



张裕恒

编著

超导物理

中国科学技术大学
出版社

超 导 物 理

张裕恒 编著

中国科学技术大学出版社

1997·合肥

图书在版编目(CTP)数据

超导物理/张裕恒 编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,1997
年9月

ISBN 7—312—00941—7

I 超导物理

II 张裕恒 编著

III ①超导电性 ②低温物理

IV O

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:850mm×1168mm/32 印张:21.25 字数 550 千

1997年9月第2版 1997年9月第2次印刷

印数:1501—4500册

ISBN 7—312—00941—7/O • 195 定价:22.60元

内 容 简 介

本书着重于超导电性的基本原理、概念。对超导宏观理论做了详细地阐述、讨论和比较；对超导微观理论建立的实验基础，形成超导的机制，物理图象也作了系统介绍；对超导隧道效应的各种重要实验现象，理论处理给出仔细的描述。高温超导体的发现迄今已十年，虽然高温超导电性机制尚不清楚，但大量的实验结果已肯定了许多与常规超导体不同的现象，本书中也给出了介绍。本书可供大学低温、超导专业学生、研究生作为教材，亦可供从事超导研究的科学工作者参考。

序 言

自从 1911 年 Onnes 首先发现 Hg 在 4.2K 附近电阻突然消失以来,开拓了一个新的超导物理领域。直到 50 年代,超导只是作为探索自然界存在的现象和规律在研究,1957 年 BCS 理论的建立揭示了漫长时期不清楚的超导起因。1954 年 Matthias 发现新型的 A-15 型超导化合物 Nb_3Sn ,1961 年 Kunzler 将 Nb_3Sn 制成高场磁体,开辟了超导在强电中的应用,特别是 1962 年 Josephson 效应的出现,将超导应用推广到一个崭新的领域。到 70 年代超导在电力工业和微弱信号检测应用方面的进展显示了它无比的优越性,例如用超导线材成功地获得了 17.5T 高磁场,从而在电能输送、磁流体发电、超导磁悬浮列车等方面的研究、试制不断推进;用 Josephson 效应做出的超导量子干涉器(简称 SQUID)可分辨 10^{-15}T 磁场,它立即应用到国防、探矿、地震预报、生物磁学等方面,交流 Josephson 器件用到射电天文、电压基准监视等领域,显示出其它器件与之不可比拟的性能。但由于超导临界温度低,必须使用液氮,大大地限制了它的优越性。从 70 年代人们注意力转向寻找高临界温度 T_c (液氮温区)超导体,在周期表上排列、组合成各种二元、三元合金或化合物,但一直进展不大,人们又去找四元化合物,仍无成效,1973 年找到的最高 T_c 是 23.2K 的 Nb_3Ge 薄膜,此后到 1985 年这个记录一直不变。

1986 年 4 月 Bednorz 和 Müller 开创了超导新纪元,他们发现了 La-Ba-Cu 氧化物超导体,其 T_c 超过 30K,随后朱经武等和赵忠贤等得到 T_c 高于 90K 的 Y-Ba-Cu 氧化物超导体,使超导体在液氮温区的应用变为现实。

高温超导的出现已历经十年,虽然目前高温超导电性机制尚

不清楚,甚至载流子是 s 波还是 d 波仍在争论之中,但大量实验结果已肯定他有许多与常规超导体不同的现象,例如高温超导体磁通动力学的新现象、新规律比常规超导体丰富得多;由于高温超导体的 κ 很大,常规超导薄膜中 GL 方程求解的近似前提已失效,以致超导薄膜临界磁场与厚度关系已不适用于高温超导体;高温超导体结构对 T_c 的敏感度亦是常规超导体所不具有的。高温超导薄膜 Josephson 器件的十年发展,迄今无论是在原理上还是在制备技术上都已获得了很大成功,产生了广阔的应用前景,故十分有必要充实 Josephson 效应的内容和十年来高温超导发展已被肯定的新现象、新规律,因此本人重写《超导物理》

本书着重于超导基础知识、基本原理、概念和物理模型,以使读者对超导有系统、深入地了解。对于其实际应用方面的问题,如 j_c 与显微结构的关系,磁通跳跃、退化和稳定,超导磁体,交流损耗等方面内容请读吴杭生、管惟炎、李宏成著《超导电性》;关于超导电子学应用方面内容请读章立源、张金龙、崔广霁著《超导物理》,崔广霁、孟小凡译《Josephson 效应的物理和应用》,或其它外国专著。

本书主要参考书为: D. Shoenberg《*Superconductivity*》; F. London,《*Superfluids*》; D. Saint-James, E. J. Thomas, G. Sarma,《*Type I Superconductivity*》; E. A. Lynton,《*Superconductivity*》; L. Solymar,《*Superconductive Tunneling and Application*》; A. Barone, G. Paterno,《*Physics and Applications of the Josephson Effect*》及姚希贤 1979 年 11 月在西安的“超导隧道效应基本原理与应用”讲稿。

著者水平有限,难免有误,请读者批评指正。

作者于中国科学技术大学

1997. 4

目 录

第一章 超导电性的表征	(1)
1.1 零电阻态的发现	(1)
1.2 零电阻态遇到的困难	(2)
1.3 Meissner 效应	(8)
1.3.1 Meissner 效应	(8)
1.3.2 超导态的特殊磁性	(8)
1.4 超导电性: $\rho=0, B=0$	(11)
1.4.1 临界温度 T_c	(11)
1.4.2 临界磁场 H_c	(27)
1.4.3 临界电流密度 j_c	(30)
1.5 超导态的实验观测	(32)
1.5.1 零电阻率的上限	(32)
1.5.2 Meissner 效应的实验观察	(35)
1.6 超导体特殊磁性的描述	(40)
第二章 超导体的热力学性质	(43)
2.1 超导相变热力学	(43)
2.1.1 二流体模型	(44)
2.1.2 超导体的自由能和磁化功	(45)
2.1.3 超导体的熵和相变潜热	(47)
2.1.4 超导体的比热	(50)
2.1.5 晶格比热和电子比热	(52)
2.2 超导相变的力学效应	(55)
2.3 热导	(59)
2.3.1 热导机制	(61)

2.3.2	低温下正常金属的热导	(61)
2.3.3	超导体的热导	(63)
2.4	温差电效应	(63)
第三章	London 理论	(65)
3.1	在超导体中的电磁基本规律	(65)
3.2	零电阻的结果	(66)
3.3	London 方程	(68)
3.4	London 方程的应用	(72)
3.4.1	有限厚度的无限大超导板	(72)
3.4.2	在磁场中的超导球	(74)
3.5	穿透深度的测量	(77)
3.5.1	颗粒的磁化率	(77)
3.5.2	细长圆柱的磁化率	(80)
3.5.3	测中空长圆柱内、外磁场法	(81)
3.5.4	微波谐振法	(81)
3.5.5	电感法	(82)
3.5.6	对穿透深度测量结果的分析	(82)
3.6	热力学理论得出的 $H_c(T)$ 、 $\lambda(T)$ 关系和 ΔC	(84)
3.6.1	$H_c(T)$	(84)
3.6.2	ΔC	(86)
3.6.3	$\lambda(T)$	(86)
3.7	London 理论的成功与不足	(89)
第四章	Pippard 理论	(93)
4.1	相干(相关)长度	(94)
4.2	反常趋肤效应	(98)
4.3	Pippard 非局域关系	(102)
4.3.1	相关长度 ξ_p 很小的情况	(104)
4.3.2	$\lambda \ll \xi_p$	(104)
4.3.3	普遍情况	(105)

4.4	Pippard 理论之成功与不足	(108)
第五章	Ginzburg-Landau (GL) 理论	(110)
5.1	自由能和 GL 方程	(111)
5.2	在磁场中 GL 方程的解	(115)
5.2.1	$H_a \approx 0$ 的情况	(115)
5.2.2	弱磁场情况	(117)
5.2.3	$\kappa \gg 1$ 时 GL 方程的解析解	(120)
5.3	特征长度 $\lambda(T, H_a)$, $\xi(T)$ 和 GL 参量 κ	(121)
5.3.1	$\lambda(T, H_a)$	(121)
5.3.2	$\xi(T)$	(124)
5.3.3	GL 参量 κ	(125)
5.4	两类超导体	(125)
5.5	GL 理论的适用范围	(134)
第六章	中间态与界面能	(136)
6.1	在均匀磁场中超导椭球的磁性	(136)
6.2	超导环的磁性	(139)
6.3	Landau 的中间态分层模型	(147)
6.3.1	Landau 不分支模型	(147)
6.3.2	Landau 分支模型	(148)
6.4	中间态的实验观察	(149)
6.4.1	Bi 探针法	(149)
6.4.2	缀饰法—Bitter 图案技术	(155)
6.4.3	磁光法	(157)
6.5	中间态热力学	(160)
6.6	界面能	(163)
6.6.1	正界面能的提出	(164)
6.6.2	正负界面能的起源	(169)
6.7	横向磁场中超导导线电阻的恢复	(173)
6.8	中间态的磁矩	(176)

6.8.1	在横向磁场中超导圆柱的磁化曲线	(176)
6.8.2	在横向磁场中超导薄圆盘的磁化曲线	(179)
6.8.3	在横向磁场中超导方薄板的磁化曲线	(179)
6.9	过冷	(181)
6.9.1	由于过冷而引起的滞后	(181)
6.9.2	理论分析	(182)
6.9.3	Faber 实验	(185)
第七章	混合态 理想的第 II 类超导体	(187)
7.1	第 II 类超导体的磁性 上、下临界磁场 H_{c1} 和 H_{c2}	(187)
7.2	第 II 类超导体的热力学性质	(189)
7.2.1	热力学临界磁场 H_c	(189)
7.2.2	$H_{c1}(T)$ 和 $H_{c2}(T)$ 处的相变是二级相变 ...	(192)
7.3	Meissner 态与理想第 II 类超导体的载流能力	(195)
7.4	H_{c1} 孤立磁通涡旋线	(197)
7.4.1	磁通涡旋线	(197)
7.4.2	London 模型的孤立涡旋线 H_{c1}	(199)
7.4.3	GL 理论的 H_{c1}	(203)
7.5	混合态结构 磁通涡旋线	(209)
7.5.1	接近 H_{c1} 的混合态	(210)
7.5.2	近邻涡旋线的相互作用	(211)
7.5.3	接近 H_{c1} 的混合态磁化曲线	(212)
7.5.4	磁通线与表面的相互作用	(214)
7.6	H_{c2}	(214)
7.6.1	强磁场中 GL 方程的解	(214)
7.6.2	再论 GL 参量 κ	(217)
7.7	接近 H_{c2} 的磁通涡旋线 Abrikosov 理论	(218)

7.8 在 $H_{c1} < H_a < H_{c2}$ 中间区的磁化曲线和 $H_a(T)$ 相图	(227)
7.8.1 磁化曲线	(227)
7.8.2 $H_a(T)$ 相图	(229)
7.9 涡旋线结构的实验观测	(230)
7.9.1 中子衍射	(231)
7.9.2 核磁共振	(232)
7.9.3 缀饰法	(233)
7.10 $\kappa = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 的特殊情况	(234)
7.11 表面超导电性	(235)
7.11.1 磁场和表面平行的情况	(235)
7.11.2 其它情况	(240)
第八章 实用超导体	(243)
8.1 磁通俘获和不可逆磁化	(243)
8.1.1 俘获磁通的观测	(243)
8.1.2 非理想第Ⅱ类超导体中的磁通俘获	(245)
8.2 作用在涡旋线上的力	(248)
8.2.1 Lorentz 力	(248)
8.1.2 镜像力	(248)
8.3 钉扎力和钉扎中心	(250)
8.3.1 钉扎力和钉扎中心	(250)
8.3.2 元钉扎	(252)
8.3.3 钉扎源	(256)
8.4 Bean 模型和临界态 ($T=0K$)	(258)
8.5 Kim-Anderson 模型	(262)
8.5.1 超导圆筒的磁化实验	(262)
8.5.2 Kim-Anderson 模型 ($T \neq 0K$)	(264)
8.5.3 磁化曲线	(264)

8.6	一般情况的磁化曲线	(267)
8.7	有限温度下的磁通蠕动 临界态	(270)
8.7.1	实验现象	(270)
8.7.2	Anderson 磁通蠕动理论	(270)
8.7.3	高温超导热激活模型新论	(273)
第九章	小尺寸超导体	(288)
9.1	小样品中的磁场分布	(288)
9.1.1	London 理论的小样品的解	(288)
9.1.2	$\kappa < 1/\sqrt{2}$ 的超导薄膜 GL 方程的解	(290)
9.1.3	$\kappa \gg 1$ 的高温超导膜 GL 方程的解	(291)
9.2	超导薄膜的磁矩	(293)
9.2.1	超导薄膜磁矩的实验结果	(293)
9.2.2	London 理论的磁矩	(295)
9.2.3	$\kappa < 1/\sqrt{2}$ 的 GL 理论的磁矩	(295)
9.2.4	$\kappa \gg 1$ 的高温超导体的 GL 理论的磁矩	(297)
9.3	超导薄膜的临界磁场	(299)
9.3.1	超导薄膜临界磁场的实验结果	(299)
9.3.2	London 理论的超导薄膜临界磁场	(299)
9.3.3	$\kappa < 1/\sqrt{2}$ GL 理论的超导薄膜临界磁场	(301)
9.3.4	$\kappa \gg 1$ GL 理论的超导薄膜临界磁场	(302)
9.4	临界厚度 d_c	(303)
9.4.1	膜中 GL 方程解的分析	(304)
9.4.2	临界厚度的实验分析	(309)
9.5	超导薄膜临界磁场的非局域效应	(314)
9.5.1	$H_{cf} \sim d$ 的实验结果 (I)	(314)
9.5.2	$H_{cf} \sim d$ 的实验结果 (II)	(314)
9.5.3	London 理论	(317)

9.5.4	GL 理论	(317)
9.5.5	λ 定义的适用性	(321)
9.5.6	$\lambda \sim d$ 关系	(322)
9.6	超导薄膜临界磁场的非线性非局域效应	(323)
9.6.1	London 和 GL 理论的非局域修正	(323)
9.6.2	弱磁场非局域理论	(327)
9.6.3	强磁场非局域理论	(329)
9.6.4	理论与实验比较 超导薄膜临界磁场的 非线性非局域效应	(333)
9.7	GL 理论对超导薄膜的适用性	(336)
9.7.1	理论与实验的矛盾	(336)
9.7.2	在薄膜中局域条件的新判据	(336)
9.7.3	GL 理论不能用于描述常规晶态超导薄膜 的原因	(339)
9.7.4	所谓实验符合 $H_{cJ} \propto d^{-1}$ 的错误所在	(339)
9.7.5	高温超导薄膜的临界磁场	(342)
9.7.6	膜的界面条件	(342)
9.8	垂直磁场中超导薄膜的电阻转变	(344)
9.8.1	实验结果	(344)
9.8.2	理论解释	(349)
第十章	超导体的输运性质	(353)
10.1	超导体中流过的电流分面于表面	(353)
10.2	从正常导体到超导体的输运电流	(354)
10.2.1	厚度为 $2d$ 的无限平板	(354)
10.2.2	圆柱超导体	(358)
10.3	临界电流 I_c	(359)
10.3.1	电流对超导电性的破坏 Silsbee 假设 ...	(359)
10.3.2	临界电流密度	(365)

10.3.3	电流和外加磁场对超导电性的破坏 广义的 Silsbee 假设	(366)
10.4	超导薄膜的临界电流	(368)
10.4.1	Silsbee 假设不适用 London 理论失效	(368)
10.4.2	GL 理论的 H_{I_c}	(369)
10.4.3	实验结果	(373)
10.5	第 II 类超导体的临界电流	(375)
10.5.1	常规第 II 类超导体的临界电流	(375)
10.5.2	高温超导体的临界电流密度	(383)
10.5.3	磁通蠕动对 j_c 的影响	(383)
第十一章	宏观量子化	(384)
11.1	类磁通量守恒	(385)
11.2	宏观量子化	(388)
11.3	实验测量	(389)
11.3.1	磁通量子化	(389)
11.3.2	临界温度的周期变化 Little-Parks 实验	(392)
第十二章	Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理论	(396)
12.1	晶格结构在超导相变前后不变	(396)
12.2	能隙	(397)
12.2.1	比热	(397)
12.2.2	远红外吸收	(397)
12.3	电-声子相互作用	(399)
12.3.1	同位素效应	(399)
12.3.2	电-声子相互作用的简单模型	(401)
12.3.3	存在吸引相互作用时正常态的不稳定性	(402)
12.3.4	吸引相互作用的来源	(404)

12.3.5	屏蔽 Coulomb 作用	(407)
12.3.6	造成电子间相互吸引的电-声子相互作用	(408)
12.4	Cooper 对	(410)
12.4.1	Cooper 对	(410)
12.4.2	Cooper 对的均方半径 ρ	(413)
12.4.3	对 T_c 和同位素效应的定性解释	(413)
12.5	BCS 基态能隙方程	(414)
12.5.1	超导基态占据 $E(p)$ 态的几率	(417)
12.5.2	Δ 和 $E(p)$ 的物理意义	(418)
12.5.3	态密度	(420)
12.5.4	$\Delta(0)$	(422)
12.6	BCS T_c 公式	(422)
12.7	临界磁场和比热	(427)
12.7.1	$H_c(T) \sim T$	(427)
12.7.2	C_s	(428)
12.8	BCS 非局域非线性关系	(430)
12.9	BCS 理论的局限性	(431)
12.9.1	与实验不符合的情况	(431)
12.9.2	BCS 理论模型之不足	(432)
第十三章	正常电子隧道	(435)
13.1	正常金属隧道	(435)
13.2	超导体和正常导体之间的隧道	(439)
13.2.1	超导隧道的发现	(439)
13.2.2	正常金属-绝缘体-超导体的结	(440)
13.3	超导体之间的隧道	(442)
13.3.1	相同超导体之间的隧道	(442)
13.3.2	不同能隙的超导体之间的隧道	(443)
13.4	唯象理论	(446)

13.4.1	N-I-S 结	(446)
13.4.2	S-I-S 结	(450)
13.5	Adkins 模型	(452)
13.6	非理想的行为	(454)
13.7	双粒子隧道	(456)
13.8	光子参与的隧道	(460)
13.9	正常电子隧道效应的应用	(467)
13.9.1	测量方法	(467)
13.9.2	超导能隙的测量 超导能隙与温度的关系	(468)
13.9.3	磁场对超导能隙的影响	(472)
13.9.4	磁性杂质对超导电性的影响	(474)
13.9.5	测量正常电子的寿命	(475)
13.9.6	声子谱	(476)
13.9.7	正常电子隧道效应在器件方面的应用	(479)
第十四章	超导电子隧道	(481)
14.1	Josephson 方程	(482)
14.2	弱连接超导体	(488)
14.3	Josephson 结的超导参数	(494)
14.3.1	临界电流密度 j_c	(494)
14.3.2	Josephson 穿透深度 λ_J	(496)
14.3.3	超导电子隧道的 $I \sim V$ 曲线	(497)
14.4	超导电子隧道与正常电子隧道	(499)
14.4.1	从正常电子隧道到超导电子隧道过渡的 实验结果	(499)
14.4.2	Josephson 隧道结的临界厚度	(501)
第十五章	d. c. Josephson 效应	(507)
15.1	小结中超导宏观量子衍射现象	(508)
15.1.1	矩形小结	(508)

15.1.2	圆形小结	(512)
15.1.3	任意取向磁场的矩形结	(515)
15.2	非均匀电流密度的 Josephson 效应	(516)
15.2.1	台阶状的电流密度分布	(516)
15.2.2	单参量电流密度分布	(520)
15.2.3	三角形分布的电流密度	(525)
15.3	小尺寸结中的自场效应	(526)
15.3.1	叠层隧道结中的自场	(526)
15.3.2	交叉膜隧道结的自场效应	(527)
15.4	涨落对 Josephson 效应的影响	(532)
15.5	大结中的自场效应	(536)
15.5.1	半无限大结的特解	(537)
15.5.2	大结的一般解	(538)
15.5.3	一维大尺寸结	(542)
15.6	结的弱超导体行为	(547)
15.6.1	势垒的自由能	(547)
15.6.2	结中的磁场能	(547)
15.6.3	结的 H_{c1}	(548)
15.7	论大结中理论与实验结果	(549)
第十六章	a. c. Josephson 效应	(553)
16.1	a. c. Josephson 效应	(553)
16.1.1	a. c. Josephson 效应	(553)
16.1.2	a. c. Josephson 效应的实验证明	(554)
16.2	微波辐照下超导结的 $I \sim V$ 曲线——微波感应 台阶效应	(555)
16.3	低 Q 结自激谐振的 $I \sim V$ 曲线——自测效应	(561)
16.3.1	隧道结中的电磁振荡模式	(561)
16.3.2	低 Q 结的自测效应	(563)