LANDOLT-BÖRNSTEIN

Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology

Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik

Neue Serie

Group III: Crystal and Solid State Physics

Volume 17

Semiconductors

Editors: O. Madelung · M. Schulz · H. Weiss†

Subvolume d

Technology of III–V, II–VI and Non-Tetrahedrally Bonded Compounds

Edited by M. Schulz · H. Weiss†

Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York · Tokyo 1984

LANDOLT-BÖRNSTEIN

Zahlenwerte und Funktionen
aus Naturwissenschaften und Technik

Neue Serie

Gesamtherausgabe: K.-H. Hellwege · O. Madelung

Gruppe III: Kristall- und Festkörperphysik

Band 17
Halbleiter

Herausgeber: O. Madelung · M. Schulz † H. Weiss †

Teilband d

Technologie der III–V, II–VI und nicht-tetraedrisch gebundenen Verbindungen

J. Baars · P. Glasow · R. Helbig · H. Jacob
K. Kassel · H. Maier · G. Müller · H. Runge
M. Schulz · E. Tomzig · C. Weyrich

Herausgegeben von M. Schulz · H. Weiss †

Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York · Tokyo 1984

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik /Landolt-Börnstein. – Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer. – Parallelt.: Numerical data and functional relationships in science and technology. – Teilw. mit d. Erscheinungsorten Berlin, Heidelberg, New York

NE: Landolt, Hans [Begr.]; PT. N.S Gesamthrsg: K.-H. Hellwege; O. Madelung. Gruppe 3, Kristall- und Festkörperphysik. Bd. 17. Halbleiter /Hrsg.: O. Madelung ... Teilbd. d. Technologie der III–V, II–VI und nicht-tetraedrisch gebundenen Verbindungen / J. Baars ... Hrsg. von M. Schulz; H. Weiss. – 1984.

ISBN 3-540-11779-2 Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo
ISBN 0-387-11779-2 New York, Heidelberg, Berlin, Tokyo

NE: Hellwege, Karl-Heinz [Hrsg.]; Schulz, Max [Hrsg.]; Baars, J. [Mitverf.]

Printed in Germany

Typesetting: Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg; printing: Druckhaus Langenscheidt KG, Berlin; bookbinding: Lüderitz & Bauer GmbH, Berlin

2163/3020 – 543210

Contributors

J. Baars, Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik, 7800 Freiburg, FRG
P. Glasow, Siemens AG, 8520 Erlangen, FRG
R. Helbig, Institut für Angewandte Physik der Universität, 8520 Erlangen, FRG
H. Jacob, Wacker-Chemitronic, 8263 Burghausen, FRG
K. Kassel, Ringstraße 25, 4788 Warstein 2, FRG
H. Maier, TELEFUNKEN electronic GmbH, 7100 Heilbronn, FRG
G. Müller, Institut für Werkstoffwissenschaften der Universität, 8520 Erlangen, FRG
H. Runge, Siemens AG, 8000 München 83, FRG
M. Schulz, Institut für Angewandte Physik der Universität, 8520 Erlangen, FRG
E. Tomzig, Wacker-Chemitronic, 8263 Burghausen, FRG
C. Weyrich, Siemens AG, 8000 München 83, FRG
Co-authors: H. Albrecht, C. Clemen, M. Druminski, P. Eckstein, S. Gisdakis, J. Heinen, H. Huber, S. Leibenzeder, J.E. Müller, M. Plihal, F. Raisch, K. Schwarzmichel, R. Trommer, Siemens AG, 8000 München 83, FRG

Vorwort

Bereits in der 6. Auflage des Landolt-Börnstein waren Tabellen über die Physik und die Technologie der Halbleiter in verschiedenen 1959, 1962 und 1965 erschienenen Bänden enthalten. In der neuen Serie bietet jetzt der Band III/17, zu dem der hier vorgelegte Teilband III/17d gehört, erstmals in dieser umfassenden Form ein detailliertes und vollständiges Daten- und Informationsmaterial über Halbleiter an. Die Daten der physikalischen Eigenschaften füllen sieben, die der Technologie zwei Teilbände. Eine Übersicht über den Inhalt aller Teilbände ist auf der Innenseite des Einbanddeckels abgedruckt.

Die technologischen Daten und Informationen erscheinen zusammengefaßt in den zwei Teilbänden III/17c und III/17d im Anschluß an die physikalischen Daten der tetraedrischen Halbleitermaterialien. Dem Gewicht der Anwendungen entsprechend ist vor allem der Siliciumtechnologie im Teilband III/17c ein großes Volumen gewidmet. Der vorliegende Teilband III/17d behandelt ausführlich die Technologie der III–V- und II–VI-Halbleiter und einiger nicht-tetraedrisch gebundener Materialien, die eine praktische Anwendung gefunden haben.

Für jedes Halbleiter-Material reicht die Information über technologische Materialdaten der Halbleiter selbst und der verwendeten Hilfsstoffe für die Technologie, über die Angabe der erreichten Materialgüte, bis hin zu technologischen Verfahren, die in der Bauelementherstellung verwendet werden.

Es war für die Herausgeber und die Autoren nicht leicht, eine einheitliche Darstellungsform und eine angemessene Schranke für den Gesamtumfang so zu finden, daß die wichtige nutzbare Information nicht in unwesentlichen Einzelheiten erstickt. Gerade die Halbleitertechnologie befindet sich derzeit noch in einer rasch fortschreitenden Entwicklung, so daß bei zu vielen technologischen Details die Gefahr des Veraltens besteht. Es wurde daher bei speziellen Verfahren und nicht allzu gebräuchlichen Variationen häufig in Übersichtstabellen auf die spezifische Fachliteratur verwiesen.

In einigen Spezialgebieten erfolgt die Weiterentwicklung der Technologie so rasch, daß schon während der Bearbeitungszeit der Buchherausgabe wesentliche Fortschritte erzielt wurden und neue Technologien entstanden sind. Kleinere Ergänzungen wurden noch während der Korrekturen in diesen Band eingearbeitet. Umfangreiche Kapitel zu neuen Gebieten sollen zu gegebener Zeit in einem Ergänzungsband dargestellt werden.

Die Texte nehmen einen etwas größeren Raum ein als in den vorhergehenden Teilbänden, da technologische Fakten der tabellarischen Darstellung nicht so gut angepaßt sind wie physikalische Zahlenwerte. Auf eine Erklärung der Funktionsprinzipien der Bauelemente wird verzichtet. In den einleitenden Kapiteln zur Bauelement-Technologie wird jedoch auf das Zusammenwirken der verschiedenen Technologieschritte und auf die möglichen Alternativen hingewiesen.

Insgesamt hoffen wir, die Darstellung so gewählt zu haben, daß ein nützliches Nachschlagewerk für die Forschungs- und Entwicklungslaboratorien von Hochschulen und Industrie entstanden ist.

Die Herausgabe von Technologie-Tabellen im Band III/17 der „Neuen Serie des Landolt-Börnstein" wurde geplant und begonnen von Herbert Weiß, der bereits 1959 zusammen mit H. Welker die ersten Halbleiter-Daten im Landolt-Börnstein publiziert hatte. Infolge eines tragischen Unfalls hat H. Weiß die Vollendung dieser 2., wesentlich vollständigeren Bearbeitung nicht mehr erlebt. Als Erlanger Kollege des Verstorbenen hat der Mitherausgeber gerne die ehrenvolle Aufgabe übernommen, die Herausgabe der beiden Technologie-Teilbände abzuschließen.

Diese umfangreiche Datenzusammenstellung über Verbindungshalbleiter im 2. Technologieband III/17d war nur möglich dank der guten Kooperation der Autoren, die allen Änderungs- und Ergänzungswünschen durch die Herausgeber in ihren Manuskripten bereitwillig nachgekommen sind. Gedankt sei auch den Mitarbeitern in der Landolt-Börnstein-Redaktion, insbesondere Herrn Dr. H. Seemüller und Frau E. Hofmann für Ihre engagierte Mitarbeit, ferner meiner Sekretärin in Erlangen, Frau G. Loy, sowie dem Springer-Verlag für ein weiteres Beispiel hervorragender Buchherstellung.

Dieser Band wird wie alle Bände des Landolt-Börnstein ohne finanzielle Hilfe von anderer Seite veröffentlicht.

Erlangen, im Februar 1984 **Der Herausgeber**

Preface

Several volumes of the 6th edition of Landolt-Börnstein which were published in 1959, 1962, and 1965 already included tables on the physics and technology of semiconductors. A detailed and complete presentation of information on semiconductors is published for the first time in this comprehensive form within the New Series in volume III/17, of which this subvolume III/17d is a part. The data on physical properties are published in seven, the technological information in two subvolumes. A survey of the contents of all subvolumes is printed on the inside of the cover.

The technological data and informations are compiled in the two subvolumes III/17c and III/17d subsequent to the subvolumes on physical data of tetrahedrally bonded semiconductors. In accordance with the importance of the applications, emphasis has been placed especially on the Si-technology which is presented in subvolume III/17c. This present subvolume III/17d compiles detailed technological information on the III–V and II–VI compounds and on several non-tetrahedrally bonded semiconductors, which have found technical applications.

For each semiconductor material, information is presented on the technological material data of the semiconductor itself and of auxiliary chemicals applied during the processing, on the material quality, and on the technological processes used in device fabrication. The editor and the authors had no easy task to find a standardized form of presentation and an appropriate limit to the total extent in such a way that the important information requested is not drowned in unnecessary details. This is especially so because semiconductor technology is still under rapid development at the moment. Too many technical details would increase the risk of obsolescence. Technological variations and special methods are therefore often surveyed in tables. References are given to specific literature where necessary.

In several areas, the progress of semiconductor technology was so rapid that even during the editing of the book important new technologies appeared and essential advances were made in processing. Minor additions and corrections could still be introduced into this book during proof reading. Major new developments, however, will be presented in a comprehensive form in a supplement volume in due time.

The technological subvolumes contain more text than the previous subvolumes. Descriptions of technology cannot as easily be presented in tabular form as physical data. The functional principles of the different devices are not explained. However, the introductory chapters to device technology discuss the mutual dependence of the different technological steps and mention alternatives.

We hope to have chosen the form of presentation in such a way that a useful reference work for research and development in laboratories, universities, and industry is possible.

The technology tables in volume III/17 were planned and commenced by Herbert Weiß, who had already edited the first semiconductor data together with H. Welker in the Landolt-Börnstein in 1959. Because of a tragic accident, H. Weiß could not see the completion of this second, more comprehensive manuscript. The editor, a colleague of H. Weiß at Erlangen university, considered it an honour to continue with the edition of the two technology subvolumes.

This comprehensive data collection on the technology of compound semiconductors in the present subvolume III/17d was only possible by the good cooperation of the authors, who readily conformed to all requests for changes and additions to their manuscripts. Thanks are also due to the members of the editorial staff of the Landolt-Börnstein, especially to Dr. H. Seemüller and Frau E. Hofmann whose competent work was of great assistance, furthermore to my secretary in Erlangen, Frau G. Loy, as well as to the Springer-Verlag for another example of excellent book production.

This volume is published without financial assistance from any other organization, as are all the other volumes of the Landolt-Börnstein.

Erlangen, February 1984 **The Editor**

Table of contents

Semiconductors

Subvolume d: Technology of III–V, II–VI and non-tetrahedrally bonded compounds

(edited by M. SCHULZ · H. WEISS†)

A. Introduction

1 General remarks

Contents of the technology sections

Data are listed for pure and doped semiconductors. Methods, procedures, and materials and apparatuses employed in the synthesis and purification of materials and for the growth of single crystals are described. Typical crystal properties obtained and diagnostic techniques used for the characterization are outlined. Detailed information is presented on the basic device structures and the processing involved in their fabrication. If fundamental physical semiconductor data are requested, the reader is referred to the subvolumes 17a and 17b. Only those fundamental physical semiconductor data, which are frequently used in device technology are repeated for convenience.

Form of presentation

Technological facts are summarized in the form of tables or are presented in concise statements. Where possible, relations of parameters, flow diagrams of procedures, and outlines of constructions are depicted in figures. Important technological terms or crucial facts and numbers are pointed out for easy finding by using *italic letters*.

Organization of chapters

A detailed classification scheme is used so that the information requested can be easily traced by the table of content and the headings of paragraphs. A 5-digit decimal classification is employed to organize the technological sections. Additional unnumbered headings of paragraphs guide the reader to the information requested without the need to read a whole section or paragraph.

The decimal classification continues from the sections on fundamental physical data in the subvolumes III/17a, b. The sections 6 and 7 contain the technology data of tetrahedrally and non-tetrahedrally bonded semiconductors, respectively. The order of semiconductor materials listed is the same as in the sections on fundamental physical data. The order is shown on the inside of the front cover.

For each material, subsections (3. digit in decimal classification) are presented which include the following information:[1])

1. Technological data:

phase diagrams
vapour pressures
solubilities
melt diffusion coefficients
distribution coefficients
viscosity
surface tension
etc.

2. Crystal growth:

synthetization
purification
zone melting
pulling techniques
directional solidification
sheet growth
vapour phase growth
gradient freeze methods
solid state recrystallization
wafer preparation
etc.

3. Characterization of crystal properties:

doping profiles
impurities
defects
polytype verification
surface properties
diagnostic techniques
etc.

4. Device technology:

basic device structures
diffusion
ion implantation
nuclear transmutation doping
epitaxy
fabrication of layers
metallization
lithography
etching processes
final device preparation
etc.

The further classification of the topics listed is not unified because the topics vary according to the applicability of various technological steps or data for each material.

[1]) This survey is also shown on the fly-leaf.

2 Frequently used symbols

The symbols used are consistent throughout all the subvolumes III/17a···i of the Landolt-Börnstein volume III/17 on semiconductor data. The units given are most frequently used in the figures and tables. For the conversion of equivalent units see Tables 4 and 5.

Table 1. Alphabetical list of symbols.[2])

Symbol	Property	Unit
a	thermal diffusivity $\left(a=\frac{\kappa}{d\cdot C}\right)$	$cm^2 s^{-1}$
a	lattice constant of wurtzite crystals	$Å=10^{-10}m$
a	radioactivity	s^{-1}
A	area	cm^2
b	line width	$nm=10^{-9}m$
$\boldsymbol{b}$	Burgers vector	$Å=10^{-10}m$
B	brightness (of ion sources)	$A cm^{-2} s^{-1}$
$\boldsymbol{B}$	magnetic induction	$T=V s m^{-2}$
c_{ij}	elastic stiffness coefficients	$N m^{-2}$
c	velocity of light	$cm s^{-1}$
c	lattice constant of wurtzite crystals	$Å=10^{-10}m$
c	concentration, solubility	cm^{-3}, at%, atoms cm^{-3}, ppm
C	capacitance	$F=A s V^{-1}$
C	specific heat	$J mol^{-1} K^{-1}$, $cal g^{-1} K^{-1}$
$CSDG$	critical stress of dislocation generation	$g mm^{-2}$
$CRSS$	critical resolved shear stress	$g mm^{-2}$
d	depth, layer thickness, diameter	μm
d	specific density	$g cm^{-3}$
d	lattice constant of cubic crystals	$Å=10^{-10}m$
D	diffusion coefficient	$cm^2 s^{-1}$
D^*	detectivity of ir-detectors	$cm Hz^{-\frac{1}{2}} W^{-\frac{1}{2}}$
e	elementary charge	$C=As$
E	electrical field strength	$V cm^{-1}$
E	energy	$VAs=J, eV$
f	focal length	$mm=10^{-3}m$
f	frequency	Hz
f	misfit parameter	–
f	factor	–
F	Gibbs free energy (free enthalpy)	$cal mol^{-1}$, $J mol^{-1}$
FF	fill factor	–
g	gain factor	–
g	generation/evaporation rate	s^{-1}
	per volume	$cm^{-3} s^{-1}$
	per area	$cm^{-2} s^{-1}$
g	gravitational acceleration	$cm s^{-2}$
G	Gibbs free energy (free enthalpy)	$cal mol^{-1}$, $J mol^{-1}$
$\hbar$	Planck constant, $\hbar=h/2\pi$	$J s$
h	height	m
H	enthalpy	$cal mol^{-1}$, $J mol^{-1}$
H	hardness	$Pa=N m^{-2}$
	empirical scale	–
I	flux density	$cm^{-2} s^{-1}$
I	electrical current	A
j	electrical current density	$A cm^{-2}$
k	distribution or segregation coefficient	–

[2]) Please also consult Table 3.

Symbol	Property	Unit
$\boldsymbol{k}$	wave vector	cm^{-1}
k	electromechanical coupling factor	–
k	Boltzmann constant	JK^{-1}
k	reaction rate	s^{-1}
K	equilibrium constant	–
K	absorption coefficient	cm^{-1}
$K(\equiv a)$	thermal diffusivity	$cm^2 s^{-1}$
L, l	length	m
m	mass	g
M	molecular weight	–
	total mass, weight	kg
n	ideality factor	–
n	electron concentration	cm^{-3}
n	refractive index	–
N	concentration of dopant	cm^{-3}
NA	numerical aperture $NA = n \sin \alpha$	–
p	hole concentration	cm^{-3}
p	pressure	$Pa = 10^{-5}$ bar
P	power	Js^{-1}
Pr	Prandtl number	–
Q	charge	As
Q	activation energy of diffusion coefficients	eV
r	rate	s^{-1}
r	ratio	–
r	Hall scattering factor	–
r	radial distance	m
R	radius	m
R	resistance	$\Omega = VA^{-1}$
R	reflectivity	–
R_0	gas constant	$Jmol^{-1} K^{-1}$
R_H	Hall coefficient	cm^3
R_p	projected range	µm
s	solidified fraction	–
s	spacing, proximity distance	µm
S	selectivity	–
S	sensitivity	Jcm^{-2}, Ccm^{-2}
S	entropy	$calmol^{-1}K^{-1}, Jmol^{-1}K^{-1}$
t	time	s
T	temperature	K
u	undercutting	µm
v	velocity	cms^{-1}
V	voltage	V
V	volume	m^3
w	concentration	wt %
w	width	m
x	mole fraction, atomic fraction	–
x	variable distance	m
x	electronegativity of metals	–
X	stress	$Pa = Nm^{-2}$
Z, z	figure of merit	–
Z	atomic number	–
⟨ ⟩ or (s)	indicates solid material	
{ } or (l)	indicates liquid material	
( ) or (g)	indicates gaseous material	
$[\,]_x$	indicates dissolved in X	
∅	diameter	

Table 2. Greek symbols.

Symbol	Property	Unit
α	angle	°, rad
α	power coefficient	–
α	thermoelectric power	$mV K^{-1}$
α	linear thermal expansion coefficient	K^{-1}
β	absorption coefficient	cm^{-1}
β	angle	°, rad
δ	small thickness	µm
γ	contrast	–
γ	disorder coefficient	–
γ	surface tension	$N m^{-1}$
Δ	difference, change of quantity	
ε	dielectric constant	–
ε_0	dielectric permittivity of free space	$F m^{-1}$
η	efficiency, yield	–
η	viscosity	$Pa s = 10 P$
θ	angle of incidence	°, rad
κ	compressibility	Pa^{-1}
κ	thermal conductivity	$W cm^{-1} K^{-1}$
λ	wavelength	$nm = 10^{-9} m$
μ	mobility	$cm^2 V^{-1} s^{-1}$
$\tilde{\nu}$	wave number $\tilde{\nu} = 1/\lambda$	cm^{-1}
ν	frequency	$Hz = s^{-1}$
ν	kinematic viscosity $\nu = \eta/d$	$m^2 s^{-1} = 10^4$ St
ϱ	resistivity	Ωcm
ϱ	space charge	$C cm^{-3}$
σ	electrical conductivity	$\Omega^{-1} cm^{-1}$
σ	cross-section	cm^2, barn $= 10^{-24} cm^2$
τ	lifetime	s
φ	azimut, phase angle	°, rad
Φ	barrier energy, work function	eV
χ	electron affinity	eV
χ	susceptibility	–
ω	angular frequency	$rad s^{-1}$

Table 3. Meaning of indices used.
The following indices are frequently used to further specify the symbols of Tables 1 and 2. Where the same letter is used, different meanings can be usually distinguished from the context in which they appear.

Index	Meaning	Index	Meaning
a	anneal	d	decay
a	acceptor	D	diffusion
abs	absolute value	D	drain
A	activation	e	electron
b	boiling	e	etch
b	bulk material value	E	emitter
B	barrier	eff	effective
B	base electrode of transistor	ex	external
c(rit)	critical value	f	forward
calc	calculated	f	formation
cw	continuous wave	f	facet
C	conduction band	F	Fermi
C	contact	FB	flatband
C	collector	g	gaseous
d	donor	g	growth
d	dopant	g	gap