

Dörte Neundorf · Reinhard Pfendtner
Hanns-Peter Popp

Elektrophysik

Physikalische Grundlagen
der elektrotechnischen Werkstoffe
und Halbleiterbauelemente

Mit 130 Abbildungen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Quantenmechanik.....	3
2.1	Mathematische Grundlagen: Operatoren.....	5
2.1.1	Vorbemerkung.....	5
2.1.2	Definition eines Operators.....	6
2.1.3	Lineare Operatoren	8
2.1.3.1	Arithmetische Operationen, Kommutator	11
2.1.3.2	Nabla- und Laplace-Operator.....	12
2.1.3.3	Matrixdarstellung	13
2.1.4	Eigenwerte und Eigenfunktionen.....	14
2.1.5	Hermitesche Operatoren: Definition und spezielle Eigenschaften.....	17
2.1.6	Systeme von Eigenfunktionen	18
2.1.7	Dirac-Notation.....	21
2.2	Motivation der Quantenmechanik.....	23
2.2.1	Die Strahlung des Schwarzen Körper	23
2.2.2	Photoelektrischer Effekt.....	28
2.2.3	Compton-Effekt	30
2.2.4	Welle-Teilchen Dualismus	32
2.2.5	Diskrete Energiezustände	34
2.3	Grundlagen der Quantenmechanik.....	37
2.3.1	Axiome der Quantenmechanik.....	37
2.3.2	Der Erwartungswert.....	38
2.3.3	Orts- und Impulsoperator.....	39
2.3.4	Kommutierende Operatoren.....	41
2.3.5	Mathematische Grundlagen.....	44
2.3.5.1	Wahrscheinlichkeit und Zufallsgröße.....	44
2.3.5.2	Kombination und Permutation.....	45
2.3.5.3	Verteilungsfunktion und Dichtefunktion.....	46
2.3.5.4	Erwartungswert und wahrscheinlichster Wert	49
2.3.5.5	Quadratisches Mittel	51
2.3.6	Schrödinger-Gleichung.....	51

2.3.7	Heisenbergsche Unschärferelation.....	54
2.3.7.1	Schwarzsche Ungleichung	54
2.3.7.2	Unschärferelation in allgemeiner Form.....	54
2.3.7.3	Spezielle Formen der Unschärferelation.....	56
2.4	Eindimensionale Probleme.....	59
2.4.1	Der Potentialtopf.....	59
2.4.1.1	Der Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden.....	59
2.4.1.2	Der Potentialtopf mit endlich hohen Wänden.....	62
2.4.2	Der Potentialwall.....	66
2.4.3	Der harmonische Oszillator.....	71
2.4.4	Das periodische Potential	74
2.4.4.1	Das Bloch-Theorem.....	75
2.4.4.2	Das Kronig-Penney-Modell.....	76
2.4.4.3	Periodisches Potential von Dirac-Pulsen.....	78
2.5	Zentralsymmetrische Probleme	81
2.5.1	Kugelkoordinaten.....	82
2.5.2	Drehimpuls.....	84
2.5.2.1	Drehimpuls in Kugelkoordinaten.....	85
2.5.2.2	Eigenwerte und Eigenfunktionen.....	86
2.5.2.3	Quadrierter Operator	87
2.5.3	Schrödinger-Gleichung im Zentralpotential.....	89
2.5.4	Das Wasserstoffatom.....	93
2.5.4.1	Bestimmung der Eigenfunktionen.....	93
2.5.4.2	Bestimmung der Eigenwerte	97
2.5.4.3	Die resultierenden Eigenfunktionen	98
2.5.5	Spezielle Funktionen.....	101
2.6	Bahndrehimpuls.....	105
2.6.1	Bahndrehimpuls und magnetisches Moment	105
2.6.2	Zeeman-Effekt.....	108
2.6.3	Elektronenspin	109
2.6.3.1	Stern-Gerlach-Experiment.....	109
2.6.3.2	Spin-Operator und Spin-Wellenfunktion	110
2.6.3.3	Energieeigenwertgleichung des Spins im Magnetfeld	111
2.6.3.4	Pauli-Gleichung und Spin-Bahn-Kopplung.....	112
2.7	Mehrelektronensysteme	115
2.7.1	Symmetrische und antisymmetrische Wellenfunktion	115
2.7.2	Zustände von Atomen und Elektronenkonfiguration.....	120
2.7.3	Termschema	121
2.7.4	Kopplung der Drehimpulse	123
2.7.5	Optische Übergänge.....	126
2.7.6	Röntgenspektren.....	129
2.8	Moleküle.....	135
2.8.1	Das Wasserstoff-Molekül-Ion.....	135
2.8.2	Wasserstoffmolekül	138

2.8.3	Molekülorbitale.....	140
2.8.4	Rotation und Schwingung von Molekülen.....	145
2.8.4.1	Rotation.....	145
2.8.4.2	Rotations-Raman-Spektrum.....	148
2.8.4.3	Schwingungsspektren.....	148
3	Statistische Physik.....	151
3.1	Grundlegende Statistik.....	153
3.1.1	Teilchenarten.....	153
3.1.2	Klassische Statistik.....	153
3.1.2.1	Entropie und Wahrscheinlichkeit.....	154
3.1.2.2	Makrozustände und Mikrozustände.....	155
3.1.2.3	Maxwell-Boltzmann-Verteilung.....	159
3.1.3	Quantenstatistik.....	165
3.1.3.1	Fermi-Dirac-Statistik.....	166
3.1.3.2	Bose-Einstein-Statistik.....	168
3.1.4	Vergleich der Statistiken.....	169
3.2	Gasdynamik.....	171
3.2.1	Ideale Gase.....	171
3.2.1.1	Druck des idealen Gases.....	171
3.2.1.2	Zustandsdichte.....	173
3.2.1.3	Energieverteilung nach Maxwell.....	175
3.2.1.4	Endgültige Zustandsgleichung.....	178
3.2.1.5	Wärmekapazität.....	179
3.2.2	Gleichverteilungssatz.....	181
3.2.3	Reale Gase.....	181
3.2.3.1	Mittlere freie Weglänge.....	182
3.2.3.2	Wärmekapazität.....	185
3.3	Weitere Anwendungen.....	187
3.3.1	Besetzungsverhältnisse.....	187
3.3.2	Ionisierung.....	187
3.3.3	Linienintensität.....	191
3.3.4	Linienprofile.....	191
3.3.5	Lampenstrahlung.....	193
3.3.6	Planck'sches Strahlungsgesetz.....	193
4	Festkörperphysik.....	197
4.1	Kristallgitter.....	199
4.1.1	Bindungsarten von Atomen.....	199
4.1.1.1	Van-der-Waals-Bindung.....	199
4.1.1.2	Kovalente Bindung.....	200
4.1.1.3	Wasserstoffbindung.....	201

4.1.1.4	Ionenbindung.....	201
4.1.1.5	Metallische Bindung.....	202
4.1.2	Kristallstrukturen.....	203
4.1.2.1	Die Einheitszelle.....	203
4.1.2.2	Anordnung von Atomen in der Einheitszelle.....	204
4.1.2.3	Indizierung der Einheitszelle.....	206
4.1.3	Gitterfehler.....	207
4.1.3.1	Nulldimensionale Gitterfehler.....	208
4.1.3.2	Andere Gitterfehler.....	209
4.1.4	Röntgenbeugung.....	209
4.1.4.1	Einfaches Punktgitter.....	209
4.1.4.2	Das reziproke Gitter.....	211
4.1.4.3	Streuung an Elektronen.....	212
4.1.4.4	Brillouin-Zonen.....	213
4.1.5	Gitterschwingungen und Phononen.....	215
4.1.5.1	Die lineare Kette.....	216
4.1.5.3	Quantelung der Gitterschwingungen: Phononen.....	218
4.2	Eigenschaften von Kristallgittern.....	219
4.2.1	Thermische Eigenschaften.....	219
4.2.1.1	Wärmekapazität von Festkörpern.....	219
4.2.1.2	Wärmeleitung.....	222
4.2.1.3	Thermoelektrizität.....	224
4.2.2	Magnetische Eigenschaften.....	226
4.2.2.1	Magnetische Eigenschaften von Materie.....	227
4.2.2.2	Dia-, Para- und Ferromagnetismus.....	227
4.2.2.3	Hall-Effekt.....	232
4.2.2.4	Supraleitung.....	234
4.2.3	Optische Eigenschaften.....	236
4.2.3.1	Brechung und Reflexion.....	236
4.2.3.2	Beugung.....	237
4.2.3.3	Absorption.....	238
4.3	Elektronentheorie der Festkörper.....	241
4.3.1	Theorie der freien Elektronen.....	241
4.3.1.1	Drudetheorie.....	241
4.3.1.2	Das Lorentz-Modell.....	244
4.3.1.3	Fermi-Statistik.....	247
4.3.1.4	Elektrische Leitfähigkeit.....	249
4.3.2	Das Bändermodell.....	250
4.3.2.1	Bloch-Funktionen.....	250
4.3.2.2	Erlaubte und Verbotene Bereiche.....	251
4.3.3	Elektronenbewegung.....	253
4.3.3.3	Effektive Masse.....	254
4.3.3.4	Mobilität und Leitfähigkeit in Leitern.....	255
4.3.3.2	Zustandsdichte.....	256

4.3.3.3 Effektive Zustandsdichte.....	256
4.4 Halbleiter.....	259
4.4.1 Eigenhalbleiter	259
4.4.1.1 Elektronen- und Löcherdichte im Eigenhalbleiter.....	260
4.4.1.2 Intrinsicdichte und Temperaturabhängigkeit des Fermi-niveaus.....	264
4.4.2 Dotierte Halbleiter.....	265
4.4.2.1 Donator- und Akzeptorenergieniveaus.....	266
4.4.2.2 Besetzung von Donatoren und Akzeptoren.....	268
4.4.2.3 Fermi-Niveau im dotierten Halbleiter	269
4.4.3 Bewegung von Elektronen und Löchern im Halbleiter.....	271
4.4.3.1 Mittlere freie Weglänge.....	272
4.4.3.2 Hall-Effekt im Halbleiter	274
4.4.4 Energiebändermodell von Halbleitern.....	275
4.4.5 Nichtgleichgewicht von Ladungsträgern	278
4.4.5.1 Quasifermi-niveaus.....	278
4.4.5.2 Lebensdauer der Überschußladungsträger.....	280
4.4.5.3 Drift- und Diffusionsstrom.....	280
4.4.5.4 Kontinuitätsgleichung	282
4.5 Anwendungen des Halbleiters.....	287
4.5.1 pn-Übergang	287
4.5.1.1 Raumladungszone.....	288
4.5.1.2 Energiebänder beim pn-Übergang.....	291
4.5.1.3 Strom durch die Diode	294
4.5.2 Kleinsignalverhalten von Dioden	297
4.5.3 Metall-Halbleiter-Kontakt und Heteroübergänge.....	300
4.5.3.1 Arten von Heteroübergängen.....	300
4.5.3.2 Metall-Halbleiterübergänge.....	302
4.5.4 Solarzellen, LEDs und Halbleiterlaser.....	304
4.5.5 Gunn-Element.....	308
5 Literatur.....	311
Stichwortverzeichnis.....	313