

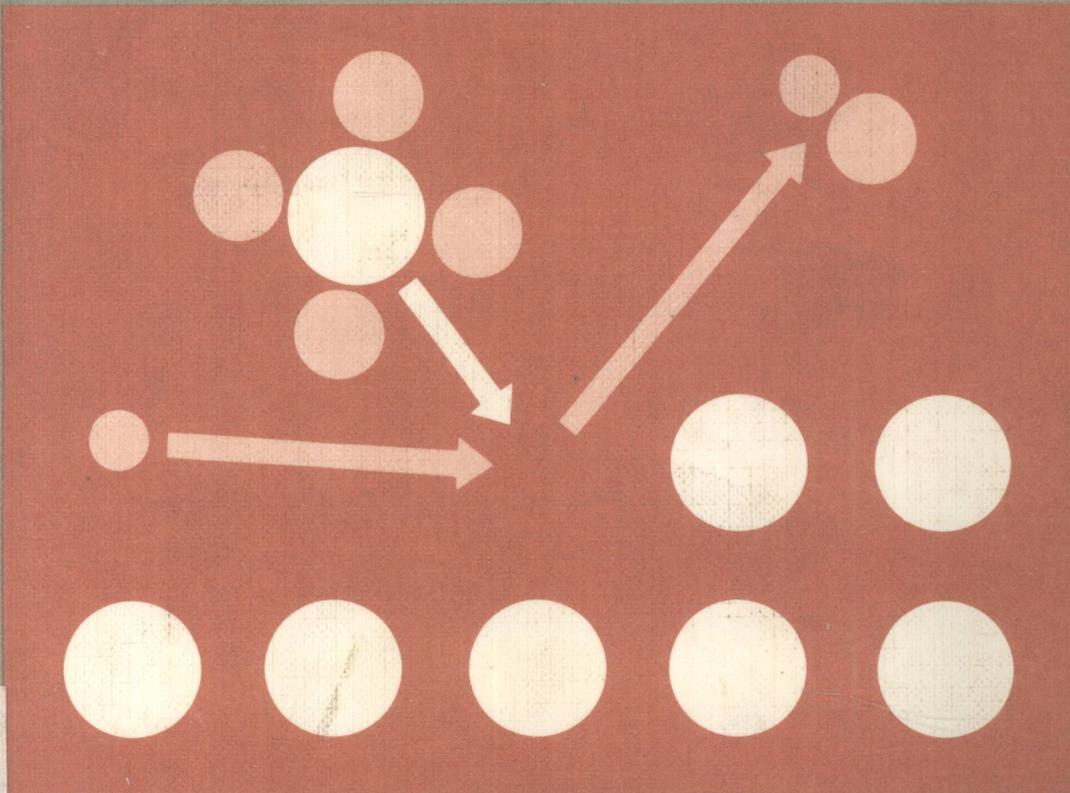
Halbleiter-Elektronik

4

I. Ruge

Halbleiter-Technologie

Zweite Auflage



Springer-Verlag

Über diese Basisbände hinaus sind weitere Einzelbände erschienen bzw. in Vorbereitung (unten mit * gekennzeichnet), die den technisch wichtigen Halbleiterbauelementen, Schaltungen und Sonderthemen gewidmet sind. Alle diese von Spezialisten verfaßten Bände sind so aufgebaut, daß sie bei entsprechenden Vorkenntnissen auch einzeln verwendet werden können.

Nachstehendes Schema gibt einen Überblick über die Konzeption der Buchreihe, die bei Bedarf einen weiteren Ausbau zuläßt.

Einführung	1 Grundlagen der Halbleiter-Elektronik	2 Bauelemente der Halbleiter-Elektronik
Vertiefung	3 Bänderstruktur und Stromtransport	5 pn -Übergänge
Technologie	4 Halbleiter-Technologie	19 Mikrotechnologie *
Einzelhalbleiter	6 Bipolare Transistoren	7 Feldeffekttransistoren
	8 Signalverarbeitende Dioden	9 Aktive Mikrowellendioden
	10 Optoelektronik I: Lumineszenz- und Laserdioden	11 Optoelektronik II: Fotodioden und Solarzellen *
	12 Thyristoren	16 GaAs-MESFET *
Integrierte Schaltungen	13 Integrierte Bipolarschaltungen	14 Integrierte MOS-Schaltungen
Sonderthemen	15 Rauschen	17 Sensorik
	18 Amorphe und polykristalline Halbleiter	20 Meß- und Prüftechnik *

Halbleiter-Elektronik

Eine aktuelle Buchreihe für Studierende und Ingenieure

Halbleiter-Bauelemente beherrschen heute einen großen Teil der Elektrotechnik. Dies äußert sich einerseits in der großen Vielfalt neuartiger Bauelemente und andererseits in den enormen Zuwachsraten der Herstellungszahlen. Ihre besonderen physikalischen und funktionellen Eigenschaften haben komplexe elektronische Systeme z. B. in der Datenverarbeitung und der Nachrichtentechnik ermöglicht. Dieser Fortschritt konnte nur durch das Zusammenwirken physikalischer Grundlagenforschung und elektrotechnischer Entwicklung erreicht werden.

Um mit dieser Vielfalt erfolgreich arbeiten zu können und auch zukünftigen Anforderungen gewachsen zu sein, muß nicht nur der Entwickler von Bauelementen, sondern auch der Schaltungstechniker das breite Spektrum von physikalischen Grundlagenkenntnissen bis zu den durch die Anwendung geforderten Funktionscharakteristiken der Bauelemente beherrschen.

Dieser engen Verknüpfung zwischen physikalischer Wirkungsweise und elektrotechnischer Zielsetzung soll die Buchreihe „Halbleiter-Elektronik“ Rechnung tragen. Sie beschreibt die Halbleiter-Bauelemente (Dioden, Transistoren, Thyristoren usw.) in ihrer physikalischen Wirkungsweise, in ihrer Herstellung und in ihren elektrotechnischen Daten.

Um der fortschreitenden Entwicklung am ehesten gerecht werden und den Lesern ein für Studium und Berufarbeit brauchbares Instrument in die Hand geben zu können, wurde diese Buchreihe nach einem „Baukastenprinzip“ konzipiert:

Die ersten beiden Bände sind als Einführung gedacht, wobei Band 1 die physikalischen Grundlagen der Halbleiter darbietet und die entsprechenden Begriffe definiert und erklärt. Band 2 behandelt die heute technisch bedeutsamen Halbleiterbauelemente in einfachster Form. Ergänzt werden diese beiden Bände durch die Bände 3 bis 5, die einerseits eine vertiefte Beschreibung der Bänderstruktur und der Transportphänomene in Halbleitern und andererseits eine Einführung in die technologischen Grundverfahren zur Herstellung dieser Halbleiter bieten. Alle diese Bände haben als Grundlage einsemestrige Grund- bzw. Ergänzungsvorlesungen an Technischen Universitäten.

Fortsetzung und Übersicht über die Reihe: 3. Umschlagseite

Halbleiter-Elektronik

Herausgegeben von W. Heywang und R. Müller

Band 4



8560169

Ingolf Ruge

Halbleiter-Technologie

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage
von Hermann Mader

Mit 218 Abbildungen



E8550169

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984

Dr.-Ing. INGOLF RUGE
o. Professor, Lehrstuhl für Integrierte Schaltungen,
Technische Universität München.
Direktor des Instituts für Festkörper-Technologie
der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Dr.-Ing. HERMANN MADER
Professor, Fachbereich Elektrotechnik,
Fachhochschule München

Dr. rer. nat. WALTER HEYWANG
Leiter der Zentralen Forschung und Entwicklung der Siemens AG,
München
Professor an der Technischen Universität München

Dr. techn. RUDOLF MÜLLER
Professor, Inhaber des Lehrstuhls für Technische Elektronik
der Technischen Universität München

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Ruge, Ingolf:
Halbleiter-Technologie/Ingolf Ruge.
2., überarb. u. erw. Aufl./von Hermann Mader.
Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer, 1984.
(Halbleiter-Elektronik; Bd. 4)

NE: Mader, Hermann ([Bearb.]; GT

ISBN 3-540-12661-9 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo
ISBN 0-387-12661-9 2nd ed. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin Tokyo

ISBN 3-540-06626-8 1. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-06626-8 1st ed. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, 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.

Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die »Verwertungsgesellschaft Wort«, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1975 and 1984
Printed in Germany

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.

Offsetdruck: Weihert Druck GmbH, Darmstadt
Bindearbeiten: Graphischer Betrieb Konrad Triltsch, Würzburg

2362/3020-542310

Vorwort zur 2. Auflage

Die neun Jahre seit Erscheinen der 1. Auflage dieses Buches haben eine ungeahnte Fortentwicklung der Halbleiter-Technologie gebracht, vor allem für das Silizium, auch wenn Gordon Moore dies bereits 1976 voraussagte. Die integrierten Schaltungen spielen immer mehr eine Schlüsselrolle in jeder modernen Volkswirtschaft, was in den kommenden Jahren durch die weltweite Einführung neuer Kommunikationsnetze besonders augenfällig werden wird. Sprachen wir Anfang der 70er Jahre nur von Integrationstechnik oder LSI (Large Scale Integration), so befinden wir uns jetzt mitten in der Größtintegration und VLSI (Very Large Scale Integration) mit einigen hunderttausend Transistor-Funktionen auf einem Chip.

Lag die Industrie um 1970 bei Strukturbreiten von 4 bis 5 μm und Ausbeuten von 10 % (teilweise darunter), so werden jetzt größtintegrierte Schaltkreise mit 2- μm -Strukturen und enormen Ausbeuten von 60 % bis 80 % gefertigt, und zwar nicht nur in Japan, sondern auch in Deutschland. Produktionslinien im 1- μm -Bereich werden derzeit aufgebaut und Entwicklungsarbeiten laufen an, um bald integrierte Schaltungen mit einer Million Transistor-Funktionen herstellen zu können. In den wenigen deutschen Forschungslaboratorien, die hier noch "mithalten" können, gibt es erste positive Resultate bei Bauelementen und integrierten Schaltungen mit Strukturbreiten unter 1 μm , ja selbst die Sub- μm -Technologie wird möglicherweise noch in diesem Jahrzehnt in bestimmte Produktionen einmünden. Im Bereich um 0,5 μm herum wird der Kampf zwischen Silizium und seinem jahrzehntelangen Konkurrenten, dem Gallium-Arsenid, immer heftiger entbrennen. Jedoch wird Silizium bis zum Ende dieses Jahrtausends wirtschaftlich seine große

Rolle weiterspielen, auch wenn derzeit Phantasien und Prognosen über "Bioelektronik" und "Molecular Electronic Devices" Kapriolen schlagen.

Bei aller Raffinesse in der wissenschaftlich-technischen Weiterentwicklung und fast nicht mehr erschwinglichem gerätetmäßigem Aufwand sind große Bereiche der Grundlagen der Halbleiter-Technologie nicht nur erhalten geblieben, sie gewinnen sogar durch das "process modeling" und einer damit möglichen vollautomatischen Fertigung noch größere Bedeutung. Ich habe daher mein Buch, was die theoretischen Grundlagen angeht, in weiten Teilen unverändert gelassen und nur einige für die VLSI-Technik wichtige neue Technologien eingefügt, so z.B. Trockenätzprozesse und vor allen Dingen moderne Lithographie-Verfahren. Daneben wurden an manchen Stellen Druckfehler und kleine "Unebenheiten" beseitigt.

An der Erstellung dieser 2. verbesserten Auflage hat Herr Prof. Dr.-Ing. Hermann Mader, der bis vor kurzer Zeit selbst mitten in der experimentellen Entwicklung dieser neuen Technologien in einem großen industriellen Forschungslabor gestanden hat, wesentlichen Anteil. Ihm gebührt mein ganz besonderer Dank. Aber auch den Herren Dr. Betz, Dipl.-Ing. Pongratz, Dipl.-Phys. Habberger und Dipl.-Phys. Götzlich sei für vielfältige freundliche Ratschläge sehr gedankt.

München, im Juli 1983

Ingolf Ruge

Aus dem Vorwort zur 1. Auflage

Beim Verfassen eines Buches über Halbleiter-Technologie gibt es in der Regel zwei Gefahrenmomente: Entweder richtet man das Buch einseitig auf die anwendungsorientierte, möglicherweise durch eigene langjährige Erfahrung abgesicherte Beschreibung technologischer Prozesse und Rezepturen aus, ohne groß auf die theoretischen Hintergründe einzugehen, oder man schwebt über den Wolken, besser über den Niederungen technologischer Entwicklungs- und Fertigungsverfahren und verkündet *ex cathedra* die grundlegenden Theorien, erläutert die Theorie der Vorgänge und Abläufe technologischer Prozesse und kümmert sich wenig um praxisnahe Realitäten.

Ich habe versucht, einen Mittelweg zu gehen, und habe mich stark auf die grundlegenden Theorien abgestützt, aber auch die Beschreibung technologischer Prozesse gebracht, ohne auf deren tiefeschürfende Begründung einzugehen. Ich hatte in den vergangenen fünf Jahren große Einblicke in die auftretenden Schwierigkeiten, wenn neue Technologien in den Halbleiterfabriken entwickelt und in die Produktion übergeführt wurden. Dies hat mich in meinem eingangs erwähnten Konzept bestärkt, die Grundlagen der einzelnen technologischen Prozesse in den Vordergrund zu rücken, dann aber auf die möglichen Abweichungen von den Theorien aufmerksam zu machen.

München, im Oktober 1974

Ingolf Ruge

Inhaltsverzeichnis

<u>Physikalische Größen</u>	16
<u>1. Der ideale Einkristall</u>	21
1.1. Gitteraufbau	21
1.2. Beschreibung von Ebenen und Richtungen im Kristall	23
1.3. Bindungskräfte	26
1.3.1. Die heteropolare oder ionische Bindung . . .	26
1.3.2. Die homöopolare oder kovalente Bindung . .	27
1.3.3. Die metallische Bindung	28
1.3.4. Die van der Waalssche Bindung	28
<u>2. Der reale Kristall</u>	30
2.1. Punktförmige Kristallfehler	31
2.1.1. Eigendefekte	31
2.1.2. Chemische Defekte	32
2.2. Linienförmige Kristallfehler	33
2.2.1. Kantenversetzungen	33
2.2.2. Schraubenversetzungen	34
2.3. Flächenhafte Kristallfehler	35
<u>3. Herstellung von Einkristallen</u>	37
3.1. Grundlagen des Kristallwachstums	37
3.2. Phasendiagramme	42

3.3.	Verfahren der Kristallzucht	53
3.3.1.	Kristallziehen aus der Schmelze am Beispiel von Silizium und Galliumarsenid	53
3.3.1.1.	Herstellung von Silizium	53
3.3.1.2.	Technische Herstellung von GaAs-Einkristallen aus der Schmelze ..	60
3.3.2.	Herstellung dünner einkristalliner Schichten aus der Gasphase am Beispiel der Si- und GaAs-Gasphasenepitaxie	67
3.3.2.1.	Herstellung epitaktischer Silizium-Schichten	68
3.3.2.2.	Herstellung epitaktischer GaAs-Schichten	74
3.3.3.	Herstellung einkristalliner Schichten aus der flüssigen Phase am Beispiel der GaAs-Flüssigphasen-Epitaxie	76
3.3.3.1.	Das Phasendiagramm Gallium-Arsen	76
3.3.3.2.	Praktische Ausführungen der Flüssigphasenepitaxie	79
3.3.4.	Herstellung einkristalliner Schichten durch Aufdampfen im Vakuum	82
3.3.5.	Herstellung dünner einkristalliner Schichten mit Hilfe der Molekularstrahlepitaxie	85
4.	<u>Dotiertechnologien</u>	88
4.1.	Legierung	91
4.1.1.	Die prinzipiellen Verfahrensschritte	92
4.1.2.	Dotierungsverlauf	93
4.2.	Diffusion	96
4.2.1.	Die Diffusionsgesetze	97
4.2.2.	Dotierungsprofile bei unterschiedlichen Randbedingungen	98
4.2.2.1.	Diffusion aus einer unerschöpflichen Quelle	98
4.2.2.2.	Diffusion aus einer erschöpflichen Quelle	102
4.2.2.3.	Profilverlauf bei einer Zwei-Schritt-Diffusion	104

4.2.2.4.	Ausdiffusion	108
4.2.2.5.	Veränderung einer Dotierungs- Konzentrationsstufe	109
4.2.2.6.	Flußbegrenzung durch die Kri- stalloberfläche	111
4.2.2.7.	Änderung des Diffusionsprofiles bei Bildung einer Oxidschicht.	114
4.2.3.	Diffusionsmechanismus	116
4.2.4.	Diffusionskonstanten in Silizium	120
4.2.5.	Praktische Durchführung der Halbleiterdif- fusion	122
4.2.5.1.	Wahl der Dotierungsstoffe	126
4.2.5.2.	Diffusionsverfahren	127
4.2.5.3.	Probleme beim Diffusionsprozess	135
4.2.6.	Getterung	136
4.2.6.1.	Entstehung von Metallausschei- dungen	137
4.2.6.2.	Prinzipielle Möglichkeiten einer Schwermetallgetterung	138
4.2.6.3.	Praktische Ausführung	144
4.3.	Ionenimplantation	145
4.3.1.	Grundlagen der Ionenimplantation	146
4.3.1.1.	Reichweiteverteilung der Ionen in amorphen Substanzen	146
4.3.1.2.	Reichweiteverteilung der Ionen in einkristallinen Substanzen	151
4.3.2.	Experimentell erhaltene Profile bei ein- kristallinem Ausgangsmaterial	153
4.3.2.1.	Streuung in Kanäle	155
4.3.2.2.	Erhöhte Diffusion durch Bestrah- lung	157
4.3.2.3.	Thermische Diffusion	158
4.3.2.4.	Strahlenschäden	159
4.3.3.	Elektrische Aktivierung und Restaurierung der implantierten Schicht	160
4.3.4.	Probleme der Ionenimplantation bei Ver- bindungshalbleitern	164
4.3.5.	Zusammenfassung der Möglichkeiten der Ionenimplantation	165

4.3.6.	Praktische Durchführung der Ionenimplan- tation	166
4.3.7.	Anwendungen der Ionenimplantation bei der Bauelementeherstellung	168
4.4.	Dotierung durch Kernumwandlung	170
4.4.1.	Dotierungsverfahren	171
4.4.2.	Homogenität der Dotierung	172
4.4.3.	Anwendung der Dotierung durch Kernumwand- lung bei der Bauelementeherstellung	173
4.5.	Gegenüberstellung der Dotierungsverfahren	173
<u>5.</u>	<u>Der Metall-Halbleiter-Kontakt</u>	<u>177</u>
5.1.	Das System Metall-Vakuum	178
5.2.	Das System Metall-Halbleiter	178
5.2.1.	Potentialverhältnisse am idealen Metall- Halbleiter-Kontakt	178
5.2.2.	Potentialverhältnisse am Metall-Halbleiter- Kontakt mit Oberflächenzuständen	183
5.2.3.	Erniedrigung der Barrierenhöhe durch den Schottky-Effekt	184
5.3.	Strom-Spannungs-Kennlinien der Kontakte	185
5.3.1.	Stromtransport im Metall-Halbleiter-Kon- takt	185
5.3.2.	I-U-Kennlinien beim Schottky-Kontakt	186
5.3.3.	I-U-Kennlinien beim ohmschen Kontakt	189
5.4.	Technische Ausführungen von Schottky- und ohmschen Kontakten	191
5.5.	Wärmeableitung durch Kontakte	192
<u>6.</u>	<u>Meßverfahren zur Ermittlung von Halbleiterparametern</u>	<u>196</u>
6.1.	Meßverfahren zur Ermittlung elektrischer Größen.	197
6.1.1.	Leitungstyp	197
6.1.1.1.	Thermokraftmessung	197
6.1.1.2.	Richtwirkung einer federnden Metallspitze	197

6.1.2.	Elektrische Leitfähigkeit	198
6.1.2.1.	Vier-Spitzen-Methode	199
6.1.2.2.	Zwei-Sonden-Verfahren	202
6.1.2.3.	Methode nach van der Pauw	203
6.1.2.4.	Kontaktwiderstandsmethode	206
6.1.3.	Ladungsträgerkonzentration	209
6.1.3.1.	Hall-Messungen	209
6.1.3.2.	Messungen mittels Schottky-Kontakten	215
6.1.4.	Ladungsträger-Lebensdauer	218
6.1.4.1.	Direkte Methoden	219
6.1.4.2.	Indirekte Methoden	222
6.1.5.	Ladungsträger-Beweglichkeit	224
6.1.5.1.	Beweglichkeit der Majoritätsträger	224
6.1.5.2.	Beweglichkeit der Minoritätsträger	225
6.1.6.	Diffusionslänge	225
6.1.7.	Lage von pn-Übergängen	226
6.1.7.1.	Chemische Sichtbarmachung der pn-Übergänge	226
6.1.7.2.	Elektrische Bestimmung der Lage des pn-Überganges	229
6.2.	Meßverfahren zur Ermittlung physikalischer Größen	229
6.2.1.	Kristallorientierung	229
6.2.1.1.	Röntgenoptische Bestimmung	230
6.2.1.2.	Lichtoptische Bestimmung	232
6.2.2.	Versetzungslinien	233
6.2.2.1.	Ätzgruben	233
6.2.2.2.	Kupferdekorierung	234
6.2.2.3.	Röntgentopographie	235
<u>7.</u>	<u>Kristallvorbereitung</u>	237
7.1.	Sägen	237
7.2.	Oberflächenglättung	238

7.3.	Ätzen	240
7.4.	Reinigen der Kristalloberfläche	244
<u>8.</u>	<u>Grundzüge der Planartechnik</u>	<u>246</u>
8.1.	Diffusionsmaskierung	250
8.2.	Herstellung von Isolierschichten	258
8.2.1.	Thermische Oxidation	258
8.2.2.	CVD-Abscheidung von Isolierschichten	263
8.2.3.	Kathodenzerstäubung.	265
8.2.4.	Anodische Oxidation	268
8.2.5.	Physikalische Eigenschaften von verschiedenen Isolierschichten und Silizium.	269
8.3.	Lithographie	271
8.3.1.	Fotolithographie	272
8.3.2.	Herstellung von Fotomasken	274
8.3.3.	Belichtungsverfahren der Fotolithographie	277
8.3.4.	Verfahrensschritte bei der Fotolithographie.	281
8.3.5.	Elektronenstrahlolithographie	284
8.3.6.	Röntgenstrahl-Lithographie	288
8.3.7.	Ionenstrahl-Lithographie	291
8.4.	Ätztechnik	294
8.4.1.	Naßchemisches Ätzen.	295
8.4.2.	Trockenätzen.	297
8.5.	Metallisierung.	301
8.6.	Zusammenfassende Darstellung der Verfahrensschritte bei der Herstellung eines Silizium-Epitaxial-Planar-Transistors	303
8.7.	Ausgewählte Bauelemente	305
8.7.1.	Epitaxial-Basistransistor	305
8.7.2.	HF-Leistungstransistor in "Overlay"-Technik	306
8.7.3.	Vollemitter-Transistor	308
8.7.4.	Hochspannungstransistor.	309
8.8.	Ausgewählte Probleme der Planartechnik	310
8.8.1.	Vergrabene Schichten	310

8.8.2.	Einstellung der Minoritätsträger-Lebensdauer durch Golddiffusion	311
8.8.3.	Emittiertreibeffekt	312
8.8.4.	Laterale Diffusionseffekte	313
8.8.5.	Störende Einflüsse bei der Planartechnik . .	313
<u>9.</u>	<u>Gehäuse- und Montagetechnik</u>	<u>315</u>
9.1.	Gehäusetypen	317
9.2.	Montage der Plättchen im Gehäuse	321
9.3.	Kontaktierung mit Drähten	323
9.4.	Andere Kontaktierungs- und Montagethoden	327
9.5.	Verkapselung	333
<u>10.</u>	<u>Spezielle Technologien für die Herstellung Integrierter Schaltungen</u>	<u>335</u>
10.1.	Silizium-Steuerelektroden-Technik	335
10.2.	Lokale Oxidation von Silizium	337
10.2.1.	Anwendung der lokalen Oxidation von Silizium für drei verschiedene Grundstrukturen. .	340
10.2.2.	Beurteilung der lokalen Oxidation im Vergleich zur konventionellen Planartechnik . .	342
10.2.3.	Probleme der lokalen Oxidation	343
10.2.4.	"LOCOS II"-Technik.	344
<u>11.</u>	<u>Einführung in die Technik der Schaltungsintegration</u>	<u>346</u>
11.1.	Integrierte Schaltungen mit bipolaren Transistoren .	346
11.2.	Integrierte Schaltungen mit MOS-Transistoren	352
11.3.	Besondere Merkmale der MOS-Technik	357
11.4.	Weitere Konzepte der Schaltungsintegration	359
11.4.1.	Varianten von Integrierten Schaltungen mit bipolaren Transistoren	359
11.4.1.1.	Integrierte Injektionslogik	359
11.4.1.2.	Isolation durch Kollektordiffusion	361
11.4.1.3.	Lokale Oxidation	362
11.4.1.4.	Integrierte Schaltungen für höhere Leistungen	363

Physikalische Größen

A	Fläche oder Richardson-Konstante
a	Gitterkonstante oder Abstand
B	magnetische Induktion
b	Breite
C	Kapazität oder Molkonzentration
D	Diffusionskonstante
D_a	ambipolare Diffusionskonstante (D_p für Löcher und D_n für Elektronen)
D_{eff}	effektive Diffusionskonstante
D_L	Diffusionskonstante für Leerstellendiffusion
D_Z	Diffusionskonstante für Zwischengitterdiffusion
d	Durchmesser, Abstand oder Dicke
E	Energie oder elektrische Feldstärke
E_s	Bildungsenergie von Schottky-Defekten
E_{Fr}	Bildungsenergie von Frenkel-Defekten
E_g	Bandabstand
E_L	Energie der Leitungsbandkante
E_V	Energie der Valenzbandkante
E_F	Fermi-Energie
ΔE	Aktivierungsenergie
dE/dx	Bremskraft (Stopping Power)