

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 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 |
| 2 | Kristallstrukturen | 33 |
| 2.1 | Das reale Kristallgitter..... | 33 |
| 2.1.1 | Die Grundgitter | 34 |
| 2.1.2 | Beispiele für Kristallgitter | 37 |
| 2.1.3 | Einzelheiten zu den für Halbleiter wichtigsten Kristallstrukturen..... | 38 |
| 2.1.4 | Ort und Lage von Kristallebenen, Miller-Indizes..... | 42 |
| 2.2 | Das reziproke Gitter | 43 |
| 2.3 | Brillouinzonen | 47 |
| 2.4 | Brillouinzonen der drei kubischen Gitter und des hexagonalen Wurtzit-Gitters..... | 48 |
| 3 | Bandstrukturberechnungen | 53 |
| 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 |
| 4 | Bestimmung von Bandstrukturparametern | 105 |
| 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 |
| 5 | Störstellen | 137 |
| 5.1 | Effektive-Massen-Theorie (EMT)..... | 137 |
| 5.2 | Experimente | 142 |
| 5.3 | Dotierungsabhängigkeit der Störstellenbindungsenergie | 146 |
| 6 | Besetzungsstatistik | 151 |
| 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 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | Nichtgleichgewichtsprozesse | 171 |
| 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 |
| 8 | Transport | 213 |
| 8.1 | Formulierung von Streuzeiten | 213 |
| 8.2 | Spezifische „elastische“ Streumechanismen | 215 |
| 8.2.1 | Streuung an akustischen Phononen: Deformationspotentialstreuung..... | 215 |
| 8.2.2 | Streuung an geladenen Störstellen: Coulombstreuung | 217 |
| 8.3 | Streuung an optischen Phononen: Polare optische Streuung..... | 220 |
| 8.4 | Weitere Streuprozesse | 222 |
| 8.5 | Gunn-Effekt..... | 227 |
| 8.6 | Elektronen- (oder Loch-)Transport über Störstellen | 230 |
| 9 | Optische Eigenschaften | 231 |
| 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 $\Delta k \neq 0$ | 234 |
| 9.2.2 | Band-Band-Übergänge mit $\Delta k = 0$ | 238 |
| 9.3 | Exzitonsche 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 |
| 10 | Zwei- und eindimensionale Elektronen/Löcher | 255 |
| 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 |
| 11 | Gleichrichtende Übergänge | 281 |
| 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 |
| 12 | Transistoren | 303 |
| 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 _{1-x} Ge _x -Feldeffekttransistor (MODFET) | 324 |
| 12.2.6 | Stammbaum der Feldeffekttransistoren..... | 326 |
| 12.2.7 | Der Einzelelektronen-Transistor: Ein neues Konzept („Single Electron Transistor“, SET)..... | 327 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 13 | Halbleiter-Leuchtdioden und -Laser | 331 |
| 13.1 | Leuchtdioden („Light Emitting Diodes“, LEDS) | 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 |
| 14 | Silizium-Technologie | 359 |
| 14.1 | Herstellung von Silizium | 359 |
| 14.2 | Dotierung zur Herstellung von pn-Übergängen | 363 |
| A | Anhang | 373 |
| A.1 | Punktgruppensymmetrie: 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: ΔE_C , ΔE_V | 398 |
| A.8 | Ausgewählte Materialparameter | 400 |