

Technische Physik in Einzeldarstellungen

Herausgegeben von **W. Meissner** und **M. Näbauer**

Band 15

Der Transistor

Physikalische und technische Grundlagen

Von

Dr. H. Salow

Darmstadt

Prof. Dr. H. Beneking

Aachen

Dr. H. Krömer

Palo Alto, Calif./USA

Dr. W. v. Münch

Yorktown Heights, N.Y./USA

Mit 275 Abbildungen



Springer-Verlag / Berlin · Göttingen · Heidelberg

J. F. Bergmann / München

1963

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen

ISBN 978-3-642-86175-8

ISBN 978-3-642-86174-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-86174-1

© by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1963

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1963

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

Vorwort

Als ich es vor einigen Jahren übernahm, eine Monographie über den Transistor zu schreiben, wurde mir sehr bald klar, daß der ungewöhnlich schnelle Fortschritt der Transistortechnik die Fähigkeit eines einzelnen Autors, ihm gerecht zu werden, übersteigt. Ich sah mich deshalb nach Mitarbeitern um. Es gelang mir, hervorragende Fachleute, die Herren Prof. BENEKING, Dr. KRÖMER und Dr. v. MÜNCH zur Mitarbeit zu gewinnen. Die Aufteilung eines Stoffes auf mehrere Verfasser hat Vorzüge und birgt Gefahren. Eine gewisse Heterogenität in Stil und Darstellung läßt sich dabei nicht ganz vermeiden. Der Gewinn liegt darin, daß die Teilgebiete von den Verfassern auf Grund ihrer speziellen Kenntnisse besonders tiefgründig bearbeitet werden können. Ferner liefert jeder Autor ein abgeschlossenes und für sich lesbares Kapitel. Dadurch wird dem Leser die Bewältigung des gesamten Stoffes erleichtert. Ich hoffe, daß im vorliegenden Fall die Vorteile die Nachteile überwiegen.

Dem Sinne der vorliegenden Sammlung von technisch-physikalischen Einzeldarstellungen entsprechend, haben die Verfasser versucht, das für das Verständnis des Transistors erforderliche Wissen und die für den Umgang mit ihm notwendigen Voraussetzungen von einem vorwiegend physikalischen Standpunkt aus darzustellen, wobei die grundlegenden Fragen besonders berücksichtigt wurden. Das Buch ist dementsprechend für alle Naturwissenschaftler, Physiker, Techniker und Studierende dieser Gebiete geschrieben, die sich mit der Physik und Technik des Transistors beschäftigen wollen und sich für ein tieferes Verständnis dieser Materie interessieren. Die Literaturverzeichnisse werden dem an einer eingehenderen Behandlung einzelner Fragen interessierten Leser weiterhelfen. Vollständigkeit im vorliegenden Buch auch nur anzustreben, ist bei der Fülle des vorhandenen Stoffes und bei der Begrenzung des Umfanges nicht sinnvoll.

Im Teil A des Buches werden von Dr. KRÖMER zunächst Kapitel aus der Halbleiterphysik erörtert, soweit sie für das Verständnis von Transistoren erforderlich sind. Daran schließen sich die theoretischen Berechnungen der physikalischen Transistorgrößen an. In Teil B werden von mir die technologischen Grundlagen für den Bau des Transistors und die Verfahren zu seiner Herstellung behandelt. Auf die spezielle Technologie der industriellen Massenproduktion konnte dabei allerdings nicht eingegangen werden. In Teil C wird von Prof. BENEKING die Schaltungs-

theorie, deren Beherrschung eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung des Transistors ist, gebracht. Die Grundprinzipien der Schaltungstheorie wurden dabei in den Vordergrund gerückt. Der von Dr. v. MÜNCH verfaßte Teil D bringt eine Darstellung der Meßtechnik, die sich bei Transistoren sehr spezialisiert hat, sowie eine Behandlung von dem Transistor verwandten Bauelementen.

Ein zu weitläufiges Eingehen auf den Gerätebau schien mir um so weniger nötig, als über ihn viele Einzeldarstellungen vorliegen, die durch ein kürzlich im gleichen Verlag erschienenenes Buch ergänzt werden.

Dem Herrn Präsidenten des Fernmeldetechnischen Zentralamtes, Dipl.-Ing. H. GRIEM, danke ich für die tatkräftige Förderung, die er jederzeit den Arbeiten an der Monographie, vornehmlich den Teilen A, B und D des Buches angedeihen ließ. Weiter danke ich den Herausgebern und dem Springer-Verlag für die Bereitwilligkeit, mit der sie meine Wünsche erfüllt haben.

Darmstadt, im Mai 1962

H. SALOW

Inhaltsverzeichnis

Teil A

Die physikalischen Grundlagen des Transistors

Von Dr. H. KRÖMER, Palo Alto, Calif./USA

	Seite
I. Das Bändermodell der Halbleiter	1
1. Energiebänder in Kristallen	1
2. Die effektiven Massen von Elektronen in Kristallen	4
3. Metalle — Nichtleiter — Halbleiter	6
4. FERMI-Statistik	8
5. Störstellen	12
II. Raumladungsschichten bei inhomogener Störstellenkonzentration .	16
1. Flache und steile Störstellengradienten	16
a) Flacher Störstellengradient	17
b) Steiler Störstellengradient	17
2. pn -Übergänge	18
3. Spezielle pn -Übergänge	22
a) Linearer pn -Übergang	22
b) Abrupter pn -Übergang	23
c) pin -Übergang	24
4. Oberflächenrandschichten und Metall-Halbleiterkontakt	25
III. Elektronen- und Löcherströme in homogenen Halbleitern und durch pn-Übergänge	27
1. Die Leitfähigkeit homogener Halbleiter	27
2. Inhomogene Störstellendichte; Diffusion und Lebensdauer	29
3. Das Gleichstromverhalten des pn -Überganges	31
4. Das Frequenzverhalten des pn -Überganges	35
5. pn -Übergänge mit Driftfeld	38
6. Verfeinerungen der Theorie	41
a) Thermische Generation und Rekombination in der Raumladungsschicht	42
b) Feldinduzierte Trägererzeugung	43
c) Oberflächeneffekte	45
d) Sonstiges	45
IV. Allgemeine Theorie des Transistors	45
1. Das Prinzip des Transistors	45
2. Mathematische Formulierung einer elementaren Theorie des Transistors	47
a) Gleichstromanteil	48
b) Wechselstromanteil	48

	Seite
3. Frequenzverhalten	50
a) Diffusionstransistor	50
b) Drifttransistor	50
4. Übersicht über die notwendigen Verfeinerungen der Theorie	52
5. Oberflächenrekombination	53
6. Die Stromdichteabhängigkeit der Stromverstärkung	56
7. Der endliche Kollektorleitwert und die Rückwirkung des Kollektors auf den Emitter	59
8. Der Basiswiderstand	62
9. Hochfrequenztransistoren	64
10. Transistoren mit $\alpha > 1$	70
a) Transistor mit Stoßvervielfachung	71
b) Trägerinjektion in den Kollektor (Vierschichtentransistor, Thyristor)	71
Literaturverzeichnis zu Teil A	72

Teil B

Die technologischen Grundlagen des Transistors

Von Dr. H. SALOW, Darmstadt

I. Die Technologie des Halbleitermaterials	74
1. Halbleiterelemente und Halbleiterverbindungen	74
2. Physikalische Eigenschaften von Germanium und Silizium	79
3. Präparation von Germaniumeinkristallen	88
a) Reinigung des Ausgangsmaterials	88
b) Kristallzüchtung	95
4. Präparation von Siliziumeinkristallen	100
5. Prüfung des Kristallmaterials	107
a) Widerstand und Homogenität	107
b) Lebensdauer der Minoritätsladungsträger	112
c) Orientierung der Kristalle	118
d) Kristallbaufehler	121
II. Die Technologie von pn-Übergängen und Transistoren	126
1. Die Zugtechnik der pn -Übergänge und Transistoren	126
a) Das Zugverfahren	126
b) Das Stufenziehverfahren	128
2. Die Legierungstechnik der pn -Übergänge und Transistoren	137
3. Die Diffusionstechnik	147
a) Die Herstellung von pn -Übergängen nach dem Diffusionsverfahren	147
b) Die Markierung des diffundierten pn -Überganges	150
c) Die technische Durchführung der Diffusionsverfahren	152
4. Oberflächenprobleme und Ätzmethoden	157
a) Die reine und technische Oberfläche von Germanium und Silizium	157
b) Oberflächeneffekte am pn -Übergang, die Stabilität von Transistorparametern	164
c) Oberflächenbehandlung	171
1. Die chemische Ätzung	172

	Seite
2. Die elektrolytische Ätzung	175
3. Die elektrolytische Formgebung	177
5. Der Hochfrequenztransistor	179
a) Der elektrochemische Transistor	183
b) Der Drifttransistor	185
c) Der Flächentransistor mit diffundierter Basis (Mesa-Transistor, Planartransistor)	188
6. Der Leistungstransistor	195
a) Stromdichteeffekte	196
b) Hochspannungseffekte	199
c) Legierte und diffundierte Leistungstransistoren	201
d) Wärmeableitung	205
Literaturverzeichnis zu Teil B	208

Teil C

Allgemeine Schaltungstheorie des Transistors

Von Prof. Dr. H. BENEKING, Aachen

Vorbemerkung	211
I. Der Transistor als Schaltelement	212
1. Das Gleichstromverhalten des Transistors	212
a) Grundsaltungen	212
b) Restströme	217
c) Arbeitspunkteinstellung	218
d) Temperaturverhalten	219
e) Arbeitspunktstabilisierung	223
f) Betriebstemperatur und Verlustleistung	227
g) Stabilisierung von Betriebsspannung und -strom	230
2. Das Wechselstrom-Ersatzschaltbild des Transistors	231
a) Herleitung des Ersatzschaltbildes	231
b) Wechselstromverhalten der Basisschaltung	240
c) Wechselstromverhalten der Emitterschaltung	244
d) Wechselstromverhalten der Kollektorschaltung	245
3. Analogie zur Vakuumröhre	246
a) Analogkennwerte	246
b) Analogersatzschaltbild	249
II. Grundlagen der Schaltungsberechnung	252
1. Vierpolformen und Ersatzschaltbilder	252
2. Leistungsverstärkung und Stabilität	263
a) Reelle Kenngrößen	263
b) Komplexe Kenngrößen	267
c) Schwingabstand	269
3. Vergleich der drei Transistor-Grundsaltungen	272
4. Gegenkopplung	274
III. Transistorschaltungen	280
1. Kleinsignalverstärkung	280
a) Gleichstromverstärker	280
b) Niederfrequenzverstärker	284

VIII

Inhaltsverzeichnis

	Seite
c) Hochfrequenzverstärker	291
d) Breitbandverstärker	299
e) Schwingungserzeugung und Entdämpfung	302
2. Großsignalverstärkung	313
3. Impulsverhalten	317
a) Der Transistor als Schalter	317
b) Umschaltverhalten	322
c) Impulsschaltungen	333
Hilfsblätter	
Hilfsblatt 1 Temperaturkompensation	341
Hilfsblatt 2 Optimale Vierpol-Verstärkung	342
Hilfsblatt 3 Wirkanpassung	342
Hilfsblatt 4 Blindanpassung	343
Literaturverzeichnis zu Teil C	344

Teil D

Physikalische und technische Eigenschaften der Transistoren

Von Dr. W. v. MÜNCH, Yorktown Heights, N. Y./USA

I. Transistormesstechnik	350
1. Kennlinienschreiber	350
2. Messung der quasistatischen Vierpolparameter	354
3. Messung der Hf-Parameter	363
4. Rausch- und Klirrfaktormessungen	371
II. Eigenschaften verschiedener Typen von Transistoren	372
1. Die Kennlinienfelder	372
2. Die Abhängigkeit der quasistatischen Vierpolparameter vom Arbeitspunkt	375
3. Die Temperaturabhängigkeit	381
4. Rauscheigenschaften	386
III. Spezielle Halbleiterbauelemente	389
1. Photodiode und Phototransistor	389
2. Der Unipolartransistor	393
3. Vierschichtentransistor und Vierschichtendiode	398
4. Doppelbasisdiode und speichernder Schalttransistor	402
5. Die Tunnelodiode	410
Literaturverzeichnis zu Teil D	412
Namenverzeichnis	414
Sachverzeichnis	419