

Technische Physik in Einzeldarstellungen Band 16

Begründet von W. Meissner und M. Nábauer

Herausgegeben von F. X. Eder

# Technologie der Galliumarsenid-Bauelemente

von

Waldemar von Münch

Mit 187 Einzelabbildungen



Springer Verlag Berlin Heidelberg New York

J. F. Bergmann Verlag München

1969

*Dr. phil. nat. Waldemar von Münch*  
*Professor im Institut für Halbleitertechnik*  
*der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*

ISBN-13: 978-3-642-88372-9  
DOI: 10.1007/978-3-642-88371-2

e-ISBN-13: 978-3-642-88371-2

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  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1969  
Library of Congress-Catalog-Card-Nr. 79-95564  
Titel-Nr. 6578

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 dürfen.

## Vorwort

Während die Technologie der Germanium- und Siliziumbauelemente bereits vor Jahren eine außerordentlich rasche Entwicklung vom Laborstadium zur industriellen Massenfertigung durchgemacht hat, befindet sich die Technologie der Galliumarsenid-Bauelemente gegenwärtig in einem nur verhältnismäßig langsam fortschreitenden Prozeß des Überganges von der Laborentwicklung zur Fertigungsreife. Diese Tatsache steht in ursächlichem Zusammenhang mit den sehr erheblichen technologischen Schwierigkeiten bei der Herstellung geeigneten Galliumarsenid-Materials und bei der Realisierung von Galliumarsenid-Bauelementen. Ferner sind die Ursachen einiger nachteiliger Eigenschaften von Galliumarsenid-Bauelementen (z.B. Frequenzbegrenzung bei bipolaren Transistoren, Kennlinienveränderungen bei Tunnelnioden) noch nicht vollständig geklärt.

In jüngster Zeit ist nun ein steigender kommerzieller Einsatz von Galliumarsenid-Bauelementen — insbesondere von Höchsthfrequenzdioden und optoelektronischen Bauelementen — zu bemerken. Mit dem Einsatz von Elektronentransfer-Bauelementen kann in Kürze gerechnet werden. Es ist zu erwarten, daß diese neuere Entwicklung, die von wesentlichen Verbesserungen auf dem Materialsektor begleitet wird, auch befruchtend auf die Weiterentwicklung von „klassischen“ Bauelementen (bipolare und Feldeffekttransistoren) wirkt. In dieser Situation erscheint es wünschenswert, einem möglichst großen Kreis von Fachleuten und Studierenden höherer Semester eine zusammenfassende Darstellung des heutigen Standes der Galliumarsenid-Technologie zur Verfügung zu stellen. Die jedem Kapitel beigefügten Literaturverzeichnisse sollen eine Hilfestellung für den an Einzelfragen interessierten Leser geben. Bei der Auswahl der Literaturstellen wurde zusammenfassenden Darstellungen der Vorzug gegeben, da diese — im Vergleich zu Originalarbeiten — dem Leser eine umfassendere und oft besser aufbereitete Information liefern.

W. von Münch

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	1
Literatur . . . . .	3
2. Physikalische Eigenschaften des Galliumarsenids . . . . .	3
2.1 Eigenschaften des reinen Galliumarsenids . . . . .	3
2.2 Eigenschaften des dotierten Galliumarsenids . . . . .	8
Literatur . . . . .	14
3. Galliumarsenid als Grundmaterial für elektronische Bauelemente . . . . .	15
3.1 Dioden und Transistoren . . . . .	15
3.2 Opto-elektronische Bauelemente . . . . .	20
3.3 Elektronentransfer-(GUNN-Effekt-) Bauelemente . . . . .	21
3.4 Germanium-Galliumarsenid-Heterobauelemente . . . . .	22
Literatur . . . . .	23
4. Herstellung und Prüfung des Galliumarsenid-Grundmaterials . . . . .	24
4.1 Horizontale Kristallisation . . . . .	25
4.2 Zugtechnik (CZOCHRALSKI-Verfahren) . . . . .	27
4.3 Tiegfremie Zonenschmelze . . . . .	29
4.4 Epitaxie aus der Gasphase . . . . .	31
4.5 Prüfung des Kristallmaterials . . . . .	38
Literatur . . . . .	44
5. Diffusionstechnik . . . . .	46
5.1 Diffusion aus der Gasphase . . . . .	49
5.11 Donatordiffusion aus der Gasphase . . . . .	52
5.11.1 Schwefeldiffusion . . . . .	54
5.11.2 Selendiffusion . . . . .	55
5.11.3 Tellurdiffusion . . . . .	57
5.11.4 Zinndiffusion . . . . .	58
5.12 Akzeptordiffusion aus der Gasphase . . . . .	60
5.12.1 Magnesiumdiffusion . . . . .	60
5.12.2 Zinkdiffusion . . . . .	61
5.12.3 Cadmiumdiffusion . . . . .	68
5.12.4 Mangandiffusion . . . . .	69
5.2 Diffusion aus der festen Phase . . . . .	70
5.21 Siliziumdiffusion . . . . .	71
5.22 Berylliumdiffusion . . . . .	72
5.23 Diffusion aus dotierten Siliziumdioxidschichten . . . . .	73
5.23.1 Zinndiffusion aus Siliziumdioxid . . . . .	79
5.23.2 Zinkdiffusion aus Siliziumdioxid . . . . .	81
5.23.3 Doppeldiffusion aus Siliziumdioxid . . . . .	83

5.3 Maskierung . . . . .	84
5.31 Maskierung mit Siliziumdioxid . . . . .	89
5.32 Andere Maskierungssubstanzen . . . . .	92
Literatur . . . . .	93
6. Legierungstechnik . . . . .	94
6.1 Epitaxie aus der flüssigen Phase . . . . .	95
6.2 Ohmsche Kontakte . . . . .	100
Literatur . . . . .	103
7. Dioden . . . . .	103
Literatur . . . . .	106
8. Bipolare Transistoren . . . . .	106
8.1 <i>npn</i> -Transistoren . . . . .	106
8.11 Doppeldiffusion aus der Gasphase. . . . .	107
8.12 Diffusion aus fester Quelle und Gasphase. . . . .	115
8.13 Doppeldiffusion aus fester Phase . . . . .	117
8.14 Epitaxie-Diffusion . . . . .	119
8.2 <i>pnp</i> -Transistoren . . . . .	120
8.21 Doppeldiffusion aus der Gasphase. . . . .	121
8.22 Diffusion aus fester Quelle und Gasphase. . . . .	122
8.23 Epitaxie-Diffusion . . . . .	123
8.3 Vierschichttransistoren. . . . .	124
Literatur . . . . .	126
9. Feldeffekttransistoren . . . . .	126
9.1 Sperrschicht-Feldeffekttransistoren . . . . .	128
9.2 Feldeffekttransistoren mit isolierter Steuerelektrode . . . . .	130
9.3 Feldeffekttransistoren mit SCHOTTKY-Kontakt . . . . .	131
Literatur . . . . .	135
10. Opto-elektronische Bauelemente . . . . .	135
10.1 Leuchtdioden . . . . .	136
10.2 Injektionslaser. . . . .	139
Literatur . . . . .	146
11. Elektronentransfer-(GUNN-Effekt-)Bauelemente . . . . .	146
Literatur . . . . .	152
12. Integrierte Bauelemente . . . . .	152
Literatur . . . . .	155
Sachverzeichnis . . . . .	156

### Liste der Symbole

$a_0$	Gitterkonstante
$B$	magnetische Induktion
$C$	Konzentration
$\bar{C}$	Flächendichte
$\bar{C}_0$	Oberflächenkonzentration
$C_{Gi}$	Konzentration auf Gitterplätzen
$C_{Zw}$	Konzentration auf Zwischengitterplätzen

$c$	reduzierte Konzentration ( $C/C_0$ )
$C$	Kapazität
$C_c$	Kollektorkapazität
$C_i$	ideale Kapazität der Steuerelektrode (pro Flächeneinheit)
$C_{eff}$	effektive Kapazität der Steuerelektrode (pro Flächeneinheit)
$D$	Diffusionskonstante
$D_0$	auf $T = \infty$ extrapolierte Diffusionskonstante
$D_s$	Diffusionskonstante an der Oberfläche
$D_{Gi}$	Diffusionskonstante für Diffusion auf Gitterplätzen
$D_{Zw}$	Diffusionskonstante für Diffusion auf Zwischengitterplätzen
$D^*$	effektive Diffusionskonstante
$D^\circ$	ambipolare Diffusionskonstante (Elektronen und Löcher)
$d$	Dichte, Dicke
$E$	Energie
$E_a$	Aktivierungsenergie
$E_L$	Energie der Unterkante des Leitungsbandes
$E_V$	Energie der Oberkante des Valenzbandes
$E_G$	Bandabstand
$E'_G$	effektiver Bandabstand
$E_{IX}$	energetischer Abstand zwischen $I^-$ - und $X$ -Minimum
$E_{RL}$	energetischer Abstand zwischen $I^-$ - und $L$ -Minimum
$E_{Fn}$	Energie des Quasi-Ferminiveaus der Elektronen
$E_{Fp}$	Energie des Quasi-Ferminiveaus der Löcher
$F$	Feldstärke
$F_k$	kritische Feldstärke
$f$	Frequenz
$f_{max}$	Grenzfrequenz der Leistungsverstärkung
$f_T$	Grenzfrequenz der Stromverstärkung
$f_{LG}$	Frequenz der Laufzeit-Grundschiwingung
$g_{m0}$	maximale Steilheit
$h$	Plancksches Wirkungsquantum
$I$	Strom
$i$	Stromdichte
$i_t$	Schwellenstromdichte
$k$	Boltzmannkonstante
$\mathbf{k}$	Wellenzahlvektor
$L$	Diffusionslänge ( $\sqrt{D\tau}$ )
$L_n$	Diffusionslänge der Elektronen
$L_p$	Diffusionslänge der Löcher
$l$	Länge
$m_0$	Elektronenmasse
$m_n$	effektive Masse der Elektronen
$m_p$	effektive Masse der Löcher
$N_A$	Akzeptorenkonzentration
$N_D$	Donatorenkonzentration
$N_{AA}$	Konzentration tiefliegender Akzeptoren
$N_{DD}$	Konzentration tiefliegender Donatoren
$N_L$	effektive Termdichte des Leitungsbandes
$N_V$	effektive Termdichte des Valenzbandes
$n$	Elektronenkonzentration
$n_0$	Gleichgewichts-Elektronenkonzentration
$n_i$	Eigenkonzentration

$n$	Brechungsindex
$p$	Löcherkonzentration
$p_D$	Dampfdruck
$p_{As}$	Arsendampfdruck
$Q_n$	Flächendichte beweglicher Ladungsträger
$Q_S$	Flächendichte der Ladungsträger in Grenzflächenzuständen
$q$	Elementarladung
$R$	Reflexionsfaktor
$R_H$	HALL-Konstante
$r_b$	Basiswiderstand
$S_{ph}$	Photonenstromdichte
$T$	absolute Temperatur
$T_S$	Schmelzpunkt
$t$	Zeit
$U$	Spannung
$U_B$	Durchbruchspannung
$U_{A0}$	Sättigungsspannung
$U_G$	Steuerspannung
$U_{PGM}$	photogalvanomagnetische Leerlaufspannung
$\Delta U_{PL}$	Spannungsänderung durch Photoleitung
$V_{As}$	Arsen-Leerstelle
$V_{Ga}$	Gallium-Leerstelle
$v_{dr}$	Driftgeschwindigkeit
$x$	Ortskoordinate (Abstand von der Oberfläche)
$x_0$	Dicke einer Quellen- oder Maskierschicht
$x_{00}$	Grenzdicke vollständiger Maskierung
$x_j$	Abstand des $pn$ -Überganges von der Oberfläche
$\alpha$	Absorptionskonstante, Stromverstärkung in Basisschaltung
$\beta$	Ausdehnungskoeffizient, Stromverstärkung in Emitterschaltung, Lichtverstärkung pro Längeneinheit und Einheit der Stromdichte
$\epsilon$	Dielektrizitätskonstante
$\epsilon_0$	Vakuum-Dielektrizitätskonstante
$\epsilon_r$	relative Dielektrizitätskonstante
$\Theta_D$	DEBYE-Temperatur
$\kappa$	Verteilungskoeffizient
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit, Wellenlänge
$\lambda_{min}$	Wellenlänge minimalen Reflexionsvermögens
$\mu_n$	Elektronenbeweglichkeit
$\mu_p$	Löcherbeweglichkeit
$\mu_{n\Gamma}$	Elektronenbeweglichkeit im $\Gamma$ -Minimum
$\mu_{nX}$	Elektronenbeweglichkeit im $X$ -Minimum
$\nu$	Lichtfrequenz
$\rho$	spezifischer Widerstand
$\rho_i$	spezifischer Widerstand bei Eigenleitung
$\sigma$	spezifische Leitfähigkeit
$\tau$	Zeitkonstante
$\tau_b$	Trägerlaufzeit durch die Basis
$\tau_n$	Lebensdauer der Elektronen
$\tau_p$	Lebensdauer der Löcher
$\tau_{PL}$	Lebensdauer aus Photoleitung
$\tau_{PGM}$	Lebensdauer aus photogalvanomagnetischem Effekt
$\tau_{\Gamma X}$	Zeitkonstante für Umbesetzung zwischen $\Gamma$ - und $X$ -Minimum