

超导物理基础

伍勇 韩汝珊 编著

北京大学出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

超导物理基础/伍勇,韩汝珊编著. — 北京:北京大学出版社,
1997.2
ISBN 7-301-03279-X

I.超… II.①伍…②韩… III.超导体-超导理论 IV.0511

书 名: 超导物理基础

著作责任者: 伍勇 韩汝珊

责任编辑: 周月梅

标准书号: ISBN 7-301-03279-x/O·385

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

电 话: 出版部 62752015 发行部 62559712 编辑部 62752032

排 印 者: 北京大学印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

850×1168毫米 32开本 9.625印张 248千字

1997年2月第一版 1997年2月第一次印刷

印 数: 0001-1,000册

定 价: 12.90元

序 言

超导物理是一门正在迅速发展着的学科,它所涉及理论和实验的深度及广度在凝聚态物理学中可以说是首屈一指的.本书以超导物理中共同性的基本问题和基本概念为主线,力图向读者介绍超导物理的基础理论和实验规律,并简单介绍高温超导理论及超导的应用.本书是作者在教学实践和科研报告的基础上改写而成的.第九章高温超导由韩汝珊教授执笔,其余章节由我执笔.由于编者水平有限,时间仓促,书中难免有错误及不当之处,欢迎读者提出改进意见.

在本书出版之时,我感谢赵忠贤教授、章立源教授、韩汝珊教授、张金龙教授及陈庚华研究员曾给予宝贵指导.感谢我的插队同学吴铎对封面设计、插图选用提供非常必要的美术指导和兄弟般的无私帮助.感谢北京大学出版社周月梅女士、各级领导和工作人员为本书出版倾注关怀,感谢他们出色而辛苦的工作.

伍 勇

1996年7月于首都师大

超 导 大 事 记

年代	姓 名	主 要 事 件
1911	H.K.Onnes*(昂内斯)	发现金属汞的超导 电性 $T_c=4.2\text{ K}$
1933	W.Meissner(迈斯纳)	发现完全抗磁性
1934	C.J.Gorter(戈特) H.G.Casimir(卡西米尔)	提出二流体模型
1935	H.London(H. 伦敦) F.London(F. 伦敦)	建立伦敦方程, 指出 超导是宏观量子现象
1936	L.V.Schubnikov(舒布尼柯夫)	制备出理想第二类超 导体并测得磁化曲线
1937	R.S.Pontius(庞修斯)	用不同方法实验
1939	D.Shoenberg(休恩伯格)	证实磁场穿透的存在
1950	V.L.Ginzburg(金兹堡) L.D.Landau(朗道)	建立 G-L 方程
1950	H.Fröhlich(弗罗里希)	提出电 - 声子作用 模型
1950	E.M.Maxwell(麦克斯韦) C.A.Reynolds(雷诺兹)	发现同位素效应
1950	A.B.Pippard(皮帕德)	提出“相干长度”、“负 表面能”概念, 建立 Pippard 方程
1954	B.Matthias(马梯阿斯)	发现 A-15 结构的 Nb_3Sn , $T_c=18\text{ K}$

1956	L.N.Cooper(库柏)	提出超导“电子对”概念
1957	J.Bardeen*(巴丁) L.N.Cooper*(库柏) J.R.Schrieffer*(施里弗)	建立BCS 超导微观理论
1957	A.Abrikosov(阿布里柯索夫)	提出第二类超导体理论, 预见磁通格子的存在
1958	L.P.Gorkov(戈尔科夫)	从BCS理论导出G-L方程
1960	I.Giaever*(贾埃佛)	发现超导体单电子隧道效应
1961	B.S.Deaver(迪弗)	实验证实超导体磁通量子化现象
1961	J.E.Kunzler(孔兹勒)	用Nb ₃ Sn绕制成功8T的强磁体
1962	B.D.Josephson*(约瑟夫森)	理论预言约瑟夫森效应
1968	W.L.Mcmillan(麦克米伦)	提出强耦合超导T _c 公式
1973	Gavaler(盖维勒)	制备23.2K的Nb ₃ Ge
1979	Steglich(斯特格利希)	发现第一个重费米子超导体
1980	J.Jerome(热罗姆)	首次发现有机超导体
1986.4	K.A.Müller*(缪勒) J.G.Bednorz*(柏诺兹)	在LaBaCuO中发现T _c >30K的超导电性
1987.2.6	朱经武(美国休斯顿大学)	发现YBaCuO超导体 T _c : 80 ~ 92 K
1987.2.24	赵忠贤(中国科学院物理所)	T _s 100 K 首先宣布YBaCuO组分 T(0) 78.5 K

- | | | |
|--------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1988.1 | Maeda(前田)
(日本国家金属研究所) | 发现 BiSrCaCuO
T_c : 115 K |
| 1988.2 | 盛正直(美国阿尔堪萨斯大学)
M.Hermann(赫曼) | 发现 TlBaCaCuO
T_c : 125 K |
| 1991.4 | A.Hebard(赫巴德)(美国
贝尔实验室) | 发现 K_3C_{60} 超导体
T_c : 18 K |
| 1993.5 | A.Schilling(斯奇林)(瑞士
苏黎世 ETH 实验室) | 发现 HgBaCaCuO
T_c : 133.5 K |

带 * 者为诺贝尔奖金获得者。

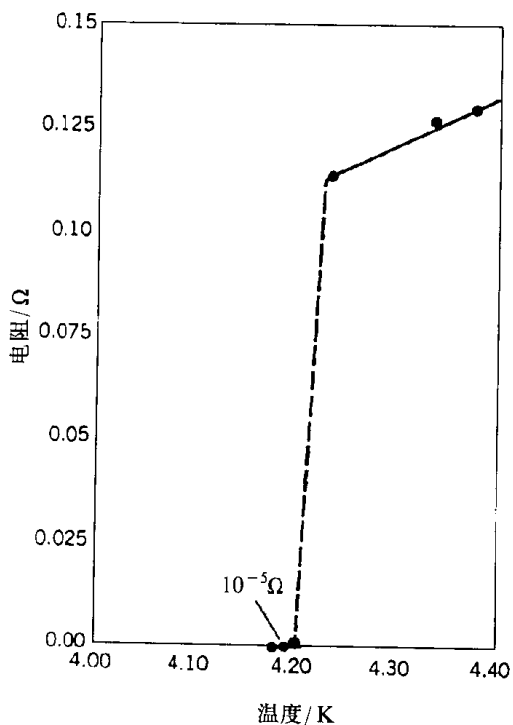


图 0-1 第一个超导元素汞的 $R-T$ 曲线, 昂内斯发表于 1911 年

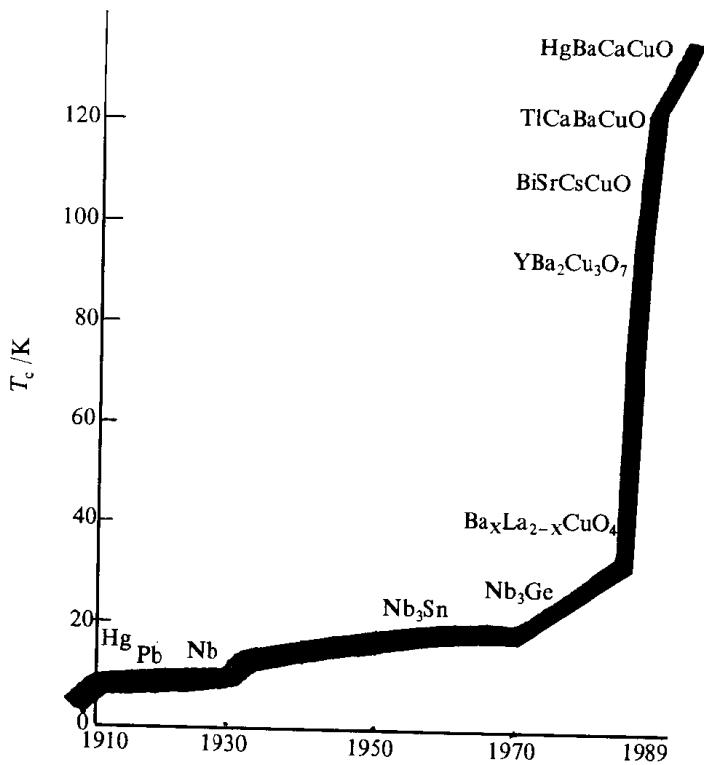


图 0-2 临界温度 T_c 最高值递增时间表

目 录

超导大事记	1
绪论	1
第一章 超导的基本特性	4
§1-1 零电阻	4
§1-2 迈斯纳效应	6
§1-3 临界磁场 H_c 和临界电流 I_c	9
§1-4 同位素效应	12
§1-5 各种超导体材料简介	14
第二章 超导热力学	25
§2-1 磁场中超导体的吉布斯自由能	25
§2-2 超导相变中的熵变和比热容跃变	27
§2-3 超导电子比热容	30
第三章 超导电动力学	32
§3-1 二流体模型	32
§3-2 伦敦方程	33
§3-3 超导体磁性质的两种描述观点	39
§3-4 超导平板的磁场和电流分布	40
§3-5 皮珀非局域理论	42
§3-6 强磁场中的几何效应: 中间态	45
第四章 金兹堡-朗道方程	50
§4-1 G-L 方程的建立	50
§4-2 相干长度 ξ	57

§4-3	穿透深度 $\lambda(T)$ 与 G-L 参数 κ	60
§4-4	磁通量子化现象	61
第五章	BCS 超导微观理论	63
§5-1	电-声子作用的基本物理图象	63
§5-2	库柏对	71
§5-3	超导基态 ($T=0$ K 的 BCS 理论)	75
§5-4	超导激发态 ($T \neq 0$ K 的 BCS 理论)	85
§5-5	BCS 理论对超导宏观现象的解释	92
§5-6	强耦合理论简介	98
第六章	理想第二类超导体	101
§6-1	概述: 磁化曲线与相图	101
§6-2	负表面能的起源	105
§6-3	孤立磁通线结构	111
§6-4	孤立磁通线的能量	122
§6-5	两根磁通线之间的相互作用	124
§6-6	第二类超导体混合态的平衡性质	130
第七章	非理想第二类超导体	138
§7-1	静磁场中的行为	138
§7-2	非均匀状态下 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$, $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ 与洛伦兹力 $\mathbf{F}_L(\mathbf{r})$	140
§7-3	钉扎力和钉扎中心	144
§7-4	临界态	147
§7-5	磁通跳跃与磁通蠕变	154
第八章	超导电子隧道效应	156
§8-1	BCS 超导电子的态密度	158
§8-2	单电子隧道效应	164
§8-3	约瑟夫森效应	171
§8-4	微波感应台阶	178
§8-5	约瑟夫森电流的磁场效应	182

§8-6 超导量子干涉仪(SQUID)	190
§8-7 高温超导电子学现况	193
第九章 高温超导简介	200
§9-1 引言	200
§9-2 高温超导体晶体结构的特点与相图	201
§9-3 正常态的反常特性	210
§9-4 超导态中的反常特性	246
§9-5 与高温超导机制相关的理论研究	250
§9-6 小结	260
第十章 超导应用	262
§10-1 引言	262
§10-2 超导在电力系统方面的应用	263
§10-3 超导在交通运输方面的应用	271
§10-4 超导在矿冶、环保、医学方面的应用	276
§10-5 超导在高能核实验、高能物理研究方面的应用	281
§10-6 超导电子学	283
主要参考书目	290

绪 论

超导是低温物理学重要的研究领域,为了认识超导在物理学中的地位,在本书起始我们先对低温物理学做一简要介绍.

低温物理学是研究在低温条件下物质的物理性质、粒子之间相互作用及运动规律的学科.它主要包括实现低温的物理途径和研究低温物性两方面内容.

一、实现低温的途径

低温液体、稀释致冷、绝热去磁是实验室获取低温的三个主要方法.

沸点比室温低很多的低温液体是低温技术中的主要冷源.常用的低温液体是液氮(77.3 K)和液氦(^4He :4.2 K, ^3He :3.2 K),一般实验室中很少使用液氢(20.4 K)、液氧(90.2 K)和液氖(27.1 K).假如再通过抽气机对实验杜瓦瓶减压,可以进一步降低瓶中液池的温度,压强越低温度也越低,这种对低温液体减压蒸发的方法获得的最低温度可达1K左右.

稀释致冷是一种能得到 mK($1\text{mK} = 10^{-3} \text{K}$)温度的致冷方法. $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液在极低温下($<0.87 \text{K}$)有相分离现象.混合液分离成的两相,按 ^3He 浓度的高低分别称为浓相和稀相.由于 ^3He 比 ^4He 原子轻(^3He 原子量:3.0160, ^4He 原子量:4.0026)所以浓相浮在稀相上面. ^3He 原子从浓相经过相界面进入稀相,类似气体蒸发会吸热致冷,使混合室温度降低. ^3He 的饱和蒸气不断用抽机从蒸馏室抽走, ^3He 气体经过冷凝重新回到浓相中去使致冷程序得以循环进行.这种稀释致冷机目前能达到的最低温度是 2 mK.

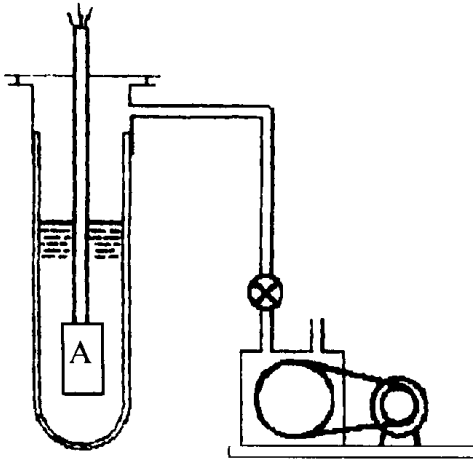


图 0-3 减压降温恒温器

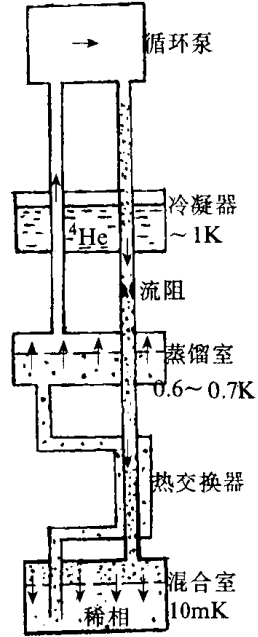


图 0-4 稀释致冷机

磁致冷方法是将顺磁盐等温磁化再绝热去磁获取低温。在 1965 年稀释致冷机发展起来之前,这种磁致冷方法一直是达到 mK 温区唯一可行的方法,至今仍在使用。最常用的顺磁盐为 CMN 即硝酸铈镁 [分子式: $2\text{Ce}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]。

除上述三种方法之外,还有核绝热去磁等方法,可达 50 nK 低温 ($1 \text{ nK} = 10^{-9} \text{ K}$),这是目前能获得的最低温度。其他致冷方法这里就不再一一介绍了。

二、低温物性的研究

各种物质的物理性质在低温下会发生很大的变化,例如热容、热导、热膨胀、电性、磁性、力学性质等。由于温度极低,粒子无规则运动极大地减弱了,通常室温下被掩盖的现象,在低温下便会显露出来。超导现象就是由于物质大量粒子处于能量的最低

态,致使量子力学效应直接在宏观世界表现出来,所以称超导为宏观量子效应。

超导物理是一门正在迅速发展着的学科,作为一门带头学科,它不仅带动着凝聚态物理学各学科的发展,而且强烈地冲击着整个物理学。本书系统地介绍超导宏观量子现象的基础知识、基本概念、理论及其应用,概括地介绍了高温超导热潮以来直至目前为止的最新进展、研究热点和重大的挑战性问题。在阐述中力求做到观点高,物理思路清晰,在保持严谨缜密的同时,选取最易理解的数学推导,深入浅出、难易适度。21世纪的超导工业将有一个较大规模的世界市场。为了迎接新技术革命的到来,超导知识的普及迫在眉睫。本书以丰富翔实的资料有说服力地展现了超导科学历史的演进和美好的应用前景。

第一章 超导的基本特性

§1-1 零电阻

1908年,荷兰物理学家昂内斯首次成功地把称为“永久气体”的氦液化,因而获得4.2K的低温源,为超导发现准备了条件.三年后即1911年,在测试纯金属电阻率的低温特性时,他又发现,汞的直流电阻在4.2K时突然消失,多次精密测量表明,汞柱两端压降为零,昂内斯确认这时汞进入了一种以零电阻为特征的新物态,并定名为“超导态”.

通常把电阻突然变为零的温度称为超导转变温度,或临界温度,用 T_c 表示.实验表明,超导体发生从正常态到超导态相变时,电阻消失是在一定温度间隔中完成的(图1-1),在此温度段中,用三个转变温度标志 $R-T$ 的变化.

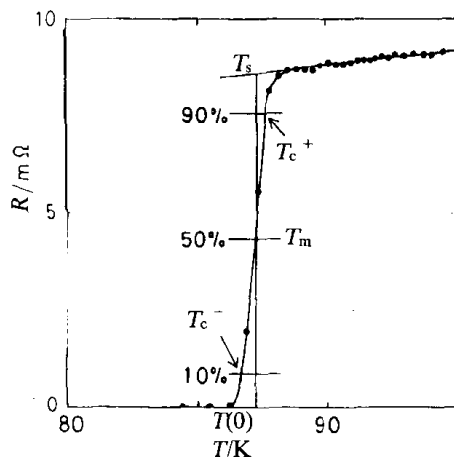


图1-1 $R-T$ 曲线

起始转变温度 T_s (on set point) 为 $R-T$ 曲线开始偏离线性的转折点的温度。

中点温度 T_m (mid point) 为电阻下降到正常态电阻 R_n 的一半时所对应的温度。

零电阻温度 $T(R=0)$ 为电阻降到零时的温度。

超导转变宽度 ΔT 定义为 R_n 下降到 90% 和 10% 之间的温度间隔 $\Delta T = T_c^+ - T_c^-$ 。超导转变宽度与超导材料的纯度及均匀性有关。

以往的测试中,一般将中点温度 T_m 定为 T_c 。

四引线电阻测量方法是实验室普遍采用的测量超导材料 T_c 的方法(图 1-2(a))。为了使温度计所测温度与样品温度一致,需将温

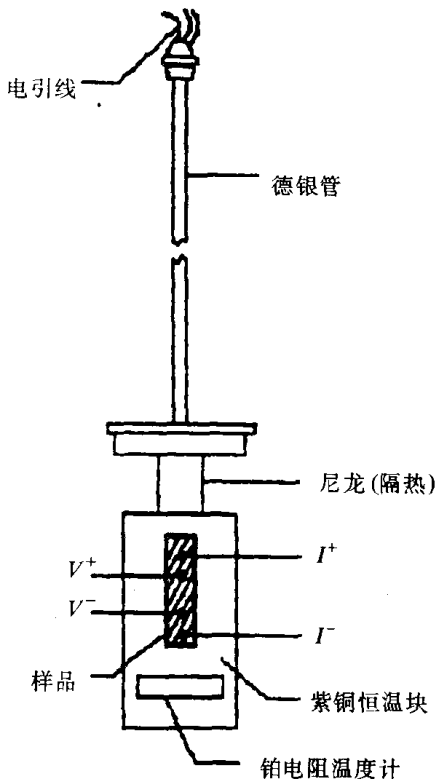


图 1-2(a) T_c 测试探头示意图

度计及样品固定在恒温紫铜块上,并保持良好的热接触.样品的两根电流引线与恒流源相连.两根电压引线与数字电压表或 $X-Y$ 记录仪相连,用来检测样品的电压.由 $R = V/I$, 直接对应出样品电阻随温度变化的 $R-T$ 曲线。

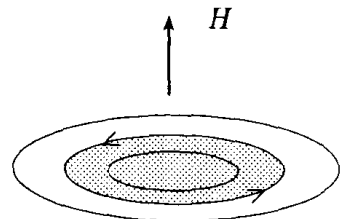


图 1-2(b) 持续电流法

四引线法测电阻率精度仅为 $10^{-13} - 10^{-15} \Omega \cdot \text{m}$, 与铜的低温电阻率 $10^{-11} \Omega \cdot \text{m}$ 相比, 人们自然会产生疑问, 是否仍存在测量不出的更小电阻呢? $10^{-13} - 10^{-15} \Omega \cdot \text{m}$ 的精度显然是不够的。

更精确的测定方法是持续电流法。将金属环置于磁场中, 降低温度使样品发生超导转变, 然后撤去磁场, 这时环内产生感生电流 (图 1-2(b)), 如果以 L 表示环的自感, R 表示其电阻, 则有

$$L \frac{dI}{dt} + IR = 0$$

$$I(t) = I(0)e^{-Rt/L}$$

$$R = \ln \left[\frac{I(0)}{I(t)} \right] \frac{L}{t}$$

如果电阻存在, 感生电流会指数锐减, 电阻越小, 电流衰减越慢。1957年有人曾使超导电流维持两年半之久, 而无明显变化。由上式可估计出电阻率 ρ 的上限为 $10^{-23} \Omega \cdot \text{m}$ 。目前能检测出的最小值为 $10^{-27} \Omega \cdot \text{m}$, 据此认为超导态金属电阻为零显然是合理的。

§ 1-2 迈斯纳效应

迈斯纳效应又叫完全抗磁性。1933年迈斯纳发现, 超导体一旦进入超导态, 体内的磁通量将全部被排出体外, 磁感应强度恒等于零。这种现象称为迈斯纳效应。

自1911年超导电现象发现到1933年, 二十多年间, 人们一直把超导体单纯看成理想导体, 即除电阻为零之外, 其他一切性质都和普通金属相同。迈斯纳效应展示了超导体与理想导体完全不同的磁性质, 使人们对超导体有了全新的认识。

所谓理想导体,即它的电导率 $\sigma = \infty$,由欧姆定律 $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ 得知,理想导体内部电场强度 \mathbf{E} 必然处处为零,否则电流密度 \mathbf{j} 将趋于无穷大,而与 \mathbf{j} 恒定有限的实验事实不符.此外超导体作为电磁系统,应遵守麦克斯韦方程:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

因为 $\mathbf{E} = 0$, 所以 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$.

这说明超导体内, \mathbf{B} 应由初始条件(或实验过程)决定,原来体内有多大磁通就维持多大磁通不变.因此, $\mathbf{B} \equiv \mathbf{B}_0$, 这是由理想导电性推出的结论. \mathbf{B}_0 表示某一确定的初始值.

但实验结果不同,参看图 1-3:

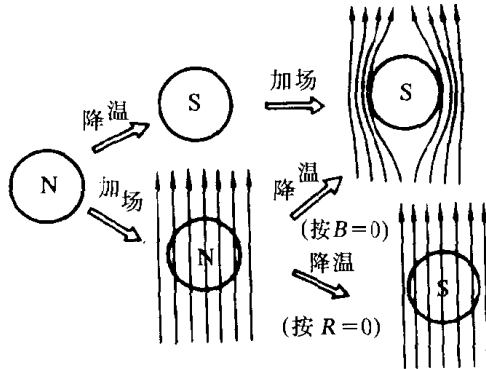


图 1-3 迈斯纳效应与理想导体情况比较

迈斯纳实验表明,不论是先降温后加磁场,还是先加磁场后降温,只要进入超导态(图中用符号 S 表示, N 表示正常态),超导体就把全部磁通排出体外,与初始条件无关,也与过程无关.即超导体内部 \mathbf{B} 不仅恒定不变,而且恒定为零. $\mathbf{B} \equiv 0$, 这是迈斯纳效应的实验结论.

理想导电性只能说明超导体内磁通冻结不变,迈斯纳效应则表明不变的磁通只能等于零.