzgangkompensierter 226
 Operationsverstärkertypen 146
 Optokoppler 156
 OPV 133
 OPV-Schaltung 229
 OrCAD 37
 Ortskurve 35, 79
 Oszillator 207
 –, spannungsgesteuerter 309
 OTA 189
 oversampling 354

P

Parallelresonanzkreis 266
 Parallelschaltung 33
 Parallelschwingkreis 293
 Parameterempfindlichkeit 211
 Pegelversatzstufe 201
 Pentodenbereich 105
 Phasenanschnittsteuerung 98
 Phasenbedingung 222, 289
 Phasendetektor 309
 Phasenfrequenzgang 35, 258
 Phasenhub 316
 Phasenlaufzeit 258
 Phasenmodulation 315
 Phasenschieber 290
 Phasenschieber-Oszillator 290
 PID-Regler 253
 Pierce-Oszillator 296
 π -Ersatzschaltbild 78, 110
 Pinch off 105
 pin-Diode 54
 –, Durchbruchspannung 55
 Pipeline-Wandler 353
 PI-Regler 252
 PLL 308
 PLL-Demodulator 314
 PM-Demodulator 317
 PM-Modulator 316
 pnp-Transistor 67
 pn-Übergang 41
 Poisson-Gleichung 42
 Pole-Splitting-Kapazität 226

Polgüte 275
 P-Regler 252
 PSpice 37
 PTAT-Spannung 336
 PTC-Widerstand 157
 Pulsdichtenmodulation 358
 Pulsweitenmodulation 358
 Punch Through 72

Q

Quantisierungsfehler 343
 Quantisierungsrauschen 355
 Quarzoszillator 295
 Quelle, gesteuerte 25

R

R2R-Netzwerk 360
 Rauschen 125, 145
 –, $1/f$ - 127, 129
 –, weißes 125
 Rauschfaktor 130
 Rauschleistungsdichte 125
 Rauschmaß 130
 Rauschspannung 129
 RC-Biquad 280
 RC-Filter, aktive 266
 RC-Hochpass 262
 RC-Kopplung 200
 RC-Oszillator 290
 RC-Tiefpass 262
 Rechenregeln, für Blockschaltbilder 37
 Rechenschaltung 231
 Referenzspannungsquelle 326, 335, 337
 Referenzstromquelle 190
 Regler 251
 Reihenschaltung 33
 Rekombination 44
 –, direkte 153
 Relaxationsoszillator 299
 Resonanzfrequenz 264
 Resonanzkreis 314
 Resonanzschärfe 263
 Reststrom 71
 RL-Hochpass 262
 RL-Tiefpass 262
 Rückkoppelfaktor 207
 Rückkopplung, instabile 207
 –, stabile 207
 Rückkopplungsgrad 207
 Rückwirkungsfreiheit 28

S

Sallen & Key-Tiefpass 269, 284
 Sample & Hold 350
 Sättigungsspannung 86
 Sättigungsstrom 45, 119
 SC-Biquad 283
 SC-Filter 281
 Schaltodiode 55
 Schalter 65, 105, 115
 Schalterkennlinie eines pn-Übergangs 50
 Schaltermodell 87
 Schaltnetzteil 338
 Schaltregler, integrierter 333
 Schaltverhalten 50
 Schleifenverstärkung 207
 Schmitt-Trigger 243
 Schottky-Diode 60, 91
 Schottky-Transistor 91
 Schrotrauschen 127
 Schwellspannung 109, 114, 117
 Schwellwertschalter 243
 Schwingbedingung 222, 289
 Schwingungserzeugung 286
 Schwingungspaketsteuerung 99
 SC-Integrator 281
 Selbsterregung 207 f.
 Serienresonanzkreis 262, 266
 SFET 103, 118
 Shockley-Reed 21
 7-Segmentanzeige 154
 Sigma-Delta-Wandler 354
 Signalflussdarstellung 36
 Signal-Rausch-Abstand 130, 344, 355
 Signalverzerrung 49
 SINAD 344
 Sinusoszillatoren 286
 Slewrate 140, 144
 Solarzelle 152
 Sourcefolger 178
 Sourceschaltung 178
 Spannungsfestigkeit 72
 Spannungsfollower 230
 spannungsgesteuerter Oszillator 309
 Spannungsregler 326
 Spannungsrückwirkung 76
 Spannungsrückwirkungskennlinie 68
 Spannungsstabilisierung 325
 Spannungsstabilisierungsschaltung 57
 Spannungs-Strom-Wandler 147, 218
 Spannungsverstärker 147, 162, 218
 Spannungsverstärkung 81, 133, 177

Speicherladung 90
 Speicherzeit 51, 90
 Speicherzeitkonstante 90
 Sperrbereich 69, 105
 Sperrschicht 42
 Sperrschicht-FET 118
 Sperrschichtkapazität 46
 Sperrschichtweite 44
 Sperrstrom 44, 52, 83
 Sperrwandler 339
 Spiegelfrequenzproblem 319
 Spiegelverhältnis 186
 Sprungantwort 224
 stabile Rückkopplung 207
 Stabilisierungsfaktor 57, 64
 Stabilität 222, 225
 Steilheit 77, 111, 120
 Steilheitsverstärker 189, 209
 Störstelle 15
 Störstellenschöpfung 16
 Störstellenreserve 16
 Stoßionisation 19
 Strombank 187, 245
 Stromflusswinkel 98, 323
 Stromquelle 189, 245
 –, gesteuerte 189
 –, spannungsgesteuerte 245
 –, stromgesteuerte 245
 Strom-Spannungs-Kennlinie 108
 Strom-Spannungs-Wandler 147, 218
 Stromspiegel 185, 245
 Stromübertragungskennlinie 68
 Stromversorgungseinheit 321
 Stromverstärker 218
 Stromverstärker-OPV 147
 Stromverstärkung 76, 79, 85, 177
 Stromverstärkungsfaktor 80
 Struktur, kristalline 13
 Subtrahierer 232
 Superhet-Empfänger 319
 Swiched-Capacitor-Filter 281
 Symmetrie 28
 Synchrondemodulation 308

T

Temperaturabhängigkeit 83, 117
 Temperaturbeiwert 52, 83
 Temperaturdrift 200
 Temperaturdurchgriff 53, 83
 Temperaturkoeffizient 56

Temperaturmessfühler 156
 Temperatursensor 156
 Temperaturspannung 20, 43
 Thermistor 156
 Thermoelement 157
 Thermowiderstand 156
 Thomson-Filter 260
 Thyristor 95
 Tiefpass, 1. Ordnung 270
 – 2. Ordnung 266
 Tiefpass-Bandpass-Transformation 274
 Tiefpass-Bandsperren-Transformation 278
 Tiefpass-Hochpass-Transformation 271
 Tiefpassschaltung 2. Ordnung 267
 Toleranzschema 259
 Transadmittanzverstärker 147, 246
 Transferstromquelle 68
 Transimpedanzverstärker 147, 209, 248
 Transistor 65
 Transistorrauschen 128
 Transistorschalter 86
 Transistorschaltung, mehrstufige 221
 Transistorverstärkerschaltung, einstufige 177
 Transitfrequenz 80, 225
 Triac 98
 Triodenbereich 105, 110
 Tschebyschefffilter 260
 –, inverse 260
 Tunnel diode 60
 Tunneleffekt 56, 60

U

Überabtastrate 354
 Übersteuerung 69, 90
 Übersteuerungsgrad 70, 86, 88
 Übersteuerungszustand 70
 Übertragungsbandbreite 214
 Übertragungsverhalten 75
 Umkehrbarkeit 29
 Umkehrfunktion 242
 Umkehrverstärker 231
 Universalfilter 280

V

VCO 309
 VC-OPV 147, 246
 – als Leitungstreiber 247
 Verarmungs-Typ 103
 Verarmungszone 42
 Verstärker 65, 69, 74, 105
 –, invertierender 230
 –, nicht invertierender 229

Verstärkerstufe, Frequenzverhalten 199
–, Kopplung 200
Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt 140, 215
Verstärkungsfehler 343
Verstärkungssteuerung, automatische 147
Vierpol 28
Vierpolgleichung 29
Vierpoloszillator 289
Vierpolparameter 29, 75
–, Umrechnung 31
Vierquadrantenmultiplizierer 242
virtuelle Masse 231
VV-OPV 147

W

Wandler, invertierender 332
–, piezoelektrischer 159
–, piezoresistiver 159
Weak-Inversion-Strom 115

Widerstand, differentieller 48
–, thermischer 72
Widerstandsrauschen 125
Wien-Oszillator 291
WILSON-Spiegel 186, 189

Y

y-Parameter 81

Z

Z-Diode 56, 191
Zener-Effekt 56
Zone, verbotene 15, 153
Z-Spannung 56
Zündspannung 95
Zweipoloszillator 286
Zweiquadrantenmultiplizierer 242, 247
Zweiweggleichrichter 321