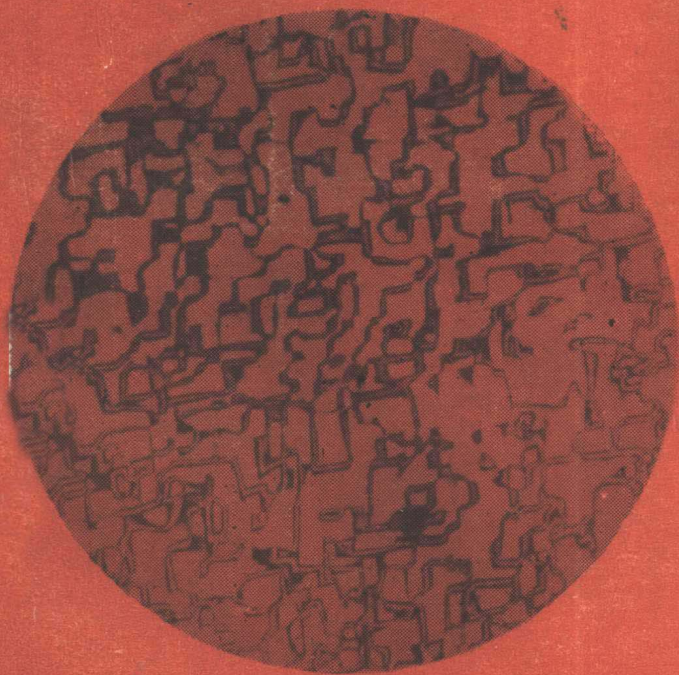


材料科学丛书

# 透射电子显微学

黄孝瑛 编著 上海科学技术出版社



材料科学丛书

---

# 透射电子显微学

---

黄孝瑛

---

上海科学技术出版社

---

材料科学丛书  
透射电子显微学  
黄孝瑛

上海科学技术出版社出版  
(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 江苏扬中印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 19 字数 499,000

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数 1—14 000

统一书号: 15119·2443 定价: 4.85 元

## 内 容 提 要

本书对应用于材料科学的透射电子显微术作了比较全面的叙述。以主要篇幅讨论了电子衍射和衍衬成象(图象解释)的分析原理和方法。叙述深入浅出,物理概念清楚;通过较多实例,介绍具体分析方法和步骤,有助于读者较快掌握这一近代实验分析技术。书末还附有多种作者收集、计算和绘制的数据、图表,对分析工作十分有用。本书适用于大专院校金属物理、金相和金属材料等专业师生及广大电镜工作者参考阅读。

## 《材料科学丛书》序

无论在发展农业、工业、国防和科学技术方面，还是在人民生活方面，材料都是不可缺少的物质基础。材料的品种、数量和质量无疑是国家现代化程度的标志之一。随着材料的广泛生产和研究工作的不断深入，以及与材料有关的基础学科的日益发展，对材料的内在规律有了进一步了解，对各类材料的共性初步得到了科学的抽象，从而诞生了“材料科学”这个新的学科领域。

材料科学主要研究材料的组分、结构与性能之间的相互关系和变化规律，它是介于基础科学与应用科学之间的一门应用基础科学，与物理、化学、化工、电子、冶金、陶瓷等学科相互交叉、彼此渗透。热力学、动力学、固体物理、固体化学、化学物理等基础学科为材料科学提供理论基础，而材料科学又为应用科学提供发展新材料、新工艺和新技术的途径。

从当前来看，材料科学的发展大致有下列几方面的趋势：

(1) 高分子材料原料丰富、性能优良，在结构材料中所占的位置日益重要。塑料、合成橡胶和合成纤维比其他传统材料将有更大的发展。

(2) 功能材料显示广阔的发展前景。半导体的广泛应用，集成电路的发展，红外、激光和超导材料的发现和应用，使功能材料犹如异军突起，建立奇功。

(3) 在新能源材料方面，随着太阳能的利用，磁流体发电等的进展，出现了各种换能和储能材料，并已普遍受到重视。

(4) 对结构材料和耐磨、耐蚀等材料提出更高的要求，包括严酷的使用条件、更长的使用寿命等。

(5) 复合材料、定向结晶材料、韧化陶瓷、定向石墨以及各种类型的表面处理与涂层的利用，使材料的效能进一步得到发挥。

(6) 探索材料在极端条件下的性能,例如玻璃态金属、超低温下的金属及金属氢都具有优越的性能。

(7) 改进制备工艺,提高质量,改进设计,更有效地使用材料。

(8) 对材料科学的基础研究趋向于更加深入和细致。尤其在表面,非晶态,原子象,固态中的杂质与缺陷,一维与二维结构,非平衡态,相变的微观机制,变形、断裂和磨损等的宏观规律和微观过程以及点阵结构的稳定性等领域,探索性研究正日益活跃。

人们期望,对材料基本规律的掌握将有助于按预定性能设计材料的原子或分子组成以及结构形态等。

我国在1978~1985年科学技术发展规划中把材料科学列为重点之一。我们必须十分重视和大力发展材料科学。

为了及时传播材料科学的基础理论,总结研究成果并扩大其工程应用,以有助于更快、更广泛地提高我国材料科学技术的水平,我们成立了《材料科学丛书》编辑委员会,由上海科学技术出版社出版这套丛书。

本丛书分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三个方面,选题包括材料科学的基础理论,研究方法和测试技术,研究成果,以及实际应用等方面。热忱地期望我国广大科学工作者,共同策进本丛书的编辑、出版工作,努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

《材料科学丛书》编辑委员会

一九七九年十二月

## 《材料科学丛书》编辑委员会

金属材料方面      无机非金属材料方面      高分子材料方面

主任委员 周志宏      主任委员 严东生      主任委员 钱宝钧

委员(以姓氏笔画为序)      委员(以姓氏笔画为序)      委员(以姓氏笔画为序)

马龙翔 王之玺  
王启东 田庚锡  
师昌绪 许顺生  
孙珍宝 杜鹤桂  
李恒德 吴自良  
汪 显 沈华生  
邹元炳 张文奇  
张沛霖 陈新民  
邵象华 林栋梁  
郁国城 周行健  
周宗祥 周惠久  
柯 俊 胡为柏  
钱临照 徐采栋  
徐祖耀 顾翼东  
郭可信 黄培云  
葛庭燧 傅元庆  
童光照 谭庆麟  
魏寿昆

丁子上  
干福熹  
江作昭  
苏 锵  
吴中伟  
袁润章  
黄蕴元  
盛绪敏  
程继健

于 翹  
王孟钟  
方柏容  
孙书棋  
李世璿  
吴人洁  
吴祥龙  
张承琦  
范 棠  
姚锡福  
钱人元  
徐 僖  
郭钟福

# 序

电子显微镜的发明距今已整整五十年了。它的问世对科学技术的发展给以无可估量的巨大影响,随之产生一门新学科曰电子显微术或称电子显微学。近三十年来电子显微术有很大的发展,已成为探索微观世界的一门强有力的以实验为基础的科学技术。它在物理学、材料科学和生物学、医学中得到极为广泛的应用。它所获得的研究成果成功地验证并发展了关于晶体结构和晶体缺陷的许多理论推测,特别在近几年来对晶格象的深入研究,丰富了人们对物质微观结构的认识。

透射电子显微镜是电子显微镜中获得最早发展、用途最广的一种。本书系统地介绍了透射电子显微术的基本原理、实验方法和分析技术,着重于材料科学中的应用。内容包括两大部分:第一部分用了较多篇幅详细阐述电子衍射的基本原理。电子衍射原理是解释衍射象的基础,在这一部分中作者详尽地介绍了一般电子衍射谱和特殊电子衍射谱(如孪晶、高阶劳厄区、菊池线等)的诠释方法。第二部分共五章,介绍衍射成象和衍射衬度的分析方法,特别着重讨论晶体缺陷和合金中第二相的衬度效应及分析方法;对几种主要晶系中的层错、全位错、不全位错、位错环、共格沉淀、不共格沉淀及其界面衬度现象都作了讨论。

综观全书,对透射电子显微术的基本概念,给出了简明而清晰的物理图象,对数学推导可以简略的地方则从简,这对从事材料科学的工作者来说是有理由这样做的。阐述工作原理之后,往往配有典型示例,能加深读者的理解并便于应用。这是本书特点之一。

作者黄孝瑛同志在北京钢铁研究总院工作多年,在电镜工作上有极为丰富的经验、精湛的学术见解。本书不仅反映了这个领域当前国内外的先进水平,并在一定程度上,总结了作者多年来在



从事电镜工作中积累的经验和学识。本书在出版之前曾多次在多种训练班上作为教材讲授过，反映是良好的。因此敢为推荐于读者。是为序。

钱昆

## 前 言

电子显微镜是近代材料研究工作中的一个重要手段。以它为主要工具,对材料的宏观形貌和微观结构进行研究的科学,称为透射电子显微学。自从本世纪三十年代初第一台电子显微镜问世以来,在不到五十年时间里,它由最初只能起到高倍金相显微镜的作用,发展到目前已能深入揭示材料的内部组织结构,并把金属的表面形貌及其内部组织结构和性能有机地结合起来,形成一门具有强大生命力的、应用十分广泛的科学技术。

人类对于客观物质世界的认识,总是由表及里,从宏观到微观,逐步深入发展的。金属材料的物理力学性能,是其内部不同组织结构的反映。因此,把两者紧密结合起来,是近代材料研究工作的必然趋势和主要特点。近代电子显微镜在对材料表面形貌进行观察的同时,还可以对内部组织结构进行电子衍射分析,使它兼有显微观察和结构分析仪器的性能。它与扫描电子显微镜、离子显微镜、电子探针和俄歇谱仪等分析仪器一起,在材料研究工作中,正显示出日益重要的作用。

电子衍射分析方法是透射电子显微学的基础。近十余年来,作为电子衍射基本原理的衍射动力学理论,虽然没有取得引人注目的突破,但由于电子计算机的应用,在电子衍射具体分析方法上,却有不少可喜的进展。电子衍射分析技术是随着电子显微镜分辨本领和穿透能力的提高,开展了对金属薄膜的直接观察而发展起来的。它的基础仍然是电子衍射分析原理。十余年来,衍射分析技术所取得的进展,也是人所公认的。

透射电子显微学的主要内容,可以归纳为:透射电子象的成像原理,电子衍射原理和衍射原理及分析方法三大部分。本书在接上

途顺序进行介绍时,力图反映当前国内外的先进水平,为读者进一步探索这一领域,掌握该项先进技术提供基础。

本书在编写过程中,始终得到钱临照教授的热情鼓励和关怀,在此表示深深的感谢。此外,还得到刘曼朗、潘天喜、原林祥、崔玉梅、姚振梅等同志的帮助,谨致谢意。

作者学识有限,水平不高,错讹之处,在所难免,敬希读者批评指正。

**编 者**

# 目 录

## 序

## 前言

第一章 透射电子显微镜的原理和构造 .....	1
§ 1-1 引言 .....	1
§ 1-2 电子光学原理简述 .....	2
§ 1-3 电子显微镜的构造 .....	7
一、照明系统 .....	8
二、成象系统 .....	10
三、观察和记录系统 .....	16
四、真空系统 .....	17
§ 1-4 当前电子显微镜的发展动向 .....	18
第二章 电子衍射基础 .....	24
§ 2-1 引言 .....	24
§ 2-2 电子的性质 .....	24
§ 2-3 运动电子与物质交互作用产生的信息 .....	26
§ 2-4 原子对电子的散射 .....	30
一、描述运动电子的方程及其解 .....	30
二、原子对电子的散射 .....	32
§ 2-5 单胞对电子的散射 .....	35
§ 2-6 晶体对电子的散射 .....	41
第三章 电子衍射实验方法 .....	49
§ 3-1 引言 .....	49
§ 3-2 选区域电子衍射原理 .....	49
§ 3-3 $L\lambda$ 值的意义及其测定方法和误差来源 .....	57
一、 $L\lambda$ 值的意义 .....	57
二、测定 $L\lambda$ 常数的方法 .....	59

三、仪器常数 $L\lambda$ 的误差来源 .....	59
§ 3-4 衍射谱相对于显微象偏转角的测定 .....	61
§ 3-5 试样制备方法 .....	63
<b>第四章 倒易点阵</b> .....	<b>72</b>
§ 4-1 引言 .....	72
§ 4-2 正空间和倒空间、倒易点阵的引入 .....	73
§ 4-3 倒易面(标准单晶衍射图谱)的绘制方法 .....	78
§ 4-4 借助倒易点阵方法计算晶面间距、晶面夹角及晶向长度 .....	81
一、求晶面间距与晶面指数的关系 .....	81
二、求晶面夹角余弦的表达式 .....	84
三、求晶向长度的表达式 .....	93
§ 4-5 正点阵与倒易点阵的指数互换 .....	93
一、正点阵与倒易点阵的互换公式和运算矩阵 .....	93
二、六方晶系指数换算中的问题 .....	98
§ 4-6 晶体几何形状对倒易点形状的影响 .....	102
<b>第五章 标定电子衍射谱的一般程序</b> .....	<b>107</b>
§ 5-1 引言 .....	107
§ 5-2 分析过程综述 .....	107
§ 5-3 立方晶系衍射谱的标定 .....	114
一、查 $\sqrt{N}$ 比值表法 .....	114
二、特征平行四边形的标定方法 .....	120
三、计算尺标定法 .....	122
四、利用标准衍射图谱进行标定 .....	123
五、指数标定注意事项 .....	125
§ 5-4 六方晶系衍射谱的标定 .....	131
一、一般讨论 .....	131
二、六方晶系衍射谱的标定方法 .....	134
§ 5-5 四方晶系电子衍射谱的标定 .....	139
§ 5-6 正交晶系电子衍射谱的标定 .....	142
§ 5-7 多晶电子衍射谱的标定 .....	143
<b>第六章 孪晶电子衍射谱的分析</b> .....	<b>146</b>
§ 6-1 引言 .....	146
§ 6-2 孪晶的晶体几何学 .....	143

§ 6-3	立方晶系孪晶衍射谱的分析	151
一、	基本公式	151
二、	讨论	152
三、	孪晶衍射谱的标定方法	158
§ 6-4	高次孪晶电子衍射谱的分析	163
§ 6-5	孪晶矩阵的一般表达式(任意晶系孪晶分析)	166
一、	任意晶系孪晶晶面及晶向指数的转换矩阵	166
二、	任意晶系孪晶转换矩阵应用于各晶系	169
§ 6-6	标定孪晶电子衍射谱的解析方法	173
<b>第七章</b>	<b>高阶劳厄区电子衍射谱的分析</b>	<b>179</b>
§ 7-1	引言	179
§ 7-2	形成高阶劳厄区衍射谱的几何学讨论	179
一、	概述	179
二、	不对称劳厄区	181
三、	对称劳厄区	191
§ 7-3	高层倒易面 $(uvw)_N^*$ 上倒易点在零层倒易面 $(uvw)_0^*$ 上的投影位置	194
一、	取原倒易点阵坐标为坐标系进行计算	194
二、	取新坐标轴 $I^*$ 、 $G_1$ 和 $G_2$ 进行计算	197
§ 7-4	高阶劳厄区衍射谱标定程序及举例	198
一、	与标定有关的若干问题	198
二、	计算举例	200
§ 7-5	标定高阶劳厄区衍射谱的直接方法	205
§ 7-6	高阶劳厄区衍射谱的应用	208
一、	利用零阶劳厄区上高阶斑点位置鉴定物相	209
二、	利用高阶劳厄区的曲率,测定倒易面间距,以鉴定物相	210
<b>第八章</b>	<b>菊池衍射谱分析</b>	<b>212</b>
§ 8-1	引言	212
§ 8-2	菊池衍射花样的几何学	213
§ 8-3	菊池线的指标化	222
一、	零阶劳厄区菊池线指标化	222
二、	高阶劳厄区菊池线指标化	224
三、	菊池图	224

§ 8-4 菊池线的应用	232
一、晶体取向的精确测定	233
二、衍衬分析	238
三、校正电子显微镜试样倾动台的角度	238
四、偏离参量 $s$ 的测定	240
五、电子束波长(加速电压)的校正	241
六、临界电压测定	243
<b>第九章 取向关系测定和迹线分析方法</b>	<b>245</b>
§ 9-1 引言	245
§ 9-2 电子衍射测定取向关系的一般程序	246
§ 9-3 描述两相取向关系的矩阵方法	252
一、矩阵方法概述	253
二、矩阵方法应用于测定取向关系	256
§ 9-4 迹线分析方法	264
一、线状结构特征的取向分析	265
二、平面结构特征的取向分析	267
三、迹线分析的精确度	274
<b>第十章 衍衬原理概述</b>	<b>277</b>
§ 10-1 引言	277
§ 10-2 电子显微象的衬度类型	277
一、质量厚度衬度	277
二、衍射衬度	281
§ 10-3 衍衬成象的运动学理论	290
一、运动学理论的一般讨论	290
二、振幅-相图	298
§ 10-4 衍衬成象的动力学理论	300
<b>第十一章 晶体缺陷的衍衬分析</b>	<b>308</b>
§ 11-1 引言	308
§ 11-2 位错和层错的基本概念	308
一、刃型位错和螺型位错	308
二、汤普森标记法	310
三、全位错的分解及层错	313
四、固定位错(不动位错)	316

五、扩展位错节 .....	318
六、体心立方金属中的位错 .....	318
七、六角结构晶体中的位错 .....	320
§ 11-3 位错和层错的衍衬分析 .....	323
一、衍衬分析所需基本数据和实验条件 .....	323
二、位错布氏矢量的测定 .....	326
三、位错密度测量 .....	345
四、位错和层错的衍衬分析 .....	347
<b>第十二章 第二相和界面的衍衬分析 .....</b>	<b>387</b>
§ 12-1 引言 .....	387
§ 12-2 第二相的各种衬度 .....	387
一、应变衬度 .....	388
二、沉淀衬度 .....	392
§ 12-3 第二相质点密度和尺寸分布的测量 .....	402
一、测量质点的体积密度 .....	403
二、用直线交截质点的方法测量质点的平均直径 $R$ .....	403
三、利用 $N_A-t$ 曲线求 $N_V$ 和 $R$ .....	403
四、不同直径范围内质点数的分布 .....	404
§ 12-4 界面衍衬分析 .....	405
一、 $\alpha$ 边界、 $\sigma$ 边界、 $\delta$ 边界 .....	405
二、同相界面及异相界面 .....	412
<b>第十三章 弱束成象技术 .....</b>	<b>427</b>
§ 13-1 引言 .....	427
§ 13-2 弱束成象原理简述 .....	428
§ 13-3 弱束暗场象技术 .....	430
一、 $g/3g$ 弱束暗场象的实验步骤 .....	431
二、对称弱束暗场象的实验步骤 .....	433
三、弱束暗场技术中的若干问题 .....	434
§ 13-4 弱束技术的应用 .....	438
一、关于位错的研究 .....	439
二、关于位错环的研究 .....	441
三、层错观察及层错能测定 .....	441
四、其它方面的应用 .....	445



参考文献 .....	447
附录一 加速电压和电子波长 .....	456
附录二 电子的原子散射因子 $f_{at}(\mu)(\text{\AA})$ .....	457
附录三 立方晶系常见孪晶和基体取向关系 .....	462
附录四 立方晶系电子衍射花样特征平行四边形表 .....	465
附录五 立方晶系晶面夹角表 .....	480
附录六 高阶、零阶劳厄区斑点重迭图形 .....	496
附录七 孪晶衍射位置表 .....	507
附录八 若干金属材料的消光距离 .....	575
附录九 合金中常见第二相的晶体学数据 .....	582