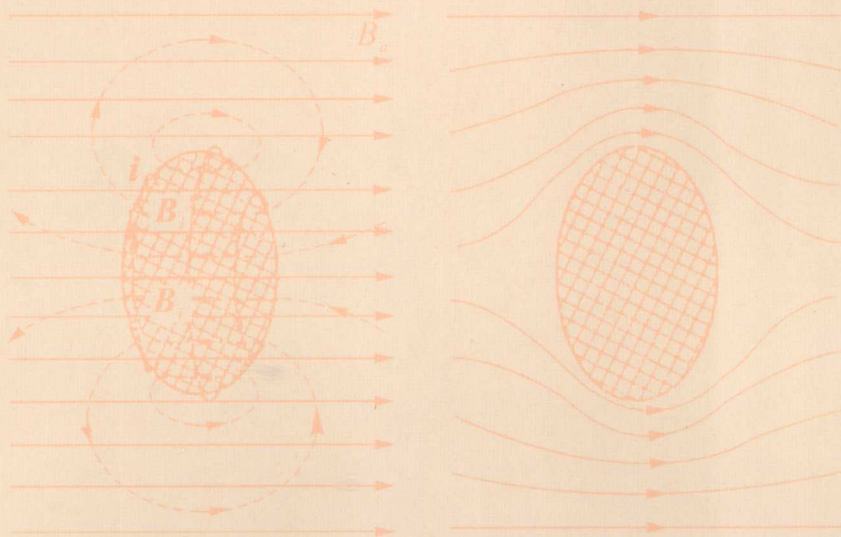


“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学精品教材

超导物理

第3版

► 张裕恒 编著



中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学精品教材

超导物理

CHAODAO WULI

第3版

张裕恒 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书着重于超导电性的基本原理、概念。对超导宏观理论作了详细的阐述、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、物理图像也作了系统介绍;对超导隧道效应的各种重要实验现象、理论处理给出了仔细的描述。高温超导体的发现迄今已二十多年,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,也可供从事超导研究的科学工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

超导物理/张裕恒编著.—3版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2009.1
(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

ISBN 978-7-312-02177-0

I. 超… II. 张… III. 超导理论—物理学—高等学校—教材 IV. O511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 164368 号

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

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:710 mm×960 mm 1/16 印张:34 插页:2 字数:646 千

1992 年 2 月第 1 版 2009 年 1 月第 3 版 2009 年 1 月第 3 次印刷

印数:4501—7500 册

定价:55.00 元

总 序

2008 年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题 281 种,经过多轮、严格的评审,最后确定 50 种入选精品教材系列。

1958 年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学

与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。五十年来,进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校五十年教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版,既是向学校五十周年校庆的献礼,也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。

侯建国

2008 年 8 月

序 言

自从 1911 年 Onnes 首先发现 Hg 在 4.2 K 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 17.5 T 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,显示出其他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 年代起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 23.2 K 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 30 K,随后朱经武等和赵忠贤等得到 T_c 高于 90 K 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二十多年,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它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、新现

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 器件的二十多年发展,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 效应的内容和二十多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》,并在此感谢阮可青老师的帮助。

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、崔广霖著《超导物理》,崔广霖、孟小凡译《Josephson 效应的物理和应用》,或其他外国专著。

本书主要参考书为: D. Shoenberg, *Superconductivity*; F. London, *Superfluids*; D. Saint - James, E. J. Thomas, G. Sarma, *Type II Superconductivity*; E. A. Lynton, *Superconductivity*; L. Sotymax, *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

2008.4

目 录

总序	(i)
序言	(iii)
第 1 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	(6)
1.3.1 Meissner 效应	(6)
1.3.2 超导态的特殊磁性	(6)
1.4 超导电性: $\rho = 0$, $B = 0$	(8)
1.4.1 临界温度 T_c	(8)
1.4.2 临界磁场 H_c	(20)
1.4.3 临界电流密度 j_c	(22)
1.5 超导态的实验观测	(23)
1.5.1 零电阻率的上限	(23)
1.5.2 Meissner 效应的实验观察	(25)
1.6 超导体特殊磁性的描述	(28)
第 2 章 超导体的热力学性质	(31)
2.1 超导相变热力学	(31)
2.1.1 二流体模型	(31)
2.1.2 超导体的自由能和磁化功	(32)
2.1.3 超导体的熵和相变潜热	(34)
2.1.4 超导体的比热容	(36)
2.1.5 晶格比热容和电子比热容	(38)
2.2 超导相变的力学效应	(39)
2.3 热导	(43)

第 5 章 Ginzburg - Landau(GL)理论	(84)
5.1 自由能和 GL 方程	(85)
5.2 在磁场中 GL 方程的解	(88)
5.2.1 $H_a \approx 0$ 的情况	(88)
5.2.2 弱磁场情况	(90)
5.2.3 $\kappa \gg 1$ 时 GL 方程的解析解	(93)
5.3 特征长度 $\lambda(T, H_a), \xi(T)$ 和 GL 参量 κ	(94)
5.3.1 $\lambda(T, H_a)$	(94)
5.3.2 $\xi(T)$	(95)
5.3.3 GL 参量 κ	(96)
5.4 两类超导体	(97)
5.5 GL 理论的适用范围	(104)
第 6 章 中间态与界面能	(105)
6.1 在均匀磁场中超导椭球的磁性	(105)
6.2 超导环的磁性	(108)
6.3 Landau 的中间态分层模型	(114)
6.3.1 Landau 不分支模型	(114)
6.3.2 Landau 分支模型	(114)
6.4 中间态的实验观察	(116)
6.4.1 Bi 探针法	(116)
6.4.2 缀饰法——Bitter 图案技术	(120)
6.4.3 磁光法	(121)
6.5 中间态热力学	(124)
6.6 界面能	(127)
6.6.1 正界面能的提出	(128)
6.6.2 正负界面能的起源	(132)
6.7 横向磁场中超导线电阻的恢复	(134)
6.8 中间态的磁矩	(136)
6.8.1 在横向磁场中超导圆柱的磁化曲线	(137)
6.8.2 在横向磁场中超导薄圆盘的磁化曲线	(139)
6.8.3 在横向磁场中超导方薄板的磁化曲线	(139)

6.9	过冷	(141)
6.9.1	由于过冷而引起的滞后	(141)
6.9.2	理论分析	(141)
6.9.3	Faber 实验	(144)
第 7 章	混合态 理想的第 II 类超导体	(146)
7.1	第 II 类超导体的磁性 上、下临界磁场 H_{c1} 和 H_{c2}	(146)
7.2	第 II 类超导体的热力学性质	(148)
7.2.1	热力学临界磁场 H_c	(148)
7.2.2	$H_{c1}(T)$ 和 $H_{c2}(T)$ 处的相变是二级相变	(150)
7.3	Meissner 态与理想第 II 类超导体的载流能力	(153)
7.4	H_{c1} 孤立磁通涡旋线	(154)
7.4.1	磁通涡旋线	(154)
7.4.2	London 模型的孤立涡旋线 H_{c1}	(155)
7.4.3	GL 理论的 H_{c1}	(159)
7.5	混合态结构 磁通涡旋线	(164)
7.5.1	接近 H_{c1} 的混合态	(164)
7.5.2	近邻涡旋线的相互作用	(165)
7.5.3	接近 H_{c1} 的混合态磁化曲线	(166)
7.5.4	磁通线与表面的相互作用	(168)
7.6	H_{c2}	(168)
7.6.1	强磁场中 GL 方程的解	(168)
7.6.2	再论 GL 参量 κ	(170)
7.7	接近 H_{c2} 的磁通涡旋线结构 Abrikosov 理论	(171)
7.8	在 $H_{c1} < H_a < H_{c2}$ 中间区的磁化曲线和 $H_a(T)$ 相图	(179)
7.8.1	磁化曲线	(179)
7.8.2	$H_a(T)$ 相图	(180)
7.9	涡旋线结构的实验观测	(181)
7.9.1	中子衍射	(181)
7.9.2	核磁共振	(182)
7.9.3	缀饰法	(183)
7.10	$\kappa = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 的特殊情况	(185)

7.11	表面超导电性	(186)
7.11.1	磁场和表面平行的情况	(186)
7.11.2	其他情况	(189)
第 8 章	实用超导体	(191)
8.1	磁通俘获和不可逆磁化	(191)
8.1.1	俘获磁通的观测	(191)
8.1.2	非理想第 II 类超导体中的磁通俘获	(192)
8.2	作用在涡旋线上的力	(195)
8.2.1	Lorentz 力	(195)
8.2.2	镜像力	(195)
8.3	钉扎力和钉扎中心	(196)
8.3.1	钉扎力和钉扎中心	(196)
8.3.2	元钉扎	(198)
8.3.3	钉扎源	(201)
8.4	Bean 模型和临界态 ($T = 0 \text{ K}$)	(203)
8.5	Kim - Anderson 模型	(206)
8.5.1	超导圆筒的磁化实验	(206)
8.5.2	Kim - Anderson 模型	(207)
8.5.3	磁化曲线	(208)
8.6	一般情况的磁化曲线	(210)
8.7	有限温度下的磁通蠕动 临界态	(212)
8.7.1	实验现象	(212)
8.7.2	Anderson 磁通蠕动理论	(212)
8.7.3	高温超导热激活模型新论	(215)
第 9 章	小尺寸超导体	(226)
9.1	小样品中的磁场分布	(226)
9.1.1	London 理论的小样品的解	(226)
9.1.2	$\kappa < 1/\sqrt{2}$ 的超导薄膜 GL 方程的解	(227)
9.1.3	$\kappa \gg 1$ 的高温超导膜 GL 方程的解	(229)
9.2	超导薄膜的磁矩	(230)
9.2.1	超导薄膜磁矩的实验结果	(230)

9.8.1	实验结果	(270)
9.8.2	理论解释	(275)
第 10 章	超导体的输运性质	(278)
10.1	超导体中流过的电流分布于表面	(278)
10.2	从正常导体到超导体的输运电流	(278)
10.2.1	厚度为 $2d$ 的无限平板	(278)
10.2.2	圆柱超导体	(282)
10.3	临界电流 I_c	(282)
10.3.1	电流对超导电性的破坏 Silsbee 假设	(282)
10.3.2	临界电流密度	(287)
10.3.3	电流和外加磁场对超导电性的破坏 广义的 Silsbee 假设	(287)
10.4	超导薄膜的临界电流	(289)
10.4.1	Silsbee 假设不适用 London 理论失效	(289)
10.4.2	GL 理论的 H_{I_c}	(290)
10.4.3	实验结果	(293)
10.5	第 II 类超导体的临界电流	(294)
10.5.1	常规第 II 类超导体的临界电流	(295)
10.5.2	高温超导体的临界电流密度	(301)
10.5.3	磁通蠕动对 j_c 的影响	(301)
第 11 章	宏观量子化	(302)
11.1	类磁通量守恒	(303)
11.2	宏观量子化	(305)
11.3	实验测量	(306)
11.3.1	磁通量子化	(306)
11.3.2	临界温度的周期变化 Little - Parks 实验	(308)
第 12 章	Bardeen - Cooper - Schrieffer (BCS) 理论	(311)
12.1	晶格结构在超导相变前后不变	(311)
12.2	能隙	(312)
12.2.1	比热容	(312)
12.2.2	远红外吸收	(313)
12.3	电-声子相互作用	(314)

12.3.1	同位素效应	(314)
12.3.2	电-声子相互作用的简单模型	(315)
12.3.3	存在吸引相互作用时正常态的不稳定性	(316)
12.3.4	吸引相互作用的来源	(318)
12.3.5	屏蔽 Coulomb 作用	(320)
12.3.6	造成电子间相互吸引的电-声子相互作用	(320)
12.4	Cooper 对	(322)
12.4.1	Cooper 对	(322)
12.4.2	Cooper 对的均方半径 ρ	(324)
12.4.3	对 T_c 和同位素效应的定性解释	(325)
12.5	BCS 基态能隙方程	(325)
12.5.1	超导基态占据 $\epsilon(\mathbf{p})$ 态的几率	(328)
12.5.2	Δ 和 $E(\mathbf{p})$ 的物理意义	(329)
12.5.3	态密度	(330)
12.5.4	$\Delta(0)$	(331)
12.6	BCS T_c 公式	(332)
12.7	临界磁场和比热容	(336)
12.7.1	$H_c(T) \sim T$	(336)
12.7.2	c_{es}	(337)
12.8	BCS 非局域非线性关系	(339)
12.9	BCS 理论的局限性	(340)
12.9.1	与实验不符合的情况	(340)
12.9.2	BCS 理论模型之不足	(340)
第 13 章	正常电子隧道	(342)
13.1	正常金属隧道	(342)
13.2	超导体和正常导体之间的隧道	(345)
13.2.1	超导隧道的发现	(345)
13.2.2	正常金属—绝缘体—超导体的结	(346)
13.3	超导体之间的隧道	(348)
13.3.1	相同超导体之间的隧道	(348)
13.3.2	不同能隙的超导体之间的隧道	(349)

13.4	唯象理论	(352)
13.4.1	N—I—S 结	(352)
13.4.2	S—I—S 结	(355)
13.5	Adkins 模型	(357)
13.6	非理想的行为	(359)
13.7	双粒子隧道	(360)
13.8	光子参与的隧道	(364)
13.9	正常电子隧道效应的应用	(370)
13.9.1	测量方法	(370)
13.9.2	超导能隙的测量 超导能隙与温度的关系	(371)
13.9.3	磁场对超导能隙的影响	(374)
13.9.4	磁性杂质对超导电性的影响	(374)
13.9.5	测量正常电子的寿命	(376)
13.9.6	声子谱	(376)
13.9.7	正常电子隧道效应在器件方面的应用	(378)
第 14 章	超导电子隧道	(379)
14.1	Josephson 方程	(380)
14.2	弱连接超导体	(385)
14.3	Josephson 结的超导参数	(389)
14.3.1	临界电流密度 j_c	(389)
14.3.2	Josephson 穿透深度 λ_J	(391)
14.3.3	超导电子隧道的 $I \sim V$ 曲线	(392)
14.4	超导电子隧道与正常电子隧道	(393)
14.4.1	从正常电子隧道到超导电子隧道过渡的实验结果	(393)
14.4.2	Josephson 隧道结的临界厚度	(395)
第 15 章	d.c. Josephson 效应	(399)
15.1	小结中超导宏观量子衍射现象	(400)
15.1.1	矩形小结	(400)
15.1.2	圆形小结	(403)
15.1.3	任意取向磁场的矩形结	(405)
15.2	非均匀电流密度的 Josephson 效应	(406)

15.2.1	台阶状的电流密度分布	(406)
15.2.2	单参量电流密度分布	(410)
15.2.3	三角形分布的电流密度	(413)
15.3	小尺寸结中的自场效应	(414)
15.3.1	叠层隧道结中的自场	(414)
15.3.2	交叉膜隧道结的自场效应	(415)
15.4	涨落对 Josephson 效应的影响	(419)
15.5	大结中的自场效应	(422)
15.5.1	半无限大结的特解	(423)
15.5.2	大结的一般解	(423)
15.5.3	一维大尺寸结	(427)
15.6	结的弱超导体行为	(431)
15.6.1	势垒的自由能	(431)
15.6.2	结中的磁场能	(431)
15.6.3	结的 H_{c1}	(431)
15.7	论大结中理论与实验结果	(433)
第 16 章	a. c. Josephson 效应	(436)
16.1	a. c. Josephson 效应	(436)
16.1.1	a. c. Josephson 效应	(436)
16.1.2	a. c. Josephson 效应的实验证明	(437)
16.2	微波辐照下超导结的 $I \sim V$ 曲线——微波感应台阶效应	(438)
16.3	低 Q 结自激谐振的 $I \sim V$ 曲线——自测效应	(442)
16.3.1	隧道结中的电磁振荡模式	(443)
16.3.2	低 Q 结的自测效应	(444)
16.4	高 Q 结自激谐振的 $I \sim V$ 曲线	(455)
16.4.1	高 Q Josephson 结的谐振模	(455)
16.4.2	高 Q 腔受激谐振反馈作用于 Josephson 结的结果	(462)
第 17 章	Josephson 效应的等效电路	(472)
17.1	Josephson 效应的等效电路	(472)
17.2	恒压源模型下的 $I \sim V$ 曲线	(473)
17.2.1	在 RSJ 模型下	(473)