

# Halbleiterphysik

Lehrbuch für Physiker und Ingenieure

von

Prof. Dr. Rolf Sauer

Oldenbourg Verlag München

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Definition des Halbleiters.....	1
1.2	Stellung der Halbleiter im Periodensystem.....	3
1.3	Chemische Bindung.....	10
1.3.1	Homöopolare (kovalente) Bindung.....	10
1.3.2	Heteropolare (ionische) Bindung.....	11
1.3.3	Gemischte Bindung.....	11
1.4	Grundbegriffe der Halbleiterphysik.....	11
1.4.1	Energieband-Modell: Darstellung im Ortsraum.....	11
1.4.2	Elektrische Leitung.....	17
1.4.3	Energieband-Darstellung im k-Raum.....	29
<b>2</b>	<b>Kristallstrukturen</b>	<b>33</b>
2.1	Das reale Kristallgitter.....	33
2.1.1	Die Grundgitter.....	34
2.1.2	Beispiele für Kristallgitter.....	37
2.1.3	Einzelheiten zuden für Halbleiter wichtigsten Kristallstrukturen.....	38
2.1.4	Ort und Lage von Kristallebenen, Miller-Indizes.....	42
2.2	Das reziproke Gitter.....	43
2.3	Brillouinzone.....	47
2.4	Brillouinzone der drei kubischen Gitter und des hexagonalen Wurtzit-Gitters.....	48
<b>3</b>	<b>Bandstrukturberechnungen</b>	<b>53</b>
3.1	Übersicht.....	53
3.2	Periodisches Kastenpotential.....	62
3.3	Brillouin-Näherung: Das fast-freie Elektron.....	71

3.4	Blochsche Näherung: Das stark gebundene Elektron.....	74
3.5	APW-Methode („Augmented plane Waves“): Zellenmethode.....	78
3.6	OPW-Methode („Orthogonalized Plane Waves“). .....	79
3.7	Pseudopotentialmethode.....	80
3.8	kp-Methode.....	83
3.9	Dispersionsrelationen von Phononen.....	102
<b>4</b>	<b>Bestimmung von Bandstrukturparametern</b>	<b>105</b>
4.1	Zustandsdichte („density of states“). .....	105
4.2	Optische Experimente.....	107
4.2.1	Fundamentalabsorption.....	108
4.2.2	Übergänge in energetisch höhere Bänder.....	113
4.2.3	Rumpfniveau-Spektroskopie („core level spectroscopy“). .....	114
4.2.4	Übergänge in Schichtstrukturen (2D-Systeme). .....	116
4.2.5	Experimenteller Grundaufbau im Spektralbereich NIR .. UV.....	118
4.2.6	Absorption durch freie Ladungsträger.....	118
4.3	Mikrowellen-Resonanzabsorption (Zyklotronresonanz). .....	121
4.4	Photonische Kristalle.....	134
<b>5</b>	<b>Störstellen</b>	<b>137</b>
5.1	Effektive-Massen-Theorie (EMT). .....	137
5.2	Experimente.....	142
5.3	Dotierungsabhängigkeit der Störstellenbindungsenergie.....	146
<b>6</b>	<b>Besetzungsstatistik</b>	<b>151</b>
6.1	Chemisches Potential.....	151
6.2	Verteilungsfunktion (Fermi-Dirac-Verteilung). .....	152
6.3	Zustandsdichte.....	152
6.4	Elektronendichte (Lochdichte). .....	154
6.4.1	Boltzmann-Näherung.....	155
6.4.2	Hoch-entartete Halbleiter.....	158
6.4.3	Bandausläufer („band tails“). .....	160
6.5	Besetzung von Störstellen.....	162
6.6	Störstellen-Halbleitung: Ladungsträgerdichte und Fermi-Niveau.....	163

<b>7</b>	<b>Nichtgleichgewichtsprozesse</b>	<b>171</b>
7.1	Übersicht.....	171
7.2	Lokale Störungen im thermischen Gleichgewicht: Poisson-Gleichung.....	173
7.2.1	Raumladungsdichte.....	174
7.2.2	Bandverbiegung an Oberflächen: Elektrische Felder.....	175
7.2.3	Bandverbiegung an Grenzflächen/HeteroÜbergängen: Kontaktpotentiale.....	176
7.2.4	Bandverbiegungen am Metall-Halbleiter-Kontakt.....	177
7.3	Bandverbiegung: Lösung der Poisson-Gleichung.....	182
7.4	Abschirmung nach Thomas-Fermi.....	187
7.5	Ströme in Halbleitern'.....	190
7.5.1	Ströme im thermischen Gleichgewicht.....	190
7.5.2	Abweichungen vom thermischen Gleichgewicht.....	191
7.6	Rekombinationsmechanismen.....	197
7.6.1	Rekombination über tiefe Störstellen (Fallenzustände, Haftstellen, „Traps“).....	197
7.6.2	Band-Band-Rekombination (strahlende Rekombination).....	204
7.6.3	Auger-Rekombination.....	207
<b>8</b>	<b>Transport</b>	<b>213</b>
8.1	Formulierung von Streuzeiten.....	213
8.2	Spezifische „elastische“ Streumechanismen.....	215
8.2.1	Streuung an akustischen Phönonen: Deformationpotentialstreuung.....	215
8.2.2	Streuung an geladenen Störstellen: Coulombstreuung.....	217
8.3	Streuung an optischen Phönonen: Polare optische Streuung.....	220
8.4	Weitere Streuprozesse.....	222
8.5	Gunn-Effekt.....	227
8.6	Elektronen- (oder Loch-)Transport über Störstellen.../.....	230
<b>9</b>	<b>Optische Eigenschaften</b>	<b>231</b>
9.1	Quantenmechanische Betrachtungen.....	231
9.1.1	Optische Dipolübergänge in semiklassischer Beschreibung.....	231
9.1.2	Anwendung auf Halbleiter.....	233
9.2	Absorption und Emission (strahlende Rekombination).....	234
9.2.1	Band-Band-Übergänge mit $A_k \neq 0$ .....	234
9.2.2	Band-Band-Übergänge mit $A_k = 0$ .....	238
9.3	Exzitonen Übergänge.....	241
9.3.1	Freie Exzitonen (FE, oft auch X).....	241
9.3.2	Exzitonen-Kondensation: Elektron-Loch-Tröpfchen (EHD).....	244
9.3.3	Gebundene oder lokalisierte Exzitonen (BE, „bound excitons“).....	246

9.4	Andere Übergänge unter Beteiligung von Störstellen.....	249
9.5	Stimulierte Emission (Laserübergänge).....	251
<b>10</b>	<b>Zwei- und eindimensionale Elektronen/Löcher</b>	<b>255</b>
10.1	Realisierung von 2D-Strukturen.....	255
10.2	Bandstruktur und Zustandsdichte in 2DEG/2DHG-Systemen.....	257
10.3	Oszillation der Fermienergie $E_F$ eines 2DEG im Magnetfeld.....	258
10.4	Shubnikov-de-Haas-Effekt.....	260
10.5	Quanten-Halleffekt mit ganzzahligen Füllfaktoren.....	261
10.6	Quanten-Halleffekt mit gebrochen-zahligen Füllfaktoren.....	265
10.7	Experimente mit ballistischen Elektronen.....	270
10.8	Bloch-Oszillationen in Übergittern.....	276
<b>11</b>	<b>Gleichrichtende Übergänge</b>	<b>281</b>
11.1	pn-Übergänge.....	281
11.2	Gepolter pn-Übergang: Strom-Spannungs-Kennlinie (ideal).....	291
11.3	Reale Strom-Spannungs-Kennlinie.....	296
11.4	Bauelemente mit pn-Übergängen.....	300
<b>12</b>	<b>Transistoren</b>	<b>303</b>
12.1	Bipolare Transistoren (pnp oder npn).....	303
12.1.1	Strom-Spannungs-Beziehungen.....	303
12.1.2	Transistor-Parameter (Vierpol-Parameter).....	308
12.1.3	Verbesserung des Frequenzverhaltens: zwei ausgewählte Konzepte.....	310
12.1.4	Ersatzschaltung.....	314
12.2	Feldeffekt-Transistoren (FETs) (Unipolar-Transistoren).....	316
12.2.1	Arbeitsprinzip.....	316
12.2.2	MOS-FET: Aufbauschema, Energiebänderverlauf und Elektronendichteprofil....	317
12.2.3	Strom-Spannungs-Kennlinien.....	319
12.2.3	Sperrschicht-Feldeffekttransistor (junction-FET, J-FET).....	322
12.2.4	High-Electron-Mobility-Transistor (HEMT).....	323
12.2.5	Höchstfrequenter HEMT-Transistor auf der Basis von SiGe: modulationsdotierter Si/Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> -Feldeffekttransistor(MODFET).....	324
12.2.6	Stammbaum der Feldeffekttransistoren.....	326
12.2.7	Der Einzelelektronen-Transistor: Ein neues Konzept („Single Electron Transistor“, SET).....	327

<b>13</b>	<b>Halbleiter-Leuchtdioden und -Laser</b>	<b>331</b>
13.1	Leuchtdioden („Light Emitting Diodes“, LEEDS).....	331
13.1.1	Physikalisches Funktionsprinzip.....	331
13.1.2	Spezielle LEDs.....	333
13.2	Halbleiterlaser.....	343
13.2.1	Allgemeine Bemerkungen.....	343
13.2.2	Physikalisches Funktionsprinzip.....	343
13.2.3	Wichtige Größen (Stichworte).....	344
13.2.4	Oberflächenemittierende Laser („Vertical Cavity Surface Emitting Lasers“, VCSELs).....	351
13.2.5	Schwellstromreduktion in Lasern mit verspannten Quantentöpfen.....	353
13.2.6	Quanten-Kaskaden-Laser.....	355
<b>14</b>	<b>Silizium-Technologie</b>	<b>359</b>
14.1	Herstellung von Silizium.....	359
14.2	Dotierung zur Herstellung von pn-Übergängen.....	363
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>373</b>
A.1	Punktgruppen Symmetrie: Charaktertafeln.....	373
A.1.1	Physikalische Bedeutung der Charaktertafeln.....	373
A.1.2	Erweiterung der Charaktertafel.....	378
A.1.3	Anwendungen von Charaktertafeln.....	379
A.2	Variationsverfahren nach Ritz (Raleigh, Galerkin).....	382
A.3	Berechnung von Matrixelementen $2P^2/m_0$ .....	385
A.4	Photonische Kristalle: ein analytisch rechenbares Beispiel.....	388
A.5	Fouriertransformierte der EMT-Grundzustandsfunktion.....	395
A.6	Austauschwechselwirkung in einem freien Elektronengas.....	396
A.7	Band-Anordnung an Heterogrenzflächen: $AE_c$ , $AE_v$ .....	398
A.8	Ausgewählte Materialparameter.....	400