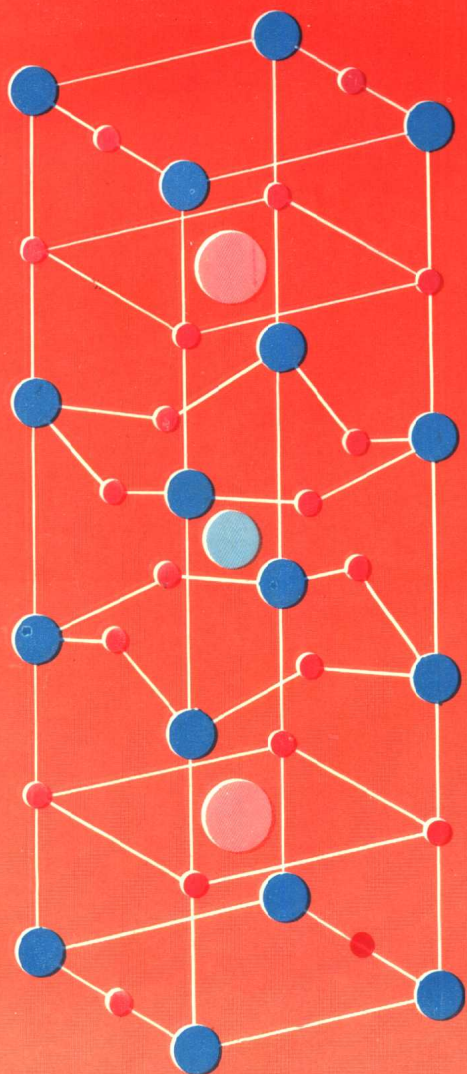


张其瑞 主编

浙江大学出版社

高温 超导 电性



高温超导电性

张其瑞 主编

张其瑞 解思深 姚希贤 张裕恒
邢定钰 郑庆祺 谭明秋 丁世英 合著
李宏成 焦正宽

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

高温超导电性

主 编 张其瑞

责任编辑 陈晓嘉

浙江大学出版社出版

浙江大学出版社计算机中心电脑排版

浙江省煤田地质勘探公司制图印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本 850×1168 1/32 印张 21.75 字数 544.2 千字

1992 年 12 月第 1 版 1992 年 12 月第 1 次印刷

印数:0001—1000

ISBN 7-308-01040-6/O · 124 定价 平装: 6.85 元
精装: 11.00 元

序

1986年4月Bednorz与Müller发现了铜-钡-铜氧超导体,其临界温度超出了30K,构成了超导体研究的重大突破,从而揭开了高温超导体研究的新一页;1987年2月朱经武、吴茂昆等和赵忠贤等发现了钇-钡-铜氧超导体,其临界温度超过了90K,进入液氮温区,进一步掀起了高温超导体研究的热潮;随后铋系和铊系氧化物超导体相继问世。超导体临界温度的迅速提高令人振奋。有关高温超导体的样品制备、结构和物性乃至应用的研究均已全面展开。参与研究人数的众多,声势之浩大、发表论文数量之多,令人惊讶不止,是科学史上空前未有的。由于涉及的材料是三元或多元氧化物,其化学成分与晶体结构都是相当复杂的,而其材料制备与传统的陶瓷工艺相似,很难加以精确的控制,因而颇不容易获得物性研究所需要的成分确定而且均匀的单相材料或单晶。由于物性测量的结果和材料的实际情况密切相关,往往不容易完全重复,有时还会出现一些令人困惑的假像。这种物性的强烈结构敏感性,一方面是外赋的,由于制备过程的细微差异和样品表征不够明确所造成的;另一方面却是内禀的,氧化物高温超导体具有窄能带材料的典型特征,其电子性质往往取决于多种因素之间的微妙平衡。虽则全球众多的科学家已尽了最大的努力,但希望迅速搞清楚高温超导体机制问题的梦想并未能够实现,问题之难,可以想见。当然六年光阴的过去并没有白费,带来了稳步的发展。有关样品制备和表征技术都有长足的进展;物性研究也开始有了一些眉目,这对于机制的阐明提供必要的约束条件;另外,对于高温超导体在弱电和强电技术中的应用的物理可行性均已得到了证明,显示出有光明的应用前景。因而可以说,对于这一领域进行全面总结的时机

业已成熟,张其瑞教授主编的“高温超导电性”也就应运而生。他邀请 10 位国内从事这方面研究的专家撰写了有关章节,对于这一迅速发展新领域进行了评述性的综述。这将对于从事这一领域研究工作的科学家提供有价值的参考书;也对于新进入这一领域的学子得以较快地了解这一领域的现况,进入其研究课题,以免在浩如烟海的文献丛中盲目摸索之劳。我深信这本专著将会得到我国物理学界的欢迎。

冯 端

1992 年 6 月

编者的话

从高临界温度氧化物超导体被发现以来,至今已经历了六个春秋。由于各国政府,以及工作在物理、化学和材料科学等诸多学科领域中的大批科学家都以前所未有的热情投入了大量的人力和巨额的经费,掀起了一场旨在尽快通过材料、物理和应用研究中取得突破而获得巨大经济效益和社会效益的高温超导体研究竞赛,至今无论在基础理论,或是在技术应用方面,都已取得了累累成果,而且这种状况正在继续向前发展。

为了使读者对高温超导体研究的发展现状有一个较系统的全面了解,我们围绕着其中的一些重要问题,如这类超导体的组成、结构、超导态和正常态的物理特性,它们与常规的低温超导体的比较,以及一些与技术应用相关的关键问题等,通过总结和分析,写成了这本书。关于高温超导电性机理的问题,尽管就理论框架等已有不少共识之处,但目前还没有一个真正为人们所公认正确的微观理论,我们仅列出一些与之相关的重要实验事实和介绍具有代表性的几个理论模型。我们希望本书将对从事实验和理论物理,材料以及技术应用研究的学者有所裨益。

本书各章构成了一个有机结合的整体,而每一章在叙述时又是相对独立的,因此各章所包含的内容难免会略有交叠。书中尽量采用法定单位制,但对某些物理量也照顾到人们的习惯用法。

在本书写作过程中,得到了国家超导攻关专家委员会和浙江大学领导的热情关怀和支持;中国物理学会理事长冯端教授给予了亲切指导并为本书作序;甘子钊教授审阅了部分章节并提出了宝贵的意见;朱道本教授提供了他本人写的有关有机超导体的总结材料;阎守胜教授参与了本书最初的筹划并准备执笔写稿,只因

后有出访任务而未能如愿;浙江大学物理系低温物理研究室的全体同志都给予了各方面的热情支持和具体帮助,在此一并致以衷心的感谢。

我还要高兴地指出,在本书写作过程中,解思深、姚希贤、张裕恒、邢定钰、郑庆祺、谭明秋、丁世英、李宏成和焦正宽等同志给予了极其愉快和默契的合作,在科研和教学工作都十分繁忙的情况下按时完成所承担的任务。因此,本书是大家共同辛勤耕耘的结晶。

高温超导电性是一个在继续迅速发展着的研究领域。我们既不可能把以前已经取得的进展在书中全面地反映出来,更无法把新近的成果及时地吸收进去。加之,由于作者的个人兴趣、工作范围,以及时间的限制,在题材和观点的取舍方面不一定完全得当,甚至错误也在所难免,请大家批评指正。

张其瑞

1992年6月5日于杭州

目 录

第1章 概论

张其瑞

- 1.1 高温超导电性研究的历史回顾 (3)
 - 1.1.1 超导临界温度理论研究 (3)
 - 1.1.2 传统的高临界温度超导体探索 (10)
- 1.2 超导电技术应用和“温度壁垒” (14)
 - 1.2.1 超导电技术应用 (14)
 - 1.2.2 “温度壁垒”问题 (19)
- 1.3 非常规超导体研究的蓬勃发展 (20)
 - 1.3.1 重费米子超导体 (21)
 - 1.3.2 低载流子密度超导体 (23)
 - 1.3.3 超晶格超导体 (26)
 - 1.3.4 有机超导体 (30)
 - 1.3.5 非晶态超导体 (38)
 - 1.3.6 磁性超导体 (42)
- 1.4 高临界温度超导体研究的重大突破 (46)

第2章 高温超导体的晶体结构

解思深

- 2.1 高温超导体的结构特点和分类 (57)
- 2.2 M_2CuO_4 型氧化物超导体的晶体结构 (62)
 - 2.2.1 La_2CuO_4 和 $La_{2-x}M_xCuO_4$ 的晶体结构 (62)
 - 2.2.2 Nd_2CuO_4 和 $Nd_{2-x}M_xCuO_4$ 的晶体结构 (68)

2.3	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和相关化合物的晶体结构	(71)
2.3.1	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导相的晶体结构	(72)
2.3.2	四方 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的晶体结构	(74)
2.3.3	替代元素对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导相晶体结构的影响	(76)
2.3.4	$\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ (124 相)的晶体结构	(78)
2.3.5	$\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15}$ (247 相)超导相的晶体结构	(81)
2.3.6	其它超导化合物的晶体结构.....	(84)
2.4	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+6}$ 系列超导氧化物的晶体结构 ...	(89)
2.4.1	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ (Bi-2201 相)的晶体结构	(89)
2.4.2	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212 相)的晶体结构	(91)
2.4.3	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223 相)的晶体结构	(94)
2.5	$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ 系列氧化物超导体的晶体结构	(96)
2.5.1	$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$ (Tl-2201 相)的晶体结构	(96)
2.5.2	$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Tl-2212 相)的晶体结构	(97)
2.5.3	$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Tl-2223 相)的晶体结构	(98)
2.6	$\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3}$ 系列氧化物超导体.....	(100)
2.7	超导相晶体结构与超导电性的关系	(102)
第3章	超导态性质	姚希贤、张裕恒
3.1	引言	(109)
3.2	临界温度	(111)
3.3	临界磁场	(119)
3.4	比热跃变	(126)
3.5	唯象理论	(130)
3.6	穿透深度	(136)
3.7	相干长度	(140)
3.8	载流子配对和磁通量子化	(143)

3.9	能隙	(148)
3.10	高 T_c 氧化物超导体的元素替代效应	(157)
3.11	电荷转移模型	(170)
3.12	结束语	(174)
第4章	正常态性质	邢定钰
4.1	引言	(181)
4.2	费米液体图像	(184)
4.3	直流电阻率	(190)
4.3.1	ρ_{ab} 的线性温度行为	(191)
4.3.2	ρ_{ab} 随载流子浓度的变化	(195)
4.3.3	电阻率的各向异性	(197)
4.4	Hall 效应	(200)
4.4.1	Hall 系数随掺杂的变化	(201)
4.4.2	Hall 系数的温度特性	(202)
4.5	其它输运性质	(206)
4.5.1	温差电势率	(206)
4.5.2	热导率	(209)
4.5.3	隧道电导	(212)
4.6	光学性质	(214)
4.6.1	角分辨光电子发射谱	(214)
4.6.2	光电导谱	(218)
4.6.3	喇曼光谱	(224)
4.7	磁学性质	(229)
4.7.1	绝缘相的磁有序和自旋涨落	(229)
4.7.2	自旋磁化率和 Knight 位移	(231)
4.7.3	自旋-点阵弛豫	(235)
4.8	若干理论进展	(241)
第5章	电子结构	郑庆祺

5.1	引言	(253)
5.2	局域密度泛函理论与能带理论	(255)
5.2.1	局域密度泛函理论(LDF)	(255)
5.2.2	能带理论简介	(259)
5.3	高 T_c 超导氧化物的能带结构.....	(262)
5.3.1	La_2CuO_4 的能带	(262)
5.3.2	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的能带	(266)
5.3.3	Bi 系化合物的能带	(272)
5.3.4	Tl 系化合物的能带	(277)
5.4	原子团(Cluster)模型和 Hubbard 模型.....	(279)
5.4.1	原子团模型	(279)
5.4.2	Hubbard 模型参数的计算	(282)
5.5	理论与实验的比较	(284)
5.6	LDA 理论的强关联修正	(297)
第 6 章	高温超导电性机理研究	谭明秋、张其瑞
6.1	引言	(305)
6.2	高温超导电性机理的实验研究	(306)
6.2.1	超导态	(306)
6.2.2	正常态	(312)
6.3	几个理论模型	(339)
6.3.1	共振价键(RVB)态和 Luttinger 液体理论 ...	(339)
6.3.2	自旋口袋(Spin Bag)模型	(346)
6.3.3	Marginal 费米液体理论	(354)
第 7 章	第二类超导体行为	丁世英
7.1	引言	(371)
7.2	磁通静力学	(373)
7.2.1	各向异性连续介质的磁性质	(373)
7.2.2	层状结构材料的磁性质	(377)

7.2.3	磁通点阵	(382)
7.2.4	磁化曲线和临界磁场	(386)
7.3	磁通动力学	(396)
7.3.1	磁通动力学性质的实验研究	(396)
7.3.2	磁通蠕动模型	(418)
7.3.3	磁通融化与磁通玻璃态	(424)
7.3.4	混合态相图	(428)
7.4	临界电流	(430)
7.4.1	晶体临界电流与磁通钉扎	(430)
7.4.2	晶间临界电流与弱连接	(439)

第8章 高温超导薄膜

李宏成

8.1	引言	(451)
8.2	高温超导薄膜制备工艺	(453)
8.2.1	后热处理法与原位法	(454)
8.2.2	电子束蒸发法	(455)
8.2.3	分子束外延(MBE)法	(458)
8.2.4	离子束溅射法	(460)
8.2.5	磁控溅射法	(461)
8.2.6	脉冲激光淀积法	(466)
8.2.7	化学气相沉积法	(470)
8.2.8	增强氧活性的方法	(472)
8.2.9	综合比较	(474)
8.3	基片的选择与隔离层	(476)
8.3.1	对基片的要求与常用基片	(477)
8.3.2	隔离层	(480)
8.3.3	蓝宝石上的隔离层	(481)
8.3.4	硅片上的隔离层	(483)
8.3.5	金属与纤维上的隔离层	(485)

8.4	Y 系薄膜	(486)
8.5	Bi 系薄膜	(488)
8.6	Tl 系薄膜	(490)
8.7	多层膜与超晶格	(492)
第 9 章 高温超导薄膜的应用		李宏成
9.1	高温超导薄膜微波器件	(507)
9.1.1	超导薄膜微波表面电阻	(507)
9.1.2	超导薄膜 R_s 的测量	(510)
9.1.3	高温超导薄膜的微波特性	(516)
9.1.4	高温超导薄膜微波器件	(521)
9.2	高温超导薄膜红外探测器	(529)
9.3	高温超导 Josephson 器件与 SQUID	(533)
9.3.1	天然弱连接 SQUID	(534)
9.3.2	边缘结 SQUID	(535)
9.3.3	双晶晶界结 SQUID	(538)
9.3.4	台阶边缘结 SQUID	(540)
9.3.5	双外延 GBJ SQUID	(543)
第 10 章 高温超导材料		焦正宽
10.1	引言	(555)
10.2	强电应用对超导材料提出的基本要求	(556)
10.3	两种比较	(559)
10.3.1	高温超导体与常规超导体的比较	(560)
10.3.2	Y 系和 Bi 系高温超导体的比较	(561)
10.4	高温超导材料的制备技术	(562)
10.4.1	概述	(562)
10.4.2	薄膜	(565)
10.4.3	厚膜	(566)
10.4.4	大块超导体	(567)

10.4.5	超导线(带).....	(567)
10.5	改善 $j_c(B)$ 特性的制备技术	(570)
10.5.1	引言.....	(570)
10.5.2	改善弱连接和形成织构的技术.....	(570)
10.5.3	增强磁通钉扎的工艺.....	(604)
10.6	高温超导材料线材复合化和线圈工艺.....	(609)
10.6.1	引言.....	(609)
10.6.2	超导材料复合化.....	(611)
10.6.3	线圈化技术.....	(614)
第11章	高温超导材料的稳定性及其在强电领域的应用 焦正宽	
11.1	稳定性概述.....	(621)
11.2	稳定化超导材料的设计.....	(626)
11.2.1	磁(绝热)稳定性.....	(626)
11.2.2	动态稳定性.....	(627)
11.2.3	低温稳定性.....	(628)
11.3	最小传播区(MPZ)及其触发能	(631)
11.4	失超保护.....	(631)
11.5	稳定导体的设计实例.....	(632)
11.5.1	多丝复合线.....	(632)
11.5.2	复合带状导体.....	(633)
11.6	高温超导电性在强电领域的应用.....	(635)
11.6.1	引言.....	(635)
11.6.2	液氮冷却的优越性.....	(639)
11.6.3	液氮的冷却效率和热物理特性.....	(640)
11.6.4	冷却系统的费用.....	(641)
11.6.5	可普及性和可靠性.....	(642)
11.7	高温超导电性的应用对不同领域可能产生的影响	(642)

11.7.1	超导系统是整个装置不可缺少的场合.....	(643)
11.7.2	与常规技术相竞争的超导应用.....	(647)
11.8	高温超导电性某些近期应用领域.....	(659)
11.8.1	高质量超导块材的应用.....	(660)
11.8.2	Bi 系超导材料的低温应用	(678)

第1章

概 论

张其瑞

