

K.-H. Hellwege

Einführung in die
Festkörperphysik

Dritte, korrigierte Auflage

Mit 432 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona
Budapest

Inhaltsverzeichnis

1.	Übersicht	1	A. Einleitung
2.	Grundbegriffe und -tatsachen	2	
3.	Symmetrie	3	B. Statik der Kristallgitter
3.1.	Anisotropie	3	
3.2.	Punktsymmetriegruppen und Raumgruppen	3	
3.3.	Begrenzungs- und Netzebenen	13	
3.4.	Das reziproke Gitter	17	
4.	Strukturbestimmung mit Interferenzen	20	
4.1.	Röntgeninterferenzen	20	
4.2.	Experimentelle Bestimmung von Gitterkonstanten	24	
4.3.	Intensität der Reflexe und Feinbau der Zelle	26	
4.4.	Elektronen- und Neutroneninterferenzen	31	
4.5.	Ergebnisse von Röntgen-Strukturanalysen	32	
4.5.1.	Isotypie	33	
4.5.2.	Bauverbände	34	
4.5.3.	Polymorphie	38	
4.5.4.	Ionen- und Atomradien	39	
5.	Fehlordnung in Kristallen	43	
5.1.	Übersicht	43	
5.2.	Strukturelle Fehlordnung	44	
5.2.1.	Punktdefekte	44	
5.2.2.	Die Anomalie der plastischen Verformung	47	
5.2.3.	Versetzungen	48	
5.2.3.1.	Stufenversetzungen	48	
5.2.3.2.	Schraubenversetzungen	50	
5.2.3.3.	Systeme von Versetzungen	51	
5.2.3.4.	Plastische Verformung von Metallen	52	
5.2.4.	Flächendefekte	54	
5.2.4.1.	Mosaik-Blockgrenzen in Einkristallen	54	
5.2.4.2.	Korngrenzen in Vielkristallen	55	
5.3.	Chemische Fehlordnung	55	
5.3.1.	Übersicht	55	
5.3.2.	F-Zentren in Alkalihalogenidkristallen	55	
6.	Chemische Bindung in Kristallen	57	C. Dynamik der Kristallgitter
6.1.	Bindungstypen	57	
6.2.	Gitterenergie von Ionenkristallen	62	
6.3.	Oberflächenenergien von Ionenkristallen	68	
7.	Die Elastizität von Kristallen	71	
7.1.	Phänomenologische Elastizitätstheorie der anisotropen Kontinua	71	
7.2.	Experimentelle Bestimmung von elastischen Konstanten	78	
7.3.	Elastizität und Gitterkräfte	79	
8.	Gitterschwingungen	81	
8.1.	Eigenschwingungen einer unendlichen linearen Kette	81	
8.2.	Abzählung der Eigenschwingungen einer linearen AB-Kette	89	
8.3.	Eigenschwingungen eines Raumgitters	91	
8.4.	Quantelung der Gitterschwingungen, Phononen	96	
8.5.	Nichtlineare Kräfte	97	
9.	Experimentelle Bestimmung von Eigenschwingungen	100	
9.1.	Ultrarotspektren von Kristallen	101	

9.2.	Unelastische Streuung von Neutronen und Röntgenphotonen	110
9.3.	Brillouin- und Ramanstreuung	112
9.4.	Elektronen-Schwingungsspektren	115
10.	Das Schwingungssystem im thermischen Gleichgewicht	116
10.1.	Statistische Grundlagen	116
10.2.	Die Debyesche Theorie der Schwingungswärme	117
10.3.	Vergleich mit der Planckschen Hohlraumstrahlung	123
10.4.	Experimentelle Prüfung der Debyeschen Theorie	124
10.5.	Vielkörperproblem und modifiziertes Einatom-Modell von Einstein	125

D. Kristalle in äußeren Feldern. Makroskopische Beschreibung

11.	Kristalle im elektrischen Feld	127
11.1.	Grundlagen. Statische Dielektrizitätskonstante	127
11.2.	Materie im elektrischen Wechselfeld. Kristalloptik	130
11.3.	Multipolstrahlung	134
12.	Kristalle im Temperaturfeld	136
12.1.	Thermische Ausdehnung	136
12.2.	Wärmeleitung	136
13.	Piezoelektrizität	138

E. Ionen in Kristallfeldern

14.	Qualitative Beschreibung eines Ions im Kristallgitter	141
14.1.	Fallunterscheidung und Modell	141
14.2.	Atome im homogenen Kondensatorfeld (Stark-Effekt)	143
14.3.	Ionen im inhomogenen elektrischen Kristallfeld	145
15.	Termschema eines Ions im Kristallfeld	149
15.1.	Das Kristallfeld	149
15.2.	Die Kristallfeldenergie 1. Näherung. Matrixelemente. Beispiel	152
15.3.	Kristallfeldzustände und Symmetrieentartung	158
15.4.	Der Kramers'sche Satz: Zeitumkehr	164
16.	Zeeman-Effekt von Ionen in Kristallen	169
16.1.	Hamilton-Operator und Störungsrechnung	169
16.2.	Beschreibung durch Spin-Hamilton-Operatoren	172
17.	Ionen in schwingenden Kristallen: Elektron-Phonon-Wechsel- wirkung	175
17.1.	Schwingungsstruktur der Elektronenterme	175
17.2.	Strahlungslose Übergänge	175
17.3.	Phononen-Raman-Effekt	176
17.4.	Lebensdauer und Breite eines Elektronenterms	176
18.	Spektren von Ionen in Kristallfeldern	178
18.1.	Auswahlregeln für elektrische Dipolstrahlung	178
18.2.	Auswahlregeln für magnetische Dipolstrahlung	180
18.3.	Beispiele und Ergebnisse aus der Kristallspektroskopie	181
18.3.1.	Vorbemerkung zur Analyse von Kristallspektren	181
18.3.2.	Spektren von Verbindungen der Seltenen Erden	182
18.3.3.	Spektren von Verbindungen mit offenen d-Schalen	191
18.4.	Spektren und elektronische spezifische Wärme	193

F. Magnetismus von Kristallen

19.	Maßsysteme. Grundlagen	195
19.1.	Maßsysteme	195
19.2.	Grundgrößen und Definitionen	195
19.3.	Modellmäßige Einteilung der Substanzen	198
20.	Diamagnetismus von Isolatoren	200
21.	Paramagnetismus von Ionenkristallen	202
21.1.	Statistische Grundlagen	202
21.2.	Paramagnetismus freier Atome	204
21.3.	Magnetische Ionen im Kristallfeld	207
21.3.1.	Ionen mit offener 3d-Schale	207
21.3.2.	Ionen mit offener 4f-Schale	210

22.	Kopplung magnetischer Momente untereinander und mit den Gitterschwingungen	215
22.1.	Magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung	215
22.2.	Elektrische Multipol-Wechselwirkung	220
22.3.	Austauschwechselwirkung	221
22.3.1.	Direkter Austausch	221
22.3.2.	Indirekter Austausch	224
22.4.	Molekularfeld und Anisotropiefeld	225
23.	Paramagnetische Relaxation	227
23.1.	Makroskopische Beschreibung	227
23.2.	Verschiedene Relaxationsarten	232
23.3.	Spin-Gitter-Relaxation	232
23.4.	Spin-Spin-Relaxation	239
23.5.	Kreuzrelaxation	242
23.6.	Magnetische Kühlung	244
24.	Ferromagnetismus	248
24.1.	Grundtatsachen und Modell	248
24.2.	Die Molekularfeldnäherung	251
24.3.	Ferromagnetische Spinwellen	258
24.3.1.	Die lineare Spinkette mit isotropem Austausch	258
24.3.2.	Spinwellen im Raumgitter	265
24.3.3.	Magnonen im thermischen Gleichgewicht	265
24.3.4.	Experimenteller Nachweis von Spinwellen	268
24.4.	Anisotropie und Domänenstruktur	275
24.4.1.	Ferromagnetische Anisotropie	275
24.4.2.	Domänenstruktur	280
25.	Antiferromagnetismus	284
25.1.	Kollinear-antiferromagnetische Strukturen mit zwei Untergittern	284
25.1.1.	Beispiele	284
25.1.2.	Molekularfeldnäherung	286
26.	Kompliziertere magnetische Strukturen. Ferrimagnetismus	295
26.1.	Antiferromagnetismus mit verkanteten Spins	295
26.2.	Modulierte Strukturen in Selten-Erd-Metallen	296
26.3.	Ferrimagnetische Strukturen	297
26.3.1.	Ferrite. Molekularfeldnäherung	298
26.3.2.	Granate	302
26.3.3.	Selten-Erd-Perowskite	304
27.	Ferrimagnetische und antiferromagnetische Spinwellen	306
27.1.	Die lineare AB-Spinkette	306
27.2.	Spinwellen im Raumgitter	312
28.	Grundlagen	317
28.1.	Maßsysteme	317
28.2.	Grundgrößen und Definitionen	317
28.3.	Dipolares, inneres und lokales elektrisches Feld	318
29.	Dipolmomente und elektrische Polarisierbarkeiten. Dispersion	319
29.1.	Übersicht	319
29.2.	Orientierungspolarisation	321
29.2.1.	Statische Elektrisierung und Polarisierbarkeit	321
29.2.2.	Orientierungs-Relaxation	325
29.3.	Ionen- und Elektronenpolarisation	325
29.3.1.	Das Lorentz'sche Modell	325
29.3.2.	Elektronische Spektren	327
29.3.3.	Schwingungsspektren	328
29.4.	Die Gesamtpolarisation	329
30.	Kopplung zwischen Lichtwellen und ultrarotaktiven Schwingungen in Ionenkristallen	330
30.1.	Freie Schwingungen: Lyddane-Sachs-Teller-Theorem	330
30.2.	Erzwungene Schwingungen und anomale Dispersion. Polaritonen	334

G. Elektrische Polarisation von Kristallen

31.	Spontanpolarisation	340
31.1.	Symmetrie und spontane elektrische Polarisation	340
31.2.	Ferroelektrizität	341
31.2.1.	Phänomenologische Beschreibung	341
31.2.2.	Experimentelle Ergebnisse	342
31.2.3.	Mikrophysikalisches Modell	346
31.3.	Antiferroelektrizität	350

H. Leitungselektronen: Metalle

40.	Das Modell: Übersicht	353
41.	Einelektronenzustände I	355
41.1.	Ein Kristallelektron im eindimensionalen Gitter	355
41.1.1.	Translationssymmetrie und Bloch-Zustände	355
41.1.2.	Energieschema und Zustandsdichte eines freien Elektrons	357
41.1.3.	Das reduzierte Energieschema	358
41.2.	Ein Kristallelektron im dreidimensionalen Gitter	361
41.2.1.	Translationssymmetrie und Bloch-Zustände a	361
41.2.2.	Der Grenzfall des freien Elektrons	363
41.2.3.	Das reduzierte Energieschema	364
42.	Das Fermi-Sommerfeld-Gas freier Elektronen	369
42.1.	Das Modell	369
42.2.	Die Fermi-Fläche	370
42.3.	Die thermische Energie	372
42.4.	Die magnetischen Eigenschaften	375
42.4.1.	Paulischer Spinmagnetismus	375
42.4.2.	Elektronenspinresonanz	378
42.4.3.	Zyklotronresonanz	378
42.4.4.	Landausches Niveauschema	379
42.4.5.	Der Bahnmagnetismus	382
43.	Das Kristallelektronengas im Gitterpotential	387
43.1.	Einelektronenzustände II	387
43.1.1.	Zeitumkehr	387
43.1.2.	Translationssymmetrie b	388
43.2.	Energiebänder im eindimensionalen Gitter	389
43.3.	Energiebänder im dreidimensionalen Gitter	393
43.3.1.	Fermiflächen	393
43.3.2.	Struktur der Energiebänder	398
43.3.3.	Isolatoren, Halbleiter, Metalle, Schmelzen	400
43.4.	Das Teilchenbild der Kristallelektronen: Effektivmassen- Dynamik	403
43.4.1.	Dynamik eines Kristallelektrons	404
43.4.2.	Ein Kristallelektron im elektrischen Feld	407
43.4.3.	Ein Kristallelektron im magnetischen Feld	409
43.4.4.	Experimentelle Bestimmung der Fermifläche von Metallen	413
43.4.4.1.	Elektromagnetische Zyklotronresonanz und de Haas- van Alphen-Effekt	414
43.4.4.2.	Dämpfung von Ultraschall im Magnetfeld	417
43.4.5.	Elektronen oder/und Löcher	419
43.5.	Optische Eigenschaften und spektroskopische Bestimmung der Bandstruktur	422
43.5.1.	Übersicht	422
43.5.2.	Interbandübergänge	423
43.6.	Grenzflächenprobleme	427
43.6.1.	Die Austrittsarbeit	427
43.6.2.	Kontakt- und Thermospannung	431
44.	Streuung von Leitungselektronen: die elektrische Leitung	434
44.1.	Streuprozesse	434
44.1.1.	Streuung an Phononen	434
44.1.2.	Streuung an Gitterfehlern	434
44.1.3.	Elektron-Elektron-Streuung	435
44.2.	Die elektrische Leitfähigkeit von Metallen	435

44.2.1.	Der Relaxationsmechanismus	435
44.2.2.	Das Ohmsche Gesetz im Gleichfeld	437
44.2.3.	Leitfähigkeit im Wechselfeld	443
44.2.3.1.	Leitfähigkeit, Skineffekt	443
44.2.3.2.	Dielektrizitätskonstante der Leitungselektronen	446
44.2.4.	Plasmawellen	449
44.2.5.	Leitung in gekreuzten Feldern: galvanomagnetische Effekte	451
44.2.5.1.	Hall-Effekt	452
44.2.5.2.	Magnetische Widerstandsänderung	455
44.2.5.3.	Quanten-Hall-Effekt (Nachtrag)	609
45.	Homogene Halbleiter	457
45.1.	Übersicht und Grundbegriffe	457
45.2.	Trägerkonzentrationen und elektrische Leitfähigkeit	462
45.2.1.	Elektronenverteilung im thermischen Gleichgewicht	462
45.2.2.	Die elektrische Leitfähigkeit	467
45.3.	Galvanomagnetische Effekte	470
45.3.1.	Hall-Effekt und Beweglichkeiten	470
45.3.2.	Magnetische Widerstandsänderung	473
45.4.	Zyklotronresonanz und effektive Massen	474
45.5.	Optische Eigenschaften	477
45.5.1.	Absorption durch freie Ladungsträger	477
45.5.2.	Interbandübergänge	478
45.5.3.	Störstellenabsorption	480
46.	Inhomogene Halbleiter	481
46.1.	Diffusion und Rekombination von Ladungsträgern	481
46.2.	Der p-n-Übergang	483
46.3.	Der p-n-Gleichrichter	486
47.	Einelektronenzustände in der LCAO-Näherung	489
48.	Exzitonen	495
48.1.	Frenkel-Exzitonen	497
48.2.	Mott-Wannier-Exzitonen	499
48.3.	k -Abhängigkeit, Strahlung und Zerfall von Exzitonen	502
48.4.	Resonanzkopplung innerhalb einer Gitterzelle	503
48.5.	Exzitonenspektren	505
49.	Polaronen	509
50.	Makroskopische Phänomene	513
50.1.	Die elektrische Leitung im Gleichfeld	513
50.2.	Die Magnetisierung	516
50.3.	Zwischenzustand und Magnetisierungskurve	518
50.4.	Thermodynamische Eigenschaften	521
50.5.	Die London'schen Feldgleichungen	526
50.6.	Flußquantelung	529
51.	Grundlagen und Ergebnisse der BCS-Theorie	532
51.1.	Die Cooper-Paare	532
51.2.	Der Grundzustand eines Supraleiters bei $T = 0$ K	534
51.3.	Die Energielücke eines Supraleiters bei $T = 0$ K	536
51.4.	Die Energielücke eines Supraleiters bei $T > 0$ K	539
52.	BCS-Theorie und makroskopische Phänomene	541
52.1.	Elektrische Leitfähigkeit und das kritische Magnetfeld	541
52.2.	Die thermodynamischen Eigenschaften	542
52.3.	Nachweis der Cooper-Paare und des Bindungsmechanismus	543
52.4.	Experimentelle Bestimmung der Energielücke	543
52.4.1.	Spezifische Wärme und Übergangstemperatur	543
52.4.2.	Optische und Ultraschall-Absorption	543
52.4.3.	Tunnelübergänge von Einzelelektronen	545

I. Leitungselektronen: Halbleiter

J. Gebundene Zustände in Kristallen

K. Supraleitung

	52.5. Josephson-Effekte	550
	52.5.1. Experimenteller Befund	550
	52.5.2. Theoretische Begründung	552
	52.6. Deutung des Meißner-Ochsenfeld-Effektes	553
	53. Grenzflächenprobleme	555
	53.1. Kohärenzlängen	555
	53.2. Die Phasengrenzenergie	556
	53.3. Supraleiter 2. Art	558
L. Anregungen und Energietransport	54. Anregungen	563
	55. Wärmeleitung	565
	55.1. Grundbegriffe und -tatsachen	565
	55.2. Wärmewiderstand durch Phononenstreuung	566
	55.2.1. Übersicht	566
	55.2.2. Phonon-Phonon- und Oberflächenstreuung	568
	55.2.3. Streuung an Gitterfehlern	571
	55.2.4. Amorphe und teilkristalline Stoffe	573
	55.3. Wärmeleitung in magnetischen Kristallen	576
	55.4. Wärmeleitung in Metallen	577
	55.4.1. Wärmeleitung im normalleitenden Zustand	577
	55.4.2. Wärmeleitung im supraleitenden Zustand	579
	Bildtafeln	581
Anhang	A: Maßsysteme	599
	B: Konstanten der Atomphysik	603
	C: Ersatzeinheiten für atomare Energien, Umrechnungstabelle	604
	D: Ebene elektromagnetische Wellen in Materie, nach der klassischen Kontinuumstheorie	606
Nachtrag	44.2.5.3. Quanten-Hall-Effekt	609
	Literatur	613
	Sachverzeichnis	621