

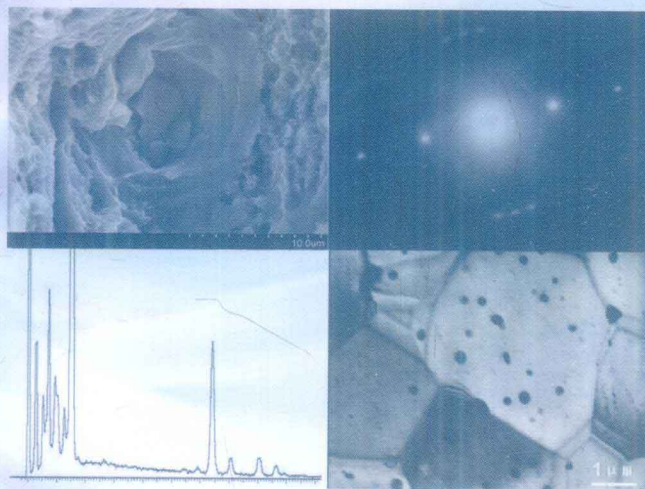


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

# 材料电子显微分析

张静武 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

# 材料电子显微分析

张静武 编著

北京  
冶金工业出版社  
2012

## 内 容 简 介

本书以电子光学基本概念为基础,讲授透射电子显微镜、扫描电子显微镜和电子探针的工作原理以及用于分析材料的基本方法。主要内容有:透射电镜和扫描电镜试样的制备、电子衍射原理及花样标定、衍衬运动学及典型衍衬像分析方法。在扩充学习内容中,较为深入地介绍了电子光学理论概念和材料电子显微分析方法的最新进展。

本书可作为高等学校材料专业的本科教材,以及机械、电子、化工、生物、医学、地质等专业的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料电子显微分析 / 张静武编著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5810-2

I. ①材… II. ①张… III. ①金属材料—电子显微镜分析—高等学校—教材 IV. ①TG115. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 272294 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5810-2

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012 年 1 月第 1 版, 2012 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 8.75 印张; 194 千字; 131 页

19.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010) 64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010) 65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

本书是适合材料类本科生学习的电镜课教材，讲授材料分析电子显微学的基本内容，为分析材料的结构、缺陷、微区形貌和成分提供现代手段，涉及透射电子显微镜、扫描电子显微镜和电子探针的原理、结构及分析方法。

当代的科研和生产实践中，应用电子显微镜分析材料的工作越来越多，每年有大量的相关科技文献发表；而在教学计划调整后，这门课程的学时已经大幅度减少，按照现有的教材开展教学，学生的课堂学习和相关文献的阅读都存在较大困难。

本教材从科技和生产实践需要出发，并依据多年的教学经验，在保持教材的完整体系和理论基础的前提下，注重应用，删繁就简，突出重点。授课时间为32~34学时。每章后的思考题为该章节的主要内容；扩充学习是与章节内容相关的理论分析、实际应用或最新进展，不计入授课学时之内。

本教材适合一般工科院校本科生的教学需要，也可以作为学生毕业设计、科技人员相关工作的参考用书。

在编写过程中，编者参阅了多本同类教材、专著、科技文献和厂商资料，在此谨向各位著者致谢！同时，燕山大学立项支持，材料学院教研室、电镜室的教师给予帮助，材料2008级同学提出修改意见，谨在此致谢！

本人水平有限，若编著中存在漏误，请读者不吝赐教！

编者 张静武

2011年11月

# 目 录

<b>1 电子光学基础</b> .....	1
1.1 电子波长 .....	1
1.2 电磁透镜 .....	2
1.3 电磁透镜的像差 .....	3
1.3.1 球差 .....	4
1.3.2 像散 .....	4
1.3.3 色差 .....	5
1.4 电磁透镜的景深和焦长 .....	6
1.4.1 景深 .....	6
1.4.2 焦长 .....	7
1.5 透射电镜的分辨率 .....	8
1.5.1 光学显微镜分辨率的极限 .....	8
1.5.2 球差对分辨率的影响 .....	10
思考题 .....	10
扩充学习——电子轨迹与球差矫正器 .....	11
1. 运动电子在轴旋转对称磁场中的轨迹 .....	11
2. 球差矫正器 .....	13
<b>2 透射电子显微镜</b> .....	15
2.1 照明系统 .....	16
2.1.1 电子枪 .....	16
2.1.2 聚光镜 .....	18
2.2 成像系统 .....	19
2.2.1 物镜及成像原理 .....	19
2.2.2 中间镜和电子衍射 .....	21
2.2.3 投影镜 .....	23
2.3 观察—记录系统和衬度 .....	23
2.3.1 观察—记录系统 .....	23
2.3.2 衬度 .....	23
2.4 主要部件的结构和工作原理 .....	26
2.4.1 样品台和双倾台 .....	26
2.4.2 电子束倾斜和平移装置 .....	27
2.4.3 消像散器 .....	28

2.4.4 光阑	28
2.5 分辨率的测定	29
2.5.1 晶格分辨率	29
2.5.2 点分辨率	29
思考题	30
扩充学习——电子枪亮度和场发射电子枪	30
1. 电子枪亮度	30
2. 场发射电子枪	32
<b>3 透射电镜试样制备</b>	<b>33</b>
3.1 复型试样	33
3.2 粉末试样	35
3.2.1 火棉胶混合制备	35
3.2.2 粉体直接制备	35
3.2.3 树脂包埋制备	36
3.3 薄膜试样	37
3.3.1 双喷射电解抛光	37
3.3.2 离子减薄	39
思考题	40
扩充学习——其他制样方法	40
1. 镀膜界面的 TEM 试样制备	40
2. 聚焦离子束制备 TEM 试样	41
<b>4 电子衍射</b>	<b>42</b>
4.1 电子衍射原理	43
4.1.1 倒易点阵	43
4.1.2 电子衍射的爱瓦尔德球图解	43
4.1.3 倒易点的结构振幅加权	44
4.1.4 偏离矢量	46
4.2 电子衍射花样	46
4.2.1 单晶体电子衍射花样的形成与特征	46
4.2.2 多晶体电子衍射花样的形成与特征	46
4.3 电镜中的电子衍射	47
4.3.1 电子衍射公式	47
4.3.2 磁转角	48
4.3.3 选区电子衍射	49
4.4 单晶体电子衍射花样标定	50
4.4.1 $D$ 值尝试法标定单晶体电子衍射花样	50

4.4.2 常见晶系单晶体电子衍射花样标定实例	54
4.4.3 花样标定的内标法	58
思考题	58
扩充学习——复杂电子衍射花样	58
1. 高阶劳厄带	58
2. 菊池线	59
<b>5 衍衬像分析</b>	<b>63</b>
5.1 衍衬成像原理	63
5.2 衍衬运动学物理模型	64
5.2.1 基本假设	64
5.2.2 双光束近似和柱体近似	65
5.3 理想晶体的运动学分析	66
5.3.1 理想晶体衍衬运动学基本方程	66
5.3.2 衍衬运动学方程的基本结论	68
5.4 缺陷晶体的运动学分析	71
5.4.1 晶体缺陷引起的附加相因子	71
5.4.2 典型晶体缺陷的衬度分析	73
5.5 晶体的典型衍衬像和基本分析方法	78
5.5.1 金属组织的衍衬像	78
5.5.2 晶体缺陷的衍衬像	82
5.5.3 衍衬像分析的基本方法	84
思考题	85
扩充学习——消光距离柏氏矢量测定和高分辨像	86
1. 消光距离	86
2. 位错柏氏矢量的测定	86
3. 高分辨像	87
<b>6 扫描电子显微镜</b>	<b>90</b>
6.1 高能电子束与试样的相互作用	90
6.1.1 背散射电子	90
6.1.2 二次电子	91
6.1.3 吸收电子	91
6.1.4 特征 X 射线	91
6.1.5 俄歇电子	92
6.2 扫描电镜的一般结构与工作原理	92
6.2.1 电子光学系统	93
6.2.2 信号检测和成像系统	94

6.3 扫描电子显微镜的工作原理与主要性能	95
6.4 扫描电镜图像基本衬度的原理及其应用	97
6.4.1 二次电子衬度原理及其应用	97
6.4.2 背散射电子衬度原理及其应用	99
6.5 扫描电镜试样的基本要求与制备	102
思考题	103
扩充学习——扫描电镜功能的新进展	103
1. 低电压扫描电子显微镜	103
2. 电子束减速技术	104
3. 背散射电子衍射	105
4. 低真空扫描电镜 (环境扫描电镜)	106
<b>7 电子探针 X 射线显微分析</b>	<b>107</b>
7.1 电子探针的一般结构	107
7.2 波谱仪工作原理	108
7.2.1 波谱仪的检测结构	108
7.2.2 波谱仪的 X 光检测	109
7.3 能谱仪的工作原理	110
7.3.1 能谱仪的检测结构	110
7.3.2 能谱仪的 X 光检测	111
7.4 多道脉冲高度分析器	111
7.5 电子探针的工作模式	112
7.5.1 元素点分析	112
7.5.2 元素线扫描分析	112
7.5.3 元素面分布分析	113
7.5.4 元素的定量分析	114
7.6 波谱仪和能谱仪的性能比较	116
思考题	116
扩充学习——EDS 分析进展	117
1. STEM - EDS 分析	117
2. FE - TEM 的 EDS 图 (EDS mapping)	118
3. SEM - EDS 图 (EDS mapping) 分析	118
附录	120
附录 I 常见晶体电子衍射花样标定用图表	120
附录 II 常见物相的晶体学数据表	125
参考文献	131



# 1 电子光学基础

电子显微镜以电子束作光源、以磁场作透镜，晶格分辨率已经超过0.1nm。本章的电子光学基本概念是电子显微镜的物理学基础。主要学习内容：电子波长、电子的磁聚焦、电磁透镜的像差和分辨率。

## 1.1 电子波长

根据德布罗意 (De Broglie) 的观点，运动的电子除了具有粒子性外还具有波动性，其波动性和可见光相似。电子的波长取决于电子运动的速度和质量，即：

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

式中， $h$  为普朗克常数， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ； $m$  为电子质量； $v$  为电子运动速度，它和电子的加速电压  $U$  之间存在如下关系：

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \quad (1-2)$$

式中， $e$  为电子所带电荷， $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

将式 1-1 和式 1-2 整理，得：

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2emU}} \quad (1-3)$$

式中， $h$ 、 $e$  是常数；当电子运动速度较低时，电子质量  $m$  接近电子静止质量  $m_0$ ， $m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ；当电子运动速度很高时， $m$  必须经过相对论校正，即：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1-4)$$

式中， $c$  为光速。

由式 1-3 可见  $\lambda$  与  $U$  成反比，加速电压  $U$  越高，电子运动速度  $v$  越大，电子波长  $\lambda$  越短。按照式 1-4 进行相对论修正的  $m$  数值，可以计算出不同加速电压下的电子波长，

见表 1-1。

表 1-1 不同加速电压下的电子波长 (经相对论校正)

加速电压/kV	电子波长/nm	加速电压/kV	电子波长/nm
1	0.0388	40	0.00601
2	0.0274	50	0.00536
3	0.0224	60	0.00487
4	0.0194	80	0.00418
5	0.0713	100	0.00370
10	0.0122	200	0.00251
20	0.0859	500	0.00142
30	0.00698	1000	0.00087

可见光的波长在 390 ~ 760nm, 从计算出的电子波长来看, 在常用的 200kV 加速电压下, 电子的波长为 0.00251nm, 要比可见光小 5 个数量级。

## 1.2 电磁透镜

电子作为带电粒子在磁场中运动会受到洛伦兹力的作用, 轴旋转对称磁场可以使运动着的电子折射而发生“聚焦”, 像可见光通过玻璃透镜一样用来成像。用电磁线圈可以产生轴旋转对称磁场, 把这种能对运动电子聚焦成像的装置称为“电磁透镜”或“磁透镜”。

图 1-1 所示的通电短线圈就是一个简单的电磁透镜, 磁感应强度  $B$  由电流方向决定。图 1-2 是电磁透镜聚焦原理示意图。磁透镜造成一种轴对称不均匀分布的磁场, 磁力线围绕导线呈环状, 磁力线上任意一点的磁感应强度  $B$  都可以分解成平行于透镜主轴的分量  $B_z$  和垂直于主轴的分量  $B_r$ 。速度为  $v$  平行于透镜主轴的电子进入透镜的磁场时, 位于透镜上半部 I 点的电子受到垂直分量  $B_r$  的作用, 使电子受到切向力。根据左手法则, 电子所受的切向力  $F_t$  的方向如图 1-2 所示。 $F_t$  使电子获得切向速度  $v_t$ ,  $v_t$  随即和  $B_z$  分量叉乘, 形成了另一个向透镜主轴靠近的径向力  $F_r$ , 使电子向主轴偏转。平行入射到磁场中的电子到达不同的位置, 都得到切向速度  $v_t$  使电子做圆周运动, 同时都具有轴向速度  $v_z$  使电子趋向轴上的一点。当电子穿过线圈运动到透镜的下半部 II 点位置时,  $B_r$  的方向改变了  $180^\circ$ ,  $F_t$  随之反向, 但是  $F_t$  的反向只能使  $v_t$  变小, 而不能改变其方向。因此穿过线圈的电子仍然向主轴靠近。电子的运动轨迹是原来平行于主轴的直线运动、圆周运动和向轴运动的合运动, 整体轨迹是圆锥螺旋状, 最终落到磁透镜的轴上, 完成电子的磁聚焦。一束平行于主轴的入射电子束通过电磁透镜时被聚焦在轴线上一点, 这一点称为焦点, 这与光学玻璃凸透镜对平行于透镜主轴入射的平行光的聚

焦作用十分相似，仍可用牛顿成像公式来说明这一聚焦过程，见图 1-3。

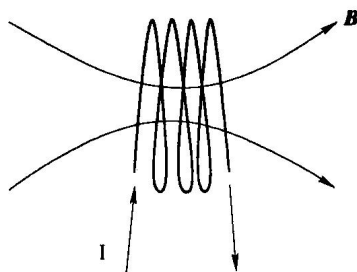


图 1-1 通电流的短线圈产生磁场

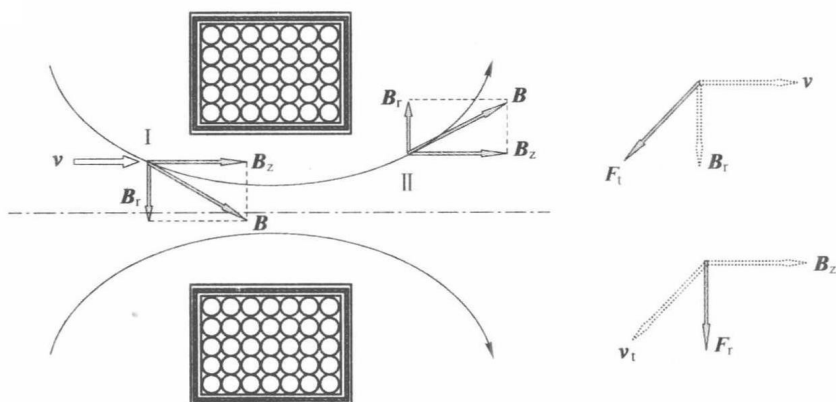


图 1-2 电磁透镜聚焦原理

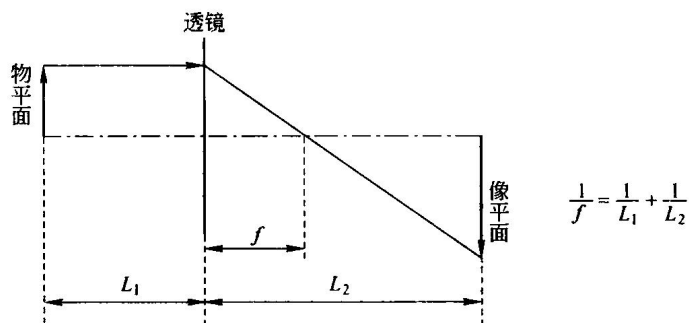


图 1-3 牛顿成像公式图示

$f$ —焦距； $L_1$ —物距； $L_2$ —像距

### 1.3 电磁透镜的像差

按照衍射理论计算结果，光学透镜的分辨率是波长的一半。对于电磁透镜来说，目前还远远没有达到这一水平。主要原因是除了衍射效应对分辨率的影响外，还有像差对

分辨率的影响。电磁透镜的主要像差有球差、像散和色差。

### 1.3.1 球差

球差是由电磁透镜近轴区域磁场和远轴区域磁场对电子束的折射能力不同而产生的像差。近轴区域对电子束的折射能力弱，远轴区域对电子束的折射能力强。来自于轴上物点散射的电子束，经过电磁透镜折射后到达像平面本应该形成一个对应的像点，但实际上近轴电子和远轴电子不聚焦在同一点上（图 1-4），这种由于透镜磁场折射能力不同形成的像点发散就是球差。像平面上沿轴线从远轴电子聚焦点到近轴聚焦点之间，存在一个像平面，其上的散焦斑最小，同其他各处的圆斑相比，这个散焦斑最清晰，就把最小散焦斑作为与物点对应的像点。设散焦斑半径为  $R_0$ ，将  $R_0$  除以放大倍数  $M$  把最小散焦斑折算到物平面上，有  $\Delta r_s = R_0/M$ ，原来的物点由于球差的影响变成了半径为  $\Delta r_s$  的漫散圆斑，用  $\Delta r_s$  表示球差大小，按照物理光学的相关公式，有：

$$\Delta r_s = \frac{1}{4} C_s \alpha^3 \quad (1-5)$$

式中， $C_s$  为球差系数，通常情况下电磁透镜的球差系数  $C_s$  相当于它的焦距，大小约为  $1 \sim 3\text{mm}$ ； $\alpha$  为孔径半角。由式 1-5 可见，减小球差系数和孔径半角可以减小球差，尤其是孔径半角减小时，球差显著减小。

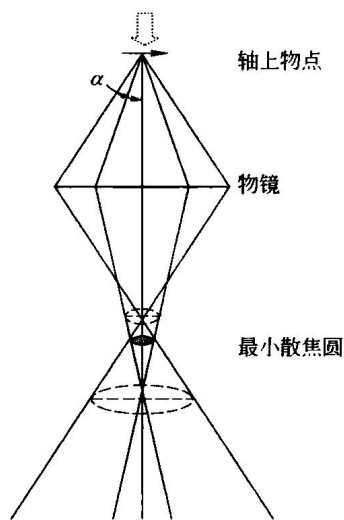


图 1-4 球差的形成

球差是影响电磁透镜分辨率的主要像差，它不能像光学透镜那样通过设计凸透镜、凹透镜的组合来补偿消除。但最近发明的电磁透镜球差矫正器可以有效地降低球差系数。

### 1.3.2 像散

像散是由透镜磁场的非旋转对称引起的像差。透镜的极靴孔加工误差，上、下极靴

的轴线错位、极靴材质不均以及极靴孔周围的局部污染等，都会引起透镜的磁场产生椭圆度。椭圆磁场长、短轴方向上的聚焦能力存在差异，结果成像物点通过透镜后不能在像平面上聚焦于一点（图 1-5）。同样在长、短轴聚焦点之间有一个最佳聚焦位置，此

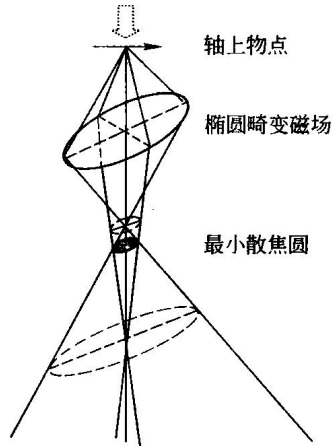


图 1-5 像散的产生

处像平面上得到一个最小散焦斑，半径为  $R_A$ ，将  $R_A$  折算到物平面上得到一个半径为  $\Delta r_A$  的漫散圆斑，用  $\Delta r_A$  表示像散的大小，其计算公式为：

$$\Delta r_A = \Delta f_A \alpha \quad (1-6)$$

式中， $\Delta f_A$  为像散系数，等于磁透镜出现椭圆度时造成的焦距差； $\alpha$  为孔径半角。电磁透镜的像散是可以消除的像差，通常引入一个强度和方位可调的矫正磁场来进行补偿，产生这个矫正磁场的装置称为消像散器。

### 1.3.3 色差

色差是由于成像电子的能量不同或波动，电子在透镜磁场中运动速度不同，从物面上一点散射的电子不能聚焦在像面上同一点而形成的像差，如图 1-6 所示。不

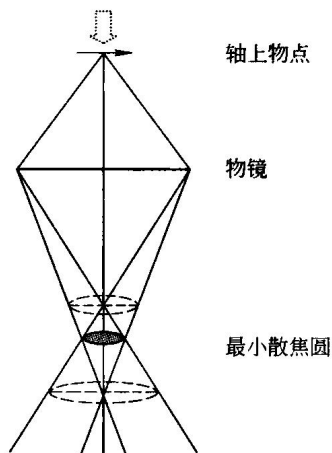


图 1-6 色差的产生

同能量的电子聚焦在不同位置，像平面上也有一个最小半径为  $R_c$  的散焦斑。同样将  $R_c$  折算到物平面上，得到半径为  $\Delta r_c$  的圆斑，用  $\Delta r_c$  表示色差， $\Delta r_c$  的大小由下式来确定：

$$\Delta r_c = C_c \cdot \alpha \left| \frac{\Delta E}{E} \right| \quad (1-7)$$

式中， $C_c$  是电磁透镜的色差系数； $\Delta E/E$  是电子束的能量变化率； $\alpha$  为孔径半角。式 1-7 说明，在色差系数和孔径半角一定的情况下，电子能量的波动是主要影响因素。引起电子能量波动的原因主要有两个：一是电子加速电压不稳，致使入射电子能量波动；二是电子束照射试样时和试样相互作用，部分电子产生非弹性散射，致使能量变化。

## 1.4 电磁透镜的景深和焦长

### 1.4.1 景深

透镜的景深是指当像平面固定时（像距不变），在保持图像清晰的条件下，允许物平面（样品）沿透镜主轴平移的最大距离。

在理想状态下（不考虑衍射差、球差、像散和色差等影响），由图 1-7 可见样品上某一物点位于  $O$  位置时，该点在像平面上应形成一个像点  $O'$ 。当试样向上方移动，使  $O$  点到达  $A$  点时， $A$  点的像应位于  $A'$  处。如果像平面的位置保持不变，则  $A'$  点将在像平面上散焦成一个半径为  $R$  的圆斑；当试样向下移动，使原物点  $O$  到达  $B$  点时， $B$  点将在像平面的  $B'$  处成像，同样会形成一个半径为  $R$  的散焦斑。

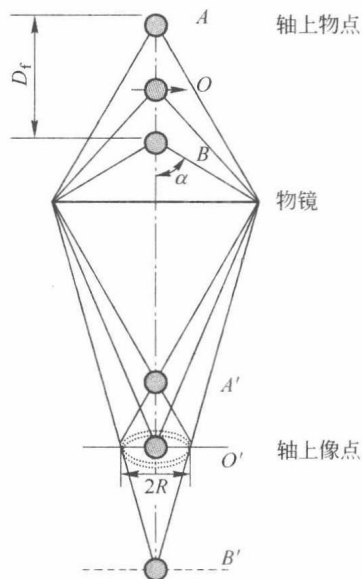


图 1-7 物镜的景深

如果衍射效应是决定透镜分辨率的控制因素（即上述诸因素中  $\Delta r_0$  为最大），在像平面上由衍射引起的散焦斑半径应是  $R_0$ ，因此，只要物点在像平面上形成的圆斑半径  $R$  小于或等于  $R_0$  时，像平面上的图像就仍能保持清晰，所以，样品在从  $A$  到  $B$  的范围内移动时，并不影响物像的清晰度， $AB$  间的这段距离称为景深，用  $D_f$  表示。

由图 1-7 的几何关系可知：

$$D_f = \frac{2\Delta r_0}{\tan\alpha} \quad (1-8)$$

式中， $\Delta r_0 = \frac{R_0}{M}$ ， $M$  为放大倍数； $\alpha$  为孔径半角。因为电磁透镜的孔径半角很小，同时  $A$ 、 $B$  两点间的距离比透镜的物距小得多，所以可以认为样品上的物点  $O$  在位于位置  $A$  和位置  $B$  时，相应的  $\alpha_A$ 、 $\alpha_B$  近似地和  $\alpha$  相等。如果  $\Delta r_0 = 1\text{nm}$ ， $\alpha = 10^{-2} \sim 10^{-3}\text{rad}$ ，求出  $D_f = 200 \sim 2000\text{nm}$ 。透射电子显微镜的金属薄膜试样的厚度一般只有  $200 \sim 300\text{nm}$ ，因此上述景深范围可以保证样品整个厚度范围内各处细节都清晰可见。

### 1.4.2 焦距

透镜的焦距是指固定样品的条件下（物距不变），像平面沿透镜主轴平移时仍能保持图像清晰的最大距离。由图 1-8 可见，样品上某一点  $P$  通过透镜后正焦位置应是  $P'$  点。如果把像平面移动到 I 位置，则  $P'$  点将散焦成一个半径为  $R$  的欠焦斑；如果把像平面反向移动相等的距离到达位置 II 时，则得到半径为  $R$  的过焦斑。若决定透镜分辨率的控制因素仍是衍射效应，由衍射产生的最小散焦斑直径等于  $R_0$ ，在物平面上为  $\Delta r_0$ ，则根据图 1-8 中的几何关系可以得到：

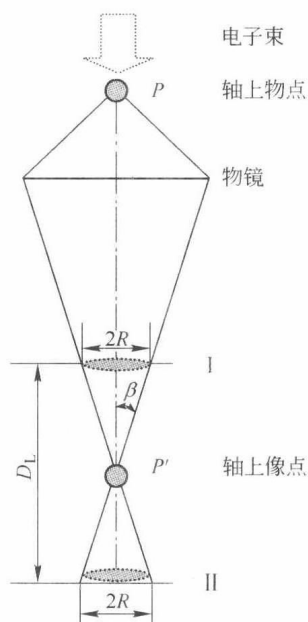


图 1-8 物镜的焦距

$$D_L = \frac{2\Delta r_0 M}{\tan\beta} \approx \frac{2\Delta r_0 M}{\beta}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{M}$$

$$D_L = \frac{2\Delta r_0 M^2}{\alpha} \quad (1-9)$$

式中,  $D_L$  就是透镜的焦长。如果  $\Delta r_0 = 1\text{nm}$ ,  $\alpha = 10^{-2}\text{rad}$ ,  $M = 200$  倍, 则  $D_L = 8\text{mm}$ 。考虑到电子显微镜是多级放大, 总放大倍数可以很高, 如  $M = 2000$  倍时,  $D_L$  可达到  $80\text{cm}$ 。这使得在透射电镜中, 荧光屏和照相底片之间的距离可以很大, 只要在焦长范围内就能得到清晰的图像。

从计算景深和焦长的公式中可以看到, 随着孔径半角  $\alpha$  的减小,  $D_f$  和  $D_L$  都会变大, 因此, 在电磁透镜中插入一个直径较小的光阑时, 可明显增加景深和焦长。

## 1.5 透射电镜的分辨率

### 1.5.1 光学显微镜分辨率的极限

光学显微镜以可见光为光源, 由于光波的波动性, 通过透镜各部分折射到像平面上的光波发生干涉, 产生衍射效应。一个理想的物点, 在像平面上形成的不再是一个像点, 而是一个具有一定尺寸的中央亮斑及其周围逐渐变暗的多个圆环, 称为 Airy 斑, 如图 1-9 所示。

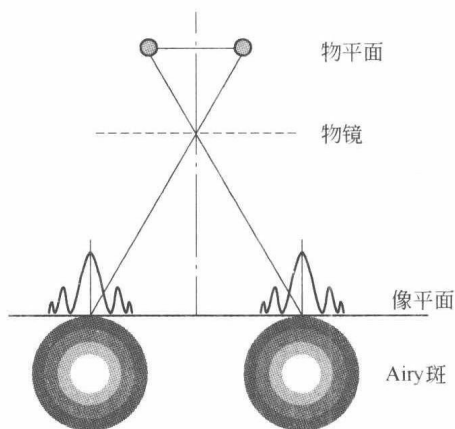


图 1-9 两个点光源成像时形成的 Airy 斑

测量表明, Airy 斑的强度大约 84% 集中在中心亮斑上, 其余强度分布在周围的亮环上。由于各亮环的强度较低, 一般人眼不易分辨, 只能看到中心亮斑。因此通常以 Airy 斑的第一暗环的半径来衡量其大小。设有两个物点通过透镜成像, 在像平面上形成两个 Airy 斑。根据衍射理论, 点光源通过透镜产生的 Airy 斑半径  $R_0$  为:



$$R_0 = \frac{0.61\lambda}{n\sin\alpha} M \quad (1-10)$$

式中,  $\lambda$  为可见光波长;  $n$  为透镜物场介质折射率;  $\alpha$  为透镜孔径半角;  $M$  为透镜放大倍数。两个物点相距较远时, 两个 Airy 斑各自分开; 当两个物点逐渐靠拢时, 两个 Airy 斑也相互靠近, 直至发生部分重叠。计算表明, 当两个 Airy 斑中心间距等于 Airy 斑的半径时, 在两个 Airy 斑强度叠加曲线上 (图 1-10), 两个最强峰之间的峰谷强度差为 19%, 这是人眼对衬度分辨的极限, 此时仍能分辨出是两个物点的像。如果两个物点进一步靠近, Airy 斑重叠更多, 峰谷强度差更低, 人眼就无法分辨了, 两个物点成为一个物点。

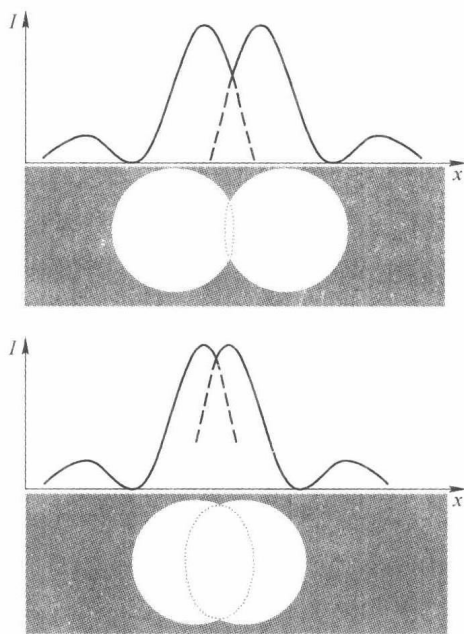


图 1-10 Airy 斑靠近时的强度叠加

通常把两个 Airy 斑中心间距等于 Airy 斑半径时, 物平面上相应的两个物点的间距  $\Delta r_0$  定义为透镜能分辨的最小间距, 即透镜分辨率 (也称分辨本领)。由式 1-10 得:

$$\Delta r_0 = \frac{R_0}{M} = \frac{0.61\lambda}{n\sin\alpha} \quad (1-11)$$

对于光学透镜, 当  $n\sin\alpha$  达到最大值时 (此时  $n \approx 1.5$ ,  $\alpha \approx 70^\circ \sim 75^\circ$ ), 式 1-11 简化为:

$$\Delta r_0 \approx \frac{\lambda}{2} \quad (1-12)$$

式 1-12 说明, 光学透镜的分辨率主要取决于可见光的波长。半波长是光学显微镜分辨率的理论极限。可见光的最短波长是 390nm, 也就是说光学显微镜的最高分辨率是