

Tietze/Schenk Halbleiter-Schaltungstechnik

U. Tietze · Ch. Schenk

Halbleiter-Schaltungstechnik

Korrigierter Nachdruck der dritten Auflage

Mit 889 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1976

Dipl.-Phys. Ulrich Tietze · Dipl.-Phys. Christoph Schenk
Die Autoren sind Mitarbeiter am Institut für Technische Elektronik
der Universität Erlangen-Nürnberg, 852 Erlangen, Cauerstraße 9

ISBN 978-3-662-07650-7 ISBN 978-3-662-07649-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-07649-1

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß §54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1969, 1971, 1974 and 1976
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1976
Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1976

Library of Congress Catalog Card Number 74-395

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Wir übernehmen auch keine Gewähr, daß die in diesem Buch enthaltenen Angaben frei von Patentrechten sind; durch diese Veröffentlichung wird weder stillschweigend noch sonstwie eine Lizenz auf etwa bestehende Patente gewährt.

Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg

Vorwort zur dritten Auflage

Die Entwicklung der Halbleitertechnik war in den vergangenen drei Jahren weniger durch spektakuläre Erfindungen gekennzeichnet als durch den enormen Preisrückgang der integrierten Schaltungen. Dadurch wurden Schaltungskonzepte interessant, die früher aus finanziellen Gründen indiskutabel erschienen. Diesem Umstand haben wir bei der Neuauflage Rechnung getragen und auch einige aufwendigere Analog- und Digitalerschaltungen aufgenommen. Dabei haben wir die bisherige Stoffeinteilung im wesentlichen beibehalten und lediglich mehr oder weniger umfangreiche Ergänzungen in den einzelnen Kapiteln vorgenommen.

Durch die oben erwähnte Verbilligung der integrierten Schaltungen haben die aktiven Filter immer größere praktische Bedeutung gewonnen. Aus diesem Grund haben wir ihnen in der dritten Auflage ein eigenes Kapitel gewidmet und die Koeffiziententabellen bis zur zehnten Ordnung erweitert. An dieser Stelle danken wir Herrn cand. ing. E. JACKSON, der im Rahmen einer Studienarbeit das Verhalten der aktiven Filter im Zeitbereich berechnet hat.

Für zahlreiche konstruktive Hinweise danken wir unseren Lesern, unseren Institutskollegen, sowie unseren früheren Kollegen in den Entwicklungsabteilungen der Firmen Hewlett-Packard GmbH, Böblingen, bzw. Robert Bosch GmbH, Reutlingen. Besonders danken wir Herrn Prof. Dr. D. SEITZER für die wohlwollende Unterstützung bei der Vorbereitung der dritten Auflage sowie dem Verlag für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Aus den zahlreichen anerkennenden Zuschriften konnten wir entnehmen, daß sich die zweite Auflage sowohl beim Studium als auch in der praktischen Entwicklungsarbeit gut bewährt hat. So bleibt uns zu hoffen, daß die vorliegende dritte Auflage diesem Ziel noch besser gerecht wird.

Erlangen, Juni 1974

U. TIETZE CH. SCHENK

Vorwort zur ersten Auflage

Die Elektronik dringt in immer weitere Gebiete von Wissenschaft und Technik vor. Sie beschränkt sich längst nicht mehr auf Nachrichtentechnik und Datenverarbeitung allein, sondern ist überall dort, wo es etwas zu messen oder zu regeln gilt, unentbehrlich geworden. Selbst wenn man dabei nur fertige Geräte zu bedienen hat, ist es oft notwendig, etwas über deren Funktionsweise zu wissen, um sie voll ausnützen zu können. Das vorliegende Buch soll helfen, die Wirkungsweise fertiger Schaltungen verstehen und auch selbständige neue entwerfen zu können. Naturwissenschaftler und Studierende der Hoch- und Fachschulen werden in dem Buch eine Einführung in die Halbleiterschaltungstechnik finden. Außerdem soll das Buch den Fachleuten eine ausführliche und kritische Übersicht über die vielfältigen Schaltungsmöglichkeiten bieten.

Die auf diesem Gebiet bisher vorliegende Literatur beschreitet zwei prinzipiell verschiedene Wege: Einmal werden fertig dimensionierte Schaltungen mit einer qualitativen Beschreibung angegeben. Das hat den großen Nachteil, daß man die Schaltungen exakt nachbauen muß und nicht den eigenen Betriebsbedingungen anpassen kann, wenn man nicht weiß, nach welchen Gesichtspunkten die Dimensionierung vorgenommen wird und wie man sie berechnet. Zum anderen werden einfache Schaltungen mit Hilfe der Vierpoltheorie sehr genau durchgerechnet. Das Ergebnis sind komplizierte Formeln, die sich nur schwer handhaben lassen. Hinzu kommt, daß man bei der Anwendung der Formeln die Daten der Halbleiter viel genauer kennen müßte, als sie vom Hersteller angegeben werden können.

Aus diesem Grund haben wir bei den Berechnungen von vornherein untergeordnete Effekte vernachlässigt. Dadurch vereinfachen sich die Formeln beachtlich, ohne daß sich das numerische Ergebnis nennenswert ändert. Es ist dann möglich, auch kompliziertere Schaltungen mit geringem mathematischem Aufwand zu berechnen.

Die meisten Halbleiterdaten unterliegen nicht nur einer beträchtlichen Fertigungstoleranz, sondern sind außerdem stark temperaturabhängig. Daher haben wir vorwiegend solche Schaltungen angegeben, deren Funktion von den Schwankungen der Halbleiterparameter nur wenig beeinflußt wird. In diesem Zusammenhang spielt die Gegenkopplung eine große Rolle. Wir haben deshalb den etwas ungewöhnlichen Weg beschritten, die Wirkungsweise und Schaltungstechnik der Gegenkopplung zunächst am Beispiel des idealen Operationsverstärkers zu

beschreiben, ohne uns dabei um seinen inneren Aufbau zu kümmern. Die dort eingeführte Denkweise wenden wir dann später auf viele Schaltungen an und gelangen dadurch zu einer besonders übersichtlichen Funktionsbeschreibung, die sich in der praktischen Entwicklungsarbeit außerordentlich gut bewährt hat.

Herrn Diplom-Physiker H. WENKING danken wir für manche gute Anregung, ebenso Herrn Gymnasial-Professor J. SAMULEIT, der in vielen Diskussionen mitgeholfen hat, die Arbeit zu fördern. Schließlich danken wir dem Verlag für die gute Zusammenarbeit.

Tübingen und Magstadt,
im Frühjahr 1969

U. TIETZE CH. SCHENK

Inhaltsverzeichnis

1	Erklärung der verwendeten Größen	1
2	Passive RC- und LRC-Netzwerke	6
2.1	Der Hochpaß	6
2.2	Der Tiefpaß	13
2.3	Anstiegszeit und Grenzfrequenz	16
2.4	Der Bandpaß	16
2.5	Wien-Robinson-Brücke	18
2.6	Doppel-T-Filter	19
2.7	Klangregelschaltung	21
2.8	Schwingkreis	23
3	Dioden	24
3.1	Kennlinien und charakteristische Daten	24
3.2	Z- und Avalanche-Dioden	26
4	Gleichrichterschaltungen und passive Stabilisierungsschaltungen	29
4.1	Einweggleichrichterschaltung	29
4.2	Vollweggleichrichterschaltung	31
4.3	Drehstrom-Brückengleichrichterschaltung	34
4.4	Spannungsverdoppler	35
4.5	Spannungsvervielfacher	37
4.6	Reihen- und Parallelschaltung von Dioden	37
4.7	Filterschaltungen	38
4.8	Spannungsstabilisierungsschaltungen mit Z-Dioden	41
4.9	Meßgleichrichter	45
5	Der Operationsverstärker	50
5.1	Eigenschaften eines Operationsverstärkers	50
5.2	Umkehrverstärker, Gegenkopplung	55
5.3	Elektrometerverstärker	64
5.4	Kompensation von Eingangsruhestrom und Offsetspannung	68
6	Der Transistor und seine Grundschaltungen	72
6.1	Kennlinien und charakteristische Daten	72
6.2	Das Transistorrauschen	76
6.3	Grenzdaten	80
6.4	Messung einiger charakteristischer Daten	84
6.5	Emitterschaltung	87
6.6	Kollektorschaltung, Emitterfolger	104
6.7	Basisschaltung	109
6.8	Kaskodeschaltung	112

6.9	Konstantstromquellen	113
6.10	Darlington-Schaltung	119
7	Feldeffekttransistoren	122
7.1	Klassifikation	122
7.2	Kennlinien und charakteristische Daten von n-Kanal-Fets	123
7.3	Grenzdaten	126
7.4	Grundsaltungen	126
7.5	Fet als Konstantstromquelle.	132
7.6	Fet als steuerbarer Widerstand.	135
8	Niederfrequenz-Vorverstärker	139
8.1	Zweistufiger NF-Verstärker	139
8.2	Gegengekoppelter NF-Verstärker	142
8.3	Gegengekoppelter NF-Verstärker für symmetrische Betriebsspannungen	143
8.4	NF-Verstärker mit dreistufiger Spannungsverstärkung.	144
8.5	NF-Verstärker mit Komplementärtransistoren	146
8.6	NF-Verstärker mit Fet-Eingang	147
9	Aufbau von Differenz- und Operationsverstärkern	150
9.1	Differenzverstärker.	150
9.2	Differenzverstärker für spezielle Anwendungen	160
9.3	Fet-Differenzverstärker	165
9.4	Operationsverstärker	167
9.5	Operationsverstärker für spezielle Anwendungen	175
9.6	Phasenkompensation bei Operationsverstärkern	178
9.7	Messung einiger Operationsverstärkerdaten	197
10	Anwendungen des Operationsverstärkers	203
10.1	Addier- und Subtrahierschaltungen	203
10.2	Präzisions-Niederfrequenz-Verstärker.	210
10.3	Konstantspannungsquellen	213
10.4	Konstantstromquellen	214
10.5	Der NIC (Negative Impedance Converter).	222
10.6	Der Rotator	227
10.7	Der Gyrator	230
10.8	Der Zirkulator	236
10.9	Integratoren	238
10.10	Differentiatoren	248
10.11	PID-Regler	251
10.12	Meßschaltungen	256
10.13	Funktionsnetzwerke	265
10.14	Analog-Multiplizierer	275
10.15	Einige Anwendungen der Analog-Multiplizierer	288
10.16	Analog-Schalter und Abtast-Halte-Glieder	293
10.17	Operationsverstärker in Digitalschaltungen	296
11	Aktive Filter	306
11.1	Theoretische Grundlagen	306
11.2	Realisierung von Tief- und Hochpaßfiltern 1. Ordnung	325
11.3	Realisierung von Tief- und Hochpaßfiltern 2. Ordnung	327
11.4	Realisierung von Tief- und Hochpaßfiltern höherer Ordnung	333

11.5	Selektive Filter	335
11.6	Sperrfilter.	344
11.7	Einstellbares Universal-Filter	350
11.8	Allpaß-Filter	352
12	Leistungsverstärker	359
12.1	Emitterfolger	359
12.2	Komplementäre Emitterfolger	361
12.3	Elektronische Strombegrenzung	370
12.4	Darlington-Schaltungen als komplementäre Emitterfolger	372
12.5	Berechnung einer Leistungsendstufe	374
12.6	Präzisions-Leistungsverstärker.	377
12.7	Leistungsverstärker mit Transformatorkopplung	379
13	Stabilisierte Netzgeräte	383
13.1	Einfachste Ausführung	383
13.2	Prinzipielle Anordnung mit Regelverstärker	384
13.3	Netzgeräte mit einfachen Regelverstärkern.	388
13.4	Methoden zur Strombegrenzung	391
13.5	Netzgeräte mit Differenzverstärkern	393
13.6	Netzgeräte mit geringem Spannungsverlust	395
13.7	Netzgeräte mit Operationsverstärkern.	397
13.8	Ausführungsformen des Leistungsverstärkers.	404
14	Breitbandverstärker	407
14.1	Untere Grenzfrequenz	407
14.2	Obere Grenzfrequenz.	409
14.3	Resonanzverstärker	414
15	Oszillatoren	416
15.1	Allgemeine Rückkopplungsbedingung	416
15.2	LC-Oszillatoren	418
15.3	Quarzoszillatoren	423
15.4	RC-Oszillatoren	428
15.5	Programmierte Schwingungsdifferentialgleichung.	433
15.6	Funktionsgeneratoren	436
16	Kippschaltungen	442
16.1	Der Transistor als Schalter	442
16.2	Astabiler Multivibrator	446
16.3	Univibrator	458
16.4	RS-Flip-Flop	465
16.5	Flip-Flop mit Vorbereitungseingängen	471
16.6	Schmitt-Trigger	474
17	Logische Grundschaltungen	480
17.1	Die logischen Grundfunktionen	480
17.2	Aufstellung logischer Funktionen.	483
17.3	Schaltungstechnische Realisierung der Grundverknüpfungen	493
17.4	Integrierte Kippschaltungen	509
17.5	Halbleiterspeicher	525

18	Anwendungen der Digitalschaltungen	531
18.1	Multiplexer	532
18.2	Addierer	533
18.3	Subtrahierer	539
18.4	Komparatoren	543
18.5	Multiplizierer	546
18.6	Schieberegister	550
18.7	Zähler	555
18.8	Umkodierer	583
18.9	Erzeugung von pseudozufälligen Binärfolgen	590
18.10	Digital-Analog-Wandler	594
18.11	Analog-Digital-Wandler	604
19	Zerhacker und Modulatoren	615
19.1	Mechanische Zerhacker	615
19.2	Transistorzerhacker	616
19.3	Fet-Zerhacker	622
19.4	Diodenzerhacker	625
19.5	Ringmodulator	626
19.6	Photozerhacker	627
19.7	Modulator mit Kapazitätsdioden	628
19.8	Zerhacker als Modulator und Synchrondemodulator	629
19.9	Zerhackerverstärker	632
20	Spezialdioden	638
20.1	Kapazitätsdiode (Varactor-Diode)	638
20.2	Schottky-Diode (Hot Carrier Diode)	639
20.3	Speicher-Schalt-Diode (Step Recovery Diode)	639
20.4	pin-Diode	640
20.5	Tunneldiode	641
20.6	Backward-Diode	643
20.7	Feldeffektdiode (Curristor)	644
20.8	Vierschichtdiode	644
20.9	Trigger-Diode (Diac)	647
21	Spezialtransistoren	648
21.1	Unijunction-Transistor	648
21.2	Thyristor	650
21.3	Triac	655
21.4	Vierschichttriode	661
22	Photohalbleiter	662
22.1	Photometrie	662
22.2	Photowiderstand	664
22.3	Photodioden	666
22.4	Photohalbleiter mit drei Elektroden	668
22.5	Leuchtdioden	671
22.6	Photokoppler	671
	Literatur	675
	Sachverzeichnis	679