

材料科学与技术丛书

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

(第3B卷)

金属与陶瓷的 电子及磁学性质

II

(英) K. H. J. 巴肖 主编

科学出版社



材料科学与技术丛书(第 3B 卷)

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

金属与陶瓷的电子 及磁学性质(Ⅱ)

〔英〕K. H. J. 巴肖 主编

詹文山 赵见高 等译

科学出版社

2001

图字：01-97-1615

图书在版编目(CIP)数据

金属与陶瓷的电子及磁学性质(Ⅰ)/〔英〕K. H. J. 巴肖主编,
詹文山等译. -北京: 科学出版社, 2001

(材料科学与技术丛书: 第3B卷)

书名原文: Electronic and Magnetic Properties of Metals and Ce-
ramics

ISBN 7-03-008062-9

I. 金… II. ①巴… ②詹… III. ①金属-电磁性质②陶瓷-电磁性
质 N. TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 67385 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

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年2月第一版 开本: 787×1092 1/16

2001年2月第一次印刷 印张: 36 3/4

印数: 1—2 300 字数: 846 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈杨中〉)

《材料科学与技术》丛书

中文版编委会

主编

师昌绪	国家自然科学基金委员会
柯俊	北京科技大学
R. W. 卡恩	英国剑桥大学

成员 (以姓氏笔画为序)

丁道云	中南工业大学
干福熹	中国科学院上海光机研究所
叶恒强	中国科学院金属研究所
刘嘉禾	北京钢铁研究总院
朱逢吾	北京科技大学
朱鹤孙	北京理工大学
吴人洁	上海交通大学
闵乃本	南京大学
周邦新	中国核动力研究设计院
柯伟	中国科学院金属腐蚀与防护研究所
施良和	中国科学院化学研究所
郭景坤	中国科学院上海硅酸盐研究所
徐僊	四川大学
徐元森	中国科学院上海冶金研究所
黄勇	清华大学
屠海令	北京有色金属研究总院
雷廷权	哈尔滨工业大学
詹文山	中国科学院物理研究所
颜鸣皋	北京航空材料研究院

总 译 序

20 世纪 80 年代末,英国剑桥大学的 R.W. 卡恩教授、德国哥丁根大学的 P. 哈森教授和美国康乃尔大学的 E.J. 克雷默教授共同主编了《材料科学与技术》(Materials Science and Technology) 丛书。该丛书是自美国麻省理工学院于 80 年代中期编写的《材料科学与工程百科全书》(Encyclopedia of Materials Science and Engineering) 问世以来的又一部有关材料科学和技术方面的巨著。该丛书全面系统地论述了材料的形成机理、生产工艺及国际公认的科研成果,既深刻阐述了有关的基础理论,具有很高的学术水平,又密切结合生产实际,实用价值较强。

该丛书共 19 卷(23 分册),分三大部分:第 1—6 卷主要阐述材料科学的基础理论;第 7—14 卷重点介绍材料的基本性能及实际应用;第 15—19 卷则着重论述材料的最新加工方法和工艺。

该丛书覆盖了现代材料科学的各个领域,系统而深入地对材料科学和技术的各个方面进行了精辟的论述,并附以大量图表加以说明,使其内容更加全面、翔实,论述也比较严谨、简洁。

有 400 余名国际知名学者、相关领域的学术带头人主持或参加了该丛书的撰写工作,从而使该丛书具有很高的权威性和知名度。

该丛书各卷都附有大量参考文献,从而为科技工作者进一步深入探讨提供了便利。

随着我国科学技术的飞速发展,我国从事与材料有关研究的科技人员约占全部科技人员的 1/3,国内现有的有关材料科学方面的著作远远满足不了广大科技人员的需求。因此,把该丛书译成中文出版,不但适应我国国情,可以满足广大科技人员的需要,而且必将促进我国材料科学技术的发展。

基于此,几年前我们就倡议购买该丛书的版权。科学出版社与德国 VCH 出版社经过谈判,于 1996 年 10 月达成协议,该丛书的中文版由科学出版社独家出版。

为使该丛书中文版尽快与广大读者见面,我们成立了以师昌绪、柯俊、R.W. 卡恩为主编,各分卷主编为编委的中文版编委会。为保证翻译质量,各卷均由国内在本领域学术造诣较深的教授或研究员主持有关内容的翻译与审核工作。

本丛书的出版与中国科学院郭传杰研究员的帮助和支持是分不开的,他

作为长期从事材料科学研究的学者,十分理解出版本丛书的重大意义,购买本丛书版权的经费问题就是在他的大力协助下解决的,特此对他表示感谢。另外,本丛书中文版的翻译稿酬由各卷主编自筹,或出自有关课题组和单位,我们对他们给予的支持和帮助表示衷心的感谢。

我们还要感谢中国科学院外籍院士、英国皇家学会会员 R. W. 卡恩教授,他以对中国人民的诚挚友谊和对我国材料科学发展的深切关怀,为达成版权协议做出了很大努力。

材料是国民经济发展、国力增强的重要基础,它关系着民族复兴的大业。最近几年,我国传统材料的技术改造,以及新型材料的研究正在蓬勃展开。为适应这一形势,国内科技界尽管编著出版了不少材料科学技术方面的丛书、工具书等,有的已具有较高水平,但由于这一领域的广泛性和迅速发展,这些努力还是不能满足科技工作者进一步提高的迫切要求,以及我国生产和研究工作的需要。他山之石,可以攻玉。在我国造诣较深的学者的共同努力下,众煦漂山,集腋成裘,将这套代表当代科技发展水平的大型丛书译成中文。我们相信,本丛书的出版,必将得到我国广大材料科技工作者的热烈欢迎。

为了使本丛书尽快问世,原著插图及表格中的英文说明一律未译,各卷索引仍引用原著的页码,这些页码大致标注在与译文相应的位置上,以备核查。

由于本丛书内容丰富,涉及多门学科,加之受时间所限,故译文中难免存在疏漏及不足之处,请读者指正。

师昌绪

柯俊

1998年3月于北京

丛 书 序

材料是多种多样的,如金属、陶瓷、电子材料、塑料和复合材料,它们在制备和使用过程中的许多概念、现象和转变都惊人地相似。诸如相变机理、缺陷行为、平衡热力学、扩散、流动和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系、不同类型材料中的电子的迁移与禁锢、原子聚集体的统计力学或磁自旋等的概念,不仅用来说明最早研究过的单个材料的行为,而且也用来说明初看起来毫不相干的其它材料的行为。

正是由于各材料之间相互有机联系而诞生的材料科学,现在已成为一门独立的学科以及各组成学科的聚集体。这本新的丛书就是企图阐明这一新学科的现状,定义它的性质和范围,以及对它的主要组成论题提供一个综合的概述。

材料技术(有时称材料工程)更注重实际。材料技术与材料科学相互补充,主要论及材料的工艺。目前,它已变成一门极复杂的技艺,特别是对新的学科诸如半导体、聚合物和先进陶瓷(事实上对古老的材料)也是如此。于是读者会发现,现代钢铁的冶炼与工艺已远超越古老的经验操作了。

当然,其它的书籍中也会论及这些题目,它们往往来自百科全书、年报、专题文章和期刊的个别评论之中。这些内容主要是供专家(或想成为专家的人)阅读。我们的目的并非是贬低同行们在材料科学与技术方面的这些资料,而是想创立自己的丛书,以便放在手边经常参考或系统阅读;同时我们尽力加快出版,以保证先出的几卷与后出的几卷在时效方面有所衔接。个别的章节是较之百科全书和综述文章讨论得更为详细,而较之专题文章为简略。

本丛书直接面向的广大读者,不仅包括材料科学工作者和工程师,而且也针对活跃在其它学科诸如固体物理、固体化学、冶金学、建筑工程、电气工程和电子学、能源技术、聚合物科学与工程的人们。

本丛书的分类主要基于材料的类型和工艺模式,有些卷着眼于应用(核材料、生物材料),有些卷则偏重于性能(相变、表征、塑性变形和断裂)。有些题材的不同方面有时会被安排在两卷或多卷中,而有些题材则集中于一专卷内(如有关腐蚀的论述就是编在第7卷的一章中,有关粘结的论述则是编在第12卷的一章中)。编者特别注意到卷内与卷间的相互引证。作为一个整体,本丛书完成时将刊出一卷累积的索引,以便查阅。

我们非常感谢 VCH 出版社的编辑和生产人员，他们为收集资料并最后出书，对这样繁重的任务作出了大量而又高效的贡献。对编辑方的 Peter Gregory 博士和 Deborah Hollis 博士、生产方的 Hans-Jochen Schmitt 经济学工程师表示我们的特别谢意。我们亦感谢 VCH 出版社的经理们对我们的信任和坚定的支持。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

P. 哈森 (Göttingen)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

我们的朋友和主编 P. 哈森教授，在今年五月份生病，并于 10 月 18 日在哥丁根 (Göttingen) 逝世，时年 66 岁。直到临终的最后一段时间，由于意志的驱使和对科学的热爱，他一直从事与我们合作的事业和参与有关的编辑工作。他的逝世对他的深为他热爱的家庭，他的同事们，他的教会，以及对全世界与他有密切联系的、从事金属物理和物理冶金方面研究的同行们是巨大的损失。

哈森博士为哥丁根大学的金属物理教授逾 30 年，直到近来退休，他的名字传遍了大西洋两岸。在他的祖国，他智慧的箴言，在公众界和学生间将会留下巨大的影响。他是《金属材料杂志》(Zeitschrift für Metallkunde) 的编辑，曾是哥丁根艺术与科学院 (Göttingen Academy of Arts and Sciences) 主席，Deutsche Gesellschaft für Metallkunde 理事会的中心人物，欧洲科学院院士，美国工程院院士。

1986 年，他首先倡议而最终导致出版《材料科学与技术》丛书前 18 卷，他亲自编著的关于相变方面的第 5 卷《材料的相变》于 1991 年出版，并获赞誉。我们感谢他对这一伟大事业的贡献，并以成功地完成这一事业作为对他的纪念。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

1993 年 10 月

前 言

第3卷旨在从材料科学及其与固体物理、固体化学和现代技术等各学科交叉的角度,对金属和陶瓷的电子学和磁学性质——这一极宽的领域做出全面的考察。

不可能将第3卷看成是金属和陶瓷的电子学和磁学性质的标准教科书。它并不试图对现在所知道的各种各样材料的这些性质作彻底的编纂或系统的安排,而只关注那些有助于理解和描述基本现象的重要成就,以及那些与技术应用有关的重要成就。事实说明不可能把所有需要考虑的材料都归入在一卷中,因此第3卷又分成两部分:卷3A和卷3B。现在,我很高兴地将其第二部分介绍给大家。

卷3B与卷3A能很好地对应,两者都是关于金属和陶瓷的电子学和磁学性质,但前者强调的是物理和物理现象,而这一部分强调的是材料。

卷3B的第8章是关于铁氧体的,这章所描述的化合物中,有一些是发现某些特殊磁相互作用类型的原型。一般来讲,铁氧体具有丰富的、各不相同的磁行为,其中有一些在现代技术中一直保持着重要的地位。

液态、非晶态和准晶态合金在原子尺度的结构中具有不同程度的无序性。但作为初步,在用各种不同模型去理解这些材料的物理性质时,可以认为它们具有相似的无序性。第9章将说明如何理解这些复杂材料经过长年累月后,就会晶化成有序的、简单的形式。而第14章则说明这些材料的一些技术应用。

在卷3B中有两章是关于在磁性和弹性间具有强相互作用的材料。第10章谈及一大类材料,其磁有序态的获得伴随有较大的体积变化,而这可以去抵消,甚至超过通常的热膨胀。第16章是关于磁致伸缩的,强调的是由外加机械应力引起磁化强度的变化,或者是相反的作用。

高密度记录是现代信息技术中最重要的问题,达到更高信息存储密度的需求,促使有关信息存储介质的研究探索不断更新,有两章涉及这一重要的材料类型,即第11章(关于磁记录材料)和第17章(关于磁光材料)。

氢原子的简单原子结构的特色在于,当它失去其惟一的电子时,其半径将急剧减小。这个性质就是氢能被一些金属以屏蔽质子的形式而吸附的原因。一般讲这种吸附是可逆的,而所研究的金属的物理性质会产生相当大的变化。第12章是讲纯金属及其固溶体的氢吸附行为以及所伴随的性能改变,接着的一章则是一大类金属间化合物的氢吸附行为及其性能变化。这些材料可作为储

能介质而日益引起广泛的兴趣。

铁磁和亚铁磁材料的特征是具有剩磁,显现出伴有矫顽力的磁滞回线。大多数技术应用都希望材料优化成具有高剩磁,然而对矫顽力的要求则明显差异很大。使用软磁材料的科学家要求低矫顽力,第 14 章谈的就是这方面的进展;相反对硬磁材料则要求高矫顽力,这在第 15 章里做了论述。

现在第 3 卷已经全部完成了,我要感谢所有作者的杰出贡献以及他们的辛勤工作,这是对金属和陶瓷的电子性能、磁性能的最综合性的处理能达到如此完美的保证。我还要特别感谢 Christina Dyllick 博士和 Peter Gregory 博士在编辑中所表现出的专长和耐性。

K. H. J. 巴肖
Eindhoven, 1993 年 8 月

目 录

8 铁氧体的磁性	(1)
9 液态、非晶态和准晶态合金的电性	(87)
10 Invar 合金	(143)
11 磁记录材料	(194)
12 金属中的氢	(238)
13 三元氢化物	(291)
14 软磁金属与合金	(348)
15 永磁材料	(398)
16 磁致伸缩材料	(463)
17 高密度磁光记录材料	(497)
索引	(535)

8 铁氧体的磁性

Maurice Guillot

Service National des Champs Intenses, CNRS, Grenoble, France

(戴道生 译校)

目 录

8.1 磁性概述	7
8.1.1 简单顺磁性	7
8.1.2 铁磁性	10
8.1.3 反铁磁性	12
8.1.4 亚铁磁性	13
8.1.4.1 引言	13
8.1.4.2 Néel 的亚铁磁理论	14
8.2 石榴石的磁性	15
8.2.1 晶体结构	15
8.2.1.1 引言	15
8.2.1.2 石榴石的对称性	16
8.2.2 亚铁磁石榴石	19
8.2.2.1 磁性	19
8.2.2.2 分子场系数	19
8.2.2.3 交换作用的各向异性	23
8.2.3 顺磁石榴石	24
8.2.3.1 引言	24
8.2.3.2 石榴石中的晶场	24
8.2.3.3 磁化强度测量	24
8.2.3.4 较高多重线的贡献	26
8.2.3.5 低温磁有序	26
8.2.3.6 结论	28
8.3 石榴石的磁各向异性	28
8.3.1 引言	28
8.3.2 实验方法	29
8.3.3 宏观描述	29
8.3.3.1 普遍方程	29
8.3.3.2 钇铁石榴石	30
8.3.3.3 稀土铁石榴石的各向异性常数	30

8.3.4	自旋重取向转变	32
8.3.4.1	引言	32
8.3.4.2	实验方法	33
8.3.4.3	自旋重取向的微观描述	33
8.3.5	稀土铁石榴石的磁致伸缩	38
8.4	低温下稀土铁石榴石的磁结构	39
8.4.1	引言	39
8.4.2	实验方法	40
8.4.3	结构因子的表示	40
8.4.3.1	稀土阳离子次晶格(24 c)的磁结构因子	41
8.4.3.2	Fe^{3+} 离子四面体次晶格(24 d)的磁结构因子	41
8.4.3.3	Fe^{3+} 离子八面体次晶格(16 a)的磁结构因子	42
8.4.4	磁离子的磁形状因子	42
8.4.5	高温 Néel 模型	43
8.4.6	“Umbrella(伞)结构”模型	43
8.4.6.1	引言	43
8.4.6.2	钽铁石榴石的伞结构	44
8.4.6.3	钽铁石榴石中伞结构的热演变	47
8.4.6.4	镱、镨、铕和钆铁石榴石的伞结构	48
8.5	在抵消温度附近铁石榴石的物理性质	49
8.5.1	引言	49
8.5.2	不存在外磁场时的抵消温度	49
8.5.2.1	晶格常数和热膨胀系数的温度关系	49
8.5.2.2	比热的确定	51
8.5.2.3	非共线磁结构的形成	52
8.5.3	存在外磁场时的抵消温度	53
8.5.3.1	倾斜自旋相	53
8.5.3.2	在抵消温度区内钆和钽铁石榴石的起始磁化率	54
8.5.4	结论	55
8.6	尖晶石铁氧体	56
8.6.1	尖晶石结构	56
8.6.1.1	概述	56
8.6.1.2	尖晶石中阳离子的分布	57
8.6.1.3	尖晶石中的金属离子	58
8.6.1.4	长程阳离子序(超结构)	59
8.6.1.5	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 中的阳离子序	59
8.6.1.6	结论	61
8.6.2	尖晶石的磁性	61
8.6.2.1	$\text{Me}^1\text{Fe}^{\text{II}}\text{O}_4$ 铁氧体的磁矩	61

8.6.2.2	$\text{Me}_{1-a}\text{Zn}_a\text{Fe}_2\text{O}_4$ 型混合铁氧体的磁矩和自旋值	62
8.6.2.3	尖晶石铁氧体中的交换常数	63
8.6.2.4	尖晶石中的转移积分	66
8.6.2.5	锰和镍铁氧体体系中的分子场系数	68
8.6.2.6	锂-锌铁氧体体系	70
8.6.2.7	尖晶石铁氧体的高磁化强度极限	72
8.6.2.8	锂-钛-锌尖晶石铁氧体体系	72
8.6.3	尖晶石铁氧体的反铁磁性和 Yafet-Kittel 角	75
8.6.3.1	尖晶石铁氧体的反铁磁性	75
8.6.3.2	尖晶石铁氧体中的反铁磁排列	76
8.6.3.3	锌-镍铁氧体体系中的 Yafet-Kittel 角	79
8.7	参考文献	83

符号与缩语表

a	晶格常数, 参数
a, b	分子场系数的函数
A	Landau-Lifshitz 交换常数
A, B	尖晶石中的单价离子(例如 Li, Na, Cu)
A, B	尖晶石结构中四面体、八面体位置
b, c, d, e, f	尖晶石结构中配位距离
b_j	第 j 个离子的散射长度
$B_j(x)$	Brillouin 函数
B_j	第 j 个原子的 Debye-Waller 因子
B_{kq}	晶场参数
C	居里常数; 比热
C_H	常磁场中的磁比热
C_{mag}	磁比热(表 8-7)
C_P	定压比热
C_{latt}	晶格对比热的贡献
C_{nuel}	核对比热的贡献
D	色散劲度常数
e	基本电荷
E	能量
E_a	磁各向异性性能
f_A	相关因子(斜效应)
f_P	磁形状因子
F	磁自由能

$F_m(H), F_n(H)$	磁、核结构因子
g	Landé(g -)因子
g	晶场各向异性张量
G	各向异性交换张量
h, k, l	Miller 指数(散射矢量)
$\mathcal{H}$	哈密顿量
$\hbar$	普朗克常量除以 2π
H	磁场;倒易空间的散射矢量
H_{exch}	交换场
H_m	分子场
I	强度
J	总角动量(包括核自旋)
J_{AA}, J_{AB}	交换作用
k	玻尔兹曼常量;某一种磁系统的近邻数
K_0, K_1, K_2, K_3	各向异性常数
l	轨道角动量量子数
L	总轨道角动量
$L(x)$	Langevin 函数
m_c	石榴石结构中稀土离子的磁矩
m_e	一个电子的剩余质量
m_J	磁量子数(总角动量分量)
m_l	磁量子数(轨道分量)
m_{pq}	第 p 个次晶格中第 q 个离子的磁矩
m_s	磁量子数(自旋分量)
M	磁矩;磁化强度
M_r	剩磁化强度
M_s	饱和磁化强度
Me	金属(尖晶石的一般形式)
n	主量子数;分子场系数
$n(p)$	第 p 个次晶格中磁离子数
n_B	磁矩;磁化强度
$n_{AA}, n_{BB}, n_{AB}, n_{BA}$	分子场系数
N'	最远邻(原子)
p	压力
p, q, r, s, t	尖晶石晶格中三角构形间距
r_j	第 j 个原子的位置矢量
r_{AA}, r_{AB}, r_{BB}	尖晶石 A, B 位最近邻间的最短间距
R	克分子气体常数

S	总自旋角动量
$\tilde{S}$	磁熵
S_i, S_j	自旋算符
$S(\alpha)$	原子 α 的磁矩
T	绝对温度
T_C	居里温度
T_{comp}	抵消温度
T_N	Néel 温度
T_0	“交叉(crossover)”温度
T_{tr}	自旋重取向相变温度
T_{YK}	磁转变(Yafet-Kittel)温度
U	能量
v	比容(体积比)
x	Brillouin 变数
x, y, z	局域对称轴
z	磁最近邻数
α	线性膨胀系数
α_i	磁矢量方向余弦($i=1-3$)
α_{YK}	Yafet-Kittel 角
Γ	表象(群论)
θ	H_{exch} 和 x 轴之间的夹角
θ	特征温度(Weiss)
θ_p	顺磁温度
Θ_D	德拜温度
λ	磁有序转变类型;波长
λ_{hkl}	磁致伸缩系数
μ	离子磁矩沿外磁场的平均分量
μ_B	玻尔磁子
μ_{eff}	有效磁矩
μ	磁矩
σ	约化磁化强度(M/M_0)
τ	约化温度(T/T_c)
ϕ	倾斜角
Φ	磁相
χ	顺磁化率
ψ	转角

AlG	铝石榴石
CF	晶场
CP	顺时钟方向排列
DC	直流电
DyYIG	铽-钇(混合)铁石榴石
emu	电磁单位
ESR	电子自旋共振
FMR	亚铁磁共振
GaG	镓石榴石
IG	铁石榴石
NMR	核磁共振
PSD	位敏探测器
RAIG	稀土铝石榴石(普适式 $R_3Al_5O_{12}$)
RE	稀土
RF	射频
RGaG	稀土镓石榴石(普适式 $R_3Ga_5O_{12}$)
RIG	稀土铁石榴石(普适式 $R_3Fe_5O_{12}$)
SR	自旋重取向
YAG	钇铝石榴石
YIG	钇铁石榴石
YK	Yafet-Kittel
□	尖晶石中空穴晶位