

Werner Buckel, Reinhold Kleiner

Supraleitung

Grundlagen und Anwendungen

6., vollständig überarbeitete
und erweiterte Auflage



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 1

| | |
|----------|--|
| 1 | Grundlegende Eigenschaften von Supraleitern 11 |
| 1.1 | Das Verschwinden des elektrischen Widerstandes 11 |
| 1.2 | Idealer Diamagnetismus, Flussschläuche und Flussquantisierung 22 |
| 1.3 | Die Flussquantisierung im supraleitenden Ring 29 |
| 1.4 | Supraleitung: ein makroskopisches Quantenphänomen 32 |
| 1.5 | Quanteninterferenzen 46 |
| 1.5.1 | Josephsonströme 47 |
| 1.5.2 | Quanteninterferenzen im Magnetfeld 60 |
| | Literatur 73 |
| 2 | Supraleitende Elemente, Legierungen und Verbindungen 75 |
| 2.1 | Vorbemerkung: Konventionelle und unkonventionelle Supraleiter 75 |
| 2.2 | Supraleitende Elemente 78 |
| 2.3 | Supraleitende Legierungen und metallische Verbindungen 83 |
| 2.3.1 | Die β -Wolfram-Struktur 83 |
| 2.3.2 | Magnesium-Diborid 86 |
| 2.3.3 | Metall-Wasserstoff-Systeme 87 |
| 2.4 | Fulleride 88 |
| 2.5 | Chevrel-Phasen und Borkarbide 89 |
| 2.6 | Schwere-Fermionen-Supraleiter 92 |
| 2.7 | Natürliche und künstliche Schichtsupraleiter 94 |
| 2.8 | Die supraleitenden Oxide 97 |
| 2.8.1 | Kuprate 97 |
| 2.8.2 | Wismutate, Ruthenate und andere oxidische Supraleiter 103 |
| 2.9 | Organische Supraleiter 104 |
| 2.10 | Supraleiter durch Feldeffekt? 107 |
| | Literatur 109 |
| 3 | Die Cooper-Paarung 115 |
| 3.1 | Konventionelle Supraleitung 115 |
| 3.1.1 | Cooper-Paarung durch die Elektron-Phonon-Wechselwirkung 115 |
| 3.1.2 | Der supraleitende Zustand, Quasiteilchen und die BCS-Theorie 123 |

XII | *Inhaltsverzeichnis*

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.1.3 | Experimente zur unmittelbaren Bestätigung der Grundvorstellungen über den supraleitenden Zustand | 128 |
| 3.1.3.1 | Der Isotopeneffekt | 129 |
| 3.1.3.2 | Die Energielücke | 132 |
| | Absorption elektromagnetischer Strahlung | 132 |
| | Ultraschallabsorption | 134 |
| | Tunnelexperimente | 135 |
| 3.1.4 | Spezielle Eigenschaften der konventionellen Supraleiter | 148 |
| 3.1.4.1 | Der Einfluss von Gitterstörungen auf die konventionelle Cooper-Paarung | 148 |
| | Der Anisotropieeffekt | 148 |
| | Der Valenzeffekt | 150 |
| | Die Elektron-Phonon-Wechselwirkung | 152 |
| 3.1.4.2 | Der Einfluss paramagnetischer Ionen auf die konventionelle Cooper-Paarung | 155 |
| 3.2 | Unkonventionelle Supraleitung | 161 |
| 3.2.1 | Allgemeine Gesichtspunkte | 161 |
| 3.2.2 | Hochtemperatursupraleiter | 167 |
| 3.2.3 | Schwere Fermionen, Ruthenate und andere unkonventionelle Supraleiter | 185 |
| | Literatur | 192 |
| 4 | Thermodynamik und thermische Eigenschaften des supraleitenden Zustandes | 197 |
| 4.1 | Allgemeine Vorbemerkungen zur Thermodynamik | 198 |
| 4.2 | Die spezifische Wärme | 202 |
| 4.3 | Die Wärmeleitfähigkeit | 205 |
| 4.4 | Grundzüge der Ginzburg-Landau-Theorie | 209 |
| 4.5 | Die charakteristischen Längen der Ginzburg-Landau-Theorie | 212 |
| 4.6 | Typ-I-Supraleiter im Magnetfeld | 218 |
| 4.6.1 | Das kritische Feld und die Magnetisierung stabförmiger Proben | 218 |
| 4.6.2 | Die Thermodynamik des Meißner-Zustandes | 223 |
| 4.6.3 | Kritisches Magnetfeld dünner Schichten in einem Feld parallel zur Oberfläche | 227 |
| 4.6.4 | Der Zwischenzustand | 228 |
| 4.6.5 | Die Phasengrenzenergie | 233 |
| 4.6.6 | Der Einfluss von Druck auf den supraleitenden Zustand | 236 |
| 4.7 | Typ-II-Supraleiter im Magnetfeld | 241 |
| 4.7.1 | Magnetisierungskurve und kritische Felder | 243 |
| 4.7.2 | Die Shubnikov-Phase | 254 |
| 4.8 | Fluktuationen oberhalb der Sprungtemperatur | 265 |
| 4.9 | Zustände außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts | 270 |
| | Literatur | 275 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 5 | Kritische Ströme in Supraleitern 1. und 2. Art | 281 |
| 5.1 | Die Begrenzung des Suprastroms durch Paarbrechung | 281 |
| 5.2 | Typ-I-Supraleiter | 283 |
| 5.3 | Typ-II-Supraleiter | 289 |
| 5.3.1 | Ideale Typ-II-Supraleiter | 290 |
| 5.3.2 | Harte Supraleiter | 294 |
| 5.3.2.1 | Die Verankerung von Flussschläuchen | 295 |
| 5.3.2.2 | Die Magnetisierungskurve von harten Supraleitern | 299 |
| 5.3.2.3 | Kritische Ströme und Strom-Spannungs-Kennlinien | 309 |
| | Literatur | 317 |
| 6 | Josephsonkontakte und ihre Eigenschaften | 319 |
| 6.1 | Stromtransport über Grenzflächen im Supraleiter | 319 |
| 6.1.1 | Supraleiter-Isolator-Grenzflächen | 319 |
| 6.1.2 | Supraleiter-Normalleiter-Grenzflächen | 326 |
| 6.2 | Das RCSJ-Modell | 334 |
| 6.3 | Josephsonkontakte unter Mikrowelleneinstrahlung | 340 |
| 6.4 | Flusswirbel in ausgedehnten Josephsonkontakten | 343 |
| 6.5 | Quanteneigenschaften von supraleitenden Tunnelkontakten | 355 |
| 6.5.1 | Coulomb-Blockade und Tunnels einzelner Ladungen | 355 |
| 6.5.2 | Flussquanten und makroskopische Quantenkohärenz | 361 |
| | Literatur | 364 |
| 7 | Anwendungen der Supraleitung | 367 |
| 7.1 | Supraleitende Magnetspulen | 369 |
| 7.1.1 | Allgemeine Aspekte | 369 |
| 7.1.2 | Supraleitende Kabel und Bänder | 370 |
| 7.1.3 | Spulenschutz | 379 |
| 7.2 | Supraleitende Permanentmagnete | 381 |
| 7.3 | Anwendungen für supraleitende Magnetspulen | 384 |
| 7.3.1 | Kernspinresonanz | 384 |
| 7.3.2 | Kernspintomographie | 388 |
| 7.3.3 | Teilchenbeschleuniger | 389 |
| 7.3.4 | Kernfusion | 391 |
| 7.3.5 | Energiespeicher | 393 |
| 7.3.6 | Motoren und Generatoren | 395 |
| 7.3.7 | Magnetische Separation | 396 |
| 7.3.8 | Schwebezüge | 396 |
| 7.4 | Supraleiter für die Leistungübertragung: Kabel, Transformatoren und Strombegrenzer | 397 |
| 7.4.1 | Supraleitende Kabel | 398 |
| 7.4.2 | Transformatoren | 400 |
| 7.4.3 | Strombegrenzer | 401 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 7.5 | Supraleitende Resonatoren und Filter | 402 |
| 7.5.1 | Das Hochfrequenzverhalten von Supraleitern | 402 |
| 7.5.2 | Resonatoren für Teilchenbeschleuniger | 407 |
| 7.5.3 | Resonatoren und Filter für die Kommunikationstechnik | 410 |
| 7.6 | Supraleiter als Detektoren | 414 |
| 7.6.1 | Empfindlichkeit, thermisches Rauschen und Störeinflüsse | 415 |
| 7.6.2 | Inkohärente Strahlungs- und Teilchendetektion: Bolometer und Kalorimeter | 416 |
| 7.6.3 | Kohärente Strahlungsdetektion und -erzeugung; Mischer, Lokaloszillatoren und integrierte Empfänger | 420 |
| 7.6.4 | Quanteninterferometer als Magnetfeldsensoren | 427 |
| 7.6.4.1 | SQUID-Magnetometer: Grundlegende Konzepte | 428 |
| 7.6.4.2 | Störsignale, Gradiometer und Abschirmungen | 439 |
| 7.6.4.3 | Anwendungen von SQUIDs | 442 |
| 7.7 | Supraleiter in der Mikroelektronik | 446 |
| 7.7.1 | Spannungsstandards | 446 |
| 7.7.2 | Digitalelektronik mit Josephsonkontakte | 450 |
| | Literatur | 455 |

Monographien und Stoffsammlungen 461

Ausblicke 465

Stichwortverzeichnis 471