

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	15
2.	Physikalische Grundlagen	16
2.1.	Freie Elektronen und freie Ionen	16
2.2.	Kristallbindungen	16
2.3.	Bandstruktur	17
2.3.1.	Elektrische Leitfähigkeit	17
2.3.2.	Energieniveaus der Elektronen	17
2.3.3.	Bändermodell	18
2.3.4.	Bändermodell und Leitfähigkeit	20
2.3.5.	Fermi-Dirac-Verteilung	21
2.3.6.	Eigenleitung	22
2.3.7.	Störstellenleitung	24
2.4.	Rekombination	26
2.5.	Ohmsches Gesetz für Halbleiter	26
2.6.	Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit	28
2.7.	Charakteristische Halbleitereigenschaften	29
2.8.	Halbleiterparameter	29
3.	Grundfunktionen der Halbleiterbauelemente	31
3.1.	Gleichrichtereffekt	31
3.2.	Bipolarer Transistoreffekt	31
3.3.	Thyristorprinzip	32
3.4.	Tunneleffekt	33
3.5.	Gunn-Diode	34
3.6.	Lasereffekt und Injektionslumineszenz	34
3.7.	Hall-Effekt	35
3.8.	Feldeffekt	35
3.9.	Schottky-Effekt	36
3.10.	Einteilung der Halbleiterbauelemente	38
4.	Allgemeines zur Technologie der Halbleiterwerkstoffe	39
5.	Theorie des Zonenschmelzens	40
5.1.	Segregation	40
5.1.1.	Verteilungskoeffizient	40
5.1.2.	Normalerstarung	40

5.1.3.	Effektiver Verteilungskoeffizient	42
5.1.4.	Verfahren zur k -Wert-Bestimmung	43
5.1.5.	Zonenschmelzen mit nicht durchmischter Schmelze	45
5.1.6.	Multizonenverteilung	45
5.1.7.	Endverteilung	46
5.2.	Selektive Abdampfung	47
6.	Einkristallzüchtung	49
6.1.	Kristallographische Begriffe	49
6.1.1.	Aufbau der Kristalle, Kristallsysteme	49
6.1.2.	Flächen und Richtungen im Kristallgitter	49
6.2.	Theoretische Grundlagen des Kristallwachstums	50
6.2.1.	Keimbildung in der Schmelze	51
6.2.2.	Einkristallwachstum	51
6.2.2.1.	Lineare Wachstumsgeschwindigkeit	51
6.2.2.2.	Theorie des Kristallwachstums nach <i>Vollmer</i>	52
6.2.2.3.	Molekular-kinetische Theorie des Kristallwachstums	52
6.2.2.4.	Einfluß der Realstruktur auf das Kristallwachstum	53
6.2.2.5.	Kristallisation aus einer Schmelze	54
6.2.2.6.	Einfluß von gelösten Fremdstoffen auf die Kristallisation aus der Schmelze	56
6.2.2.7.	Dendritisches Wachstum	57
6.3.	Verfahren zur Züchtung von Einkristallen aus der Schmelze	58
6.3.1.	Allgemeine Gesichtspunkte zur Züchtung von Halbleiterkristallen aus der Schmelze	58
6.3.2.	Verfahren der gerichteten Erstarrung (Bidgman-Verfahren)	59
6.3.3.	Ziehverfahren nach Chzochralski	60
6.3.4.	Schwimmtiegelverfahren	64
6.3.5.	Durchmesserstabilisierung beim Chzochralski-Verfahren	65
6.3.6.	Zonenschmelzverfahren	66
6.3.7.	Tiegelfreie Einkristallzüchtung	67
6.3.8.	Verfahren zur Züchtung von bandförmigen Halbleiterkristallen	70
6.3.8.1.	Dendritische Bänder	71
6.3.8.2.	Einkristalline Bänder	71
7.	Mechanische Kristallbearbeitung	74
7.1.	Mechanische Eigenschaften von Einkristallen und deren Auswirkungen bei der Kristallbearbeitung	75
7.1.1.	Plastizität	75
7.1.2.	Spaltbarkeit	76
7.1.3.	Härte, Ritzhärte	77
7.2.	Modelle der mechanischen Belastungsarten von Kristalloberflächen und ihr Zusammenhang mit den realen Bearbeitungsverfahren	79
7.2.1.	Eindrücken von Spritzen	79
7.2.2.	Eindrücken von Kugeln	80
7.2.3.	Ritzen mit Spitzen	80
7.2.4.	Partikelbeschuß	80

7.3.	Gestörte Schichten als Folge der mechanischen Kristallbearbeitung	81
7.3.1.	Störschichtmodell	81
7.3.2.	Bestimmung der Störtiefe	82
7.3.3.	Abhängigkeit der Störtiefe von Kristall- und Bearbeitungsparametern	82
7.4.	Kristallographische Orientierung	83
7.4.1.	Begriffe der Orientierungsmeßtechnik	83
7.4.2.	Orientierungsmethoden	85
7.5.	Mechanische Bearbeitungsverfahren	92
7.5.1.	Trennen von Einkristallen (Schneiden)	92
7.5.2.	Schleifen	94
7.5.3.	Läppen	95
7.5.4.	Polieren	98
7.5.5.	Vereinzeln	101
7.5.5.1.	Ritzen und Brechen	101
7.5.5.2.	Präzisions-Hochgeschwindigkeitstrennschleifen	102
7.5.5.3.	Trennschleifen mit Gattern	103
7.5.5.4.	Hubläppen	103
7.5.5.5.	Ultraschall-Stoßläppen	104
7.5.5.6.	Spalten	104
7.5.5.7.	Strahlläppen	104
7.5.6.	Kantenverrunden von Halbleiterscheiben	105
7.6.	Gravieren, Ritzen und Vereinzeln mit Laserstrahlen	105
7.6.1.	Störungsarten durch Laserstrahleinwirkung	106
7.6.2.	Lasergravieren, -ritzen und -vereinzeln	106
7.6.3.	Reinigung laserbearbeiteter Scheiben	107
7.7.	Definition von geometrischen Scheibenparametern und deren Kontrolle	107
7.8.	Kontrolle von polierten Halbleiterscheiben	108
7.8.1.	Visuelle Kontrolle und Fehlererscheinungen	108
7.8.2.	Objektive Meßmöglichkeiten	109
7.9.	Zusammenstellung der Art der Messungen, Meßmittel und gemessene Größen bei Halbleiterscheiben	110
8.	Epitaxie	111
8.1.	Einleitung	111
8.2.	Grundlagen der Epitaxie	112
8.2.1.	Keimbildung von Wachstum	112
8.2.2.	Einbau von Fremdatomen	112
8.2.3.	Epitaxiesysteme	113
8.2.4.	Gitteranalogie und Gitteranpassung	113
8.3.	Substrat	114
8.3.1.	Substrateigenschaften	114
8.3.2.	Substratorientierung	114
8.3.3.	Substratvorbehandlung	115
8.4.	Verfahren der Epitaxie	115
8.4.1.	Kristallisation aus der festen Phase	115
8.4.2.	Verfahren aus der flüssigen Phase	116
8.4.2.1.	Epitaxie aus der Schmelze	116
8.4.2.2.	Lösungskristallisation	116
8.4.3.	Chemische Gasphasenreaktionen	118

8.4.3.1.	Normaldruckverfahren	121
8.4.3.2.	Niederdruck-CVD-Verfahren	123
8.4.4.	Physikalische Dampfphasenabscheidung	124
8.4.4.1.	Aufdampfen und Sputtern	124
8.4.4.2.	Molekularstrahlepitaxie	125
8.5.	Materialcharakterisierung	126
8.5.1.	Schichtdicke und -homogenität	126
8.5.2.	Mechanische Spannungen	126
8.5.3.	Baufehler	126
8.5.4.	Zusammensetzung	126
8.5.5.	Elektrische Charakterisierung	127
8.6.	Ausblick	127
9.	Kristallbaufehler	128
9.1.	Atomare Fehlordnung und Mikrodefekte	128
9.1.1.	Eigenfehlordnung	128
9.1.2.	Chemische Fehlordnung	129
9.1.3.	Wachstumsstreifen	129
9.1.4.	Ausscheidungen	130
9.2.	Strukturelle Fehlordnung	132
9.2.1.	Versetzungen	132
9.2.2.	Versetzungsringe und Stapelfehler	133
9.2.3.	Versetzungsreaktionen	133
9.2.4.	Versetzungsgeneration und Versetzungsbewegung	134
9.3.	Wechselwirkung zwischen atomarer und struktureller Fehlordnung	136
9.3.1.	Cottrell-Atmosphäre und Getterwirkung	136
9.3.2.	Generation struktureller Fehlordnung an Ausscheidungen	136
9.4.	Systematik der Kristallbaufehler	137
9.4.1.	Wachstumsbedingte Kristallbaufehler	138
9.4.2.	Bearbeitungsbedingte Kristallbaufehler	138
9.4.3.	Prozeßinduzierte Kristallbaufehler	138
10.	Nachweismethoden für Strukturdefekte	140
10.1.	Präparative (Ätz-)Methode	141
10.1.1.	Physikalisch-chemische Grundlagen der Ätzmethode	141
10.1.1.1.	Chemische Reaktion	141
10.1.1.2.	Diffusionskontrollierte Ätzprozesse	143
10.1.1.3.	Kinetisch bedingte Ätzeffekte	144
10.1.2.	Anwendungstechniken der Ätzmethode	145
10.1.2.1.	Präparationstechniken	145
10.1.2.2.	Auswertetechniken	147
10.2.	Lichtmikroskopische Defektanalyse	149
10.3.	Elektronenmikroskopische Defektanalyse	150
10.3.1.	Grundlagen der Bildentstehung bei der Transmissionselektronenmikroskopie	150
10.3.2.	Einsatzgebiet und Anwendungstechniken der Transmissionselektronenmikroskopie	153
10.4.	Rasterelektronenmikroskopische Defektanalyse	153
10.4.1.	Anwendungsbedingte Vorteile	155
10.4.2.	Grundprinzipien der Rasterelektronenmikroskopie	155

10.4.3.	Moden des Rasterelektronenmikroskops	156
10.4.3.1.	Sekundärelektronenmode	156
10.4.3.2.	Rückstreuelektronenmode	157
10.4.3.3.	Leitfähigkeitsmode	157
10.4.3.4.	Katodolumineszenzmode	159
10.4.3.5.	Analytische Moden	160
10.5.	Andere Rastersonden zur Defektanalyse	161
10.6.	Röntgenbeugungsmethoden zur Defektanalyse	162
10.6.1.	Grundlagen der Röntgenbeugung an Kristallen	162
10.6.2.	Techniken der Röntgentopographie	164
10.6.2.1.	Parallelstrahlmethode	164
10.6.2.2.	Planwellentopographie	166
10.6.2.3.	Planwellen-CCT-Technik	166
10.6.2.4.	Röntgendiffraktometrie	167
10.6.2.5.	Besondere Verfahren der Röntgentopographie	168
10.6.3.	Bildentstehung und Auswertung	168
10.7.	Strukturdefektanalysen unterstützende Methoden	170
11.	Elektrische, optische und physikalisch-analytische Meßtechnik	171
11.1.	Problemstellung	171
11.2.	Störstellen	171
11.2.1.	Flache Störstellen	171
11.2.2.	Tiefe Störstellen	173
11.2.3.	Isoelektronische Störstellen	173
11.2.4.	Störstellenreaktionen	174
11.2.5.	Elektronische Übergänge	174
11.2.6.	Ladungsträgertransport	174
11.3.	Untersuchungsverfahren zur Prozeßkontrolle	175
11.3.1.	Leitungstyp	175
11.3.1.1.	Thermosonde	175
11.3.1.2.	Strom-Spannungs-Kennlinie eines Metall-Halbleiter-Kontaktes (Diodenverfahren)	176
11.3.1.3.	Hall-Effekt	177
11.3.2.	Leitfähigkeit, Trägerkonzentration, Trägerbeweglichkeit	177
11.3.2.1.	Zwei-Sonden-Methode	177
11.3.2.2.	Vier-Spitzen-Verfahren	178
11.3.2.3.	Ausbreitungswiderstands-Verfahren	180
11.3.2.4.	Messung der Durchbruchsspannung	181
11.3.2.5.	Hall-Effekt und Leitfähigkeit	182
11.3.2.6.	Kontaktlose Methoden	183
11.3.2.7.	Spannungsabhängigkeit der Kapazität eines Metall-Halbleiter- Kontaktes (C-V-Verfahren)	184
11.3.2.8.	Optische Absorption an freien Ladungsträgern	185
11.3.3.	Lebensdauer der Minoritäts-Ladungsträger	186
11.3.3.1.	Abklingen der Photoleitung	187
11.3.3.2.	Phasenkompensations-Verfahren	188
11.3.3.3.	Doppelimpuls-Verfahren	188
11.4.	Spezielle Meßverfahren	189
11.4.1.	Temperaturabhängigkeit des Hall-Effektes und der Leitfähigkeit	189
11.4.2.	Photoleitung und EBIC	191

11.4.2.1.	Weitere Methoden zur Messung der Diffusionslänge und der Trägerlebensdauer	191
11.4.2.2.	Störstellen-Photoleitung	192
11.4.3.	Lumineszenz	192
11.4.3.1.	Rekombination von an neutralen flachen Störstellen gebundenen Exzitonen	192
11.4.3.2.	Donator-Akzeptor-Paarrekombinationen	195
11.4.4.	Optische Absorption und Raman-Spektroskopie	195
11.4.4.1.	Elektronische Übergänge	195
11.4.4.2.	Lokale Schwingungsmoden	197
11.4.4.3.	Raman-Spektroskopie	199
11.4.4.5.	Kapazitätsspektroskopie	199
11.4.5.1.	Thermisch stimulierte Kapazitätsveränderung	199
11.4.5.2.	Deep-Level-Transient-Spektroskopie	201
11.5.	Physikalische Analyseverfahren zur Bestimmung der chemischen Konzentration von Verunreinigungen	202
11.5.1.	Emissionsspektroskopie	202
11.5.2.	Neutronenaktivierungsanalyse	202
11.5.3.	Sekundärionen-Massenspektroskopie	203
11.5.4.	Elektronenstrahlverfahren	203
11.5.4.1.	Elektronenstrahl-Mikroanalyse (ESMA)	203
11.5.4.2.	Auger-Elektronenspektroskopie	204
12.	Germanium	205
12.1.	Allgemeines	205
12.2.	Physikalische Eigenschaften	205
12.3.	Applikationen	212
13.	Silizium	213
13.1.	Technische Bedeutung und Vorkommen	213
13.2.	Siliziumqualitäten	213
13.3.	Herstellung des technischen Siliziums	214
13.4.	Chemische Darstellung des Reinsiliziums	214
13.5.	Eigenschaften des Siliziums	218
13.5.1.	Chemische Eigenschaften	218
13.5.2.	Physikalische Eigenschaften	218
13.5.3.	Fremdstoffe im Silizium	222
13.6.	Tiegelfreies Zonenschmelzen	228
13.7.	Einkristallzüchtung	230
13.7.1.	Czochralski-Verfahren	230
13.7.2.	Tiegelfreie Einkristallzüchtung	232
13.8.	Stand und Fortschritte	234
13.8.1.	Neue Erkenntnisse zur Herstellung und Einkristallzüchtung	234
13.8.2.	Eigenschaften von CZ- und FZ-Kristallen	236
13.8.3.	Neuere Kristallzüchtungsvarianten	236
13.8.4.	Inhomogenitäten in Siliziumkristallen	238
13.8.5.	Kohlenstoff im Silizium	240
13.8.6.	Sauerstoff im Silizium	241
13.8.7.	Verhalten der Übergangsmetalle	245
13.8.8.	Solarsilizium	247
13.9.	Binäre Zustandsschaubilder	248

14.	Silizide	254
14.1.	Einleitung	254
14.2.	Eigenschaften der Silizide	254
14.2.1.	Phasendiagramm	255
14.2.2.	Strukturelle, mechanische und thermodynamische Eigenschaften der Silizide	257
14.2.3.	Elektrische Eigenschaften der Silizide	258
14.3.	Herstellung der Silizidschichten	261
14.3.1.	Herstellung von Kontaktsilizidschichten	261
14.3.2.	Herstellung von Gate-Silizidschichten	262
14.4.	Experimentelle Methoden zur Charakterisierung der Silizide	263
14.5.	Phasenwachstum	264
14.5.1.	Systematik des Phasenwachstums	264
14.5.1.1.	Metallschichten auf Si-Substrat	264
14.5.1.2.	Amorphe Metall-Si-Gemische	267
14.5.2.	Sequenz des Phasenwachstums für Metallschichten auf Si	268
14.5.3.	Struktur der Silizidschichten, Epitaxie	269
14.5.4.	Mechanische Spannungen in den Silizidschichten	270
14.6.	Einfluß von Verunreinigungen auf die Silizidbildung	270
14.6.1.	Kontaminationen in den Metallschichten	271
14.6.2.	Oxidschichten	272
14.6.3.	Dotandenakkumulation	272
14.7.	Silizidbildungsmechanismus bei Metallschichten auf Si-Substrat	273
14.8.	Anwendungen	273
14.8.1.	Schottky-Kontakte	273
14.8.1.1.	Systematik der Barrierenhöhen	273
14.8.1.2.	<i>I-U</i> -Kennlinien von Silizidkontakten	274
14.8.1.3.	Ohmsche Kontakte	276
14.8.1.4.	Einfluß der Herstellungsbedingungen auf die elektrischen Kontaktparameter	276
14.8.1.5.	Flache Kontakte	277
14.8.1.6.	Reaktionen mit dem Deckmetall, Diffusionsbarrieren	277
14.8.1.7.	Spezielle Anwendungsbeispiele von Silizidkontakten	278
14.8.2.	Silizide in Gate-Metallisierungen	279
14.8.2.1.	Eigenschaften von Polyzid-Leitbahnen	280
14.8.2.2.	Anwendung von Polyziden in MOS-Bauelementen	282
15.	Halbleitende Verbindungen	284
15.1.	Einführung	284
15.2.	Kristallographische Besonderheiten der A ^{III} B ^V -Verbindungen	285
15.3.	Galliumarsenid	286
15.3.1.	Bedeutung des Galliumarsenids	286
15.3.2.	Synthese des Galliumarsenids	287
15.3.3.	Einkristallzüchtung des Galliumarsenids	287
15.3.3.1.	Bridgman-Verfahren	287
15.3.3.2.	Czochralski-Verfahren mit Abdeckschmelze (LEC-Verfahren)	289
15.3.4.	Dotierung des Galliumarsenids	291
15.3.4.1.	<i>n</i> -Dotierung	291
15.3.4.2.	<i>p</i> -Dotierung	292
15.3.4.3.	Halbisolierendes Galliumarsenid	292
15.3.4.4.	Dotierungsinhomogenitäten	293

15.3.5.	Kristallperfektion	294
15.3.5.1.	Strukturprüfung an GaAs-Einkristallen	294
15.3.5.2.	Möglichkeiten zur Verbesserung der Kristallperfektion	294
15.3.6.	Messung der Halbleiterparameter	296
15.3.7.	Bandstruktur und effektive Masse	298
15.4.	Galliumphosphid	298
15.4.1.	Bedeutung des Galliumphosphids	298
15.4.2.	Synthese des Galliumphosphids	299
15.4.3.	Einkristallzüchtung des Galliumphosphids	300
15.4.4.	Kristallperfektion des Galliumphosphids	301
15.4.5.	Dotierung des Galliumphosphids	301
15.5.	Indiumphosphid	302
15.5.1.	Bedeutung des Indiumphosphids	302
15.5.2.	Herstellung des Indiumphosphids	302
15.5.3.	Einkristallzüchtung des Indiumphosphids	303
15.5.4.	Dotierung des Indiumphosphids	303
15.6.	Stand und Fortschritte	304
16.	Anwendung der Halbleiterwerkstoffe – Trend der Bauelemententwicklung	306
16.1.	Einleitung	306
16.2.	Mikroelektronik	306
16.3.	SOI-Technologie	308
16.4.	Festkörper-Mikrowellenbauelemente	309
16.4.1.	Bedeutung	309
16.4.2.	Anwendung von GaAs-Bauelementen	310
16.4.3.	Stand der GaAs-Bauelemententwicklung	311
16.4.4.	InP-Mikrowellenbauelemente	313
16.4.5.	Elektronentransfer-Bauelemente als Sonderfall der Mikrowellenbauelemente	313
16.4.6.	Spezielle Hochfrequenzeigenschaften von GaAs und InP	313
16.5.	Optoelektronische Bauelemente	314
16.6.	Bauelemente der Leistungselektronik	316
16.7.	Photovoltaische Zellen	318
16.8.	Sonstiges	319
	Literaturverzeichnis	321
	Sachwörterverzeichnis	336
	Bilderatlas	343