

凝聚态物理学丛书

金属物理学

第四卷 超导电性和磁性

冯端等著



科学出版社

DW26/02

内 容 简 介

《金属物理学》分四卷出版,本书为第四卷,分两编:第十三编论述超导电性,主要介绍超导电性基础知识,晶体缺陷与超导电性,高温超导电性;第十四编论述磁性,主要介绍金属磁性分类及原子磁矩,无磁序金属磁性,金属中的磁有序,强磁金属的内禀磁性,金属中的磁有序,强磁物质中的磁畴与磁化,固体缺陷与技术磁化性能,特殊状态下的金属磁性等。

本书可作为高等院校本科生和研究生《金属物理学》一课的教学参考书,也可供从事固体物理学、冶金学或材料科学有关的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属物理学 第四卷 超导电性和磁性/冯 端等著.-北京:科学出版社,1998

(凝聚态物理学丛书)

ISBN 7-03-005970-0

I. 金… I. 冯… II. ①金属学:物理学②金属-磁性③金属-超导电性 N.TG111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 05085 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 6 月第 1 版 开本: 850×1168 1/32

1998 年 6 月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—2 500 字数: 530 000

定价: 45.00 元

《凝聚态物理学丛书》出版说明

以固体物理学为主干的凝聚态物理学，通过半个世纪以来的迅速发展，已经成为当今物理学中内容最丰富、应用最广泛、集中人力最多的分支学科。从历史的发展来看，凝聚态物理学无非是固体物理学的向外延拓。由于近年来固体物理学的基本概念和实验技术在许多非固体材料中的应用也卓有成效，所以人们乐于采用范围更加广泛的“凝聚态物理学”这一名称。

凝聚态物理学是研究凝聚态物质的微观结构、运动状态、物理性质及其相互关系的科学。诸如晶体学、金属物理学、半导体物理学、磁学、电介质物理学、低温物理学、高压物理学、发光学以及近期发展起来的表面物理学、非晶态物理学、液晶物理学、高分子物理学及低维固体物理学等都是属于它的分支学科，而且新的分支尚在不断进发，还有，凝聚态物理学的概念、方法和技术还在向相邻的学科渗透，有力地促进了材料科学、化学物理学、生物物理学和地球物理学等有关学科的发展。

研究凝聚态物质本身的性质和它在各种外界条件（如力、热、光、气、电、磁、各种微观粒子束的辐照乃至处于各种极端条件）下发生的变化，常常可以发现多种多样的物理现象和效应，揭示出新的规律，形成新的概念，彼此层出不穷，内容丰富多彩，这些既体现了多粒子体系的复杂性，又反映了物质结构概念上的统一性。所有这一切不仅对人们的智力提出了强有力的挑战，更重要的是，这些规律往往和生产实践有着密切的联系，在应用、开发上富有潜力，有可能开辟出新的技术领域，为新材料、元件、器件的研制和发展，提供牢固的物理基础。凝聚态物理学的发展，导致了一系列重要的技术突破和变革，对社会和科学技术的发展将发生深远的影响。

为了适应世界正在兴起的新技术革命的需要，促进凝聚态物理学的发展，并为这一领域的科技人员提供必要的参考书，我们特组织了这套《凝聚态物理学丛书》，希望它的出版将有助于推动我国凝聚态物理学的发展，为我国的四化建设做出贡献。

主 编：葛庭燧

副主编：冯 端

目 录

《凝聚态物理学丛书》出版说明

葛庭燧 冯 端

第 四 卷

第十三编 超导电性

丁世英

引 言	1
第三十一章 超导电性基础	4
I 基本性质	4
§ 31.1 理想导电性	4
§ 31.2 完全逆磁性	10
§ 31.3 热力学性质	16
§ 31.4 力学效应	20
§ 31.5 超导电性的 BCS 微观图象	23
II 金兹堡-朗道唯象理论	26
§ 31.6 引言	26
§ 31.7 超导体的自由能和 GL 方程	27
§ 31.8 相干长度和穿透深度	29

• iii •

§ 31.9	界面能	32
§ 31.10	磁通量子化	34
III	超导体的磁性质	36
§ 31.11	超导电性的成核场	37
§ 31.12	阿布里考索夫磁通线阵态	41
§ 31.13	$H \leq H_{c2}$ 的磁化曲线	45
§ 31.14	磁通线的结构和能量	47
§ 31.15	下临界磁场 H_{c1}	53
§ 31.16	磁通线间的相互作用	54
§ 31.17	$H \geq H_{c1}$ 附近的磁化曲线	56
§ 31.18	混合态	58
§ 31.19	第一类超导体的中间态	63
IV	磁通线阵	67
§ 31.20	混合态中的磁通线阵	67
§ 31.21	磁通线阵的强度	71
§ 31.22	磁通线阵的缺陷	74
§ 31.23	磁通线阵的压强和洛伦兹力	77
V	临界电流	80
§ 31.24	薄膜的临界电流	81
§ 31.25	迈斯纳态的临界电流	82
§ 31.26	混合态的临界电流	86
第三十二章 晶体缺陷与超导电性		93
I	实验观测	93
§ 32.1	磁化曲线	94
§ 32.2	临界电流和临界洛伦兹力	100
§ 32.3	钉扎力的若干实验规律	112
II	宏观描述	115
§ 32.4	临界态和比恩模型	115
§ 32.5	磁化强度	121
§ 32.6	磁通蠕变	124
§ 32.7	磁通流动	127
§ 32.8	钉扎耗散	130

§ 32.9	磁通跳跃和不稳定性	134
III	元钉扎力	139
§ 32.10	微扰法近似	139
§ 32.11	孤立磁通线近似	141
§ 32.12	芯钉扎力	142
§ 32.13	磁钉扎力	143
§ 32.14	弹性钉扎力	145
§ 32.15	电子散射钉扎力	147
§ 32.16	各向异性钉扎力	150
IV	元钉扎力的求和	151
§ 32.17	极限情况的求和	151
§ 32.18	磁通线阵的弹性不稳定	152
§ 32.19	几种求和理论	155
第三十三章	高温超导电性	158
I	序论	158
§ 33.1	高温超导体的探索	158
§ 33.2	氧化物高温超导体的种类	165
§ 33.3	氧化物高温超导体的特征	167
II	晶体结构	169
§ 33.4	214 结构	169
§ 33.5	123 结构	172
§ 33.6	复杂结构	181
§ 33.7	晶体的微结构与高温超导电性	186
III	正常态性质	196
§ 33.8	铜氧化物的相图	196
§ 33.9	正常态输运性质	197
§ 33.10	正常态磁性质	201
§ 33.11	电子结构和费米面	202
IV	超导态性质	204
§ 33.12	超导态的概况	204
§ 33.13	能隙	205
§ 33.14	配对机制	208

V	静态磁性质	209
§ 33.15	三维各向异性磁性质	209
§ 33.16	层状结构材料的磁性质	213
§ 33.17	磁通点阵	215
§ 33.18	磁化曲线	220
§ 33.19	下临界场	223
§ 33.20	上临界场	227
VI	磁通动力学	231
§ 33.21	不可逆线	231
§ 33.22	巨磁通蠕动	235
§ 33.23	交流磁化率损耗峰的移动	238
§ 33.24	直流磁化曲线的特征: 蝴蝶形	240
§ 33.25	力学法研究结果: 磁通融化与脱钉	241
§ 33.26	磁阻曲线的反常展宽	245
§ 33.27	I - V 特性曲线	248
§ 33.28	热磁效应	251
§ 33.29	经典磁通蠕动模型	253
§ 33.30	磁通融化与磁通玻璃	259
§ 33.31	混合态相图	263
VII	临界电流	264
§ 33.32	晶体临界电流与磁通钉扎	264
§ 33.33	微桥的临界电流	273
§ 33.34	多晶的临界电流	275
第十三编	参考文献	289

第十四编 金属磁性

翟宏如

引言	301
第三十四章 金属磁性分类及原子磁矩	304

§ 34.1 物质磁性概论	304
§ 34.2 原子磁矩	307
第三十五章 无磁序金属磁性	314
§ 35.1 局域电子抗磁性及顺磁性	314
§ 35.2 传导电子抗磁性及顺磁性	331
§ 35.3 无磁序金属(顺磁体及抗磁体)	341
第三十六章 金属中的磁有序	351
§ 36.1 铁磁性	351
§ 36.2 反铁磁性和亚铁磁性	385
第三十七章 强磁金属的内禀磁性	409
§ 37.1 交换作用	409
§ 37.2 饱和磁化强度与居里温度	430
§ 37.3 饱和磁化强度对温度的依赖关系	441
第三十八章 强磁物质中的磁畴与磁化	453
§ 38.1 强磁物质的技术磁化性能	453
§ 38.2 影响磁畴结构的能量	458
§ 38.3 畴壁与磁畴	492
§ 38.4 磁化过程和磁化曲线	518
第三十九章 固体缺陷与技术磁化性能	545
§ 39.1 早期的模型、内应力和掺杂理论	546
§ 39.2 位错应力场与磁化的相互作用	553
§ 39.3 点缺陷和面缺陷与磁化的短程相互作用	560
§ 39.4 窄畴壁与内禀矫顽力	566
§ 39.5 缺陷与反磁化成核场	570
第四十章 特殊状态下的金属磁性	577
§ 40.1 超细微粒磁性	577
§ 40.2 磁性薄膜与多层膜磁性	589
第十四编 参考文献	618
人名索引	627
内容索引	629

第 一 卷

主要参考书目 (附有按语)

绪论

第一编 金属的结构及其理论

冯 端

第一章 金属的结构

第二章 金属结构的理论

第二编 合金的结构及其理论

冯 端

第三章 合金的热力学

第四章 合金的结构

第五章 微观的合金理论

第三编 晶体的缺陷

冯 端

第六章 点缺陷

第七章 位错

第四编 表面与界面

冯 端

第八章 表面

第九章 界面

第五编 原子的迁移

丘 第 荣

第十章 金属中的扩散

第十一章 几个和扩散有关的实际问题

第 二 卷

序言

第六编 相变导论

冯 端

第十二章 相变的基本类型

第十三章 朗道理论及其应用

第七编 相变动力学

刘 治 国

第十四章 非匀相转变动力学

第十五章 匀相转变动力学

第八编 界面稳定性与形态的演变

冯 端

第十六章 界面形态的稳定性

第十七章 界面形态的演变

第九编 相变的微观理论

杨正举 金国钧

第十八章 统计模型与临界现象

第十九章 软模理论与结构相变

第二十章 电子-晶格耦合系统

第 三 卷

序言

第十编 内耗与超声衰减

王业宁 沈惠敏

- 第二十一章 内耗的唯象理论
- 第二十二章 点缺陷引起的内耗
- 第二十三章 位错与晶界内耗
- 第二十四章 相变与共格晶面的内耗与超声衰减
- 第二十五章 与热、磁、电性质有关的内耗

第十一编 晶体的范性

冯 端

- 第二十六章 范性形变的几何学与晶体学
- 第二十七章 范性形变的物理本质
- 第二十八章 合金强化

第十二编 断裂和高温力学性质

吴希俊 孔庆平

- 第二十九章 断裂
- 第三十章 高温力学性质

第十三编 超导电性

丁世英

引 言

金属超导电性的发现归功于翁纳斯(H. K. Onnes),因为他在1911年第一个揭示了物质在超导态的基本特征之一:理想导电性^[1]. 在随后的研究中,迈斯纳(W. Meissner)和欧欣菲尔德(R. Ochsenfeld)于1933年又发现了超导态物质的另一个基本特征:完全逆磁性^[2]. 金兹堡(V. L. Ginzburg)和朗道(L. D. Landau)在1950年发表了非常有效的描述超导电性的唯象理论,即GL理论^[3]. 巴丁(J. Bardeen)、库伯(L. N. Cooper)和施里弗(J. R. Schrieffer)在1957年提出的微观理论,即BCS理论,使得对超导电性物理机制的理解相当清楚^[4].

但是在超导电性被发现后的半个世纪内,人们的研究主要还是限于现在称做“Ⅰ类超导体”的性质. 实际存在的另一类超导体就是“Ⅱ类超导体”. Ⅱ类超导体又分为“理想Ⅱ类超导体”和“非理想Ⅱ类超导体”(又叫“硬超导体”). 前者具有完美的晶体结构,而后者则存在着各种晶体缺陷. 第一个关于理想Ⅱ类超导体的实验结果是苏伯尼柯夫(L. V. Shubnikov)等在1937年发表的,不过在长时间内没有被重视^[5]. 1957年,阿布里考索夫(A. A. Abrikosov)指出,GL参数 $K > (1/\sqrt{2})$ 的超导体是Ⅱ类超导体,Ⅱ类超导体中磁通量子线排成规则阵列,其余的 $[K < (1/\sqrt{2})]$ 是Ⅰ类超导体^[6]. 1960年代的中子衍射实验,特别是缀饰技术清楚地证实了

阿布里考索夫磁通线阵态确实存在. 1961 年, 孔兹勒(J. E. Kunzler)等发现 Nb_3Sn 在 8.8T 的磁场中还能有 $4.5 \times 10^9 \text{A/m}^2$ 的载流能力^[7]. 后来逐步认识到, Nb_3Sn 等的这些特性与它们属于 II 类超导体密切相关. 很高的临界磁场联系它们的大 K 值, 而大的载流能力则是因为含有很多的晶体缺陷. 由于技术上应用的超导材料要求有在强磁场中无电阻地传输大电流的能力, 因而孔兹勒等的发现展示了超导电性技术应用的广阔前景. 紧接着关于硬超导体的实验和理论研究就蓬勃地开展起来了.

1962 年, 伦敦(H. London)、比恩(C. P. Bean)等提出了“临界态”的概念来描述硬超导体的特性, 并把硬超导体的各种不可逆特性简化为单一的结构敏感的性质^[8]. 造成不可逆性的物理原因是晶体缺陷对超导体中的磁通线阵的“钉扎效应”. 定量描述钉扎强度的物理量是单位体积的钉扎力, 即钉扎力密度. 首先从微观上解释钉扎效应的是戈特尔特(C. J. Gorter)和安德森(P. W. Anderson)等^[9]. 他们指出, 超导体自由能的空间不均匀性导致了钉扎力的产生. 从 1962 年起就计算了磁通线与一些特殊类型的单个钉扎中心的互作用力, 即元钉扎力. 不过, 简单地把单位体积中所有的元钉扎力求和有时给出比实验发现的体钉扎力密度大得多的数值. 1966 年, 拉伯希(Labusch, R.)提出有一定弹性强度的磁通线阵就不能使每个钉扎中心都最有效地钉扎. 差不多同时, 山藤馨(K. Yamafuji)等也独立地得出结论, 硬超导体的交流损耗也要求磁通线阵的弹性不稳定性^[10]. 到 1969 年, 拉伯希发表了统计求和理论^[11]. 钉扎理论研究的这两个主要问题到现在仍很活跃, 虽然求和问题尚很不成熟.

与钉扎机理研究活跃的同时, 对与超导材料的实际应用有关的各项研究在冶金学家、物理学家及工程师们的共同努力下, 也积极开展起来了. 由于工艺的进展及热磁不稳定性等问题的克服, 现在技术应用的超导材料已是“本征稳定”的了. 也出现了像“超导电金属学”等这样的分支学科. 应用研究规模也逐渐从实验室向工业化转变. 能产生直到十几特斯拉磁场的各种磁体已经是商品化.

Ⅱ类超导体材料目前仍是合金和金属化合物为主,主要用于制造各种磁体.由于零电阻性,超导磁体不输入功率.产生稳恒磁场(不输出功率)的超导磁体是“零功率热机”.它还具有轻便、经济等突出优点.除了高能物理应用的巨型磁体外,成千上万的是中小型磁体.电力工业、交通、矿业、环境保护等也是应用发展的积极领域.最近,在医学上的应用(如磁共振成像仪)发展有后来居上之势.从长远来看,超导体材料也是诱人的.在理论上超导材料是最彻底的节能材料,而受控热核反应则是永不枯竭的能源.但受控热核反应的“磁炉”又需用大型超导磁体.因此,实现受控热核反应和寻找高性能的超导体材料都属当今世界最富吸引力的物理课题之列.

与超导电性有关的问题范围较广.本编前面两章主要涉及与金属与合金的缺陷直接有关的性质.作为基础,前一章概要介绍金属与合金的超导电性质.后一章则重点处理晶体缺陷与磁通线阵相互作用导致的超导体“硬化”的物理问题.篇末列出这方面的若干专著及评述文章,作为有志深入钻研本领域问题的读者参考.这些文献的一部分^[12-18]是深浅不同地论述超导电物理的,而另外一些是有关超导电性和不可逆性质的优秀评述^[19-21].

本编最后一章介绍高温超导电性.因为含铜氧化物高温超导体表现了金属性,高温超导体的发现和研究既是常规(金属与合金)的超导电性探索的继续,又展示出许多新的特征,大大丰富了超导物理学和超导材料学的内容.高温超导电性的技术应用前景以及其物理内容具有极大吸引力.例如,技术应用高温超导材料的开发及高温超导机制的研究仍具有很强的挑战性.在目前,高温超导仍是研究的热点,并在迅速发展,内容不断在丰富.本章着重介绍其基本性质,它们都和晶体结构和缺陷密切相关.

第三十一章 超导电性基础

I 基本性质

本章讨论超导体在超导态的电学性质(理想导电性)、磁学性质(完全逆磁性)、热力学性质(热力学量变化)和力学性质(模量等变化)等. 此外, 还讨论了平衡热力学理论及超导电性的微观图象. 这些都是针对块状超导体而论的, 而小尺寸的超导体性质基本不包括在此讨论的范围内.

§ 31.1 理想导电性

1908年, 翁纳斯在荷兰莱登大学将最后一种“永久气体”氦气液化了, 使得能在氦沸点的温区(4.2K附近)进行实验物理研究工作. 他当时最感兴趣的问题之一是在温度逐渐降低而趋近绝对零度时金属的电阻率如何变化. 当然这些问题对现在攻读固体物理专业的大学生来说已属常识.

翁纳斯发现^[1], 铂, 一种到现在还未发现超导电性的金属, 其电阻先是随温度降低单调地下降, 到温度足够低时又几乎不变, 参见图 31.1. 这个与温度无关的部分就是剩余电阻, 它主要是由杂质贡献的. 对于汞, 一种当时能得到最高纯度的金属, 他发现, 参见图 31.2, 从某一“临界温度” T_c 开始, 其电阻突然消失(精确地说应是小到测不出来). 他把汞的这种低温电学性质从 $T \leq T_c$ 开始反常的状态称作“超导态”. 这里, 汞样品的 T_c 约为 4.2K. 后来, 人们用最精确的测量电阻的方法证明, 处于超导态的金属, 其电阻率即使不是零, 也小于 $10^{-25} \Omega \cdot \text{m}$. 作为比较, 纯铜的电阻率在室温时为 $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 在液氮温度是 $10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$. 现代实验室中测得的最小正常态电阻率为 $10^{-15} \Omega \cdot \text{m}$, 比超导态的电阻率大 100 亿倍以上. 习惯上