

高等学校试用教材

金属电子显微分析

西安交通大学 谈育煦 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

15.21

机械工业出版社

前 言

本书是根据1983年11月在西安召开的高等工业学校机电类金属材料及热处理专业教材编审会议制订的教学大纲编写的。

大纲中规定本课程总学时为35学时，要求突出物理概念，避免繁琐、不必要的数学推导，在保持课程系统性和重点的前提下，对一些次要内容可大量删节。

全书以透射电子显微分析为主，以较大的篇幅论述电子衍射分析的原理和电子显微图象的解释方法，这是课程的重点所在。这样安排的目的是使学生在学完本课程后，能分析本专业范围内常见的典型透射电子显微组织结构（包括电子衍射花样）并能与从事电子显微组织分析的专业人员共同拟订实验方案和分析实验结果。

本书贯彻了量和单位的国家标准，唯长度单位保留了现阶段国际上仍普遍使用的埃（符号 \AA ，我国暂时并用的非法定计量单位）和纳米（符号为 nm ，法定计量单位），它们之间的折算关系为 $1 \text{\AA} = 0.1 \text{nm} = 10^{-10} \text{m}$ （准确值）。

本书较广泛地从国内外近期出版的专著和电镜教科书中选材，特别是国内1980年后陆续出版的《金属电子显微分析》（陈世朴、王永瑞合编）、《金属物理研究方法》第二分册（陈梦滴主编）和《金属X射线衍射与电子显微分析技术》（李树棠主编）等教科书给予本书作者诸多的启示。

本书由西北工业大学马世良、严隽民主审；上海交通大学王永瑞、华中工学院曹书云、合肥工业大学陆在庆、陕西机械学院林香祝等同志参加了审稿。在审稿过程中对本书提出不少宝贵的意见和建议，谨此深表感谢。

编 者 1987年11月

目 录

<p>第一章 电子光学的一般知识.....1</p> <p> §1.1 电子射线的特性.....1</p> <p> 一、电子波的波长.....1</p> <p> 二、电子波的折射.....2</p> <p> §1.2 静电透镜和磁透镜.....3</p> <p> 一、静电透镜.....3</p> <p> 二、磁透镜.....3</p> <p> §1.3 电磁透镜的象差.....4</p> <p> 一、球差.....4</p> <p> 二、象散.....5</p> <p> 三、色差.....5</p> <p> §1.4 透镜的分辨率.....6</p> <p> 一、衍射效应对分辨率的影响.....6</p> <p> 二、象差对分辨率的影响.....7</p> <p> §1.5 电磁透镜的景深和焦长.....7</p> <p> 一、景深.....7</p> <p> 二、焦长.....9</p> <p> 思考题.....9</p> <p>第二章 透射电子显微镜.....10</p> <p> §2.1 透射电子显微镜的结构和成像原理.....10</p> <p> 一、照明系统.....10</p> <p> 二、成像系统.....12</p> <p> 三、观察和记录装置.....14</p> <p> §2.2 主要部件的结构和工作原理.....14</p> <p> 一、样品倾斜装置.....14</p> <p> 二、电子束倾斜和平移装置.....15</p> <p> 三、消象散器.....15</p> <p> 四、光阑.....15</p> <p> §2.3 透射电子显微镜的分辨率及放大倍数测定.....17</p> <p> 一、分辨率的测定.....17</p> <p> 二、放大倍数的测定.....18</p> <p> 思考题.....18</p> <p>第三章 复型技术.....19</p>	<p> §3.1 概述.....19</p> <p> §3.2 一级复型和二级复型.....19</p> <p> 一、一级复型.....19</p> <p> 二、二级复型(塑料 碳二级复型).....20</p> <p> §3.3 萃取复型.....21</p> <p> §3.4 质厚衬度.....21</p> <p> §3.5 复型技术在分析金属材料方面的应用.....22</p> <p> 一、图象分析原理.....22</p> <p> 二、典型组织的复型电子显微分析.....22</p> <p> 三、断口分析.....27</p> <p> 思考题.....29</p> <p>第四章 电子衍射.....30</p> <p> §4.1 概述.....30</p> <p> §4.2 电子衍射原理.....30</p> <p> 一、布拉格定律.....30</p> <p> 二、厄瓦尔德图解.....32</p> <p> 三、倒易点阵的概念.....33</p> <p> 四、电子衍射的基本公式.....34</p> <p> 五、结构因数.....35</p> <p> 六、零层倒易面.....36</p> <p> 七、标准零层倒易面.....37</p> <p> 八、偏离矢量.....38</p> <p> §4.3 电子显微镜中的电子衍射.....40</p> <p> 一、磁转角.....40</p> <p> 二、有效相机常数.....41</p> <p> 三、选区电子衍射.....42</p> <p> §4.4 单晶体电子衍射花样的标定.....42</p> <p> 一、单晶体电子衍射花样的标定程序.....43</p> <p> 二、钢中典型组成相的电子衍射花样的标定.....45</p> <p> §4.5 多晶体的电子衍射花样.....47</p> <p> 一、环状电子衍射花样的产生.....47</p> <p> 二、利用环状花样进行物相鉴定.....48</p> <p> 三、利用多晶体电子衍射花样测</p>
--	---

定相机常数·····	49	§6 1 扫描电子显微镜·····	99
§4-6 复杂电子衍射花样·····	50	一、电子束和固体样品作用时产生的信号·····	99
一、高阶劳厄区·····	50	二、扫描电子显微镜的构造和工作原理·····	101
二、超点阵斑点·····	50	三、扫描电子显微镜的主要性能·····	103
三、二次衍射斑点·····	51	四、二次电子衬度原理及其应用·····	105
四、孪晶花样·····	51	五、背散射电子衬度原理及其应用·····	109
五、菊池线·····	53	六、吸收电子的成象·····	111
思考题·····	56	七、电子通道花样·····	111
第五章 金属薄膜的电子显微分析·····	57	八、扫描透射电子显微分析(STEM)·····	113
§5-1 概述·····	57	§6 2 电子探针·····	115
§5-2 金属薄膜样品的制备·····	57	一、电子探针的结构·····	115
§5-3 衍射衬度原理·····	60	二、波长分散谱仪·····	115
§5-4 衍衬运动学简介·····	62	三、能量分散谱仪·····	119
一、基本假设·····	62	四、定性分析和定量分析·····	120
二、理想晶体的衍衬强度·····	63	思考题·····	121
三、理想晶体衍衬运动学基本方程的应用·····	66	第七章 其它显微分析仪器简介·····	122
四、非理想晶体的衍射衬度·····	68	§7 1 俄歇电子能谱仪·····	122
§5 5 晶体缺陷分析·····	69	一、俄歇电子能谱仪的构造和工作原理·····	122
一、层错·····	69	二、谱线分析·····	122
二、位错·····	72	三、应用·····	123
三、第二相粒子·····	75	§7 2 场离子显微镜·····	123
§5 6 薄膜透射电子显微分析在金属材料研究中的应用·····	76	一、场离子显微镜的结构和成象原理·····	123
一、钢中马氏体组织结构的电子显微分析·····	76	二、场离子显微图象的标定·····	124
二、钢中贝氏体组织结构的电子显微分析·····	88	§7 3 离子探针·····	125
三、珠光体组织结构的电子显微分析·····	91	附录一 立方晶体的晶面(或晶向)夹角表·····	127
四、其它金属材料的电子显微组织结构分析·····	92	附录二 电子衍射花样标定时用的数据表·····	135
思考题·····	98	附录三 常见晶体的标准电子衍射花样·····	155
第六章 扫描电子显微镜和电子探针·····	99	参考书·····	161

第一章 电子光学的一般知识

§ 1-1 电子射线的特性

一、电子波的波长

电子显微镜的照明光源是电子射线。和可见光相似,运动的电子也兼有波动性和微粒性,即所谓二象性。根据德布罗意(de Broglie)的观点,匀速直线运动着的电子必定和一个波动相对应,这个电子波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: $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s; m 为电子的质量; v 为电子的速度,它和加速电压 U 之间存在下面的关系:

$$\frac{1}{2} m v^2 = eU$$

即
$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (1-2)$$

式中 e 为电子所带的电荷,等于 1.6×10^{-19} C。

由式(1-1)和(1-2)可得

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

如果电子速度较低,则它的质量和静止质量相近,即 $m \approx m_0$ ($m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg)。如果加速电压很高,使电子具有极高的速度,则必须经过相对论校正,此时

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

式中 c 为光速。

表1-1是根据式(1-3)计算出的不同加速电压下电子波的波长。

表 1-1 不同加速电压下电子波的波长(经相对论校正)

加速电压 U / kV	电子波波长 λ / nm	加速电压 U / kV	电子波波长 λ / nm
20	0.00859	120	0.00334
40	0.00601	160	0.00285
60	0.00487	200	0.00251
80	0.00418	500	0.00112
100	0.00371	1000	0.00087

可见光的波长大致为400~800nm范围之间,从计算出的电子波波长来看,在常用的40~200 kV加速电压下,电子波的波长要比可见光小5个数量级。

二、电子波的折射

可见光从一个介质传播到另一种介质中去时,由于光在两种介质中的传播速度不同,使介质界面两边光的传播方向发生变化,这就是所谓光的折射(图1-1)。可见光发生折射时,入射光、折射光和介质界面的法线位于同一平面内,且入射角 θ 、折射角 γ 、速度、波长和折射率 N_1 、 N_2 之间服从下列关系:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{N_2}{N_1} = N_{21} \quad (1-5)$$

式中, v_1 、 v_2 、 λ_1 、 λ_2 分别为电子波在第一和第二介质中的速度和波长; N_1 、 N_2 分别为两种介质的折射率; N_{21} 为相对折射率。如果 $N_2 > N_1$,即 $N_{21} > 1$,则表明光在第一种介质中的传播速度大于第二种介质中的传播速度,此时折射角 γ 将比入射角 θ 小。

电子是带有负电的粒子,它们在静电场中会受到电场力的作用,使运动方向发生偏转。图1-2示意地说明了静电场对电子的折射作用。图中 U_1 和 U_2 为两个等电位区, $U_2 > U_1$ 。电场强度 \mathbf{E} 的方向是由 U_2 指向 U_1 ,而电荷所受的作用力 \mathbf{F} 则与 \mathbf{E} 反向。当电子以 \mathbf{v}_1 速度通过界面区 $A \cdot B$ 进入 U_2 等电位区时,速度 \mathbf{v}_1 将变成 \mathbf{v}_2 。 \mathbf{v}_1 在通过 $A \cdot B$ 区时,不受电场力的作用,故它的方向和大小并无变化,因此 $\mathbf{v}_{r1} = \mathbf{v}_{r2}$,但是 \mathbf{v}_{n1} 在通过 $A \cdot B$ 区时,由于电子受到电场力 \mathbf{F} 的作用,使 \mathbf{v}_{n1} 增大至 \mathbf{v}_{n2} ,因此由 \mathbf{v}_{r2} 和 \mathbf{v}_{n2} 合成的 \mathbf{v}_2 的方向更靠近 $A \cdot B$ 区法线的方向。且 $|\mathbf{v}_2| > |\mathbf{v}_1|$ 。由图1-2可知, $v_{r1} = v_1 \sin \alpha$, $\mathbf{v}_{r2} = \mathbf{v}_2 \sin \beta$,故电子束在静电场中产生折射时有:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1-6)$$

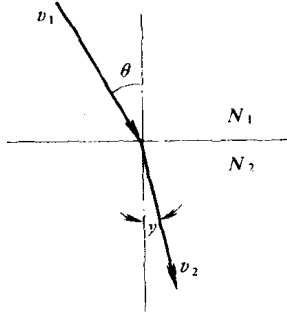


图1-1 光的折射

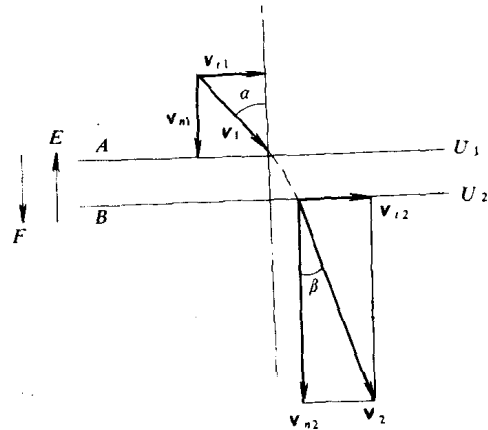


图1-2 电子束在电场作用下折射

比较式(1-5)和(1-6)及图1-1和图1-2,可以看出,可见光和电子束通过相应的物质界面时,具有类似的折射方式,所不同的是:可见光从光疏介质进入光密介质时, $\gamma < \theta$,相应的速度也变小;而电子束从低电压区进入高电压区时,虽然折射角 β 小于入射角 α ,但电子的速度却增加了。

利用折射的原理可以使可见光和电子束聚焦,如果把平行的可见光通过一个玻璃凸透镜,

就会聚集在焦点上。按照同样的道理，我们把静电场的等位面也做成凸透镜状，那末平行电子束也会会聚在一个焦点上。

电子在运动时受到磁场的作用也会产生偏折，但是由于磁场力（洛仑兹力）的作用，电子除了产生偏折外，还会在垂直于磁场的平面内作匀速圆周运动。有关这个问题将在讨论磁透镜时作进一步分析。

§1-2 静电透镜和磁透镜

一、静电透镜

一对电位不等的圆筒就可构成一个最简单的静电透镜。如果一个圆筒的电位比另一个圆筒低，弧形的电力线方向由高指向低方。如果我们在垂直于电力线的方向画出等位面，其形状就和凸透镜十分相似 见图1 3。平行的电子束从低向高照射时，就会在筒轴线的某一点上聚焦。

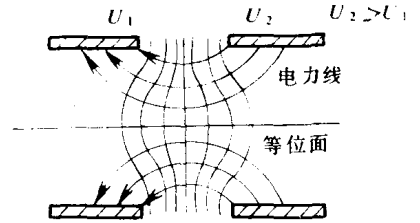


图1 3 静电透镜示意

图一—电力线与等位面分布

如果发射电子的阴极位于静电透镜的电场之内，那末这种静电透镜被称为浸没透镜。在电子显微镜中，发射电子束的电子枪就属于这一类静电透镜。

二、磁透镜

图1 4为磁透镜的聚焦原理示意图。通电的短线圈就是一个简单的磁透镜，它能造成一种不均匀分布的磁场。磁力线围绕导线成环状，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 和垂直于透镜主轴的分量 B_r 。速度为 v 的平行电子束进入透镜的磁场时，位于 A 点的电子将受到 B_r 分量的作用。根据右手法则，电子所受的切向力 F_t 的

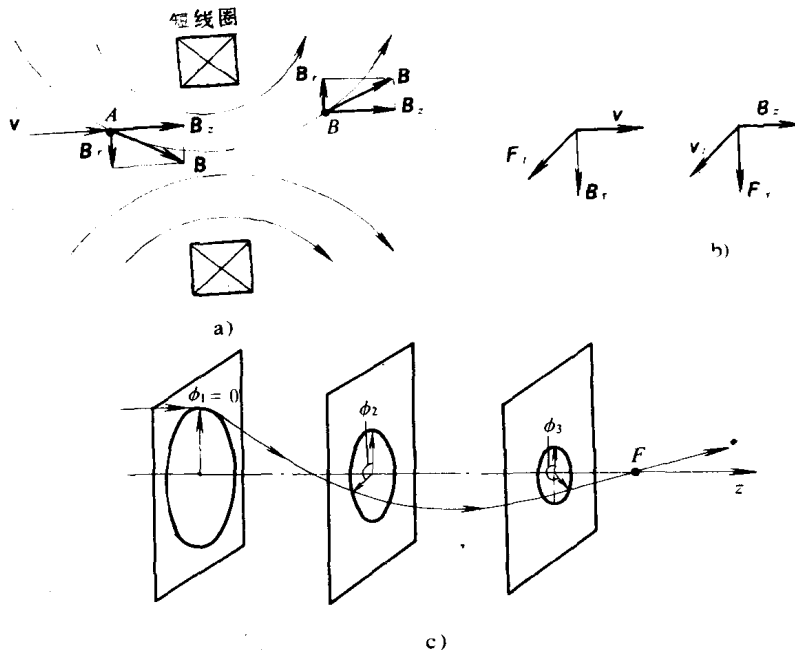


图 1-4 磁透镜的聚焦原理示意图

方向如图1-4b所示。 F_r 使电子获得一个切向速度 v_r 。 v_r 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(聚焦)。当电子穿过线圈走到一点位置时, B_r 的方向改变了180度, F_r 随之反向,但是 F_r 的反向只能使 v_r 变小,而不能改变 v_r 的方向,因此穿过线圈的电子仍然趋向于向主轴靠近。图1-4c示出了平行电子束通过磁透镜时,电子的聚焦轨迹。由于洛仑兹力的作用,用磁透镜成像时,图象会相对于物体产生一定角度的旋转。

图1-5为一种带有铁壳的磁透镜示意图。导线外周的磁力线都在铁壳中通过,由于在软磁壳的内侧开一道环状的狭缝,从而可以减小磁场的广延度,使大量磁力线集中在缝隙附近的狭小地区之内,增强了磁场的强度。为了进一步缩小磁场轴向宽度,还可以在环状间隙两边,接出一对顶端成圆锥状的极靴,如图1-6所示。带有极靴的磁透镜可使有效磁场集中到沿透镜轴几毫米的范围之内。

光学玻璃透镜成像时,物距、象距和焦距三者之间关系式为:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \quad (1-7)$$

式中 f 为焦距, L_1 为物距, L_2 为象距。光学玻璃透镜的焦距 f 是不能改变的,因此要满足成像条件, L_1 和 L_2 必须同时改变。

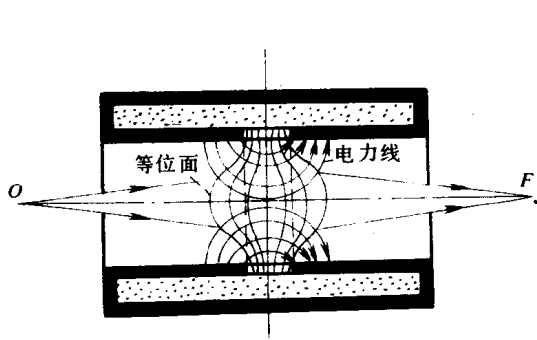


图1-5 带有软磁壳的磁透镜示意图

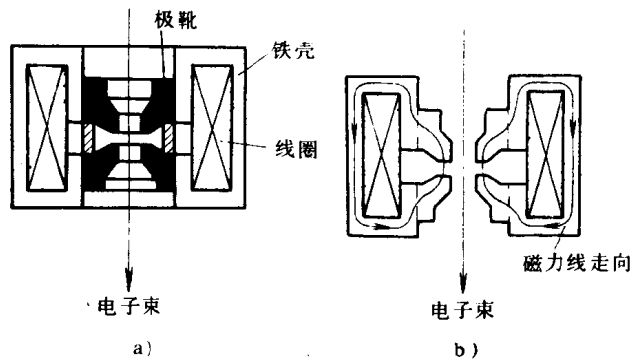


图1-6 带有极靴的磁透镜
a) 结构图 b) 磁力线在极靴中行进路线

磁透镜的焦距可以通过线圈中所通过的电流大小来改变,因此,它的焦距可任意调节。用磁透镜成像时,可以在保持物距不变的情况下,改变焦距和象距来满足成像条件,也可以保持象距不变,改变焦距和物距来满足成像条件。

§ 1-3 电磁透镜的象差

象差分成两类,即几何象差和色差。

1. 几何象差 这是因为透镜磁场几何形状上的缺陷而造成的。几何象差主要指球差和象散。

2. 色差 是由于电子波的波长或能量发生一定幅度的改变而造成的。

下面我们将分别讨论球差、象散和色差形成的原因并指出减小这些象差的途径。

一、球差

球差是由于磁透镜的中心区域和边缘区域对电子的折射能力不同而造成的。离开透镜主

轴较远的电子（远轴电子）比主轴附近的电子（旁轴电子）折射能力强。当物点 P 通过透镜成像时，电子就不会会聚到同一焦点上，从而形成了一个散焦斑，如图1-7所示。如果象平面在远轴电子的焦点和旁轴电子的焦点之间作水平移动，就可以得到一个最小的散焦圆斑。最小散焦斑的半径用 R_s 表示。若把 R_s 除以放大倍数，就可以把它折算到物平面上去，其大小

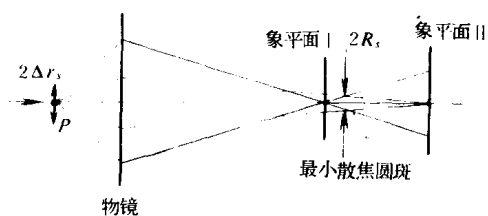


图 1-7 球差

$\Delta r_s = \frac{R_s}{M} \cdot \Delta r_s$ 为由于球差造成的散焦斑半径，用它来表示球差的大小， M 为透镜的放大倍数。 Δr_s 可通过下式计算：

$$\Delta r_s = \frac{1}{4} c_s a^3 \quad (1-8)$$

c_s 为球差系数。通常情况下，物镜的 c_s 值相当于它的焦距大小，约为1~3mm。 a 为孔径半角(rad)。从式(1-8)可以看出，减小球差可以通过减小 c_s 值和缩小孔径角来实现，因为球差和孔径半角成三次方的关系，所以用小孔径角成像时，可使球差明显减小。

二、象散

极靴内孔不圆、上下极靴的轴线错位、制作极靴的材料材质不匀以及极靴孔周围局部污染等原因都会使磁透镜的磁场产生椭圆度。透镜磁场的这种非旋转性对称，会使它在不同方向上的聚焦能力出现差别，结果使成像物点 P 通过透镜后不能在象平面上聚焦成一点，见图1-8。在聚焦最好的情况下，能得到一个最小的散焦斑，把最小散焦斑的半径 R_A 折到物点 P 的位置上去，就形成了一个半径为 Δr_A 的圆斑，用 Δr_A 来表示象散的大小。 Δr_A 可通过式(1-9)计算：

$$\Delta r_A = \Delta f_A a \quad (1-9)$$

式中 Δf_A 为磁透镜出现椭圆度时造成的焦距差。如果磁透镜在制造过程中已存在固有的象散，则可以通过引入一个强度和方位都可以调节的矫正磁场来进行补偿，这个产生矫正磁场的装置就是消象散器。

三、色差

图1-9为形成色差原因的示意图。若入射电子能量出现一定的差别，能量大的电子在距透镜光心比较远的地点聚焦，而能量较低的电子在距光心较近的地点聚焦，由此造成了一个焦距差。把象平面在长焦点和短焦点之间移动时，也可得到一个最小的散焦斑，其半径为 R_c 。

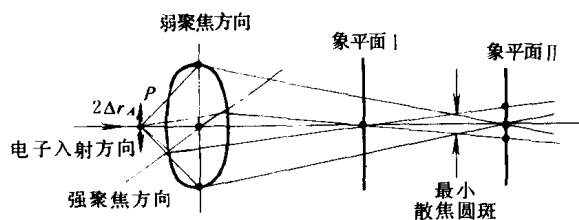


图 1-8 象散

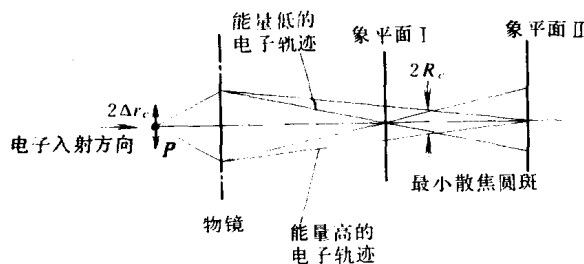


图 1-9 色差

把 R 除以透镜的放大倍数,即可把散焦斑的半径折算到象点 P 的位置上去,这个半径大小等于 Δr_c ,其值可以通过式1-10计算

$$\Delta r_c = C_c \alpha \left| \frac{\Delta E}{E} \right| \quad (1-10)$$

式中 C_c 为色差系数, $\frac{\Delta E}{E}$ 为电子束能量变化率。当 C_c 和孔径角 α 一定时, $\left| \frac{\Delta E}{E} \right|$ 的数值取决于加速电压的稳定性和电子穿过样品时发生非弹性散射的程度。如果样品很薄,则可以把后者的影响略去,因此采取稳定加速电压的方法可以有效地减小色差。

§ 1-4 透镜的分辨率

透射电子显微镜的分辨率主要由衍射效应和象差来决定。

一、衍射效应对分辨率的影响

由衍射效应所限定的分辨率在理论上可由Rayleigh公式计算,即

$$\Delta r_o = \frac{0.61 \lambda}{N \sin \alpha} \quad (1-11)$$

式中 Δr_o 表示成象物体(试样)上能分辨出来的两个物点间的最小距离,是一个长度值,用它来表示分辨率的大小。 Δr_o 愈小,透镜的分辨率愈高。式中 λ 为波长, N 为介质的相对折射系数, α 为透镜的孔径半角。

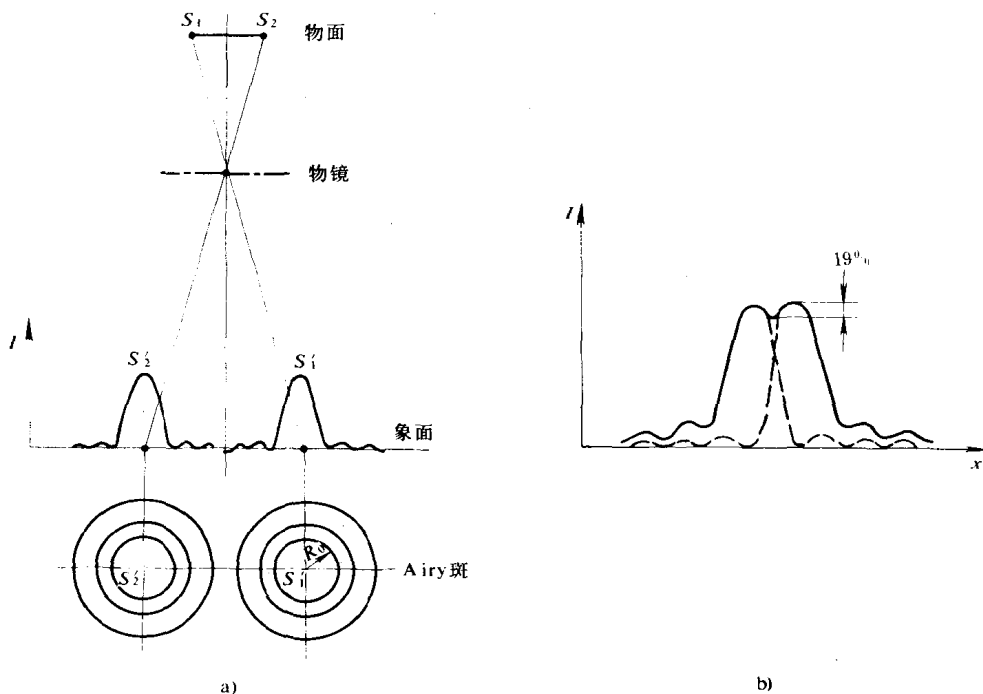


图 1-10 两个点光源成象时形成的Airy斑

a) Airy斑 b) 两个Airy斑靠近时强度叠加

现在我们主要来分析一下 Δr_0 的物理含义。图1-10中物体上的光点通过透镜成像时，由于光阑孔边缘产生衍射的缘故，在象平面上得到的并不是一个点，而是一个中心最亮，周围常有明暗相间同心圆环的圆斑，即所谓Airy斑。若样品上有两个光点 S_1 、 S_2 通过透镜成像，在象平面上会产生两个衍射斑 S_1' 、 S_2' ，如图1-10a，如果这两个衍射斑相互靠近，当两个光斑强度峰间的强度谷值比强度峰值低19%时（把强度峰的高度看作100%），这个强度反差对人眼来说是刚有所感觉。也就是说，这个反差值是人眼能否感觉出存在 S_1' 和 S_2' 两个斑点的临界值。式(1-11)中的常数项就是以这个临界值为基础的。在峰谷之间出现19%强度差值时，象平面上 S_1' 和 S_2' 之间的距离正好等于衍射斑的半径 R_0 ，把衍射斑折算回到点 S_1 和 S_2 的位置上去时，就能形成两个以 $\Delta r_0 = \frac{R_0}{M}$ 为半径的小圆斑，两个圆斑之间的距离与它们的

半径相等。如果把试样上 S_1 点和 S_2 点间的距离进一步缩小，那末人们就无法通过物镜把它们的象 S_1' 和 S_2' 分辨出来。由此可见，若以任一物点为圆心，并以 Δr_0 为半径作一个圆，此时与之相邻的第二物点位于这个圆周之内时，则透镜就无法分辨出此二物点间的反差。如果第二物点位于圆周之外，便可被透镜鉴别出来，因此 Δr_0 就是衍射效应规定的分辨率。

通过式(1-11)的分析可知，减小波长，增加 N 和 a 值均可使 Δr_0 减小，从而可以提高透镜的分辨率。若从波长来看，电子显微镜的加速电压上升到100~200 kV 时，其波长将比可见光短5个数量级，因此可以大大提高它的分辨率。但是，从孔径半角的角度来看，为了减小球差，磁透镜的孔径半角一般只有 $1^\circ \sim 2^\circ$ ，因此不能期望用加大孔径半角的手段来提高分辨率，与之相反，光学透镜成像时，可以把孔径半角加大到 70° 以上。

二、象差对分辨率的影响

如前所述，由于球差、象散和色差的影响，物体（试样）上的光点在象平面上均会扩展成散焦斑。各散焦斑半径折算回物体后得到的 Δr_s 、 Δr_A 、 Δr_c 值自然就成了由球差、象散和色差所规定的分辨率。

一个已经制造好的磁透镜，在使用过程中，球差、象散和色差都是客观存在的，此外还不可避免会出现衍射效应，若同时考虑衍射和球差对分辨率的影响时，则会发现改善其中一个因素时会使另一因素变坏。为了使透镜的球差变小，可通过减小 a 来实现，但从衍射效应来看， a 减小将使 Δr_0 变大，分辨率下降。为了解决这个矛盾可以令式(1-8)中的 Δr_s 和式(1-11)中的 Δr_0 相等，求出相应的 a 角，这就是兼顾球差和衍射效应的最佳孔径角 a_0 ，即 $a_0 = 12.5 \left(\frac{\lambda}{c_s} \right)^{\frac{1}{4}}$ 。故磁透镜的孔径半角一般位于 $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{1000}$ rad 之间。

样品上的任一物点在象平面上成像时，由衍射、球差、象散和色差造成的散焦斑都在象平面上同一位置重合，此时磁透镜分辨率的好坏取决于这些散焦斑中最大斑点的半径尺寸。提高分辨率的方法是减小最大斑点的半径。

§1-5 电磁透镜的景深和焦长

一、景深

透镜的景深是指当象平面固定时（象距不变），能维持物象清晰的范围内，允许物平面（样品）沿透镜主轴移动的最大距离。

在理想状态下（不考虑衍射、球差、象散和色差等影响），样品上某一物点位于 O 位置时，见图1-11，该点在象平面上应形成一个象点 O' 。当试样向上方移动，使 O 点和 A 点重合时， A 点的象应位于 A' 处。如果象平面的位置保持不变，则 A' 点将在象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 和 B 点重合时， B 点将在 B' 处成像，但在象平面上同样会形成一个半径为 R 的散焦斑。

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 Δr_o 为最大），那末在象平面上由衍射引起的散焦斑半径应是 R_o ，因此，只要物点在象平面上形成的圆斑半径 R 小于或等于 R_o 时，象平面上的图象仍能保持清晰，所以，样品在位置 A 和 B 的范围内移动时，并不影响物象的清晰度， AB 间的这段距离称为景深，用 D_f 表示。

由图1-11上的几何关系可知：

$$D_f = \frac{2\Delta r_o}{\text{tg } \alpha} \quad (1-12)$$

式中 $\Delta r_o = \frac{R_o}{M}$ ； M 为放大倍数； α 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 α_A 、 α_B 近似地和 α 相等。如果 $\Delta r_o = 1\text{nm}$ ， $\alpha = 10^{-2} \sim 10^{-3}\text{rad}$ ，求出的 $D_f = 200 \sim 2000\text{nm}$ 。

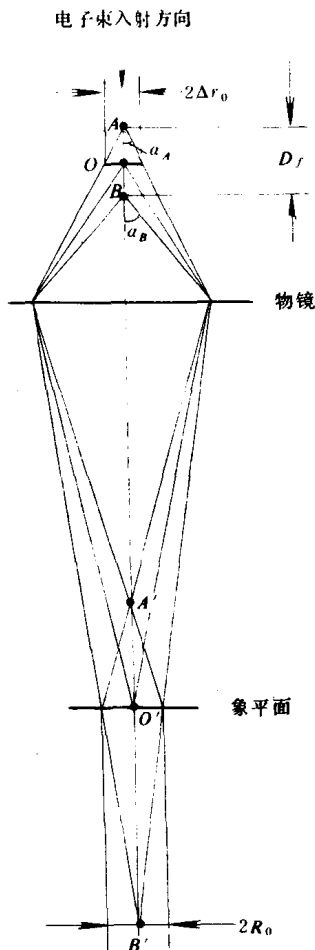


图 1-11 景深

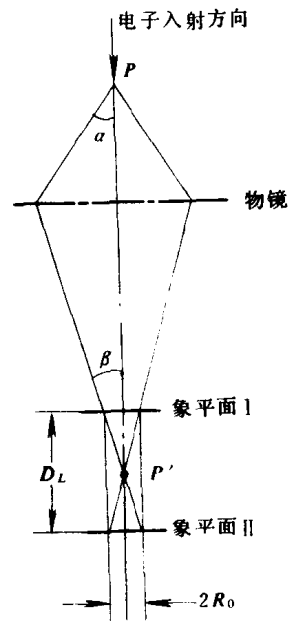


图 1-12 焦距

金属薄膜试样的厚度一般只有200~300nm厚，因此上述景深范围可以保证样品整个厚度范围内各个结构细节都清晰可见。

二、焦长

透镜的焦长是指固定样品的条件下（物距不变），象平面沿透镜主轴移动时仍能保持物象清晰的距离范围。

由图1-12可见，样品上某一点 P 通过透镜后正焦位置应是 P' 点。如果把象平面移动到I位置，则 P' 将散成一个半径为 R_o 的欠焦斑；如果把象平面反向移动相等的距离到达位置II时，则得到半径为 R_o 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_o ，则根据图1-12中的几何关系可得到

$$D_L = \frac{2 \Delta r_o M}{\text{tg } \beta} \approx \frac{2 \Delta r_o M}{\beta} \quad \text{其中 } R_o = \Delta r_o M$$

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

$$\therefore D_L = \frac{2 \Delta r_o M^2}{\alpha} \quad (1-13)$$

式中 D_L 就是透镜的焦长。如果 $\Delta r_o = 1\text{nm}$ ， $\alpha = 10^{-2}\text{rad}$ ， $M = 200$ 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，如果 $M = 2000$ 倍时， D_L 可达80cm。因此在透射电镜中，荧光屏和照相底片之间的距离虽然很大，但仍能得到清晰的图象。

从计算景深和焦长的公式中可以看到，随着孔径半角 α 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，可使景深和焦长明显变大。

思考题

1. 电子束的折射和光的折射有何异同点？
2. 比较静电透镜和磁透镜的聚焦原理。
3. 球差、色差和象散是怎样造成的？用什么方法减小这些象差？
4. 说明透镜分辨率的物理意义。用什么方法提高透镜的分辨率？
5. 分辨率、有效放大倍数和放大倍数在意义上有何区别？
6. 电磁透镜的景深和焦长是受哪些因素控制的？

第二章 透射电子显微镜

§2-1 透射电子显微镜的结构和成象原理

图2-1为透射电子显微镜和光学显微镜的光路系统示意图。从光学成象原理来看，二者是相同的。透射电镜和光学显微镜之间的差别主要有以下几个方面，即透射电镜的照明光源是电子束，光学显微镜的照明光源是可见光；电子束是用电磁透镜来聚焦的，而可见光是用玻璃透镜来聚焦；透射电镜的物镜和投影镜（相当于目镜）之间装有一个中间镜，中间镜的引入不仅可以调节放大倍数，而且可以进行电子衍射操作；可见光形成的象可以在毛玻璃或白色屏幕上显示出来，而由电子束形成的象只能在荧光屏上才能显示出来。

图2-2为一台透射电子显微镜的镜体剖面示意图，透射电子显微镜是由三个主要部分组成的，它们分别是照明系统、成象系统和观察记录系统。现将这三个系统分述如下：

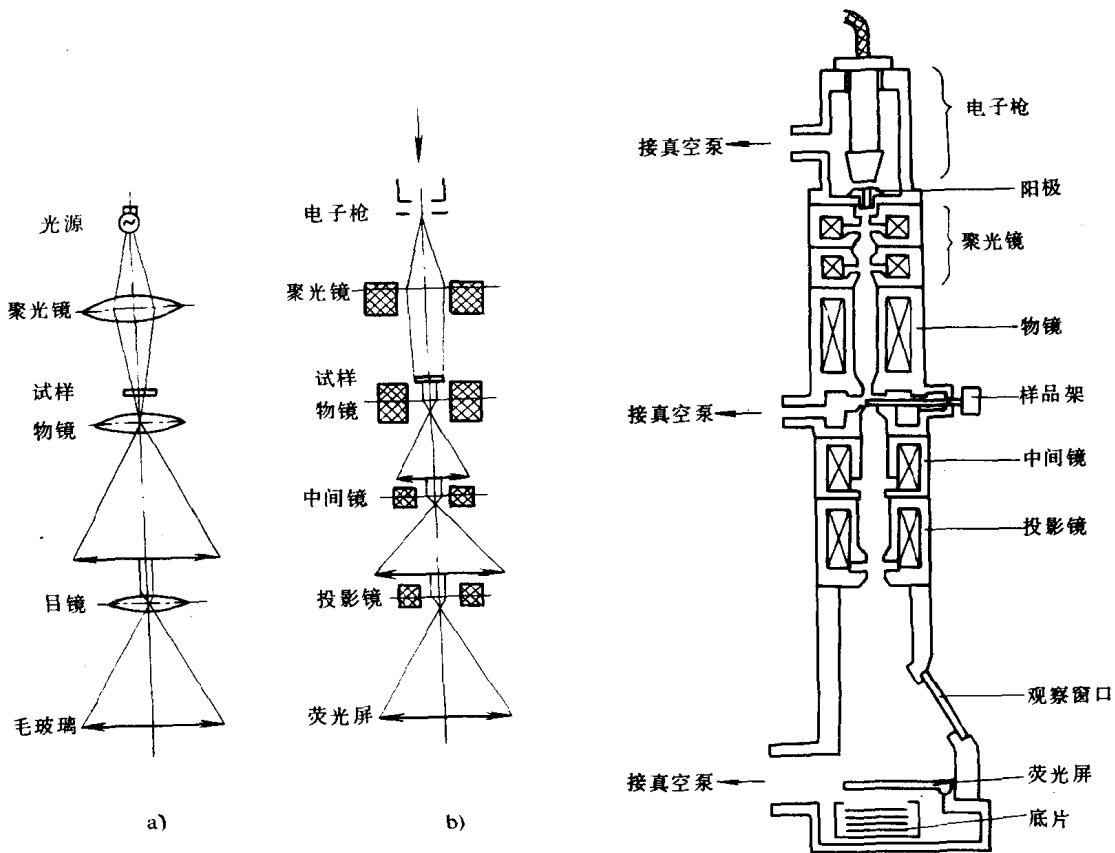


图2-1 透射电子显微镜和光学显微镜的光路系统比较

图2-2 透射电子显微镜的镜体剖面示意图

a) 光学显微镜的光路图 b) 透射电子显微镜的光路图

一、照明系统

照明系统主要由电子枪和聚光镜组成。电子枪是发射电子的照明光源。聚光镜的作用是

把由电子枪发射出来的电子会聚而成的交叉点进一步会聚到样品表面上去。

(一) 电子枪

图2-3为电子枪的示意图。图2-3 a为电子枪的自偏压回路。负的高压直接加在栅极上，而阴极和负高压之间因加上了一个偏压电阻，使栅极和阴极之间有一个数百伏的电位差。图2-3 b中反映了阴极、栅极和阳极之间的等位面分布情况。因为栅极比阴极电位值更负，所以可以用栅极来控制阴极的发射电子有效区域。当阴极流向阳极的电子数量加大时，在偏压电阻两端的电位值增加，使栅极电位比阴极进一步变负，由此可以减小灯丝有效发射区域的面积，束流随之减小。若束流因某种原因而减小时，偏压电阻两端的电压随之下降，致使栅极和阴极之间的电位接近，此时栅极排斥阴极发射电子的能力减小，束流又可望上升。因此，自偏压回路可以起着限制和稳定束流的作用。由于栅极的电位比阴极负，所以自阴极端点引出的等位面在空间呈弯曲状。在阴极和阳极之间的某一地点，电子束会会聚成一个交叉点，这就是所谓虚光源或有效光源，其直径约几十微米。

(二) 聚光镜

放大倍数为几十万倍的高分辨电子显微镜要求样品被照明的范围很小，因此应把电子枪提供的光斑直径进一步会聚缩小，以便得到一束强度高、直径小、相干性又好的电子束。高

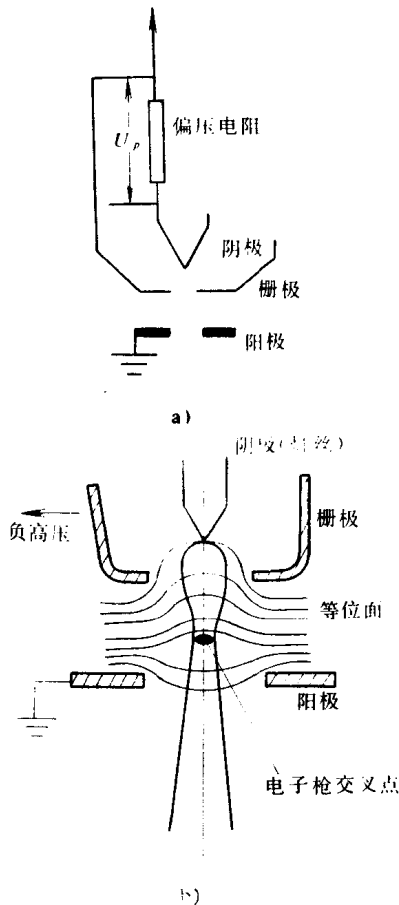


图 2-3 电子枪

a) 自偏压回路 b) 电子枪内的等位面

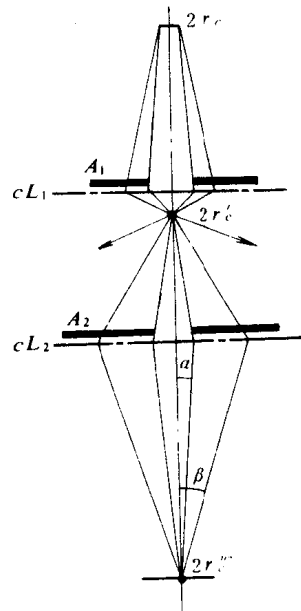


图 2-4 双聚光镜的原理图

性能电子显微镜一般都采用双聚光镜系统。图2-4为双聚光镜的原理图，图中 $2r_e$ 为电子枪光斑直径， cL_1 、 cL_2 分别表示第一聚光镜和第二聚光镜， A_1 、 A_2 为聚光镜光阑。第一聚光镜的光阑孔是固定的，而第二聚光镜的光阑孔做成分档可变，其直径可从 $100\mu\text{m}$ 增大到 $500\mu\text{m}$ 。

当电子枪光斑位于第一聚光镜两倍焦距之外时，光斑象将被缩小到直径等于 $2r_e'$ 。第一聚光镜是一个强磁透镜，焦距很短，在保持物距 L_1 不变的条件下，焦距 f 变短时，为满足成像条件，象距 L_2 也必须缩得很小（因为 $\frac{1}{f} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$ ， $M = \frac{L_2}{L_1}$ ， M 为放大倍数）。通常情况下，

第一聚光镜可以把电子枪光斑缩小十至五十倍（即 $M = \frac{1}{10} \sim \frac{1}{50}$ ）。由于第一聚光镜的焦距很小，如果要在第一聚光镜下面安放物镜时，二者靠得太近，无法布置样品台和其它附件，因此在第一聚光镜下还必须加入第二聚光镜 cL_2 。第二聚光镜是一个弱透镜，它的焦距很长，如果把光斑的一次象 $2r_e'$ 置于第二聚光镜的略小于两倍焦距的位置上，则可得到一个比 $2r_e'$ 稍大的二次象 $2r_e''$ 。光阑 A_2 可使第二聚光镜的孔径半角从 β 减小到 α ，孔径半角减小可使成像电子束只限于近轴光束，由此可以减小球差，提高成像质量。如果把 $2r_e'$ 置于第二聚光镜的焦点处，则可以得到一束平行的电子束，有利于进行衍射操作。在第二聚光镜下方安置物镜时，因二者间留有较大的间隙，可用于装入样品台和其它附件。

双聚光镜的优点是：可以在较大的范围内调节电子束束斑的大小；可以限制样品上被照射的面积，使被照射部分以外的区域免受污染，使样品的温升降低，可减小热漂移，防止烧损和破裂；以及电子束的发散度小，便于得到高质量的衍射花样。

二、成像系统

成像系统主要是由物镜、中间镜和投影镜组成。

（一）物镜

物镜的作用是形成样品的第一次放大象，电子显微镜的分辨率是由一次象来决定的。只有被物镜分辨出来的结构细节，通过中间镜和投影镜放大，才能被肉眼看清。如果样品上的结构细节并未被物镜所鉴别，那末中间镜和投影镜只能起到把这个仍然模糊的细节继续放大的作用。

物镜是一个强励磁短焦距的透镜（ $f = 1 \sim 3\text{mm}$ ），它的放大倍数较高，一般为 $100 \sim 300$ 倍。目前高质量的物镜其分辨率可达 0.1nm 左右。

物镜的分辨率主要决定于极靴的形状和加工精度。一般来说极靴的内孔和上下极靴之间的距离愈小，物镜的分辨率就愈高。为了减小物镜的球差，往往在物镜的后焦面上安放一个物镜光阑。物镜光阑不仅具有减小球差、象散和色差的作用，而且可以提高图象的衬度。此外，我们在以后的讨论中还可以看到，物镜光阑位于后焦面的位置上时，可以方便地进行暗场的衍衬成像操作。

在用电子显微镜进行图象分析时，物镜和样品之间的距离总是固定不变的（即物距 L_1 不变），因此改变物镜放大倍数进行成像时，主要是改变物镜的焦距和象距（即 f 和 L_2 ）来满足成像条件。

（二）中间镜

中间镜是一个弱透镜，其焦距很长，放大倍数可通过调节励磁电流来改变。一般情况下，中间镜的放大倍数位于 $0 \sim 20$ 倍之间。当 $M > 1$ 时，中间镜起放大作用；当 $M < 1$ 时，可起

缩小作用。在电镜操作过程中，主要是利用中间镜的可变倍率来控制电镜的总放大倍数。如果物镜的放大倍数 $M_0 = 100$ ，投影镜的放大倍数 $M_p = 100$ ，则在中间镜放大倍数 $M_i = 20$ 时，总放大倍数 $M = 100 \times 20 \times 100 = 200000$ 倍。若 $M_i = 1$ ，则总放大倍数为 10000 倍。如果 $M_i = \frac{1}{10}$ ，则总放大倍数仅为 1000 倍。

为了讨论方便起见，中间镜象平面和投影镜物平面之间的距离可近似地认为固定不变（即中间镜的象距 L_2 固定不变），参看图 2-5a、d。因此，若要荧光屏上得到一张清晰的放大象，必须使中间镜的物平面正好和物镜的象平面重合，即通过改变中间镜的激磁电流，使其焦距变化，与此同时，中间镜的物距 L_1 也随之改变。

如果把中间镜的物平面和物镜的后焦面位置重合时，在荧光屏上得到的是一幅电子衍射花样，这就是所谓电子显微镜中的电子衍射操作。

在中间镜的上方，物镜的象平面位置上有时可以加入一个中间镜光阑，这个光阑孔的直径是分档可变的，习惯上称它为选区光阑。选区光阑的作用是只让通过光阑孔的一次象所对应的样品区域提供衍射花样，以便于该微区组织的晶体结构分析，这就是选区衍射操作。有关电子衍射和选区电子衍射的内容将在第四章中详细分析。

（三）投影镜

投影镜的作用是把经中间镜放大（或缩小）的象（或电子衍射花样）进一步放大，并投影到荧光屏上，它和物镜一样，是一个短焦距的强磁透镜。投影镜的励磁电流是固定的，因为成象电子束进入投影镜时孔径角很小（约 10^{-5} rad），因此它的景深和焦长都非常大。即使改变中间镜的放大倍数，使显微镜的总放大倍数有很大的变化，也不会影响图象的清晰度。有时，中间镜的象平面还会出现一定的位移，由于这个位移距离仍处于投影镜的景深范围之内，因此，在荧光屏上的图象依旧是清晰的。

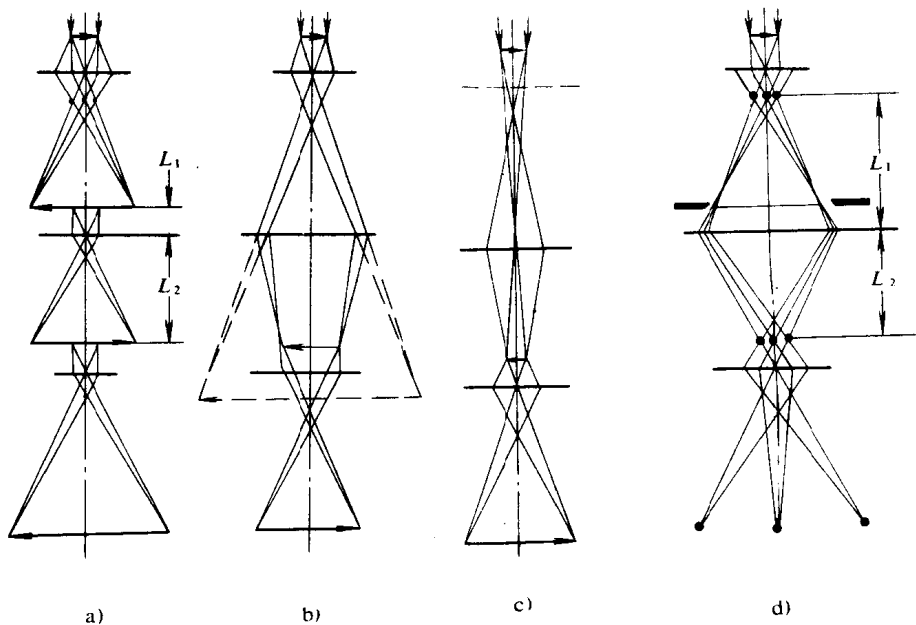


图 2-5 透射电子显微镜成象时四种典型光路图

- a) 高倍放大 b) 低倍放大
c) 极低倍放大 d) 电子衍射