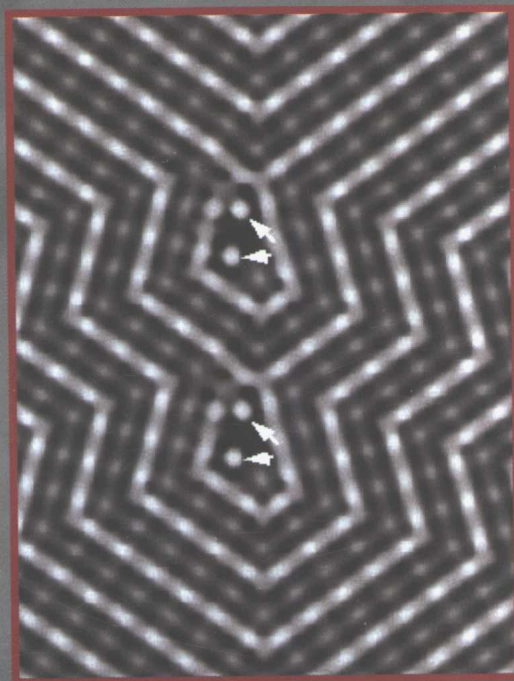


透射电子 显微学进展

叶恒强 王元明 主编



科学出版社

www.sciencep.com

透射电子显微学进展

叶恒强 王元明 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍透射电子显微学现状及进展。本书各章作者都在本学科领域从事多年的研究工作,并取得了有意义的,甚至是突破性的进展。全书共分四部分,分别介绍电子衍射,透射电子显微术,亚埃尺度电子显微术和透射电子显微术的应用,以及在交叉学科领域中的最新进展。

本书可供材料科学、物理、电子、生物等领域的科技人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

透射电子显微学进展/叶恒强,王元明主编. —北京:科学出版社,2003.8
ISBN 7-03-011895-2

I. 透… II. ①叶… ②王… III. 透射电子显微术-研究-进展 IV. 0766-11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 063290 号

责任编辑:童安齐 沈 建 / 责任校对:柏连海
责任印制:刘士平 / 封面设计:张 放

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2003年8月第一次印刷 印张:38 1/4 插页:2

印数:1—2 500 字数:880 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

序

中国电子显微学学者在 20 世纪中叶错失衍射衬度电子显微学的发展机遇之后,得益于国家的改革开放政局,20 世纪八九十年代,在高分辨电子显微学、高空间分辨分析电子显微学两个方面分别在国际上争得一席之地。与此同时,大批优秀的中青年走出国门,在世界各地一流的电子显微镜实验室中深造。不少国内的学者与海外学子迅速步入有关该研究领域的前沿,取得了丰硕的成果。

21 世纪科学技术的进步对物质结构在原子尺度及电子结构层次的表征需求迫切,纳米科技的兴起对纳米结构的特性测量及组织的直观可视研究也提到了日程上来。这都为透射电子显微学的拓展提供了广阔的空间。为了介绍 20 世纪 90 年代末以来本领域的状态及发展的趋向,同时也反映中国学者的最新研究成果,我们撰写了本书。全书主要介绍透射电子显微学的基本原理、重要技术发展及其在材料、信息、生物等学科中的应用。

本书编纂之时,欣逢著名科学家、教育家郭可信院士八十华诞。郭可信教授在合金钢中碳化物的研究、准晶的发现与研究、电子衍射晶体学等方面成就卓著。他是中国电子显微镜学会创始人之一,带领中国电子显微镜学者冲出亚洲、走向世界,做出了不可磨灭的贡献。他在研究工作中培养了大批研究人员,自我国恢复研究生制度以来,已培养百余名博士、硕士。郭可信教授的众多同仁、弟子衷心希望以自己的最新研究成果成文结集,献给敬爱的前辈与导师。郭先生在中国科学院金属研究所工作近 30 年,对金属研究所的建设、人才培养、树立优良学风,均居功至伟。在本书撰写过程中,金属研究所同仁给予鼎力支持,以表示对郭先生深深的敬意和祝愿。

受本书编委会之托,也作为郭先生的一名学生,我荣幸地为本书作序。我们希望,本书对广大读者认识透射电子显微学的发展,激励有志青年攀登科技高峰,会大有裨益。

叶恒强

2003 年 4 月 17 日

前 言

在电子显微镜中,具有能量为几十千至几兆电子伏特的高能电子入射到晶体上时,会和其中的原子核和电子发生强烈的交互作用。从原子核附近穿过的大部分入射电子,受原子的库仑力作用,运动方向发生变化(卢瑟福弹性散射)。晶体内部由于质点排列的规律性,散射波在某些方向得以加强并形成衍射波,而在其他方向相互干涉抵消,最终形成反映晶体有规律排列特点的电子衍射图和电子显微像。除了弹性散射外,入射电子还有可能与处在某些能级或能带上的电子碰撞而损失能量,同时将晶体从初态激发到能量更高的激发态。在释放能量的过程中,晶体中会发生能级或能带间的电子跃迁。如果这种碰撞和跃迁发生在靠近原子核的内层电子,就会产生二次电子、X 光光子或俄歇电子。显然,入射电子的能量损失谱或其产物的能量谱反映了晶体的化学组成和电子结构特征。透射电子显微学,是一门借助电子显微镜揭示并正确诠释这种交互作用所提供信息的综合性学科。它和物理、化学、材料科学、生物学、地学和信息学等基础学科,甚至和先进仪器制造相关的应用学科紧密联系,并互相促进,共同发展。

自从 20 世纪 30 年代第一台实验电子显微镜问世以来,特别是 20 世纪 80 年代初,具有高分辨率的透射电镜和分析电镜出现后,它的分辨水平日臻细微,功能更趋多样,已成为现代实验室中一种不可或缺的研究晶体结构和化学组成的综合仪器。利用现代高分辨电子显微镜和高空间分辨分析电子显微镜,我们可以在纳米或原子尺度研究物质的显微结构和电子结构,加深对组织结构与性能关系的理解,为相应学科的发展和新型材料与器件的研制提供重要的实验和理论依据。

在电子显微学发展的长河中,我国科学工作者也做出了贡献。最近 *Microscopy and Microanalysis* (2003, Vol. 9, 96~138) 刊登了 F. Haguenu (法国)、P. W. Hawkes (法国)、J. L. Hutchison (英国)、B. Satiat-Jeunemaitre (法国)、G. T. Simon (加拿大) 和 D. B. Williams (美国) 所写的“Key Events in the History of Electron Microscopy”一文,列举了电子显微学发展中从 1897 年至 1997 年的重要文献,其中就包括了列在电子光学与仪器部分由 D. N. Wang (王大能) 等撰写的关于二维晶体电子晶体学的论文 [*Nature*, Vol. 367 (1994), 614~621]; 列在物质与材料科学部分由 R. Guan (关若男)、K. H. Kuo (郭可信) 等撰写的用特殊的高分辨像模拟技术研究 Cu_{64}O 结构的论文 [*Acta Cryst.*, B 41 (1985), 219~225] 和由 K. H. Kuo (郭可信) 所领导的中国研究组关于准晶研究的综述论文 [*J. Electron Microsc. Tech.*, Vol. 7 (1987), 277~282]。

为了使读者了解高分辨电子显微学和高空间分辨分析电子显微学的最新进展,我们编纂了本书。本书各章作者都在本学科各领域从事过多年深入的研究工作,并在所撰写的领域取得了有意义的,甚至突破性的进展。本书的各章虽然也有基本原理和方法简介,但重点在最新进展上。有关本学科的基础知识和基本原理,读者可参阅已出版的有关专著。

本书共四部分:电子衍射(A),透射电子显微术(B),亚埃尺度电子显微术(C),透射电子显微术的应用(D)。为了适应超高分辨、结构与化学分析定量化、操作简便等高要求,

本书前三部分主要对透射电子显微镜衍射、成像及化学分析的原理、技术发展的现状进行分析和阐述。第四部分介绍在交叉学科领域应用的新进展。

电子衍射是成像理论的基础,衍射本身即可提供关于实验对象晶体结构的丰富信息。本书的第一部分前两章分别对动力学衍射理论与会聚束电子衍射做了系统介绍。有机分子和碳材料的组成原子多为轻元素,散射电子能力较弱,有机分子更不耐电子辐照,所以有关实验难度较大。本书有两章分别介绍该领域的最新进展。

用 X 射线能量色散谱和电子能量损失谱在亚微米、纳米尺度进行化学分析,在有了场发射电镜后又推进到新的水平。本书第二部分有三章分别介绍:电子能量损失谱原理及应用,通道增强微分析原子定位技术用于不完整晶体及无对称中心的极性测量,空间差值能谱分析及能谱显微学的新方法。全息术的提出虽源于电子成像,但却在激光领域先结了果。20 世纪 80 年代以来,在电镜电子源和相关设备改善的促进下,电子全息术重现生机。本书第二部分介绍了这一新技术在材料研究中的应用。在深入探索生物结构基因的同时,电子显微术以其高分辨率、计算机图像处理以其直观可视性在研究生物大分子中独树一帜。本书第二部分的其中一章对此作了系统叙述,所发表的彩色图片为本书增色不少。

尽管原子尺度的高分辨成像已经到了成熟阶段,但人类对微观世界的探求仍永无止境。由于计算机快速与海量计算的介入,电子透镜对三级以上像差的校正取得了突破性进展等原因,亚埃尺度的超高分辨成像理论与技术,在 21 世纪之初,终于从幕后走向前台,成为本领域新热点。本书第三部分从电子晶体学原理、衍射与成像互补技术、样品下表面出射波重构、球差校正电子显微术、原子分辨率、原子序数、衬度成像等多方面介绍这一正在成长中的领域。

作为一门实验科学,透射电子显微术对凝聚态物理、固态化学、岩矿、信息、材料、生物、能源等领域的交叉与渗透取得了极大的成功。以至透射电子显微镜成为研究型大学、研究所的分析中心和高新技术企业生产检验的核心设备。本书第四部分用较大的篇幅,分别介绍了透射电子显微术在上述领域中的最新应用成果。

本书每章自成系统,读者可以参阅有关章节目录,各取所需,不必逐章阅读。希望全体合作者的努力能对从事本领域研究和教学的人士有所裨益。参加本书撰写的作者众多,除各人风格迥异外,所使用的符号也依循着他们所熟悉的物理、化学、材料等不同领域的惯例,虽然编者在力所能及的有限范围内作了统一规范,但仍不尽如人意。诚恳希望读者对于不足与错误之处,提出宝贵意见。

本书编委会

叶恒强(主任)

王元明 卢柯 李斗星

2003 年 6 月

目 录

A 电子衍射

A1 高能电子动力学衍射的一般理论	彭练矛	1
1 引言		1
2 高能电子与晶体的相互作用		1
3 弹性与非弹性散射,光学势.....		2
4 高能电子衍射的散射振幅和散射截面		3
5 弹性电子衍射的描述		4
6 一般动力学电子衍射的描述		6
6.1 电子在平均势场中运动的波动方程		6
6.2 弹性电子散射的波动方程		7
6.3 弹性和非弹性电子散射的动态方程		7
6.4 非弹性电子散射截面		8
7 实验电子衍射数据与理论比较		9
附录:晶体的动力学形状因子.....		12
参考文献		13
A2 会聚束电子衍射的原理和应用	王仁卉 邹化民	15
1 引言.....		15
2 实验技术.....		16
3 双束动力学条件下的会聚束电子衍射——薄膜厚度和消光距离的测定.....		19
3.1 电子衍射的双束动力学理论		19
3.2 用 CBED 测定摇摆曲线		21
3.3 用 CBED 测定薄膜厚度和消光距离		22
4 运动学条件下的会聚束电子衍射——高阶 Laue 带线		23
4.1 HOLZ 线的形成		23
4.2 HOLZ 线图的标定与计算机模拟		25
4.3 影响 HOLZ 线图质量的因素		27
4.4 HOLZ 反射和 HOLZ 线的应用		27
5 用会聚束电子衍射测定晶体的对称性.....		28
5.1 可以用 CBED 技术测定的对称元素		29
5.2 31 个衍射群及其 CBED 测定		31
5.3 CBED 法确定点群		32
6 晶体与准晶体中位错伯格矢量的 CBED 测定		36

6.1	位错线引起的衍射线扭折的方向	36
6.2	位错线引起的衍射条纹分裂的节点数	38
6.3	晶体位错伯格矢量的离焦 CBED 测定	39
6.4	准晶位错伯格矢量的离焦 CBED 测定	42
7	晶体结构的 CBED 测定	44
7.1	会聚束电子衍射的多束动力学理论	44
7.2	结构因子的 CBED 测定	45
8	应变场的 CBED 研究	46
8.1	根据 HOLZ 线的位移测定界面应变场	46
8.2	根据 HOLZ 线的分裂测定界面应变场	51
	参考文献	53
A3	测定碳纳米管原子结构的电子显微学与电子衍射方法 秦禄昌	55
1	引言	55
2	碳纳米管的结构描述	55
3	碳纳米管的电子显微像	59
3.1	成像原理	59
3.2	单壁碳纳米管的电子显微像实验观察	61
4	电子衍射测定碳纳米管螺旋角	67
4.1	螺旋结构电子衍射理论	67
4.2	分立碳纳米管螺旋角的测定	75
4.3	筏状碳纳米管簇的螺旋角分布	77
4.4	单壁碳纳米管晶体	79
4.5	碳纳米衍射的倾斜与测量	79
4.6	碳纳米管衍射对称性	80
4.7	多层碳纳米管的电子衍射	80
	附录	80
	参考文献	82
A4	电子衍射在确定有机分子晶体薄膜结构中的应用 吴劲松	84
1	引言	84
2	电子衍射强度	85
2.1	电子散射与 X 射线散射——Mott 公式	85
2.2	电子衍射结构因子	86
2.3	晶体结构与结构因子	87
2.4	电子衍射强度与结构因子	87
3	电子衍射中的相位问题	90
4	直接法解决非周期结构的相位	96
5	结构因子的电子衍射精确测定	99
6	有机化合物晶体电镜薄膜样品的制备	101
7	有机物样品辐照损伤	102

8	电镜实验方法	103
9	有机化合物的会聚束电子衍射	104
10	并二苯的电子衍射	106
	参考文献	111

B 透射电子显微术

B1	生物大分子的电子显微学 ... 李慧林 施丹 任罡 隋海心 湛东华 王大能	114
1	在结构基因组时代的电子显微学	114
2	电镜样品的制备	115
2.1	碳膜与微栅的制备	115
2.2	负染色法	116
2.3	糖包埋法	116
2.4	非晶态冰包埋法	116
3	冷冻电子成像	117
3.1	低剂量成像	117
3.2	照相底片与数字化相机	118
3.3	电子束的能量过滤	119
4	计算机图像处理与三维结构重构概要	120
4.1	电子图像处理的一般原理	120
4.2	二维晶体图像的处理	122
4.3	螺旋对称颗粒图像的处理	124
4.4	单颗粒图像的处理	126
4.5	二十面体对称的病毒颗粒图像的处理	127
5	由电子显微学测定的几个生物大分子结构	129
5.1	膜蛋白分子结构的电子晶体学研究	129
5.2	用单颗粒法测定的 8Å 分辨率的微管结构	138
5.3	完整单纯疱疹病毒三维结构研究	141
6	生物大分子电子显微学领域中现存问题与发展前景	144
	参考文献	145
B2	电子通道及 ALCHEMI	姜南 149
1	引言	149
2	电子通道效应的基本理论	153
2.1	解析近似	153
2.2	理论与实验比较	156
3	ALCHEMI 及应用	158
3.1	子晶格占位测定与理论预测的比较	159
3.2	ALCHEMI 在不完整晶体中的应用	160
3.3	非中心对称的极性测量	162
4	ALCHEMI 的准确性	166

5	结论及展望	171
	参考文献	172
B3	电子能量损失谱及其在材料科学中的应用	段晓峰 孔翔 174
1	引言	174
1.1	微束电子衍射(Microbeam Diffraction, μ -D)和会聚束电子衍射(Converge Beam Electron Diffraction, CBED)	174
1.2	X射线能谱(Energy Dispersion Spectroscopy, EDS)	175
1.3	电子能量损失谱(Electron Energy-Loss Spectroscopy, EELS)	175
1.4	电子能量过滤显微术	175
1.5	电子发射源的能量发散度	176
2	电子能量损失谱的基本原理	176
2.1	原子中的电子能级	177
2.2	高能入射电子与样品的相互作用	180
3	电子能量损失谱在材料科学中的应用	187
3.1	等离子激发电子能量损失谱	187
3.2	原子的内层电子激发的能量损失谱	188
3.3	电子能量损失谱及其精细结构与晶体取向的关系	190
3.4	电子能量损失谱应用举例	191
	参考文献	194
B4	纳米宽界面成分的定量分析	章效锋 197
1	引言	197
2	一些基本概念	198
3	空间差值扫描能谱分析法	200
3.1	EDS 面扫描分析方法	200
3.2	EELS 面扫描分析方法	201
3.3	线扫描分析方法	202
4	空间差值点式能谱分析法	203
4.1	实验方法及束斑尺寸的选择	203
4.2	一个实例:SiC 晶界中 Al 成分的定量分析	204
4.3	关于样品厚度影响的讨论	207
5	成分电子显微像晶界成分分析方法	210
5.1	能谱显微像方法	210
5.2	Z-衬度像与同步 EELS 分析方法	212
	参考文献	214
B5	电子全息术在材料研究中的应用	王岩国 217
1	引言	217
2	离轴全息成像原理	217
3	电子全息图的特征	219
4	电子全息实验技术	220

5	影响电子全息像质量的因素	221
5.1	场发射电子枪	221
5.2	照明电子束	221
5.3	样品	222
5.4	菲涅耳衍射	222
5.5	电镜参数的影响	222
6	电子全息像的记录	224
6.1	光学记录	225
6.2	数字化记录	225
7	电子全息图的重构	225
8	电子全息术的应用	227
8.1	材料势场对入射电子波相位的影响	228
8.2	相位衬度像和振幅衬度像	230
8.3	样品厚度的测量	230
8.4	平均内势的测定	231
8.5	消除噪声	231
8.6	相位差放大	232
8.7	物镜球差的矫正	232
8.8	介电陶瓷界面电势场分布的测量	233
8.9	隧道结势场分布的测量	236
	参考文献	237

C 亚埃尺度电子显微术

C1	电子晶体学	邹晓冬 Sven Hovmoeller	239
1	引言		239
2	电子晶体学的发展历史		239
2.1	电子衍射		239
2.2	电子显微学及晶体学图像处理		240
3	电子晶体学的基础理论		240
3.1	晶体结构,晶体内静电势分布及晶体结构因子		240
3.2	晶体原子位置与结构因子的关系		241
4	用电子衍射确定晶体结构		243
5	用高分辨电子显微像确定晶体结构		245
5.1	通过晶体学图像处理用高分辨电子显微像确定晶体结构		245
5.2	测定并补偿高分辨电子显微像的高焦与像散		247
6	电子晶体学的应用		249
7	大晶胞晶体的三维重构		251
8	用晶体学图像处理研究晶体缺陷及界面		254
9	结论		256

参考文献.....	256
C2 衍射晶体学在高分辨电子显微学求逆中的作用	李方华 258
1 高分辨电子显微学的逆问题	258
1.1 高分辨电子显微像的成像过程	258
1.2 成像的逆过程和求逆	258
2 衍射晶体学与高分辨电子显微学相结合的优越性	260
2.1 弱相位物体近似	260
2.2 电子衍射花样与显微像的互补关系	261
2.3 衍射晶体学与高分辨电子显微学相结合的优越性和可行性	261
3 赝弱相位物体近似	262
3.1 透射函数	263
3.2 衍射波函数	263
3.3 像波函数和像强度	264
3.4 像衬随晶体厚度和原子重量的变化	264
3.5 电子晶体学图像处理技术的理论基础	266
4 最大熵原理和直接法在求定结构像中的作用	267
4.1 高分辨电子显微像的解卷处理	267
4.2 直接法解卷	267
4.3 最大熵解卷	268
5 衍射分析在提高结构像分辨率中的应用	268
5.1 直接法相位外推	268
5.2 电子衍射强度的调制	268
5.3 参考重原子法和 Wilson 统计建立校正电子衍射强度的经验方法	269
5.4 结合电子衍射强度校正的相位外推	269
5.5 傅里叶迭代在修正赝电势图中的应用	269
6 解卷和相位外推在测定微小晶体结构中的应用	270
6.1 $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1})_2\text{CoO}_y$ 晶体结构测定	270
6.2 'Pb'-1212 晶体结构测定	273
7 结论	275
参考文献.....	275
C3 高分辨电子显微像的模拟计算与重构	陈江华 王元明 杨奇斌 278
1 引言	278
2 样品下表面出射面波函数的计算	280
2.1 描述高能电子散射的薛定谔方程与多片层法	281
2.2 多片层法的快速计算与正确使用	285
2.3 比相位近似更精确的像光栅表达式	286
3 样品下表面出射面波函数的重构	287
3.1 TF-EWR 原理简介	287

3.2	TF-EWR 技术的现状及其在材料科学中的应用	290
3.3	一种从电子全息图重构出射面波函数的方法	294
4	结论	296
	参考文献	297
C4	材料结构的超显微术研究	贾春林 299
1	引言	299
2	高分辨率透射电子显微镜及提高分辨率的途径	299
2.1	超高压高分辨率透射电子显微镜	300
2.2	物镜球差校正高分辨率透射电子显微镜	300
2.3	系列欠焦像的出射波函数重构	301
3	BaTiO ₃ 中孪晶界面的原子结构及原子位移的出射波函数重构研究	303
3.1	BaTiO ₃ 中 $\Sigma=3(111)$ 孪晶界面的原子结构及原子位移	304
3.2	BaTiO ₃ 中 $\{111\}$ 微孪晶交割节点的原子结构	308
4	材料结构的物镜球差校正高分辨率透射电子显微术研究	312
5	结论	315
	参考文献	315
C5	高分辨扫描透射电子显微学技术——原子分辨率原子序数衬度成像	辛燕 Steve J. Pennycook 317
1	引言	317
2	基本成像原理	319
2.1	高分辨扫描透射 Z 衬度成像的基本过程	319
2.2	非相干 Z 衬度像特点	320
2.3	高分辨扫描透射 Z 衬度成像条件-电子束斑及环形探测器	323
2.4	Z 衬度成像理论——物理图像解释	326
2.5	Z 衬度像的处理及计算机模拟	328
3	原子分辨率电子能量损失谱	330
4	材料中的应用及实验中的具体问题	330
4.1	得到 Z 衬度像的实验方法	330
4.2	高分辨 Z 衬度像在材料中的应用举例	332
4.3	实验中常出现的问题	337
5	展望及新的发展	338
	参考文献	339
D 透射电子显微术的应用		
D1	集成铁电学中电子显微学相关的一些问题研究	金红政 朱静 341
1	引言	341
1.1	研究背景	342
1.2	研究面临的问题	343

1.3	研究内容和意义	344
2	BST 薄膜的微观结构表征:界面层的发现	344
2.1	BST 薄膜样品的电镜观察	344
2.2	界面层的结构及起源	348
3	界面层电容串联模型解释尺寸效应	350
3.1	尺寸效应	350
3.2	界面层电容串联模型	351
3.3	特殊电极时尺寸效应的消失	353
3.4	Ruddlesden-Popper 层错模型对尺寸效应的完美解释	354
4	界面层电场屏蔽模型解释疲劳失效	355
4.1	疲劳失效	355
4.2	特殊电极和疲劳问题的解决	356
4.3	无疲劳失效的特殊铁电薄膜材料	357
4.4	流行的疲劳模型:畴界钉扎模型	357
4.5	界面层电场屏蔽模型	358
4.6	尺寸效应和疲劳效应的对比	360
5	总结和展望	361
	参考文献	361
D2	电子显微学在巨磁电阻多层膜研究中的应用	沈峰 张泽 364
1	引言	364
2	实验结果与分析讨论	365
2.1	$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ 磁性多层膜的高分辨及元素成像	365
2.2	氧化层镜面反射自旋阀的显微结构研究	372
2.3	磁隧道结氧化层势垒的高分辨电镜和电子全息研究	376
3	结论	379
	参考文献	380
D3	庞磁电阻材料的结构与性能	李斗星 382
1	巨磁电阻效应的发现及巨磁电阻材料的结构与性能	382
1.1	巨磁电阻效应的发现与研究	382
1.2	掺杂的稀土锰酸盐的晶体结构	385
1.3	掺杂的稀土锰酸盐的基本性质、相图、庞磁电阻效应和微观结构	388
2	影响庞磁电阻材料性能的因素	406
2.1	离子半径的影响	406
2.2	电荷有序的影响	409
2.3	压力的影响	413
2.4	阳离子价态和氧非化学计量比的影响及其测定	414
2.5	点阵失配应变的影响	416
2.6	颗粒尺寸的影响	420

2.7 其他因素的影响	420
参考文献	421
D4 材料微结构的电子显微学与电子结构研究	于荣 贺连龙 叶恒强 426
1 引言	426
2 实验与计算方法	426
3 W 在 TiAl 基合金片层组织中的行为	427
3.1 电子显微学分析	427
3.2 W 的 B2 稳定化效应的电子结构分析	429
4 Si 和 Al 的 TiC 孪晶稳定化效应	434
4.1 Si 诱导的 TiC 孪生	434
4.2 Al 诱导的 TiC 层错与孪晶	438
4.3 TiC 的孪晶界面能	439
5 结论	442
参考文献	443
D5 介孔分子筛的电子显微分析	周午纵 445
1 引言	445
2 实验方法概要	445
3 氧化硅介孔分子筛结构	447
3.1 二维六方相	447
3.2 三维六方相	453
3.3 立方相	456
3.4 无序相	460
4 介孔分子筛为载体的新型催化剂	462
4.1 骨架掺杂	462
4.2 孔道内壁载入催化剂	463
5 介孔分子筛为模板合成纳米材料	466
5.1 纳米线	466
5.2 三维纳米线骨架	467
6 结束语	469
参考文献	469
D6 AlN、La—Sr—Mn—O、Si 等低维纳米材料中界面的电子显微学	马秀良 473
1 引言	473
2 不同点阵间取向关系的几何模型	474
3 不同界面体系中的晶体学取向关系	475
3.1 立方 TiN/立方 MgO	475
3.2 六方 AlN/立方 TiN	477
3.3 正交点阵与立方点阵构成的界面体系——La—Sr—Mn—O/SrTiO ₃	482
3.4 菱方 La—Sr—Mn—O 与立方 SrTiO ₃ 构成的界面体系	487

3.5	一维纳米 Si 线中的(111)孪晶以及对一维生长特性的影响	490
4	小结	492
	参考文献	492
D7	准一维纳米线材料的结构和物理性能原位测量	王中林 高瑞平 495
1	引言	495
2	原位透射电子显微镜技术的实验装置及测试原理	495
	实验装置	495
3	单根纳米管力学性能的原位测量	497
3.1	碳纳米管弯曲模量的测试原理	497
3.2	碳纳米管的弯曲模量	498
3.3	测量微量物质的纳米称	506
4	单根碳纳米管的量子导电性	508
4.1	碳纳米管的弹道式量子导电效应的试验研究	508
4.2	单层导电模型对实验结果的解释	511
5	碳纳米管的场致发射	513
5.1	碳纳米管场致发射现象的显微观察	513
5.2	单根碳纳米管功函数测量的实验装置及原理	515
5.3	单根碳纳米管功函数的测定及结果讨论	517
5.4	在外加电场作用下碳纳米管的结构损伤形式	519
6	小结	520
	参考文献	521
D8	在铁纳米颗粒上外延生长的惰性氧化膜的透射电子显微镜研究	冯国光(王元明译)523
1	引言	523
2	实验	524
2.1	等离子体蒸气和气相沉积	524
2.2	电子衍射和 HRTEM 像	524
3	薄氧化膜在金属表面上的生长——Caberra 和 Mott 氧化理论	524
4	TEM 结果	525
4.1	60%截角纳米颗粒	525
4.2	30%截角纳米颗粒	527
4.3	在电镜中强电子束辐照下被钝化的铁纳米颗粒上氧化物的生长	532
5	纳米颗粒上氧化物的生长及其稳定性	533
5.1	生长的形貌依赖性	533
5.2	生长对温度和氧压的依赖性	534
6	结论和小结	535
	参考文献	535
D9	氮化镓纳米线的结构与缺陷	张锦平 吴源 程国胜 537
1	{10 $\bar{1}$ 0} 氮化镓纳米线	537

2	{0001} 氮化镓纳米线	539
3	氮化镓纳米线中的层错结构	543
4	结论	544
5	附录: GaN 纳米线的合成方法	544
	5.1 纳米空间模板法	544
	5.2 准一维气-液-固生长法	548
	参考文献	550
D10	半导体量子点的电子显微学研究	廖晓舟 邹进 552
1	引言	552
	1.1 什么是量子点	552
	1.2 量子点如何生长	553
	1.3 重要结构参数及其测量技术	553
2	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ 量子点形状的测定	554
	2.1 未包埋的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ 量子点	554
	2.2 包埋的量子点	555
3	像模拟法测定量子点的成分分布	557
	3.1 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ 量子点	557
	3.2 $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$ 量子点	561
4	能量过滤成像法测定量子点的成分分布	564
	4.1 未包埋的 $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$ 量子点	564
	4.2 $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$ 量子点堆垛	566
5	$\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$ 量子点的生长机制	568
6	成分分布对量子点形状的影响	571
7	结论	573
	参考文献	573
D11	二维十次对称准晶及晶体近似相的电子显微学研究	李兴中 马秀良 575
1	引言	575
2	二维准周期点阵与准周期拼图	575
	2.1 Penrose 拼图	575
	2.2 双色 Penrose 拼图	576
	2.3 Binary 准周期拼图	577
	2.4 准周期点阵的高维空间描述	578
3	二维十次对称准晶	578
	3.1 二维十次对称准晶的分类	579
	3.2 二维十次对称准晶结构描述	579
4	晶体近似相	580
	Penrose 拼图周期近似	580
5	研究实例	581