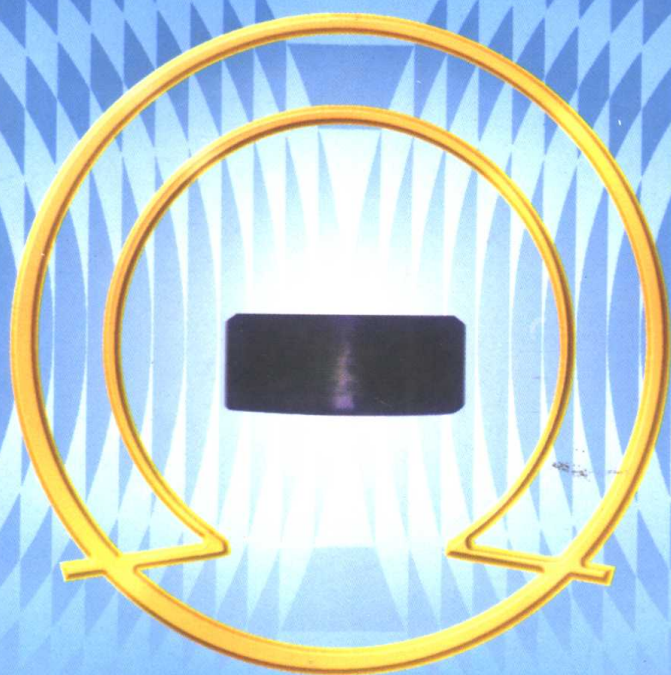


Superconductivity Application

超导电性及其应用

林良真 张金龙 李传义 夏平畴 杨乾声 著



北京工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

超导电性及其应用/林良真等编著. -北京:北京工业大学出版社, 1998. 12

ISBN 7-5639-0740-8

I. 超… II. 林… III. 超导电性-应用 IV. 0511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 39443 号

超导电性及其应用

林良真 等著

责任编辑 张 瑚 炳 忠

责任校对 乐 声

※

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

※

1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 32 开本 16.5 印张 411 千字

印数: 1~1500 册

ISBN 7-5639-0740-8/T·99

定价: 34.00 元

《全国高技术重点图书》

出版指导委员会

主 任：朱丽兰

副主任：刘 杲

卢鸣谷

总干事：罗见龙 梁祥丰

委 员：(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	牛田佳	王守武	刘 仁	刘 杲
卢鸣谷	叶培大	朱丽兰	孙宝寅	师昌绪	任新民
杨牧之	杨嘉墀	陈芳允	陈能宽	罗见龙	周炳琨
欧阳莲	张兆祺	张钰珍	张效祥	赵忠贤	顾孝诚
徐修存	谈德颜	龚 刚	梁祥丰		

《全国高技术重点图书·超导技术领域》

编审委员会

主任委员：赵忠贤

委 员：甘子钊 宋玉升 章立源

出版前言

电工科学是一门有着上百年发展历史、理论基础比较完善的技术科学，对国民经济发展起着举足轻重的作用。跨入 90 年代，世界进入科学技术更加迅猛发展和科技成果更加快速转向生产实践的时代，电工科学和其他学科一样，也面临着汲取别的新兴学科成就促进自身创新和向其他学科渗透派生出新的交叉学科的任务。对于我国这样一个发展中的开放的大国来说，拓宽电工学科领域，增加电工学科活力，发展电工电能高新技术，使之更好地服务于提高国力的各项建设，更是不容忽视的课题。

30 多年来，我国电工界的科学技术人员为发展电工电能新技术进行了大量艰苦卓绝的研究工作，在电工新材料、新工艺、新能源、先进制造技术，以及环保、医学、生物中的高新电工技术等方面取得了一批批成果。由丁肇中教授主持的 α -磁谱仪中的大型永磁设备主要是中国

科学院电工研究所的研制成果,就充分地证实了这一点。

为了向国内外读者介绍近年来我国电工电能高新科学技术的发展情况和主要研究成果,为促进我国高新科学技术发展尽一份力量,1996年以来,我们特请中国科学院电工研究所研究员万遇良、沈国镠为学术顾问,朱尚廉、张瑚为选题策划,先后组织中国科学院电工研究所、中国科学院空间科学与应用研究中心、北京大学、东南大学等单位的资深研究人员,就超导电工新技术、磁流体发电、超导磁流体推进、太阳能发电、风力发电、宽离子束加工、电子束加工、永磁和永磁机构等撰写了一批学术专著,将于1998年至2000年陆续出版。其中不乏“863”国家高技术研究发展计划主题项目,有的还是率先发表的著作。在选题和选题计划实施过程中得到了中国科学院院士、中国科学院电工研究所所长严陆光和北京市新闻出版单位的指导与支持,在此谨致谢意。

北京工业大学出版社

1998年9月

作者简介



林良真 中国科学院电工研究所研究员、博士生导师、所学位评定委员会主任。1958年毕业于哈尔滨工业大学电机系，同年开始在中国科学院电工研究所从事电力系统稳定和大能量电感储能装置的研究。1973年后进行超导磁体技术研究，1980年后曾先后赴德国卡尔斯鲁厄研究中心技术物理所和汉堡电子同

步加速器实验室进修和工作。曾获国家科技进步三等奖(1991年)和中国科学院科技进步二等奖(1990年和1994年)。目前担任国家超导技术专家委员会委员、中国电工技术学会理事兼超导应用技术专业委员会主任、国际制冷学会第1/2专业委员会委员和国际低温工程委员会委员等职。

张金龙 北京大学物理系教授。1960年毕业于北京大学物理系后，留校工作。长期从事“超导物理”课程的教学工作，是编



写全国高技术重点图书《超导物理学》的著者之一。在科研方面从事过晶体缺陷的观察与研究。1973 年开始从事低温超导材料的 TEM 研究及超导磁体研究, 1986 年开始从事高温超导材料和 C_{60} 材料的 TEM 研究, 以及磁通运动动力学的理论研究。在国内外有关杂志和学术会议上已发表论文百余篇。



李传义 现任北京大学物理系教授。1958 年毕业于吉林大学物理系, 同年起在北京大学物理系金属物理教研室任教, 1971 年转至低温物理教研室从事低温超导的研究及研究生教学工作。先后在超导材料物理、超导磁体物理及应用、超导薄膜及多层膜等方面从事研究, 主持了强磁场物理的国家自然科学基金项目, 取得了多项成果。曾获科学大会三等奖, 国家教委科技进步一、二等奖, 机械工业部科技成果奖及北京大学科技成果奖等奖项。1993 年起享受政府特殊津贴。目前从事富勒烯超导膜及其与金属、半导体界面的研究工作。

夏平畴 1937 年 10 月生于湖北省广济县。1960 年毕业于重庆大学电机系, 同年分配到中国科学院电工研究所工作。现系电工研究所研究员、博士生导师, 国家自然科学基金电工学科评委。曾获国家科技进步二等奖, 中国科学院技术进步一等奖。

1960~1968 年主要从事大电机蒸发冷却技术研究。1970~1985 年转而从事永磁电机及永磁磁场数值分析技术研究, 并为科



技大学研究生院讲授“电磁场有限元分析引论”长达6年。1985年至今致力于永磁应用项目的研究。1994~1997年,作为丁肇中教授所需空间 α -磁谱仪磁体研究的电工研究所技术负责人,参加磁体研制工作。1998年5月 α -磁谱仪升空成功,并已记录了两亿例事件。



杨乾声 1939年7月出生,现为中国科学院物理研究所研究员、博士生导师。1963年中国科技大学技术物理系毕业,毕业后在中国科学院物理研究所工作,从事极低温实验和超导电性研究,1980~1982年在美国阿贡实验室做访问学者,研究Nb基金属超晶格,回国后继续进行超导体非平衡态研究和超导隧道效应研究。1987年从事高温超导体的研究,因发现 LN_2 温区氧化物超导体获得国家自然科学一等奖和中国科学院科技进步特等奖,之后研究工作集中在超导薄膜和超导隧结技术和物理研究,以及超导量子干涉器件的研究等。

前 言

自 1911 年荷兰物理学家昂尼斯 (Onnes) 发现超导电性以来, 人们就对超导电性的实际应用提出了许多设想。但是, 由于当时发现的超导材料的超导性极易受到磁场影响而被破坏, 致使这些设想未能实现。直到 60 年代发现具有实用价值的超导材料后, 才使早期的设想得以实现。目前, 超导电性的应用已逐步发展成为有一定规模的一门实用技术, 并在能源、工业、交通、医疗、航天、国防和科学实验等领域, 都有独特的和不可取代的作用。80 年代中期, 高临界温度超导材料的发现, 又对超导技术的发展起到进一步的推动作用。

超导电性反应应用的研究与发展, 直接联系着凝聚态物理、材料科学和电工技术等多学科的发展, 是当前高新科学技术的一个重要研究领域, 具有重大的科学意义和应用前景。我国已将超导技术作为一个独立的主题列入“863”国家高技术研究发展计划中, 可以预测, 到下

个世纪初，超导电性的应用将会成为一门规模相当大的实用技术，并将为人类做出巨大的贡献。

本书在阐明超导电性基本原理的基础上，对超导电性应用原理与发展进行了扼要的阐述，并尽可能地反映当前超导电性应用的国际发展水平和我国在超导应用研究领域所取得的成就。

本书的第一、二章由张金龙、李传义撰写，第三章由夏平畴撰写，第四、五章由林良真撰写，第六章由杨乾声撰写。在本书撰写过程中还得到众多有关专家的帮助，对此，笔者表示衷心的感谢。希望本书的出版能对我国超导应用研究起到良好的促进作用，并期望能对从事超导电性应用研究的科技工作者和有关大、专院校的相关专业的师生有所帮助。由于作者学识有限，书中难免会有不少缺点、错误和不当之处，祈请读者批评和指正。

林良真

1998 年 9 月于北京

[illegible]

此为试读 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

三、GLAG 理论与理想第二类超导体	(44)
(一) GLAG 理论	(44)
(二) GL 方程与 λ 、 ξ	(47)
(三) 界面能与磁通量子化 ($e_s = 2e$)	(54)
(四) 理想第二类超导体	(60)
参考文献	(87)
第二章 非理想第二类超导体及实用超导材料	(90)
一、非理想第二类超导体	(90)
(一) 非理想第二类超导体的基本性质	(90)
(二) 磁通钉扎与定向超流密度	
——磁通驱动力和磁通钉扎力	(98)
(三) 临界电流密度与临界态描述	(102)
(四) 温度为 0K 时磁通格子的受力及其运动 ...	(105)
(五) 磁通跳跃(磁不稳性)及其克服	(111)
二、低温超导材料	(117)
(一) 韧性合金超导材料——NbTi	(118)
(二) 脆性 A15 型 A_3B 超导化合物材料	(124)
(三) Nb ₃ Al 成材研究的新进展	(131)
三、高温超导氧化物	(136)
(一) 高温超导氧化物的结构及特性	(137)
(二) 单晶的各向异性	(142)
(三) 高温超导体中的磁通线	(146)
(四) J_c 的各向异性和本征钉扎	(149)
(五) 晶粒与晶粒之间连接——弱连接	(151)
(六) 高温超导氧化物的混合态	(155)
(七) 热激活磁通运动	(161)
四、高温超导材料	(178)
(一) YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} 体材	(178)

(二) 高温超导氧化物线、带材	(189)
参考文献	(202)
第三章 超导磁体的磁场计算	(206)
一、超导螺管线圈的磁场计算 (I)	(206)
二、超导螺管线圈的磁场计算 (II)	(213)
三、由螺线管的组合产生高均匀度磁场的算法	(221)
四、高均匀度磁场的有源补偿方法	(224)
(一) 磁场的展开	(224)
(二) z 方向磁场分量的修正	(228)
五、计算静磁场问题的模板方法	(235)
(一) 模板 1: 无限长载流丝	(238)
(二) 模板 2: 无限短载流丝	(239)
(三) 模板 3: 有限长载流丝	(239)
(四) 模板 4: 无限长平面电流片	(240)
(五) 模板 5: 有限长平面电流片	(241)
(六) 模板 6: 无限长矩形截面电流柱	(241)
(七) 模板 7: 无限短矩形截面电流柱	(242)
(八) 模板 8: 有限长矩形截面电流柱	(243)
(九) 模板 9: 圆形截面环状电流片	(244)
(十) 模板 10: 任意截面环状电流片	(245)
(十一) 模板 11: 有限厚度圆形截面环状线圈	(245)
(十二) 模板 12: 电流丝圆环	(246)
(十三) 模板 13: 不成整圆的电流丝	(247)
(十四) 模板 14: 无限长圆柱状电流片	(247)
(十五) 模板 15: 无限长圆柱状载流线圈	(248)
六、具有铁芯或铁轭的超导磁体的计算	(248)
(一) 有限元算法	(249)

(二) 边界元方法	(257)
参考文献	(262)
第四章 超导磁体技术	(263)
一、概述	(263)
二、超导磁体的退化和锻炼效应	(266)
三、超导磁体的稳定性	(269)
(一) 绝热稳定化判据	(270)
(二) 动态稳定判据	(271)
(三) 低温稳定判据	(272)
四、超导体的交流损耗	(277)
(一) 磁滞损耗	(277)
(二) 涡流损耗	(279)
(三) 自场损耗	(280)
五、超导磁体设计	(284)
(一) 磁场计算	(285)
(二) 超导材料的选择	(287)
(三) 超导线电流密度的选择	(290)
(四) 磁体稳定性的选择	(291)
(五) 超导磁体的失超保护	(292)
(六) 磁体结构的选择	(294)
(七) 超导磁体的冷却方式	(296)
(八) 超导磁体的励磁方式	(299)
参考文献	(302)
第五章 超导磁体的应用	(304)
一、超导磁体在电力领域中的应用	(304)
(一) 超导电机	(304)
(二) 超导变压器	(309)
(三) 超导限流器	(312)

(四) 超导输电	(315)
(五) 超导储能	(318)
二、超导磁体在大型科学工程中的应用	(324)
(一) 高能加速器	(324)
(二) 高能粒子探测器	(328)
(三) 核聚变装置	(331)
(四) 磁流体发电装置	(336)
三、超导磁体在交通和工业领域中的应用	(341)
(一) 超导磁悬浮列车	(341)
(二) 超导电磁推进船舶	(343)
(三) 超导磁分离装置	(347)
(四) 超导磁拉单晶生长炉	(350)
四、超导磁体在生物医学领域中的应用	(354)
(一) 超导核磁成像装置(MRI)	(354)
(二) 核磁共振谱仪(NMR)	(358)
五、超导磁体的其他应用	(361)
(一) 超导扫雷具	(361)
(二) “磁窗”用超导磁体	(365)
参考文献	(366)
第六章 超导在电子学技术中的应用	(370)
一、引言	(370)
二、超导电子学的物理和技术基础	(372)
(一) 约瑟夫森(Josephson)效应	(372)
(二) Nb 结技术	(380)
(三) 高临界温度 YBCO 超导薄膜	(389)
(四) 高临界温度超导 HTS 约瑟夫森结	(397)
三、超导量子干涉器件	(410)
(一) d. c. SQUID 的工作特性和噪声	(411)

(二) rf SQUID 的工作特性和噪声	(415)
(三) SQUID 的应用	(417)
(四) SQUID 磁强计	(421)
(五) SQUID 磁强计应用	(432)
四、超导高频器件	(442)
(一) 超导薄膜的高频性能	(442)
(二) 超导无源微波器件	(444)
(三) 约瑟夫森高频器件	(454)
(四) 超导混频器	(458)
(五) 约瑟夫森电压基准	(462)
五、超导数字电路	(471)
(一) 超导数字电路的发展概况	(471)
(二) 约瑟夫森结电压态逻辑电路	(472)
(三) 快单磁通量子 RSFQ 逻辑电路	(480)
六、超导粒子探测器	(491)
七、超导三端器件	(499)
(一) 电场效应器件	(499)
(二) 电荷注入器件	(500)
(三) 磁通流器件	(504)
参考文献	(504)

第一章 超导概念与理论概述

超导概念来源于实验研究，对它的理解需要有关理论结论给出的物理图像。为了使读者便于接受上述物理图像，本章行文中仅有供读者参阅的数学推导部分，对这样的部分用 * 标出。读者可以粗略地阅读这些用 * 标出的部分，行文是连贯的。以物理概念为重点，读者可用较短的时间阅读本章概述的理论。

一、基本现象与早年理论

(一) 零电阻与完全排磁通

1. 零电阻现象和超导临界参量

1908 年氦气被液化，获得了人造液态氦的低温条件 (4.2 K)。1911 年昂尼斯 (Onnes) 发现，在液氦低温条件下，水银的电阻突降为它在 0°C 时电阻值的百万分之一^[1]，如图 1-1 (c) 所示。持续电流实验证实此时的电阻率约为 $10^{-23} \Omega \cdot \text{cm}$ ^[2]。而良导体铜在 4.2 K 时的电阻率约为 $10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ ，它远大于此时水银的电阻率，