

材料科学与工程系列



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Electron Microscopy
and Analysis

电子显微分析

章晓中 编著



清华大学出版社

材料科学与工程系列



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Electron Microscopy
and Analysis

电子显微分析

章晓中 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书作为学习电子显微分析技术的入门书,主要介绍透射电子显微术(电子衍射、质厚衬度像、衍射衬度像)、扫描电子显微术(包括背散射电子衍射和环境扫描显微镜)、电子探针和微分析(能谱与波谱)以及扫描探针显微术(扫描隧道显微镜和原子力显微镜),还定性介绍了高分辨电子显微术、会聚束衍射、微衍射、电子能量损失谱、能量过滤像、扫描透射显微术、电子全息术、电子三维重构像和原位透射电镜技术。此外,书中对目前透射电子显微镜的最新进展——球差校正透射电镜技术作了简要介绍。

本书是一本将电子显微学理论和应用密切结合,兼顾不同层次读者群的专业基础课教材,适用于材料、物理、化学、化工、机械、微电子、土木、生物、医学等学科的本科生或研究生,也可作为非电子显微学专业人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电子显微分析 / 章晓中编著. —北京:清华大学出版社, 2006.12

(材料科学与工程系列)

ISBN 7-302-14160-6

I. 电… II. 章… III. 电子显微镜分析—高等学校—教材 IV. O657.99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 137827 号

责任编辑:宋成斌 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:杜 波

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印刷者:北京嘉实印刷有限公司

装订者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印张:21 彩插:1 字数:410千字

版 次:2006年12月第1版

印次:2006年12月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-14160-6/O·592

印 数:1~3000

定 价:36.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:015022-01

序 言

清华大学准备设置电子显微学的课程是在 1980 年,当时机械系刘家浚、朱宝亮老师等亲自去北京钢铁学院(现名字改为北京科技大学),进修赵伯麟老师主讲的电子显微学课程。1981 年,刘家浚老师在清华大学机械系首次开设电子显微镜课,学生是 77 级的机械系本科生,也有机械系研究生选修。1982—1992,十年间再加上 1995 年,朱宝亮老师为机械系本科生和研究生分别开设电镜课,吸收外系同学选修,也有科学院系统的学生和工作人员来听课。1988 年材料系建系后,电子显微镜课仍由机械系朱宝亮老师主讲。1993—1994 年间,此课程由唐国翌老师主讲。1996 年开始,材料系和机械系分别开设电子显微学课程,分别由王家军(1996)和姚可夫(1996 至今)老师授课。1996 年暑假,材料系教师研究教学的会议上,探讨了电子显微学课程的设置,建议由三门课组成:48 学时电子显微分析——电子衍射、32 学时材料电子显微学——电子衍射和 48 学时电子显微学,分别由电子显微镜实验室的唐国翌(1997—1998)、杨改英(1997—1998)和朱静(1997—2001)老师主讲,其中实验课(约占 1/4~1/3 课时)分别由电镜室的高级工程师陈锡花(1997—2005)、周惠华(1997 至今)、闫允杰(1997 至今)、程志英(1997 至今)和申玉田(2005 至今)等老师授课。由于教学改革课程学时的缩减及教师人事的变动,前两门课合并为一门本科生课程,1999 年至今由章晓中老师授课,电子显微学为研究生课程,2002 年至今由袁俊老师授课。

在教学中,曾经用过各种教材,除了朱宝亮、姚可夫、唐国翌、朱静、杨改英、章晓中、袁俊等老师自写的讲义外,本科生用的教材和参考书主要有《金属物理研究方法(第二分册)》(陈梦滴主编)、《金属电子显微分析》(陈世朴、王永瑞合编)、《金属电子显微分析》(谈育照编)、《金属 X 射线衍射与电子显微分析技术》(李树棠主编)等,研究生用的教材和参考书主要有《高空间分辨分析电子显微学》(朱静、叶恒强、王仁卉、温树林、康振川编著)、《电子衍射图在晶体学中的应用》(郭可信、叶恒强、吴玉琨著)、《电子衍射分析方法》(黄孝瑛编著)、《透射电子显微学》(黄孝瑛编著)等。此次出版的《电子显微分析》一书是章晓中老师按照课程之间的衔接和定

II

电子显微分析

位,参考了由 D. B. Williams 和 C. B. Carter 编写的 *Transmission Electron Microscopy* 一书及上述提到的讲义和参考书撰写、补充、修改而成。

本书适用于工科院校本科生的电子显微学课程教学和非电子显微学专业人员参考。

希望此书能在电子显微学的教学和普及中起到作用。

朱 静

2006 年 10 月

前 言

本书是清华大学百门精品课程电子显微分析的教材,它适合于工科院校本科生的电子显微学课程教学和非电子显微学专业人员参考。

笔者 1985—1989 年在牛津大学材料系攻读博士学位,修了 P. B. Hirsch 教授的 Diffraction 课和 M. J. Goringe 博士的 Transmission Electron Microscopy 课,笔者的研究生导师 G. W. Groves 博士培养了笔者如何用电子显微分析技术进行材料研究,引领笔者步入电子显微学的殿堂。

1999 年秋,笔者回国来清华大学材料科学与工程系任教授,开始讲授电子显微分析课。该课程是清华大学材料系大四学生的必修课(48 学时),它的后续课程是研究生课程电子显微学。2002 年,电子显微分析课入选清华大学百门精品课程的重点建设课程,教学语言也从中文改为了英文。在本精品课程教学组的朱静院士和袁俊教授的鼓励与支持下,笔者萌生了自己编一本能反映 21 世纪电子显微学发展水平又适合材料类本科生一学期电镜课教学的中文教科书,经过 3 年的努力和在清华大学一年的教学试用,才有了现在的这本教科书。

本书内容分为 9 章。第 1 章先介绍电子显微学的基础——电子光学的基本知识,重点介绍磁透镜的原理,各种像差的成因以及它们的校正方法。第 2 章阐述了透射电子显微镜的结构和工作原理,重点介绍了透射电镜的成像系统。由于能否得到好的电镜照片的关键之一是电镜试样制备的好坏,该章详细介绍了各种透射电镜样品的制备,以及一些最新的样品制备方法,如聚焦离子束方法。电镜的各种图像和信号实际上是电子与物质的相互作用的结果,故第 3 章介绍了电子与物质的相互作用及产生的各种信号,以及它们在电子显微术中的应用。第 4 章介绍了透射电子显微术的基本技术之一——电子衍射,重点介绍选区电子衍射以及简单电子衍射谱的标定。第 5 章进一步介绍一些常见的复杂电子衍射谱(李晶谱、高阶劳厄带、菊池线)及其标定。第 6 章介绍了透射电子显微术的另一基本技术——电子像,重点介绍了质厚衬度像和衍射衬度像。第 7 章介绍了扫描电镜的结构与它的各种成像机制,还介绍了目前用得越来越多的背散射电子衍射和环境扫描显微镜。第 8 章介绍了电子探针显微分析仪和微分析,重点介绍了在透射电镜和扫描电镜上都可用的能谱技术,还介绍了影响微分析区域大小和准确度的一些主要因

素。第9章简单介绍了高分辨电子显微术、会聚束衍射、微衍射、电子能量损失谱、能量过滤像、扫描透射显微术,还介绍了传统上不被认为是电子显微镜技术的扫描探针显微镜,因为它们在纳米科技的研究上用得越来越普遍。该章还介绍了在一般的电镜教科书里很少提及的电子全息术、电子三维重构像、原位透射电镜技术,还对目前透射电子显微术的最新进展——球差校正透射电子显微术作了简要介绍。

本书还包括3个实验讲义,分别由清华大学电子显微镜实验室的周惠华高级工程师(实验一)、程志英和申玉田高级工程师(实验二)、闫允杰高级工程师(实验三)撰写。

本书具有如下特点:

(1) 强调基本原理和应用

本教材以讲清物理概念为主,避免过多地使用数学。介绍方法时,以基本原理和如何应用为主,让学生用最短的时间,学到电子显微学的主要内容。

(2) 与国外最好的教材内容同步

本教材的编写参考了国外最流行的透射电子显微术教材 *Transmission Electron Microscopy* (Williams 和 Carter 著) 和最流行的扫描电子显微术和微分析教材 *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (Goldstein 著)。

(3) 反映了电子显微学的最新进展

本教材介绍了在国内电镜教科书中较少提及的背散射电子衍射、环境扫描显微镜、能量过滤像、电子全息术、电子三维重构像、原位透射电子显微术,还对电子显微学的最新进展——球差校正透射电镜技术作了介绍。

(4) 参考文献齐全

本教材在参考文献中列出了国内可查询到的近10年出版的几乎所有的国内外电子显微学的教材与专著。

(5) 适应面广

虽然本教材是为了一学期的课程设计的,但也可用于半学期课程的教学,教师可根据需要选择教学内容。建议可选讲如下章节:第1章,第2章(2.1~2.5, 2.10),第3章,第4章,第6章(6.1~6.3),第7章(7.1~7.5),第8章,第9章(9.1~9.6)。本书还可作为非电子显微学专业人员的参考书。

(6) 无先修要求

为了方便其他专业的学生,本教材未对学生的基础知识作特别的要求,涉及的相关知识会在书中介绍。

本教材的编写过程自始至终得到了清华大学电子显微镜实验室的朱静院士的关心和鼓励,朱静院士仔细审阅了全书还为本书作序;清华大学电子显微镜实验室

的袁俊教授也为本书的编写提供了宝贵的意见。在此向他们表示衷心的感谢。笔者的研究生汤富领和廖星为本书的成稿做了大量的录入和扫描图片的工作,清华大学为本教材的编写提供了经费,在此一并致谢。本书还选用了参考文献中的一些图和照片,在此向有关作者表示衷心的感谢。

由于笔者学识有限,加之时间仓促,书中难免挂一漏万,不当之处,还望读者斧正。

章晓中

2006年10月于北京清华园

目 录

第 1 章 电子光学基础	1
1.1 分辨率	1
1.2 磁透镜的聚焦原理	4
1.2.1 电子在均匀磁场中的运动	5
1.2.2 短磁透镜	6
1.2.3 磁透镜的设计	10
1.3 电子光学作图成像法	11
1.4 电子透镜的像差	12
1.4.1 球差	13
1.4.2 畸变	13
1.4.3 像散	14
1.4.4 色差	15
1.5 磁透镜的理论分辨率	16
第 2 章 透射电子显微镜	18
2.1 透射电子显微镜发展简史	18
2.2 透射电子显微镜的基本结构	19
2.3 照明系统	21
2.3.1 电子枪	21
2.3.2 照明系统和偏转系统	26
2.4 成像系统	28
2.4.1 透射电镜的成像原理	29
2.4.2 物镜	29
2.4.3 中间镜和投影镜	32
2.5 像的观察与记录系统	35
2.5.1 荧光屏	35
2.5.2 照相底片	35
2.5.3 视频摄像机	36

电子显微分析	
2.5.4 慢扫描 CCD 照相机	36
2.5.5 成像板	37
2.6 试样台和试样架	38
2.7 透射电镜的真空系统	40
2.8 透射电镜的电子部分和其他部分	43
2.9 电子显微镜的合轴调整	43
2.9.1 照明系统的合轴与消像散	45
2.9.2 成像系统的合轴与消像散	47
2.9.3 物镜聚焦的调整	49
2.10 透射电镜的样品制备	50
2.10.1 粉末样品的制备	50
2.10.2 薄膜样品的制备	51
2.10.3 超薄切片法	55
2.10.4 复型	56
2.10.5 界面试样的制备	57
2.10.6 聚焦离子束方法	58
2.10.7 真空蒸涂方法	59
2.10.8 试样的保存和观察时的注意事项	59
第 3 章 电子与物质的相互作用	60
3.1 电子的弹性散射	61
3.2 电子的非弹性散射	62
3.2.1 特征 X 射线	62
3.2.2 二次电子	63
3.2.3 背散射电子	63
3.2.4 俄歇电子	64
3.2.5 阴极荧光	64
3.2.6 透射电子	65
3.2.7 等离子体激发	65
3.2.8 声子激发	65
3.3 辐照损伤	66
第 4 章 电子衍射	67
4.1 电子衍射原理	67

4.1.1	布喇格定律	67
4.1.2	倒易点阵与爱瓦尔德(Ewald)作图法	68
4.1.3	结构因子	69
4.1.4	干涉函数	71
4.1.5	衍射花样与晶体几何关系	74
4.2	倒易点阵平面及其画法	74
4.2.1	晶带定律	75
4.2.2	二维倒易点阵平面的画法	75
4.3	选区电子衍射	77
4.4	多晶电子衍射花样和相机长度标定	81
4.4.1	多晶电子衍射花样的标定	83
4.4.2	相机长度的标定	85
4.5	单晶电子衍射花样的分析	86
4.5.1	单晶电子衍射花样的产生及其几何特征	86
4.5.2	单晶电子衍射花样的标定	86
4.5.3	衍射花样与晶体几何关系	92
4.5.4	四方晶系的电子衍射谱的标定	92
4.5.5	六方晶系的电子衍射谱的标定	94
4.6	其他电子衍射谱	96
4.6.1	单晶、多晶和非晶电子衍射谱比较	96
4.6.2	织构试样的衍射谱	96
4.6.3	二次衍射	97
4.6.4	高阶劳厄带	99
4.6.5	菊池线	100
4.7	电子衍射的计算机分析	100
第 5 章	复杂电子衍射谱	103
5.1	孪晶电子衍射谱	103
5.1.1	孪晶电子衍射谱的一般分析	103
5.1.2	孪晶电子衍射谱的标定	109
5.1.3	孪晶电子衍射谱的矩阵分析	110
5.2	高阶劳厄带电子衍射谱	111
5.2.1	高阶劳厄带的成因与特征	111
5.2.2	非零层倒易点在零层上的投影	113
5.2.3	高阶劳厄带指标化	116

5.3	菊池线分析	119
5.3.1	菊池线的产生	119
5.3.2	菊池线的几何特征	120
5.3.3	菊池线的指标化	123
5.3.4	菊池花样应用	124
5.4	超点阵结构和长周期结构	128
5.4.1	超点阵结构	128
5.4.2	长周期结构	129
第 6 章	透射显微术电子像衬度原理	132
6.1	质厚衬度	134
6.2	衍射衬度	137
6.3	电子衍衬像的运动学理论	138
6.3.1	完整晶体的暗场像	138
6.3.2	完整晶体的明场像	144
6.3.3	不完整晶体的衍衬像的运动学理论	144
6.4	几种晶体缺陷的衍衬像	146
6.4.1	层错	146
6.4.2	位错	148
6.4.3	第二相粒子	153
6.4.4	小角晶界和大角晶界	154
6.5	衍衬分析中几个主要参数的测定	156
6.5.1	磁转角的测定	156
6.5.2	柏格斯矢量的测定	157
6.6	波纹图	159
6.7	衍衬运动学理论的局限性	162
6.8	电子衍衬像的动力学理论	162
6.8.1	完整晶体的衍衬像的动力学理论	163
6.8.2	不完整晶体的衍衬像的动力学理论	165
第 7 章	扫描电子显微镜	167
7.1	扫描电子显微镜的发展简史	167
7.2	扫描电镜的基本结构与原理	168
7.2.1	基本原理	168
7.2.2	扫描电镜的工作方式	168

7.2.3	扫描电镜的结构	170
7.3	扫描电镜像的衬度形成原理	175
7.3.1	二次电子发射规律及其成像衬度	175
7.3.2	背散射电子发射规律及其成像衬度	180
7.3.3	吸收电子像和它的衬度	182
7.3.4	扫描透射电子像	183
7.3.5	阴极荧光像	183
7.4	扫描电镜分辨率和放大倍数	184
7.4.1	电子束直径对分辨率的影响	184
7.4.2	电子受试样散射对分辨率的影响	185
7.4.3	信号噪声比对分辨率的影响	186
7.4.4	扫描电镜的放大倍数	187
7.5	扫描电镜的性能特点	187
7.6	背散射电子衍射分析	190
7.6.1	背散射电子衍射的实验条件与工作原理	190
7.6.2	背散射电子衍射的应用	192
7.7	可变气压/环境扫描电镜	196
7.7.1	可变气压/环境扫描电镜的工作原理	197
7.7.2	可变气压/环境扫描电镜的分类与应用	199
7.8	金属材料的几种典型断口的扫描电镜分析	202
第8章	电子探针显微分析仪和微分析	206
8.1	电子探针的结构与工作原理	206
8.1.1	枪体	206
8.1.2	谱仪和信息记录部分	207
8.2	波谱仪	208
8.3	能谱仪	213
8.4	能谱仪和波谱仪的比较	216
8.5	X射线谱仪的应用	218
8.5.1	试样的制备	219
8.5.2	分析方法	219
8.5.3	电子探针分析的最小区域	221
8.5.4	应用	222
8.6	X射线谱仪的定量分析	223
8.6.1	定量分析的基础	223
8.6.2	ZAF修正	224

第 9 章 其他显微分析方法	227
9.1 高分辨透射电子显微术	227
9.2 会聚束衍射	232
9.3 微衍射	233
9.4 电子能量损失谱	234
9.5 能量过滤像	237
9.6 扫描透射电子显微术	238
9.7 扫描探针显微镜	240
9.7.1 扫描隧道显微镜	240
9.7.2 原子力显微镜	242
9.7.3 扫描探针显微镜家族的其他成员	245
9.8 电子全息术	246
9.9 电子三维重构像	249
9.10 原位透射电子显微术	251
9.11 球差校正透射电镜	252
实验	256
实验一 透射电镜样品的制备	256
实验二 透射电子显微学实验	265
实验三 场发射扫描电镜的结构、形貌观察和能谱仪的应用	281
附录	290
附录 A 各种倒易点阵平面可能所属的晶系	290
附录 B 各种点阵类型的晶面间距表	291
附录 C 原子散射因子表	292
附录 D 各种点阵的结构因数 F_{hkl} 不为零的条件	294
附录 E 立方系晶面间夹角	295
附录 F 常见晶体标准电子衍射花样	299
附录 G 立方和六方晶体可能出现的反射	303
附录 H 不同 c/a 比值下,四方晶系边长比(r_1/r_2)和夹角(ϕ)表(部分)	305
附录 I 不同 c/a 比值下,六方晶系边长比(r_1/r_2)和夹角(ϕ)表(部分)	306
附录 J 常见倒易面的零阶和高阶劳厄带斑点重叠图	307
附录 K 特征 X 射线的波长和能量表	315
参考文献	318

第 1 章 电子光学基础

1.1 分辨率

在正常的照明情况下,人眼能够看清楚的最小细节大约是 0.1 mm 。如果想观察更微小的细节,人们必须用显微镜把所要观察的细节放大到 0.1 mm 以上。这个数值称为人眼的最小鉴别距离,它表示人眼分辨细节的能力。这个数值越小,分辨能力就越高,这就是“分辨本领”或“分辨率”的含义。显微镜实际上是一个能够把欲观察的细节进一步放大的仪器,但这种放大并不是无限的。光的波动本质限制了显微镜分辨最小细节的极限——分辨率,分辨率与显微镜的放大倍数是两个概念。超越显微镜的分辨率继续放大是无效的,因为这时不会得到更多的信息。

下面我们用最简单的光学系统来说明分辨率的准确定义及影响分辨率的因素。图 1-1 表示一个无限小的理想点光源 O , 经过会聚透镜 L 在位于像平面 S 的屏幕上成像于 O' 的情况。由光阑 AB 限制的光束产生衍射, 在屏幕上出现一系列干涉条纹, 使得图像 O' 不是一个点像, 而是一个由不同直径明暗相间的衍射环包围着的亮斑——艾里斑(Airy disk)。艾里斑的光强度分布如图 1-2(a) 所示, 光能量的 84% 集中在中央峰, 其余的能量依次逐减地分布在一、二级……衍射环中。

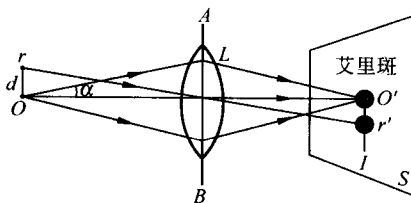


图 1-1 两个点光源像的叠加

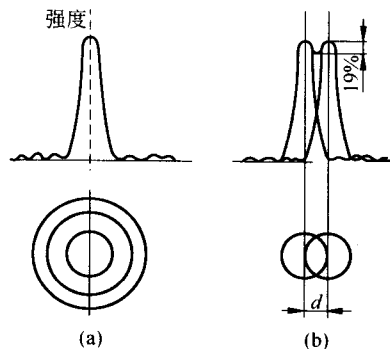


图 1-2 艾里斑与分辨率的示意图

(a) 艾里斑的强度分布;

(b) 两个点光源成像时的分辨极限

假设在点光源 O 之上还有一个点光源 r ，它在屏幕上成像于 r' 。如果把点光源 r 向 O 点移动，则 r' 也要向 O' 移动，当 r 和 O 接近到一定距离时两个衍射图像互相叠加。我们想知道： r 和 O 多近时，在屏幕上便分辨不出它们是两个点光源的像了？英国物理学家瑞利(Rayleigh)告诉我们：如两个点光源接近到使两个亮斑的中心距离等于第一级暗环的半径，且两个亮斑之间的光强度与峰值的差大于 19%，则这两个亮斑尚能分辨开。这就是著名的瑞利判据。我们用 d 来表示此时这两个光点之间的距离。当两个光点之间的距离比 d 小时，我们就分辨不出屏幕上两个点光源的像了，如图 1-2(b) 所示。我们把刚好能分辨屏幕上两个点光源像时的 r 和 O 之间的距离 d 称为显微镜的极限分辨距离，又称显微镜的分辨率(resolution)。

显微镜的分辨率 d 由下式决定：

$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (1-1)$$

式中， λ 表示光波在真空中的波长； α 表示孔径角之半； n 表示透镜和物体间介质折射系数(折射率)。运用透镜数值孔径 NA ($NA = n \sin \alpha$) 的概念，式(1-1)可写成

$$d = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (1-2)$$

从式(1-2)可以看出，波长越短，数值孔径越大，显微镜的分辨率就越高。事实上，透镜的像差也对显微镜的分辨率有影响，但由于现代玻璃透镜的改善和合理的组合，已可将透镜的像差校正到对显微镜的分辨率几乎没有影响，因此我们通常用式(1-1)或式(1-2)来表示光学显微镜的分辨率。如果能够减小波长和增大数值孔径，我们就可得到高的显微镜分辨率。对于光学显微镜来说，一个好的物镜的孔径角接近 90° ， NA 可达 0.95。可见光的波长在 $4000 \sim 8000 \text{ \AA}^{\text{①}}$ 的范围内，如果取波长为 4000 \AA ，对一个“干”系统 ($n=1$)，显微镜的分辨率约为

$$d \approx \frac{1}{2}\lambda = 2000 \text{ \AA} \quad (1-3)$$

如果用 $n=1.66$ 的溴苯作为物体和透镜间的介质，则 $d \approx \frac{1}{3}\lambda = 1300 \text{ \AA}$ 。到目前为止，还找不到比溴苯折射率更高的浸透介质，因此，光学显微镜的分辨率大约是 2000 \AA 。若使用比可见光波长更短的紫外线，由于被观察的大多数物体都强烈吸收短波紫外线，因此可用的波长只能限于 $2000 \sim 2500 \text{ \AA}$ 之间。用这种光源可把分辨率增大一倍左右，这正是现代紫外线显微镜所能达到的水平。但这样的分辨率对观察许多物质的显微组织来说仍然不够。X 射线也是一种波，其波长在 1 \AA 左右。如用 X 射线作光源，当然分辨率会显著提高，遗憾的是目前找不到能使 X

① $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。

射线会聚的透镜。运动的电子具有波粒二象性,它的波长比 X 射线更短,且可用电磁透镜使其聚焦,故电子被用作显微镜的光源,这样的显微镜称为电子显微镜。

要了解电子显微镜的分辨率,先必须了解电子的波长。

电子的波长可根据德布罗意公式

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (1-4)$$

算出,式中 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 是普朗克常数; m 是运动电子的质量; v 是电子的速度。电子的速度和电子所受到的加速电压有关。当电压小于 500 V 时,电子速度比光速小得多,式(1-4)中的 m 可用电子的静止质量 m_0 代替 ($m_0=9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$)。设电子的初速度为 0,加速电压为 V ,那么加速每个电子所消耗的功效 (eV) 就是电子获得的全部动能,即

$$eV = \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (1-5)$$

由式(1-4)和式(1-5)可求得电子波长

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{h}{m_0 v} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV}} \quad (1-6)$$

将 m_0 和电子的电荷 ($e=1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$) 数值代入式(1-6),可得计算电子波长的简化公式

$$\lambda = \frac{12.25}{\sqrt{V}} \text{ (\AA)} \quad (1-7)$$

注意使用上式时,电压 V 的单位是 V,波长 λ 的单位是 \AA 。

一般透射电镜电压为 100~200 kV,这时电子的运动速度可与光速相比,计算电子的波长时必须考虑相对论修正,这时电子动能和质量为

$$\begin{cases} eV = mc^2 - m_0 c^2 \\ m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases} \quad (1-8)$$

由式(1-4)和式(1-8)可以得到考虑相对论修正后的电子波长:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV \left(1 + \frac{eV}{2m_0 c^2}\right)}} \quad (1-9)$$

把有关数据代入式(1-9),可得考虑相对论修正后的计算电子波长的简化公式为

$$\lambda = \frac{12.25}{\sqrt{V(1 + 10^{-6} V)}} \quad (1-10)$$

同样使用上式时,电压 V 的单位是 V,波长 λ 的单位是 \AA ,光速 c 为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

表 1-1 中列出了电子波长随加速电压变化的几个常用数据。