

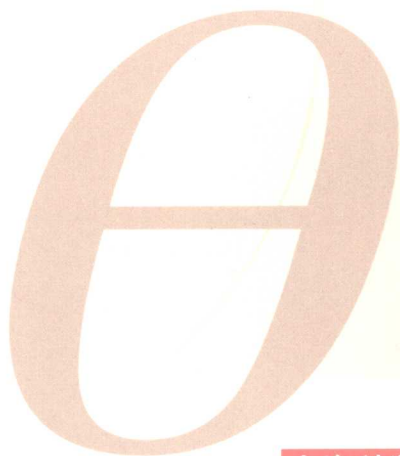
科学

前沿进展

# 高温超导应用研究

时东陆 周午纵 梁维耀 主编

KEXUE QIANYAN JINZHAI



上海科学技术出版社

科学前沿进展

# 高温超导应用研究

时东陆 周午纵 梁维耀 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高温超导应用研究 / 时东陆, 周午纵, 梁维耀主编.  
上海: 上海科学技术出版社, 2008. 10  
(科学前沿进展丛书)  
ISBN 978 - 7 - 5323 - 9224 - 7/O·289

I. 高… II. ①时…②周…③梁… III. 高温超导性—  
研究 IV. O511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 189907 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

上海书刊印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 42.25

字数: 617 千字

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—1500

定价: 188.00 元

---

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,  
请向工厂联系调换

## 内 容 提 要

本书是由海内外从事高温超导研究的华人专家学者共同撰写的著作,主要介绍高温超导领域近十年来的发展现状和最新研究成果,包括技术理论、实验新方法、第二代超导带材、基底制备、多层膜的研制过程等,尤其是关于第二代超导带材在电力、电工、微波通信等方面的应用。全书共 11 章,分别为:高温超导体磁通动力学和混合态相图;高温超导体的能斯特效应;高温超导膜的回顾与展望;二代超导体;薄膜晶界和涂层导体;钇钡铜氧系涂层导体的低成本和新方法制备;高温超导的电力应用;高温超导低温实验技术;REBCO 高温超导晶体生长;微波特性及其应用;二硼化镁超导材料研究进展。

本书介绍的实验方法和最新概念都可以用于工业实践,对发展超导应用、国防科技以及研究生教育具有深远的意义。许多科研成果已经达到商业化的水平,对建立超导工业和开发新材料市场有着直接的作用。本书主要读者对象为超导领域的研究者、高等院校的大学生和研究生,也可供工业界的工程师与技术人员参考。

# 《科学前沿进展》序

科学是人类文化知识宝库中最具创造力和最有价值的一个部分,是人类文明高度发展的重要标志。科学的前沿处在人类探索自然由已知领域向未知领域推进的边界,是科学最富生命力的部分。科学前沿的推进,意味着人类对未知世界有了新的发现,有了新的认知。这必然会带来技术的发明、工业的应用和文化的进步。科学的发现越基本,发现的规律越普遍,所产生的技术和应用便会越重要,对社会的文明进步所起的作用也会越巨大。

经过好几代人的艰苦奋斗,中国的现代化进程已发展到一个重要时期,一个依靠增强科学技术自主创新能力来推进社会全面、协调和可持续发展的时期。而科学技术自主创新的源头,或者说原始性创新的初始源头,正是来自于科学向未知领域推进的新发现,来自于科学前沿探索的新成果。

前沿探索成果的价值在于首创。首创是无法靠摹拟仿效、引进跟踪来实现的,要靠推陈出新、标新立异。要在科学前沿研究上推陈出新、标新立异,有许多重要的事要做,其中有一样就是著书立说,即在大量研究实践的基础上,有创见地做学问,出版学术著作。

学术著作是研究成果的总结,它的价值也在于其原创性。一个国家,一个地区,学术著作出版的水平是这个国家、这个地区科学研究水平的重要标志。科学研究具有系统性和长远性,继承性和连续性等特点,科学发现的取得需要有充沛的好奇心和丰富的想象力,也需要有长期的、系统的研究成果的积累。因此,学术著作的出版也需要有长远的安排和持续的积累,来不得半点的虚浮,更不能急功近利。

学术著作的出版,既是为了总结、积累,更是为了交流、传播。交流传播了,总结积累的效果和作用才能发挥出来。为了在中国传播科学而于

## 2 高温超导应用研究

1915 年创办的《科学》杂志,在自身发展的历程中,一直也在尽力促进中国学者的学术著作的出版。

几十年来,《科学》的编者和出版者,在不同的时期先后推出过好几套中国学者的科学专著,其中有早期的《**科学丛书**》,以及在 2000 年前后两个五年中的《**科学专著丛书**》和《**科学前沿丛书**》,形成了一个以刊物的名称和字样**科学**为标识的学术专著系列。在《**科学专著丛书**》名下,共出版了 14 部专著;在《**科学前沿丛书**》名下,共出版了 6 部专著,其中有不少佳作,受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

为了促进中国学者对前沿工作做有创见的系统总结,在纪念《科学》创刊 90 周年的时候,《科学》的编者和出版者决定对**科学**系列学术著作做新的延伸,出版《**科学前沿进展**》学术丛书,继续为中国学者著书立说尽一份力。

坚持这种努力,随着中国科学研究向世界前列的挺进,在**科学**系列的学术专著之中,一定会有更多中国学者推陈出新、标新立异的佳作问世,也一定会有传世的名著问世!

周光召

(《科学》杂志编委会主编)

2005 年 10 月 25 日

# 本书序

从 1986 年发现铜氧化物超导性和 1987 年实现液氮温区超导性以来,超导的广泛应用一直受到关注。1987 年,科学家曾估计高温超导的广泛应用可能需要 20 年,最早实现应用的可能是电子学方面。现在 20 年过去了,超导应用的现状如何,应该如何进一步发展,成为备受关注的问题。由海内外华人学者编著的《高温超导应用研究》一书将会从各个方面探讨这一问题。

超导应用有些是大家看不到的,如电压基准;有的是看到而没有注意的,如用于医院临床诊断的核磁共振成像的超导磁体;比较大型的应用是在大科学工程方面,如加速器、磁约束核聚变试验装置等;在科学仪器方面有其独特的优势,如高灵敏度的量子干涉磁强计和仪器磁体。如此小体积高磁场的磁体,以及如此高灵敏度的电磁信号检测仪器是非超导材料不能替代的。这些应用基本都是使用低温超导材料,而高温超导材料的应用除上述方面外还可能有更广泛应用,如:超导磁悬浮车、超导电力系统、新式的超导船舶推进系统等。目前比较有一定规模的高温超导应用是移动通讯基站上的超导滤波器,北美已经有几千套在基站上应用。然而,其他方面的应用还基本处于样机和试验阶段。过去有企业家和专家预测,到 2020 年,与超导材料及应用有关的市场可能达到 2 000 亿美元,看来过于乐观。这种预测的基础是基于一种高磁场下有高临界电流的实用带材的实现。这种带材的行业术语被称为第二类带材,即用以 YBCO 或 ReBCO(Re 代表稀土元素)为基底的实用带材。目前可以做到

#### 4 高温超导应用研究

几百米,但价钱太贵,只有突破一些关键的工艺技术才有可能降低成本。同时要达到低温超导材料所具有的那样可靠性。广泛应用的希望就在这里。

本书结合高温超导应用及有关应用背景,对关键技术和物理分析进行了论述。这对从事有关方面研究的科技工作者和研究生会有所帮助。虽然高温超导的应用研究目前遇到了一些困难,但作为一种性质独特的材料,又是开源节流的能源材料,高温超导材料具有明确的光明的应用前景,对于人类的未来是非常重要的材料,终将造福人类。今天的努力将会使广泛应用早日到来。感谢这些作者编著这本有意义的《高温超导应用研究》。

赵忠贤

2008年4月8日

# 各章撰稿人名单

## 第 1 章

闻海虎,中国科学院物理研究所研究员,超导国家重点实验室主任。

Dr. H. H. Wen, National Laboratory for superconductivity, Institute of Physics, CAS, Beijing 100080, China.

e-mail: <hhwen@aphy. iphy. ac. cn>

## 第 2 章

许祝安,浙江大学物理系教授。

Professor Z. A. Xu, Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.

e-mail: <zhuang@zju. edu. cn>

## 第 3 章

时东陆,同济大学先进材料与纳米生物医学研究院院长、上海交通大学微纳科学技术研究院特聘教授、美国辛辛那提大学化工与材料工程系教授。

Professor D. L. Shi, The Institute for Advanced Material & Nano Biomedicine, Tongji University, Shanghai 200092, China; The Research Institute of Micro/Nano Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200232, China; Department of Chemical and Materials Engineering, University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45221, USA.

e-mail: <shid@email. uc. edu>

徐永利,美国环球能源公司资深科学家。

## 2 高温超导应用研究

Dr. Y. L. Xu, Sr. Scientist and Program Manager, Materials Research Lab, UES Inc, 4401 Dayton-Xenia Rd, Dayton Ohio 45432, USA.

e-mail: <yxu@ues.com, xuyongli6@yahoo.com>

## 第 4 章

古宏伟,北京有色金属研究总院超导材料研究中心主任、研究员。

Dr. H. W. Gu, General research institute for nonferrous metals, Beijing 100088, China.

e-mail: <guhw@grinm.com>

索红莉,北京工业大学材料科学与工程学院教授。

Professor H. L. Suo, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China.

e-mail: <honglisuo@bjut.edu.cn>

赵跃,北京工业大学材料科学与工程学院博士生。

Y. Zhao, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China.

e-mail: <zeuszhao@emails.bjut.edu.cn>

## 第 5 章

蔡传兵,上海大学理学院教授,上海大学超导及应用技术研究中心主任。

Professor C. B. Cai, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China.

e-mail: <cbcai@yahoo.com>

## 第 6 章

王三胜,北京航空航天大学仪器光电学院副教授。

Dr. S. S. Wang, School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China.

e-mail: <wangs ansheng@tsinghua.org.cn>

## 第 7 章

林良真,中国科学院应用超导重点实验室,中国科学院电工研究所研究员。

Dr. L. Z. Lin, Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing, 100190, China.

e-mail: <lzlin@mail. iee. ac. cn>

肖立业,中国科学院应用超导重点实验室,中国科学院电工研究所研究员。

Dr. L. Y. Xiao, Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing, 100190, China.

e-mail: <xiao@mail. iee. ac. cn>

## 第 8 章

李来风,中国科学院理化技术研究所研究员。

Dr. F. L. Li, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100080, China.

e-mail: <lfli@mail. ipc. ac. cn>

张浩,中国科学院理化技术研究所博士研究生。

Dr. H. Zhang, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100080, China.

e-mail: <stavrosatic@gmail. com>

龚领会,中国科学院理化技术研究所研究员。

Dr. L. H. Gong, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100080, China

e-mail: <lhgong@cl. cryo. ac. cn>

## 第 9 章

姚忻,上海交通大学物理系教授。

Professor X. Yao, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China.

e-mail: <xyao@sjtu. edu. cn>

#### 4 高温超导应用研究

汤晨毅, 上海交通大学物理系。

Dr. C. Y. Tang, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China.

#### 第 10 章

沈致远, 前美国杜邦公司中心研究院杜邦院士。

Z. Y. Shen, Retired DuPont Fellow, 5 Stone Barn Lane, Wilmington, DE 19807, USA.

e-mail: <zyshen@comcast.net>

#### 第 11 章

索红莉, 北京工业大学材料科学与工程学院教授。

Professor H. L. Suo, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China.

e-mail: <honglisuo@bjut.edu.cn>

# 目 录

《科学前沿进展》序

本书序

各章撰稿人名单

## 第一篇 基础理论

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 第 1 章 高温超导体磁通动力学和混合态相图 .....             | 闻海虎 |
| § 1.1 引言 .....                           | 3   |
| § 1.2 磁通钉扎的起源和磁通运动的耗散 .....              | 6   |
| § 1.3 涡旋玻璃态和集体蠕动(钉扎)模型 .....             | 9   |
| § 1.4 磁化弛豫、非线性 $U(j)$ 关系和 $\mu$ 指数 ..... | 17  |
| 1.4.1 梅利的标度法 .....                       | 19  |
| 1.4.2 磁化弛豫率的方法 .....                     | 19  |
| 1.4.3 广义反演方法 .....                       | 21  |
| 1.4.4 汤普森拟合法 .....                       | 23  |
| § 1.5 涡旋态相图的发展 .....                     | 24  |
| 1.5.1 不可逆线的发现 .....                      | 25  |
| 1.5.2 磁通晶格的一级融化 .....                    | 27  |
| § 1.6 高温超导体的峰值效应和布拉格玻璃 .....             | 30  |
| 1.6.1 峰值效应概述 .....                       | 31  |
| 1.6.2 布拉格玻璃 .....                        | 33  |
| 1.6.3 基于布拉格玻璃到磁通玻璃相变的解释 .....            | 36  |
| 1.6.4 存在的问题 .....                        | 38  |
| § 1.7 磁通线的量子隧道和量子融化现象 .....              | 40  |

## 2 高温超导应用研究

|                     |    |
|---------------------|----|
| § 1.8 反常霍尔效应        | 42 |
| § 1.9 一些低维特性        | 43 |
| 1.9.1 约瑟夫森涡旋        | 44 |
| 1.9.2 涡旋饼           | 45 |
| 1.9.3 BKT 转变        | 47 |
| § 1.10 一些新的实验方法     | 49 |
| § 1.11 高温超导体的强电应用简述 | 49 |
| § 1.12 结束语          | 50 |
| 参考文献                | 51 |

## 第 2 章 高温超导体的能斯特效应 ..... 许祝安

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| § 2.1 引言                      | 56 |
| § 2.2 高温超导体的赝能隙态和相位涨落         | 58 |
| 2.2.1 电子态相图                   | 58 |
| 2.2.2 赝能隙态                    | 60 |
| 2.2.3 超导相位涨落                  | 63 |
| § 2.3 能斯特效应及其测量方法             | 64 |
| 2.3.1 正常态载流子的能斯特效应            | 64 |
| 2.3.2 第二类超导体混合态的涡旋能斯特效应       | 66 |
| 2.3.3 能斯特效应的测量                | 67 |
| § 2.4 空穴型高温超导体的能斯特效应          | 68 |
| 2.4.1 最佳掺杂区铜氧化物的能斯特效应         | 71 |
| 2.4.2 欠掺杂区的能斯特效应              | 73 |
| 2.4.3 过掺杂区的能斯特效应              | 75 |
| 2.4.4 类磁通激发的二维特性              | 77 |
| 2.4.5 Zn 掺杂的钇钡铜氧系的能斯特效应       | 79 |
| 2.4.6 上临界场 $H_{c2}$           | 83 |
| 2.4.7 讨论                      | 86 |
| § 2.5 电子型高温超导体和其他第二类超导体的能斯特效应 | 89 |
| § 2.6 结束语                     | 94 |
| 参考文献                          | 94 |

## 第二篇 第二代超导薄膜与导线

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| 第 3 章 高温超导膜的回顾与展望 .....         | 时东陆 徐永利 |
| § 3.1 引言 .....                  | 101     |
| § 3.2 高温超导涂层的基底材料 .....         | 105     |
| 3.2.1 基底材料及性能 .....             | 105     |
| 3.2.2 轧制辅助双轴织构基底技术 .....        | 110     |
| 3.2.3 无织构金属基底 .....             | 112     |
| § 3.3 隔离层 .....                 | 112     |
| 3.3.1 离子束辅助沉积隔离层 .....          | 113     |
| 3.3.2 倾斜基底沉积 .....              | 115     |
| 3.3.3 轧制辅助双轴织构基底上的陶瓷隔离层材料 ..... | 115     |
| 3.3.4 轧制辅助双轴织构基底上的金属隔离层 .....   | 117     |
| 3.3.5 自氧化外延生长 .....             | 118     |
| § 3.4 超导层的制造 .....              | 119     |
| 3.4.1 原位法制造钇钡铜氧系薄膜 .....        | 119     |
| 3.4.2 后处理方法 .....               | 120     |
| 3.4.3 液相外延生长 .....              | 122     |
| § 3.5 高温超导材料的晶界研究 .....         | 123     |
| 3.5.1 高温超导材料中的晶界 .....          | 123     |
| 3.5.2 双晶技术 .....                | 124     |
| 3.5.3 高温超导材料的晶界理论 .....         | 125     |
| § 3.6 REBCO 的一些最新研究动态 .....     | 126     |
| 3.6.1 REBCO 厚膜 .....            | 126     |
| 3.6.2 脉冲电子束沉积方法 .....           | 127     |
| 3.6.3 晶界掺杂 .....                | 127     |
| 3.6.4 单晶及隔离层的表面研究 .....         | 129     |
| 3.6.5 涂层超导体的电流路径模拟 .....        | 130     |
| § 3.7 结束语 .....                 | 131     |
| 参考文献 .....                      | 132     |

## 4 高温超导应用研究

|                           |             |
|---------------------------|-------------|
| 第4章 第二代高温超导带材 .....       | 古宏伟 索红莉 赵 跃 |
| § 4.1 第二代高温超导带材的结构 .....  | 146         |
| 4.1.1 钇钡铜氧系超导体的基本特征 ..... | 146         |
| 4.1.2 第二代超导带材的结构 .....    | 147         |
| § 4.2 第二代高温超导带材的制备 .....  | 152         |
| 4.2.1 具有立方织构的基带的制备 .....  | 152         |
| 4.2.2 隔离层的制备 .....        | 155         |
| 4.2.3 钇钡铜氧系薄膜的制备 .....    | 155         |
| § 4.3 涂层导体基带研究的最新进展 ..... | 158         |
| 4.3.1 Ag 及其 Ag 合金基底 ..... | 159         |
| 4.3.2 Ni 及其合金基底 .....     | 161         |
| 4.3.3 Cu 及其合金基带 .....     | 171         |
| 4.3.4 不锈钢基带 .....         | 173         |
| 4.3.5 小结 .....            | 173         |
| § 4.4 第二代超导带材的研究进展 .....  | 173         |
| 4.4.1 美国 .....            | 174         |
| 4.4.2 日本 .....            | 175         |
| 4.4.3 欧洲 .....            | 176         |
| 4.4.4 韩国 .....            | 176         |
| 4.4.5 中国 .....            | 176         |
| § 4.5 结束语 .....           | 176         |
| 参考文献 .....                | 177         |

## 第5章 高温超导薄膜晶界和涂层导体 .....

蔡传兵

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 5.1 引言 .....                 | 185 |
| § 5.2 薄膜晶界和二维晶界网络中的电传输特性 ..... | 188 |
| 5.2.1 晶界弱连接 .....              | 188 |
| 5.2.2 晶界种类 .....               | 191 |
| 5.2.3 薄膜晶界的电流电压特性 .....        | 194 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 5.2.4 薄膜晶界及其二维网络中的临界电流 .....  | 203 |
| 5.2.5 薄膜晶界的辐射、掺杂和电场效应 .....   | 213 |
| 5.2.6 薄膜晶界的磁通钉扎和跳跃特性 .....    | 218 |
| § 5.3 涂层导体及其双轴织构外延生长技术 .....  | 222 |
| 5.3.1 金属基底 .....              | 223 |
| 5.3.2 缓冲层 .....               | 226 |
| 5.3.3 超导层 .....               | 234 |
| § 5.4 高温超导薄膜及其涂层导体的磁通钉扎 ..... | 239 |
| § 5.5 涂层导体的当前发展状态和展望 .....    | 246 |
| 参考文献 .....                    | 252 |

## 第 6 章 钇钡铜氧系涂层导体的低成本和新方法制备 ..... 王三胜

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| § 6.1 钇钡铜氧系涂层导体的低成本化学溶液法制备 .....                 | 260 |
| 6.1.1 引言 .....                                   | 260 |
| 6.1.2 三氟乙酸金属有机物沉积方法制备钇钡铜氧系超导薄膜及离子束改性 .....       | 265 |
| 6.1.3 全化学溶液方法制备钇钡铜氧系涂层导体 .....                   | 277 |
| 6.1.4 大面积双面钇钡铜氧系超导薄膜制备及表征 .....                  | 291 |
| § 6.2 离子束结构改性制备双轴织构金属基带研究 .....                  | 296 |
| 6.2.1 引言 .....                                   | 296 |
| 6.2.2 低能离子束轰击制备双轴织构金属基带及其稳定性 .....               | 303 |
| 6.2.3 在低能离子束轰击制备的 Ni 金属基带上采用溶胶-凝胶工艺制备织构缓冲层 ..... | 326 |
| 6.2.4 离子束轰击冷轧基带诱发双轴织构形成的物理机制 .....               | 331 |
| § 6.3 同步织构法在金属基带上制备织构缓冲层的研究 .....                | 335 |
| 6.3.1 引言 .....                                   | 335 |
| 6.3.2 同步织构工艺用于制备织构缓冲层 .....                      | 340 |
| 6.3.3 在同步织构工艺制备的缓冲层上复合外延层的生长 .....               | 350 |
| 6.3.4 在复合外延层上制备钇钡铜氧系超导层的研究 .....                 | 353 |
| 6.3.5 采用同步织构技术制备双轴织构取向缓冲层的相关机制 .....             | 354 |