

Horst Hansel / Werner Neumann

Physik

Moleküle und Festkörper

Mit Übungsaufgaben
von Fred Albrecht und Peter Frübing

Mit 310 Abbildungen und 27 Tabellen

Inhalt

	Dielektrische und optische Eigenschaften der Stoffe	13
1.1	Elektrische Polarisation	13
1.2	Polarisierbarkeit, Clausius-Mossotti-Beziehung	17
1.3	Arten der Polarisation	23
1.3.1	Unpolare Stoffe	23
1.3.2	Polare Stoffe	26
1.3.2.1	Paraelektrische Stoffe	27
1.3.2.2	Pyroelektrische Stoffe	32
1.3.2.2.1	Pyroelektrizität, Piezoelektrizität	36
1.3.2.2.2	Ferroelektrische Stoffe	40
1.3.2.2.3	Antiferroelektrika, Ferrielektrika	43
1.4	Zum Frequenzverlauf der Dielektrizitätskonstanten und der Brechzahl	44
1.4.1	Komplexe Polarisierbarkeit	44
1.4.2	Komplexe Dielektrizitätskonstante, komplexe Brechzahl, dielektrische Verluste	49
1.4.2.1	Relaxationsspektrum der Dielektrizitätskonstanten	53
1.4.2.2	Resonanzspektrum der Dielektrizitätskonstanten	56
1.4.2.3	Frequenzverlauf der Dielektrizitätskonstanten und seine experimentelle Bestimmung	60
1.4.3	Frequenzverlauf der Brechzahl, normale und anomale Dispersion	64
1.5	Aufgaben	69
	Chemische Bindung	72
2.1	Heteropolare und homöopolare Bindung	74
2.1.1	Klassische Deutungsversuche	74
2.1.1.1	Heteropolare Bindung	74
2.1.1.2	Homöopolare Bindung	79
2.1.2	Quantenmechanische Modellvorstellungen	80
2.1.2.1	Valenzstrukturmethode, Bindung des Wasserstoffmoleküls	80
2.1.2.2	Molekülorbitalmethode	91
2.2	Metallische Bindung	93
2.3	Van der Waals-Bindung	94
2.4	Wasserstoffbrückenbindung	96
2.5	Donator-Akzeptor-Komplexe	97
2.6	Einige spezielle Bindungen	98
2.6.1	er- und 7r-Bindungen	98

Inhalt

2.6.2	Hybridisation. . . . .	.102
2.6.3	Mehrfachbindungen, Mesomerie. . . . .	.107
2.6.4	Isomerie. . . . .	.114
2.6.5	Bindungsverhältnisse bei Makromolekülen. . . . .	.115
2.6.6	Bindungsverhältnisse im Festkörper. . . . .	.121
2.7	Aufgaben. . . . .	.122
 Molekülspektren . . . . .		.123
3.1	Spektrum des zweiatomigen Moleküls. . . . .	.124
3.1.1	Rotationsspektrum. . . . .	.124
3.1.2	Schwingungsspektrum. . . . .	.129
3.1.3	Rotationsschwingungsspektrum. . . . .	.134
3.1.3.1	Rotationsschwingungsspektrum bei konstantem Elektronenzustand	134
3.1.3.2	Rotationsschwingungsspektrum bei gleichzeitiger Veränderung des Elektronenzustandes, Franck-Condon-Prinzip. . . . .	.138
3.1.3.3	Elektronenbandenspektrum. . . . .	.144
3.2	Spektrum mehratomiger Moleküle. . . . .	.150
3.2.1	Rotationsspektrum mehratomiger Moleküle. . . . .	.150
3.2.2	Rotationsschwingungsspektrum mehratomiger Moleküle . . . . .	.154
3.3	Raman-Spektrum. . . . .	.161
3.4	Photolumineszenz. . . . .	.166
3.5	Dissoziation. . . . .	.172
3.6	Molekülbildung. . . . .	.174
3.7	Spektroskopische Techniken. . . . .	.175
3.7.1	Bouger-Lambert-Gesetz, Beersches Gesetz, Extinktion. . . . .	.175
3.7.2	Absorptionsspektroskopie. . . . .	.178
3.7.2.1	Prismen- und Gitterspektrometer. . . . .	.178
3.7.2.2	Fourier-Spektrometer. . . . .	.182
3.7.2.3	ATR-Methode. . . . .	.184
3.7.3	Fluoreszenzspektrometer. . . . .	.186
3.7.4	Raman-Spektrometer. . . . .	.189
3.8	Methoden zur Bestimmung charakteristischer Moleküleigenschaften. . . . .	.190
3.9	Aufgaben. . . . .	.195
 Struktur und mechanische Eigenschaften der Kristalle . . . . .		.196
4.1	Zum Begriff Festkörper. . . . .	.196
4.1.1	Amorphe Festkörper. . . . .	.198
4.2	Idealkristall. . . . .	.201
4.2.1	Punktgitter, Basis, Elementarzelle. . . . .	.202
4.2.2	Symmetrieoperationen, Bravais-Gitter. . . . .	.206
4.2.3	Zusammenhang zwischen Gitter und Kristallform. . . . .	.212
4.2.4	Reziprokes Gitter. . . . .	.214
4.3	Einfache Kristallstrukturen. . . . .	.217
4.4	Methoden zur Kristallstrukturbestimmung. . . . .	.230
4.4.1	Reflexionsgoniometer. . . . .	.230
4.4.2	Beugungsverfahren. . . . .	.232

4.4.2.1	Lauesche Gleichungen, Ewaldsche Konstruktion, Braggsche Reflexionsbedingung	232
4.4.2.2	Meßanordnungen zur Röntgenstrukturanalyse.	235
4.4.2.3	Strukturfaktor und Atomformfaktor.	236
4.5	Realkristall.	240
4.5.1	Nulldimensionale Gitterstörungen.	241
4.5.2	Eindimensionale Gitterstörungen.	243
4.5.3	Zweidimensionale Gitterstörungen.	245
4.5.4	Zum Nachweis von Gitterstörungen.	247
4.6	Grundlagen der Kristallisation.	249
4.6.1	Zum Vorgang der Kristallisation.	251
4.6.1.1	Keimbildung.	251
4.6.1.2	Kristallwachstum	253
4.6.2	Einige Methoden der Einkristallzüchtung	256
4.7	Besondere Strukturen.	261
4.7.1	Quasikristalle.	261
4.7.2	Polymere	262
4.7.3	Flüssige Kristalle.	265
4.8	Mechanische Eigenschaften.	266
4.8.1	Elastische Verformung.	267
4.8.2	Plastische Verformung.	276
4.8.3	Kautschukelastizität	283
4.8.4	Messung elastischer Konstanten.	284
4.9	Aufgaben.	287
5	Dynamik des Kristallgitters	288
5.1	Schwingung des unendlich ausgedehnten zweiatomigen eindimensionalen Kristalls.	288
5.2	Schwingung des zweiatomigen eindimensionalen Kristalls endlicher Abmessung.	294
5.3	Gitterschwingungen dreidimensionaler Kristalle.	297
5.4	Phononen	299
5.5	Spezifische Wärmekapazität	306
5.5.1	Einstein-Modell.	307
5.5.2	Debye-Modell	309
5.6	Anharmonizität von Gitterschwingungen.	313
5.6.1	Wärmeausdehnung	314
5.6.2	Wärmeleitung des Kristallgitters.	314
5.6.3	Unelastische Neutronenstreuung.	316
5.7	Diffusion und Ionenleitung.	317
5.8	Aufgaben.	322
6	Metalle, Bändermodell	323
6.1	Das Elektronengas der Metalle	325
6.1.1	Energiezustände, Bloch-Funktionen, Brillouin-Zonen.	327
6.1.2	Energieverteilung	335
6.1.2.1	Besetzung der Energieniveaus ϵ_m am absoluten Nullpunkt	337
6.1.2.2	Besetzung der Energieniveaus für $T > 0$ K.	340

6.1.3	Entartung, Entartungstemperatur	341
6.1.4	Spezifische Wärmekapazität des Elektronengases	344
6.1.5	Elektronenemission	347
6.1.5.1	Austrittsarbeit	347
6.1.5.2	Thermische Elektronenemission, Richardson-Gleichung	349
6.1.5.2.1	Schottky-Effekt	352
6.1.5.3	Feldemission	355
6.1.6	Transportprobleme	357
6.1.6.1	Elektrische Leitung	357
6.1.6.2	Wärmeleitung, Wiedemann-Franz-Gesetz	362
6.1.7	Organische Metalle	364
6.2	Quasifreie Elektronen im räumlich periodischen Potentialfeld	365
6.2.1	Bloch-Wellen im räumlich periodischen Potentialfeld	366
6.2.2	Energieeigenwerte	368
6.2.3	Effektive Masse	372
6.2.4	Quasiteilchen	377
6.2.4.1	Quasiteilchen Kristallelektron	377
6.2.4.2	Quasiteilchen Defektelektron	381
6.2.4.3	Quasiteilchen Exziton und Polaron	384
6.2.4.4	Quasiteilchen Plasmon	388
6.2.5	Bändermodell	390
6.3	Aufgaben	398
7	Halbleiter und Isolatoren	399
7.1	Halbleiter	399
7.1.1	Gleichgewichtsverteilung der Kristall- und Defektelektronen	399
7.1.1.1	Idealhalbleiter, Eigenleitung	399
7.1.1.2	Realhalbleiter	411
7.1.1.2.1	Donatoren, Akzeptoren	411
7.1.1.2.2	Störstellenleitung	416
7.1.2	Halbleitertypen	424
7.1.3	Streumechanismen, Hall-Effekt	428
7.1.3.1	Quanten-Hall-Effekt	437
7.2	Isolatoren und amorphe Festkörper	444
7.3	Aufgaben	452
8	Nichtgleichgewichtsprozesse und Inhomogenitäten in Halbleitern	456
8.1	Generation und Rekombination von Ladungsträgern, Bilanzgleichungen	457
8.1.1	Nichtgleichgewicht bei homogener neutraler Konzentrationsabweichung	459
8.1.2	Nichtgleichgewicht bei inhomogener neutraler Konzentrationsabweichung	462
8.1.3	Mittlere Raumladungslebensdauer	465
8.1.4	Debye-Länge	467
8.2	Quasi-Fermi-Energie	469
8.3	Fotoleitung	470
8.3.1	Grundgitterfotoleitung, optische Aktivierungsenergie	471

8.3.1.1	Direkte und indirekte Übergänge	472
8.3.1.2	Zum Zusammenhang der Fotoleitfähigkeit mit der Lichtintensität bei linearer Rekombination	474
8.3.1.3	Zum Zusammenhang der Fotoleitfähigkeit mit der Lichtintensität bei quadratischer Rekombination.	475
8.3.2	Störstellenfotoleitung	477
8.4	Injektion von Ladungsträgern, raumladungsbegrenzte Ströme	479
8.5	Kontakthänomene.	484
8.5.1	Übergangsbedingung für das Fermi-Niveau.	484
8.5.2	Unbelastete Kontakte.	486
8.5.2.1	Unbelasteter Metall-Metall-Kontakt, Kontaktspannung	486
8.5.2.2	Unbelasteter Metall-Halbleiter-Kontakt	490
8.5.2.3	Thermospannungen.	498
8.5.2.4	Ladungsträgerinjektion an Kontakten.	500
8.5.2.5	Unbelasteter p-n-Übergang	502
8.5.3	Belastete Kontakte.	506
8.5.3.1	Sperrfreie Kontakte.	507
8.5.3.2	Gleichrichtende Kontakte.	508
8.5.3.2.1	Metall-Halbleiter-Kontakt	508
8.5.3.2.2	p-n-Übergang.	510
8.6	Elektrischer Durchschlag, Zener-Effekt	517
8.7	Transportprozesse elektronischer Ladungsträger.	520
8.7.1	Boltzmann-Gleichung	522
8.7.2	Elektrische Leitfähigkeit	525
8.7.3	Ladungsträgerbeitrag zu Wärmeleitung	527
8.7.4	Thermoelektrische Effekte.	528
8.8	Aufgaben.	530
9	Supraleitung	532
9.1	Grundlegende experimentelle Ergebnisse.	532
9.2	Zur Deutung der Supraleitung	545
9.3	Josephson-Effekte.	548
9.4	Aufgaben.	556
10	Magnetische Eigenschaften	557
10.1	Magnetisierung, magnetische Suszeptibilität	557
10.2	Arten des Magnetismus.	559
10.2.1	Zum Verhalten des magnetischen Momentes eines Atoms im Magnetfeld.	560
10.2.2	Diamagnetismus.	561
10.2.3	Paramagnetismus.	565
10.2.3.1	Langevin-Paramagnetismus.	565
10.2.3.2	Pauli-Paramagnetismus.	571
10.2.3.3	Adiabatische Entmagnetisierung	575
10.2.4	Ferromagnetismus	576
10.2.4.1	Hysteresis, Weißsche Bezirke, Bloch-Wände.	576
10.2.4.2	Modellvorstellung zum Ferromagnetismus.	585
10.2.4.2.1	Weiß-Modell.	585

10.2.4.2.2	Heisenberg-Modell	589
10.2.4.2.2.1	Austauschintegral, eindimensionale Spinkette	589
10.2.4.2.2.2	Spinwellen	594
10.2.4.2.2.3	Magnonen	600
10.2.4.2.2.3.1	Zum experimentellen Nachweis von Magnonen	601
10.2.5	Antiferromagnetismus, Ferrimagnetismus	604
10.3	Aufgaben.	608
Anhang		611
A.1	Zur Berechnung des inneren Feldes in einem polarisierten Dielektrikum.	611
A.2	Zum Zusammenhang von elektronischer Polarisierbarkeit und Atomradius.	614
A.3	Zur Einstellung polarer Moleküle in einem äußeren Feld	616
A.4	Zum Frequenzgang der Dielektrizitätskonstanten.	617
A.5	Zur quantenmechanischen Behandlung des Wasserstoffmoleküls	619
A.6	Zur sp^3 - und sp^2 -Hybridisation.	623
A.7	Zum Einfluß der Zentrifugalkraft auf das Rotationsspektrum eines zweiatomigen Moleküls.	625
A.8	Zu den Rotationsenergieniveaus eines symmetrischen Kreiselmoleküls.	627
A.9	Bose-Einstein- und Fermi-Dirac-Statistik	629
A.10	Normalkoordinaten zur Beschreibung des zweiatomigen eindimensionalen Kristalls.	635
A.11	Zur Bestimmung der Energieeigenwertdichte des Elektronengases im konstanten Potentialfeld.	638
A.12	Zur Temperaturabhängigkeit der Fermi-Energie.	638
A.13	Zur inneren Energie des Elektronengases.	640
A.14	Zum Schottky-Effekt	641
A.15	Zum Energieeigenwertspektrum des Elektrons im periodischen Potentialfeld.	643
A.16	Zum Verlauf der Energiefunktion $W(\epsilon)$ an den Bandrändern	644
A.17	Zum Hall-Effekt bei schwachen Magnetfeldern.	644
A.18	Zur Bestimmung der mittleren Relaxationszeit	646
A.19	Abgeschirmtes Coulomb-Potential.	647
A.20	Zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer.	648
A.21	Zusammenhang zwischen der Beweglichkeit und der Diffusionskonstanten.	649
A.22	Zum magnetischen Moment eines Atoms im äußeren Feld H	650
A.23	Zu den Spinwellen.	653
A.24	Zu den Josephson-Gleichungen.	657
A.25	Zum Josephson-Gleichstromeffekt im Magnetfeld.	659
A.26	Berechnung des mittleren Abstandsquadrates des Elektrons vom Kernmittelpunkt für das Wasserstoffatom im Grundzustand	666
A.27	Landau-Niveaus.	669
A.28	Lösungen der Aufgaben.	672
A.29	Literatur.	737