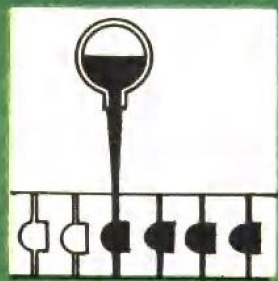
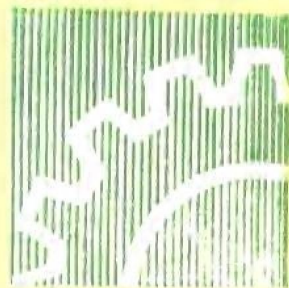
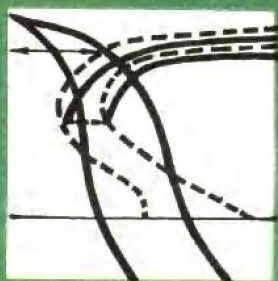


高等学校试用教材



金属电子显微分析

上海交通大学 陈世朴 合编
王永瑞



15.21

机械工业出版社

高等学校试用教材

金属电子显微分析

上海交通大学 陈世朴 合编
王永瑞



机械工业出版社

金属电子显微分析

上海交通大学陈世朴 王永瑞 合编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $16 \frac{1}{4}$ · 字数 395 千字

1982 年 7 月北京第一版 · 1982 年 7 月北京第一次印刷

印数 00,001—11,000 · 定价 1.70 元

*

统一书号: 15033 · 5117

前 言

本书是根据一九七八年六月在西安举行的一机部金相热处理对口专业教材会议所通过的教学计划和《金属电子显微分析》课程教学大纲的要求进行编写的，讲述透射电子显微镜、扫描电子显微镜和电子探针等电子显微分析仪器的的工作原理、构造和分析方法，偏重于金属材料方面的应用，但对于其它类型材料的研究，其原理同样是适用的。我们在编写过程中，对于样品的制备、测试的条件以及为解释分析结果所需要的基本理论给予了必要的重视，以期读者能够正确地选择和运用这些技术去解决材料研究中提出的各种问题。

考虑到目前有关院校金相热处理专业在材料和工艺两方面侧重的情况有所不同，对本课程的要求和安排的时数也有差异，我们在编写时适当考虑了某种程度的伸缩性，以便大体上可在40~60学时内进行讲授。目录内注有星号(*)的一些章节，可根据具体情况加以取舍。

本书由上海交通大学材料科学与工程系陈世朴和王永瑞合编，第一、二、三、六章由王永瑞编写，第四、五、七、八章及附录由陈世朴编写，并经西安交通大学机械系张平生、胡志忠、谈育煦三位老师审阅。第一机械工业部教材编辑室丁孝模担任本书责任编辑。

上海交通大学胡赓祥、李鹏兴两位老师对本书的编写提供了许多宝贵的指导性意见，方莲华、徐南华同志承担了大量图片的翻拍、印相工作，杨玉铭、周平南、戎咏华、周本兴、潘仁积和甘肃工业大学王国梁等同志为抄写、校对书稿和描图付出了大量的劳动，谨此表示由衷的感谢。

由于我们在电子显微分析方面的理论基础和实践经验都很不足，本书缺点和错误之处在所难免，望读者和有关方面批评指正，以便再版时加以修改。

目 录

绪论	1	3. 分辨本领的测定	30
第一章 电子光学基础	2	4. 放大倍数的测定	31
一、概述	2	第三章 复型技术	33
二、光的折射和光学透镜成像	2	一、概述	33
1. 光的折射	2	二、非晶体样品质厚衬度成像原理	34
2. 光学透镜成像	3	1. 单个原子对入射电子的散射	34
三、光的衍射和光学显微镜分辨本领		2. 透射电子显微镜小孔径角成像	35
理论极限	5	3. 质厚衬度成像原理	35
1. 光的衍射	5	三、复型图像衬度的改善——投影	38
2. 光学显微镜分辨本领理论极限	5	四、塑料一级复型	40
3. 有效放大倍数	6	五、碳一级复型	41
四、电子的波性及其波长	7	六、塑料-碳二级复型	42
*五、电子在静电场中运动和静电透镜	9	七、抽取复型	43
1. 电子在静电场中运动	9	*八、氧化物复型	45
2. 静电透镜	10	*九、支持膜和粉末(或颗粒)样品制备	45
六、电子在磁场中运动和磁透镜	11	1. 塑料支持膜	45
1. 电子在磁场中运动	11	2. 塑料-碳支持膜	46
2. 磁透镜	12	3. 碳支持膜	46
*七、电磁透镜的像差	15	4. 粉末或颗粒样品制备	46
八、电磁透镜分辨本领	17	十、复型电子显微镜图像分析	46
*九、电磁透镜的景深和焦长	18	十一、复型技术在金相分析中的应用	49
第二章 透射电子显微镜	20	1. 钢中屈氏体组织的识别	49
一、概述	20	2. 贝氏体的组织形态	50
二、照明系统	22	3. 碳钢的回火组织	53
1. 电子枪	22	4. 利用抽取复型鉴定物相	53
2. 聚光镜	23	十二、金属断口分析中复型技术	55
3. 垂直照明和倾斜照明	24	第四章 电子衍射	57
三、成像系统	25	一、概述	57
1. 物镜、中间镜和投影镜	25	二、布喇格定律	58
2. 高放大倍数成像	25	三、倒易点阵和爱瓦尔德球作图法	59
3. 中放大倍数成像	26	1. 倒易点阵的概念	59
4. 低放大倍数成像	26	2. 爱瓦尔德球作图法	61
四、图像观察和记录系统	26	3. 倒易阵点的“权重”——结构因数	
五、样品台	26	或结构振幅	61
六、透射电子显微镜分辨本领和放大		四、电子衍射基本公式和相机常数	62
倍数的测定	28	五、电子显微镜中的电子衍射	64
*1. 消像散	28	1. 电子显微镜中的电子衍射和有效	
*2. 费涅尔衍射条纹	29		

相机常数	64	5. 堆积层错	119
2. 选区电子衍射的原理和操作	65	6. 位错	121
*3. 显微电子衍射	66	7. 第二相粒子	125
*4. 高分辨率衍射	66	8. 运动学理论的适用范围	131
*5. 高分散性衍射(或小角度衍射)	67	*七、衍衬动力学理论	132
六、多晶电子衍射花样和相机常数的 标定	67	1. 理想晶体的动力学基本方程	133
1. 多晶衍射花样的产生及其几何特征	67	2. 动力学方程的求解	134
2. 多晶花样的分析方法及应用	69	3. 厚度消光和弯曲消光	137
3. 相机常数的标定	70	4. 反常吸收效应	138
七、单晶电子衍射花样的分析	71	5. 明、暗场像衬度的不互补性	141
1. 单晶衍射花样的产生及其几何特征	72	6. 缺陷晶体的动力学方程	142
2. 单晶花样的分析——尝试-校核 法和标准花样对照法	75	7. 晶体缺陷图像的衬度特征	143
*3. 单晶花样指数化的不唯一性	78	八、薄膜衍衬技术在金属研究中的应用	146
八、选区电子衍射中图像相对于花样的 磁转角标定	80	1. 钢中两类马氏体形态的精细结构	147
九、抽取复型粒子的物相鉴定	81	2. 碳钢回火过程早期析出的碳化物	149
*十、复杂花样及其分析	82	3. 铝合金的时效	151
1. 高阶劳厄带斑点	83	4. 镍基高温合金中 γ' 粒子的强化 机理	154
2. 超点阵斑点	86	第六章 扫描电子显微分析	156
3. 双衍射斑点	87	一、概述	156
4. 孪晶花样	89	二、电子束与固体样品相互作用	156
5. 菊池衍射花样	90	*1. 非弹性散射机制	156
第五章 金属薄膜的透射电子显微 分析	96	2. 固体样品受入射电子激发产生的 各种物理信号	158
一、概述	96	三、扫描电子显微镜工作原理、构造 和性能	162
二、薄膜制备的基本要求	97	1. 工作原理	162
三、由大块样品制备薄膜	97	2. 构造	163
1. 电火花切割薄块	98	3. 扫描电子显微镜主要性能	166
2. 机械研磨预减薄	98	四、样品制备	169
3. 化学抛光预减薄	99	五、扫描电子显微镜像衬度及其应用	169
4. 电解抛光最终减薄	100	1. 表面形貌衬度	169
5. PTFE夹具圆片抛光法	102	2. 表面形貌衬度的应用	171
四、薄晶体样品的衍衬成像原理	103	3. 原子序数衬度及其应用	177
*五、电子波在晶体样品内的散射和传播	106	*六、电子通道分析	180
1. 单个原子和晶胞对电子的散射振幅	106	1. 电子通道效应	180
2. 消光距离的概念	108	2. 电子通道花样的获得	181
六、衍衬运动学理论	112	3. 电子通道花样的指数化	182
1. 基本假设	112	4. 电子通道花样的应用	184
2. 理想晶体的衍射强度	113	*七、扫描透射电子显微分析	184
3. 倾斜晶界等的厚度消光条纹	117	第七章 电子探针X射线显微分析	187
4. 缺陷晶体的衍射强度	118	一、概述	187

二、电子探针仪的工作原理和结构特点	188	2. 衍射花样的观察和记录	220
1. X射线讯号的发生	188	3. 低能电子衍射的应用	221
2. X射线讯号的检测	189	四、俄歇电子能谱仪	222
3. 电子探针仪的结构特点	195	1. 俄歇跃迁及其几率	222
三、电子探针仪的分析方法和应用	198	2. 俄歇电子能谱的检测	224
1. 定点分析	198	3. 定量分析	226
2. 线扫描	201	4. 俄歇谱仪的应用	226
3. 面扫描	203	*五、场离子显微镜	227
*四、定量分析的基本概念	203	1. 场离子显微镜的结构	227
1. 精确强度比 k_A 的获得	203	2. 场致电离和原子成像	228
2. 基体校正诸因素	204	3. 图像的诠释	229
3. $(\bar{Z}AF)$ 全校正公式	207	4. 场致蒸发和剥层分析	230
4. $(\bar{Z}AF)$ 校正的实际计算	209	5. 原子探针	230
5. 定量分析的经验校正方法	211	6. 场离子显微镜的应用	231
6. 轻元素的定量分析	213	附录	
第八章 表面分析技术	215	I 立方晶体的晶面(或晶向)夹角表	234
一、概述	215	II 常见晶体的标准电子衍射花样	241
二、离子探针	215	III 特征X射线的波长和能量表	248
*三、低能电子衍射	218	IV 主要参考书目	250
1. 二维点阵的衍射	219		

绪 论

任何一种材料的宏观性能或行为，都是由其微观组织结构所决定的。从近代发展的观点来看，为了比较透彻地描述或鉴定材料的组织结构，必须对它的化学成分、元素分布、组成相的形貌（包括形状、大小和分布）和晶体结构、各个组成相之间的取向关系和界面状态以及晶体缺陷的密度和组态等，有一个正确和全面的了解，因为所有这些方面的特征，都对材料的宏观性能有着十分敏感的影响。

人们通过长期的生产实践和科学实验，对金属和其它材料的组织结构已经积累了相当丰富的知识，并使一系列重要的分析技术得以发展和完善，其中包括光学金相显微分析、X射线衍射和化学分析方法。但是，就分辨率、检测灵敏度、定量精度以及适应性等方面来说，这些方法已愈来愈不能满足现在科学技术发展的需要。例如，光学金相方法近年来虽也有不少重大的改进，但其分辨率受到光波衍射的限制，只能提供微米数量级左右的形貌细节图像；X射线衍射可以相当精确地测定组成相的晶体结构和位向，可是由于聚焦的困难和衍射信息的强度较弱，一般只能获得总体的或者平均的结果；通常的湿法或光谱化学分析也有类似的缺点，无法给出微观的成分不均匀性资料。除了空间分辨率（分析细节的侧向或深度范围）不够高以外，上述传统方法的另外一个缺点还在于，它们无不例外地不能把形貌显示与成分、结构分析有机地结合起来，每一种方法只能孤立地完成其中一项分析功能。然而，在微观尺度的区域内同时取得形貌、成分和晶体结构等各方面的资料，并且据此确切地鉴定材料的组织结构本质，正是显微分析工作者长久以来渴求的目标。

本世纪三十年代以来，一系列电子光学仪器的相继出现并不断完善，有力地推动了材料显微分析技术的发展。它们主要是：透射电子显微镜（TEM），扫描电子显微镜（SEM），电子探针X射线显微分析仪（EPMA），离子探针（SIMS）、俄歇电子能谱仪（AES）等表面分析仪器。

以电子光学方法将具有一定能量的电子（或离子）会聚成细小的入射束，通过与样品物质的相互作用激发表征材料微观组织结构特征的各种信息，检测并处理这些信息从而给出形貌、成分和结构的丰富资料，是所有电子光学分析仪器的共同特点；它们之间的相互渗透或组合，又进一步开拓了对样品内同一微区（粒子或相区域）进行综合分析的新技术。透射电子显微镜具有最高的分辨本领，如加速电压为100kV的高性能电子显微镜已可达到 $2\sim 3\text{Å}$ ，它能提供极其微细的材料组织结构情况；选区电子衍射（SAED）方法的引入使微观形貌与晶体学性质的分析一一对应起来；利用各种特殊样品台对样品进行高分辨率条件下的系统动态观察，揭示了材料在相变和形变过程中组织结构的变化规律。所以，透射电子显微镜现已成为最重要的显微分析手段。扫描电子显微镜能够以较高的分辨率（ 100Å 左右）和很大的景深清晰地显示粗糙样品的表面形貌，并以多种方式给出微区成分等其它信息，用来观察断口表面微观形态、分析研究断裂的原因和机理，以及其它许多方面的应用，日益受到人们的重视。电子探针仪可以对微米数量级侧向和深度范围内的材料微区进行相当灵敏和精确的化学成分分析，基本上解决了鉴定元素分布不均匀性的困难。随着人们对材料表面或界面现象重要性认识的增长，各种电子光学表面分析仪器和技术应运而生，目前已能取得表面一至几个原子层范围内元素的类别、含量和表层原子排列结构等重要的资料，大大推动了表面科学的发展。

第一章 电子光学基础

一、概 述

对于从事材料显微组织结构分析的工作者来说，关心的是显微镜能清晰成像的最小的细节究竟是多小？它所显示的组织或结构特征与材料的力学、物理和化学性质又有何关系？因此，长期以来人们一直在不遗余力地改进研究材料显微组织形态、晶体结构和微区化学成分的手段。电子显微镜的出现和不断完善，为之提供了一种高放大倍数、高分辨本领、综合功能好的新型分析仪器。

为了便于学习、掌握电子显微镜的原理，首先对光学显微镜要有一定的了解，因为这两种仪器的基本光学原理是相似的。熟悉光学显微镜，就不难理解电子显微镜，它们之间的区别仅在于所使用的照明源和聚焦成像的方法不同而已。两种仪器都属于光学放大仪器。前者用可见光照明，用玻璃透镜聚焦成像；后者用电子束照明，用一定形状的静电场或磁场（静电透镜或磁透镜）聚焦成像。因此，在讨论电子显微镜工作原理之前，需要用一定的篇幅来讨论光学透镜成像和电子光学基本原理，并尽可能地联系两者之间的相似性。

然而，无论光学显微镜或是电子显微镜都不能分辨样品上相距小于照明源半波长的两物点，半波长是两种显微镜分辨本领的理论极限。光学显微镜经历了近三个世纪，于1890年达到了大约2000 Å的分辨本领极限；电子显微镜发明至今仅四十余年，分辨本领已达优于3~5 Å的水平，与光学显微镜相比有了十分显著的提高。由于电子显微镜具有极高的分辨本领和放大倍数，日益成为人们探索微观世界的有效工具。

二、光的折射和光学透镜成像

1. 光的折射

光在均匀介质中是沿直线传播的，可是当光从一种介质传播到另一种介质时，由于光的传播速度随介质而变，因此在两介质分界面上光的传播方向将发生突变。这种现象叫做光的折射，如图1-1所示。

物理学指出，具有一定频率的光叫做单色光。对于给定单色光来说，其频率 ν 在不同介质中是恒定不变的。在折射率为 n 的介质中，光的传播速度 v 等于光在真空中传播速度 c 的 $1/n$ 。由于

$$\begin{aligned} c &= \nu \lambda_0 \\ v &= \nu \lambda \end{aligned} \quad (1-1)$$

所以，单色光在介质中的波长 λ 也等于它在真空中波长 λ_0 的 $1/n$ ，即

$$\lambda = \lambda_0 / n \quad (1-2)$$

实验和理论都证实光的折射服从以下规律：

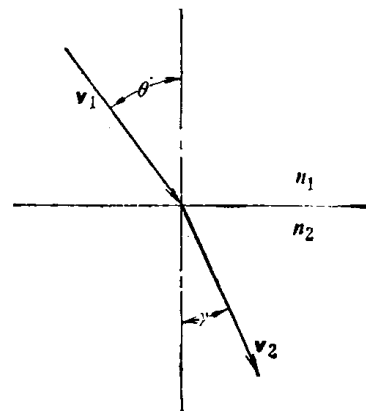


图1-1 光的折射

- 1) 入射光、折射光和介质界面的法线三者都在同一平面内;
- 2) 入射角 θ 、折射角 γ 与两介质折射率 n_1 、 n_2 之间满足以下关系:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1-3 a)$$

由于

$$v_1 = v\lambda_1, \quad v_2 = v\lambda_2$$

所以

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (1-3 b)$$

式中 n_{21} ——相对折射率。

如果 $n_2 > n_1$, 即 $n_{21} > 1$ 或 $\lambda_1 > \lambda_2$, 表明光在第一介质中的传播速度大于在第二介质中的传播速度。前者叫做光疏物质, 后者叫做光密物质。相应情况下折射光比入射光更接近两介质界面的法线, 即 $\gamma < \theta$ 。

2. 光学透镜成像

光的折射是光学透镜成像的基础。

众所周知, 旋转对称的外凸球面透镜具有聚焦和放大作用, 这就是凸透镜。它是光学显微镜聚焦、放大成像的主要部件。

如果凸透镜的厚度比两边球面半径小得多, 这样的透镜叫做薄透镜。它具有以下性质:

1) 在薄透镜中, 通过中心 C 的所有光线都不发生折射, 该中心叫做透镜的中心。通过透镜中心的直线叫做光轴。若光轴又通过透镜球面球心, 叫做主轴, 其余的叫做副轴。通过透镜中心且与主轴垂直的平面叫做透镜主平面, 如图 1-2 所示。

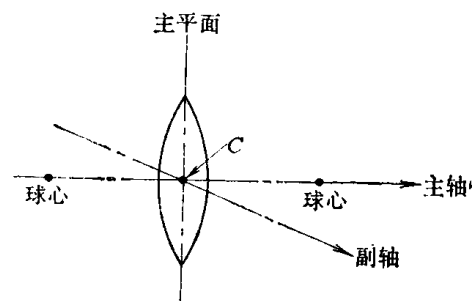


图1-2 透镜中心、光轴和主平面

2) 若向凸透镜照射一束平行于主轴 z 的平行光, 通过透镜后将会聚在主轴上一点, 该点叫做透镜的焦点, 用 F 来标记。透镜中心至焦点的距离叫做焦距, 用 f 来表示, 如图 1-3 a) 所示。任何一个凸透镜都有两个焦点 (前焦和背焦点) 分别在凸透镜的两侧。只要透镜两边折射界面曲率半径和折射介质相同, 那么两侧焦距相等。通过焦点且与主轴垂直的平面叫做焦平面。

一束平行于任一副轴的平行光通过透镜后也将会聚在该副轴与背焦平面的交点上, 如图 1-3 b) 所示。

3) 如果光在凸透镜的前焦点处受到散射, 则通过透镜后变成一束平行于主轴的平行光, 如图 1-3 c) 所示。

因此, 在理想情况下, 如果凸透镜物距 (透镜物平面至主平面的距离) 大于焦距, 样品上任何一物点散射的光经过透镜后会聚在像平面上相应一像点上, 在透镜的另一侧形成实像, 如图 1-3 d) 所示。如果凸透镜物距小于焦距, 则在与物同侧形成虚像, 如图 1-3 e) 所示。一个样品可看成是由许多物点所组成的。由每一个物点散射的光, 经过透镜后都会聚在相应的像点上, 许许多多像点就构成了该样品的像。通过像点且垂直于主轴的平面叫做像平面。

从图 1-3 d)、e) 可以看到几条特殊的光线, 通过这几条特殊光线, 可以用作图的方法

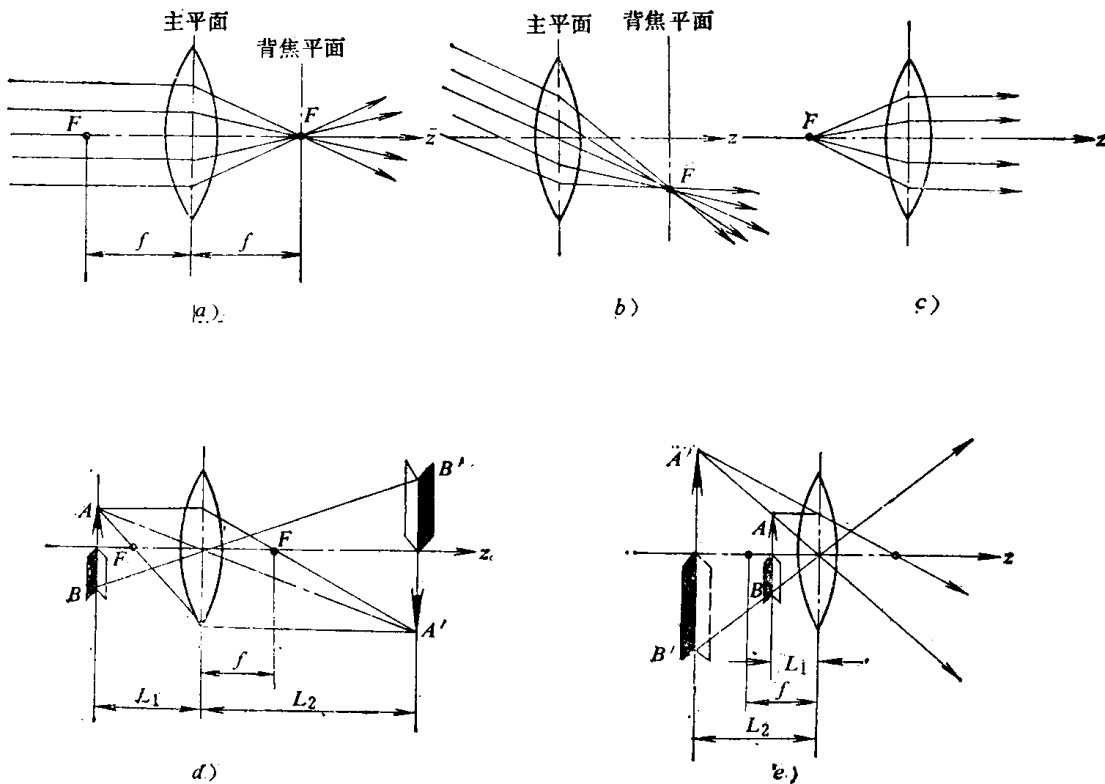


图1-3 光学透镜成像

确定透镜成像的位置和大小:

- 1) 从一物点射出的平行于主轴的光线, 经过透镜后必定要穿过透镜的背焦点;
- 2) 从一物点射出的, 穿过透镜中心的光线不发生折射;
- 3) 从一物点射出的, 通过透镜前焦点的光线, 经过透镜后变成平行于主轴的光线。

只要确定了其中两条光线, 它们的交点就是相应的像点。依此类推, 可以把一个物体的像的位置和大小用作图的方法来确定。

对于薄透镜成像, 物平面、焦平面、像平面三者之间关系, 还可按下式计算来确定:

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{f} \quad (1-4)$$

式中 L_1 ——薄透镜物距, 它永远为正值;

L_2 ——薄透镜像距, 正像距表示倒立实像, 负像距表示正立虚像;

f ——薄透镜焦距, 凸透镜焦距为正, 凹透镜焦距为负。

同样, 只要确定了其中二个参数, 即可按式 (1-4) 来确定第三个参数。

通常用像和物的长度比来定义透镜像的放大倍数, 即:

$$M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{L_2}{L_1} \quad (1-5)$$

表明透镜像放大倍数等于相应像距和物距之比。

三、光的衍射和光学显微镜分辨本领理论极限

1. 光的衍射

光和无线电波一样都属于电磁波。由于它具有波动性质，使得由透镜各部分折射到像平面上的像点及其周围区域的光波相互之间发生干涉作用、产生衍射现象。即使是一个理想的点光源通过透镜成像时，由于衍射效应，在像平面上也不能得到一个理想的像点，而形成一个具有一定尺寸的中央亮斑及其周围明暗相间的圆环所组成的所谓埃利（Airy）斑，如图 1-4 a）所示。通常以埃利斑第一暗环的半径来衡量其大小。

若用一台测微光度计沿通过埃利斑中心的直线进行扫描，可测得埃利斑光强度的分布。它表明大约 84% 的强度集中在中央亮斑，其余则分散在第一亮环、第二亮环……。由于周围亮环光强度比较低，一般情况肉眼不易分辨，只能看到中央亮斑。

根据衍射理论推导，点光源通过透镜产生的埃利斑半径 R_0 的表达式为：

$$R_0 = \frac{0.61 \lambda}{n \sin \alpha} M \quad (1-6)$$

式中 n —— 透镜物方介质折射率；

λ —— 照明光波长；

α —— 透镜孔径半角；

M —— 透镜放大倍数。

习惯上把 $n \sin \alpha$ 叫做数值孔径，也可用 N. A. 来表示。

式 (1-6) 说明埃利斑半径与照明光源波长成正比，与透镜数值孔径成反比。

2. 光学显微镜分辨本领理论极限

如上所述，一个样品可看成是由许多物点所组成的。设想这些物点相邻、但不相重叠，当用波长为 λ 的光波照射物体时，每一个物点都可看成一个“点光源”。用透镜成像时，每一“点光源”（如物点散射的光）都在透镜的像平面上形成各自的埃利斑像。如果两物点相距比较大，如图 1-4 b）所示，相应的埃利斑像也彼此分开；当两物点彼此接近时，相应的埃利斑像也彼此接近，直至部分重叠。瑞利（Lord Rayleigh）建议分辨两埃利斑像的判据是：两埃利斑中心间距等于第一暗环半径 R_0 ，如图 1-4 c）所示。此时，两埃利斑强度叠加曲线表明，两中央峰之间叠加强度比中央峰最大强度 I 低 19%，因此肉眼仍能分辨是两个物点的像。通常把两埃利斑中心间距等于第一暗环半径 R_0 时，样品上相应的两个物点间距离 Δr_0 定义为透镜能分辨的最小距离，也就是透镜的分辨本领。由式 (1-6) 得到：

$$\Delta r_0 = \frac{R_0}{M}$$

所以

$$\Delta r_0 = \frac{0.61 \lambda}{n \sin \alpha} \quad (1-7)$$

对于玻璃透镜来说，由于可以采用组合透镜或设计特殊形状的折射界面等措施来降低几何像差（尤其是球差），所以可以采用较大的孔径角来成像，最大的孔径半角 $\alpha = 70^\circ \sim 75^\circ$ ，在物方介质为油情况下， $n \approx 1.5$ ，其数值孔径 $n \sin \alpha \approx 1.25 \sim 1.35$ 。因此式 (1-7) 可化简为：

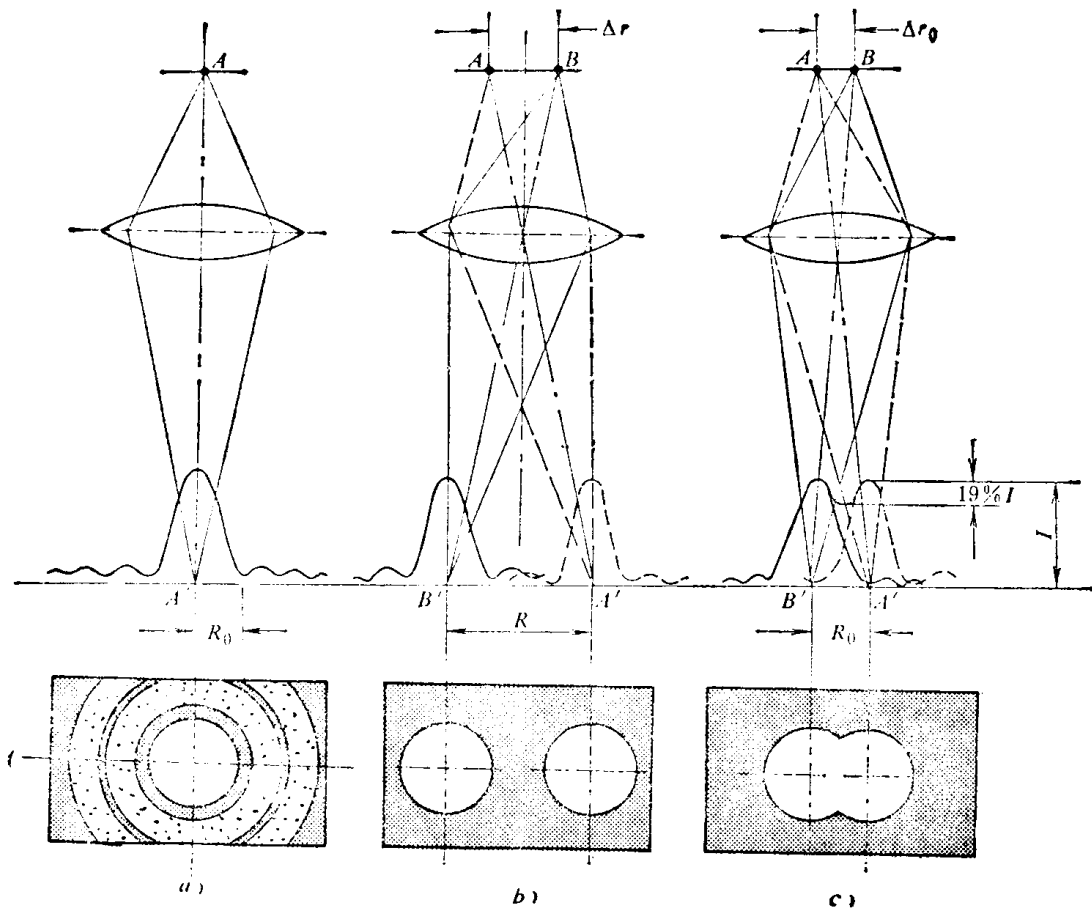


图1-4 光的衍射和光学透镜分辨本领

- a) 一物点的埃利斑像 (示意) 及其光强度分布
 b) 相距比较远的两物点的埃利斑像
 c) 相距比较近的两物点的埃利斑像及其光强度叠加

$$\Delta r_0 \approx \frac{1}{2} \lambda \quad (1-8)$$

以上说明, 透镜能分辨的两点间的最小距离, 即分辨本领主要取决于照明波长。半波长是光学玻璃透镜分辨本领的理论极限。可见光的波长在 $3900 \sim 7600 \text{ \AA}$ 之间, 最佳情况下, 光学玻璃透镜分辨本领极限值可达 2000 \AA 。

物镜是显微镜第一级成像透镜, 是关键的部分。物镜分辨本领的优劣将直接决定显微镜分辨本领。因此, 通常以物镜的分辨本领来定义显微镜的分辨本领。

3. 有效放大倍数

一般说, 人眼的分辨本领大约是 0.2 mm , 光学显微镜分辨本领极限大约是 $0.2 \mu \text{ m}$ (2000 \AA)。因此光学显微镜必须提供足够的放大倍数, 把它能分辨的最小距离放大到人眼能分辨的程度。相应的放大倍数叫做有效放大倍数, 它可由下式来确定:

$$M_{\text{有效}} = \frac{\Delta r_e}{\Delta r_0} \quad (1-9)$$

式中 $M_{\text{有效}}$ —— 显微镜有效放大倍数;

Δr_e —— 人眼分辨本领;

Δr_0 —— 显微镜分辨本领。

光学显微镜分辨本领极限 $\Delta r_0 = 2000 \text{ \AA}$ ，相应的有效放大倍数 $M_{\text{有效}} = 1000$ 倍。实际上为了减轻人眼的负担，所选用的放大倍数应比有效放大倍数略高些，观察起来人眼就不感到吃力，一般说光学显微镜最高放大倍数就是根据上述原则确定的，其值在 $1000 \sim 1500$ 倍。

综上所述，若要提高显微镜的分辨本领，关键是要有短波长的照明源。顺着电磁波谱往短波长方向看，紫外线波长比可见光短，在 $3900 \sim 130 \text{ \AA}$ 范围。由于绝大多数样品物质都强烈地吸收短波长紫外线，因此，可供照明使用的紫外线限于波长 $2000 \sim 2500 \text{ \AA}$ 范围。这样，用紫外线作照明源，用石英玻璃透镜聚焦成像的紫外线显微镜分辨本领可达 1000 \AA 左右，比可见光显微镜提高一倍。X射线波长很短，在 $100 \sim 0.5 \text{ \AA}$ 范围，但是至今还不知道有什么物质能使之有效地改变方向、折射和聚焦成像。

为此，必须寻找一种既要波长短，又能使之聚焦成像的新型的照明源，才有可能突破光学显微镜分辨本领和有效放大倍数的极限。

四、电子的波性及其波长

鉴于光的波粒二象性，德布罗意 (de Broglie) 认为运动的微观粒子 (如电子、中子、离子等) 的性质与光的性质之间存在着深刻的类似性。既然光在一些情况下显示波性 (光波)，在另一些情况下又显示粒子性 (光子)。那么运动的微观粒子在一定情况下也会显示波性。也就是说，每一束匀速直线运动的微观粒子都有一个波与之相对应，这个波的波长 λ 与粒子运动速度 v 、粒子质量 m 之间存在以下关系：

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (1-10)$$

式中 h —— 普朗克常数。

这个波叫物质波或德布罗意波。电子波是其中一种。晶体对电子波的衍射现象证实了德布罗意假说的正确性。它揭示了在微观世界中，粒子的运动服从波粒二象性的规律。在波振幅大的地方，出现粒子的几率大；在波振幅小的地方出现粒子的几率小。

一个初速为 0 的电子，在电场中从电位为 0 的点开始运动，因受加速电压 U 的作用获得的运动速度为 v ，它们之间的关系为：

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \quad (1-11)$$

或

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

式中 e —— 电子电荷；

m —— 电子质量。

加速电压比较低时，电子运动速度比光速小得多，它的质量近似等于电子静止质量，即 $m \approx m_0$ 。由式 (1-10) 和式 (1-11) 整理得：

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U}} \quad (1-12 a)$$

把 $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ， $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， $m_0 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 数值代入，式 (1-12 a) 可简化为：

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{U}} \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{12.25}{\sqrt{U}} \quad (1-12b)$$

式中 λ 以埃为单位, U 以伏为单位。上述说明电子波长与其加速电压平方根成反比。加速电压越高, 电子波长越短。

但是推导式 (1-12) 的前提条件是: $v \ll c$, 所以它仅适用于加速电压比较低的情况下电子波长的计算。在电子显微镜中, 加速电压比较高, 一般在几十千伏以上, 对于这样高能电子波长的计算, 必须引入相对论校正。由于电子质量随运动速度的增大而增大, 即

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1-13)$$

而相应的电子能量为:

$$E = eU = mc^2 - m_0c^2 \quad (1-14)$$

将 (1-10)、(1-13) 和 (1-14) 三式整理得:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U \left(1 + \frac{eU}{2m_0c^2}\right)}} \quad (1-15a)$$

把 h 、 e 、 m_0 值代入, 整理得:

$$\lambda = \frac{12.25}{\sqrt{U(1 + 0.9788 \times 10^{-6}U)}} \quad (1-15b)$$

其中 λ 和 U 的单位与式 (1-12b) 相同。

表 1-1 列出按式 (1-15b) 计算的不同加速电压下电子波长值。

表1-1 电子波长 (经相对论校正)

加速电压, kV	电子波长, Å	加速电压, kV	电子波长, Å
1	0.388	40	0.0601
2	0.274	50	0.0536
3	0.224	60	0.0487
4	0.194	80	0.0418
5	0.173	100	0.0370
10	0.122	200	0.0251
20	0.0859	500	0.0142
30	0.0698	1000	0.00687

从上可知, 电子波长比可见光波长短得多。以电子显微镜中常用的 50~100kV 电子波来看, 其波长仅仅 0.0536~0.0370 Å, 约为可见光波长的十万分之一。从原理上说, 若能用波长这样短的电子波做照明源, 可以显著地提高显微镜的分辨本领和有效放大倍数。问题在于能否制造出使电子波聚焦成像的透镜。

电子是带负电的粒子。物理学指出, 电子波在静电场或磁场中运动, 与光波在不同折射率的介质中传播比较, 具有相似的光学性质。

五、电子在静电场中运动和静电透镜

1. 电子在静电场中运动

在电荷或带电物体的周围存在着一种特殊的场，即电场。相对于观察者为静止的、不随时间变化的电场叫做静电场。电场有两项重要的性质：第一，位于电场中的电荷将受到所处位置电场施加的作用力，即电场力；第二，电荷在电场中运动，电场力做功，这表明电场具有能量。通常把电场作用在单位正电荷上的电场力定义为电场强度，其矢量表达式：

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{f}}{q} \quad (1-16)$$

式中 \mathbf{E} ——电场强度（简称场强或 \mathbf{E} 矢量）；

\mathbf{f} ——电场施加给试验电荷的作用力；

q ——试验电荷。

通常以正电荷在电场中所受电场力的方向来定义电场强度的方向。

在电场中电位是逐点变化的，其中有许多的点电位相同。由这些电位相同的点组成的面叫做等电位面。既然电场中某一点既可用场强又可用电位梯度来表示，那么二者之间必然存在着内在联系：即电场强度仅与电位梯度有关：

$$\mathbf{E} = -\frac{dU}{dn}\mathbf{n} \quad (1-17)$$

式中 \mathbf{n} ——沿等电位面法线朝着电位增大方向的单位矢量；

dU/dn ——沿电场等电位面法线方向电位变化率，即电位梯度。

式（1-17）表明电场强度在数值上等于电位梯度的负值。因此，电场强度的方向就是电位变化率最大的方向，电场强度的大小表明沿该方向电位变化的快慢。

负号表示电场强度的方向与电位增加方向相反。

如果两块电位分别为 U_a 和 U_b 的平行板电极，当电极尺寸比间距大得多时，除边缘区域外，两电极间的电场是均匀的，叫做均匀电场。它具有以下三个特点：第一，等电位面是一系列与电极平面平行的平面；第二，该电场中任一点的电场强度方向平行于通过该点的等电位面法线，从高电位指向低电位，如图 1-5 所示；第三，平行板电极均匀电场中任一点的电场强度相等，其数值可按下式来计算：

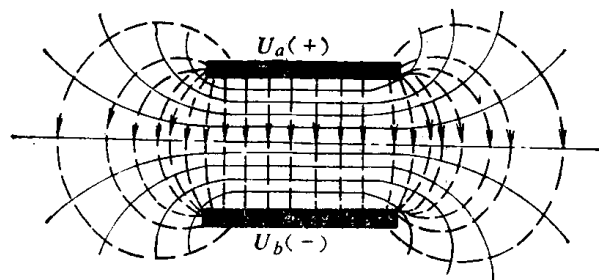


图1-5 平行板电极电场

$$E = \frac{U_b - U_a}{l} \quad (1-18)$$

式中 l 为 a 、 b 电极间距。

因为电子带负电，它在电场中所受的电场力方向反平行于相应位置的电场强度方向。

当一个速度为 v 的电子，沿着与等电位面法线成一定角度方向运动，如图 1-6 所示。如果某等电位面上方电位为 U_1 、下方为 U_2 ，那么该电子由 U_1 电位区进入 U_2 电位区的瞬间，

在交界点 O 处运动方向发生突变, 电子运动速度从 v_1 变为 v_2 。因为电场对电子作用力方向总是沿着电子所处点等位面法线, 从低电位指向高电位, 所以沿电子所处点等位面切线方向电场力分量为 0, 电子沿该方向运动速度分量 v_t 保持不变, 即 $v_{t1} = v_{t2}$ 。从图 1-6 可得到:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{v_t/v_1}{v_t/v_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1-19 a)$$

如果起始点电位为 0, 电子初速为 0, 那么电子在 U_1 、 U_2 电位区的运动速度分别为:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2eU_1}{m}}, \quad v_2 = \sqrt{\frac{2eU_2}{m}}$$

代入 (1-19 a) 并整理得:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \sqrt{\frac{U_2}{U_1}} \quad (1-19 b)$$

还由于

$$\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{U}}$$

所以 (1-19 b) 还可改写成以下形式:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \sqrt{\frac{U_2}{U_1}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (1-19 c)$$

(1-19 b)、(1-19 c) 表达式与光的折射定律表达式 (1-3 a), (1-3 b) 十分相似, 其中 \sqrt{U} 相当于折射率, 说明电场中等位面是对电子折射率相同的表面, 与光学系统中两介质界面起着相同的作用。

2. 静电透镜

既然一定形状的光学介质界面 (如玻璃凸透镜旋转对称的弯曲折射界面) 可以使光波聚焦成像, 那么类似形状的等电位曲面簇也可能使电子波聚焦成像。我们把能产生这种旋转对称等电位曲面簇的电极装置叫做静电透镜, 如图 1-7 a)、b) 所示。

从图上可看到, 静电透镜主轴上一物点散射的电子沿直线轨迹向电场运动, 当电子射入电场作用范围时, 将受到折射, 最后被聚焦在透镜轴上一点, 与其类似的光学玻璃透镜光路如图 1-7 c) 所示。

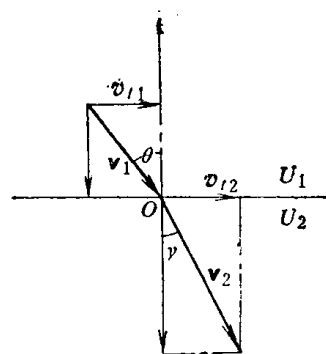


图1-6 电场对电子的折射

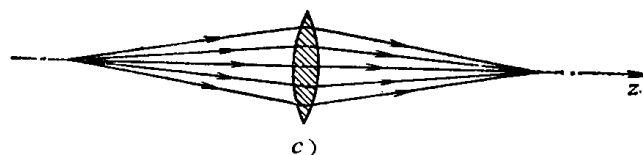
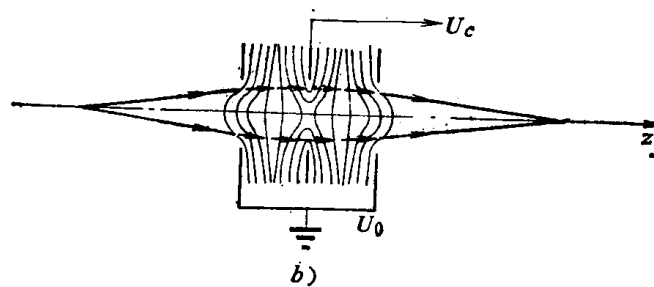
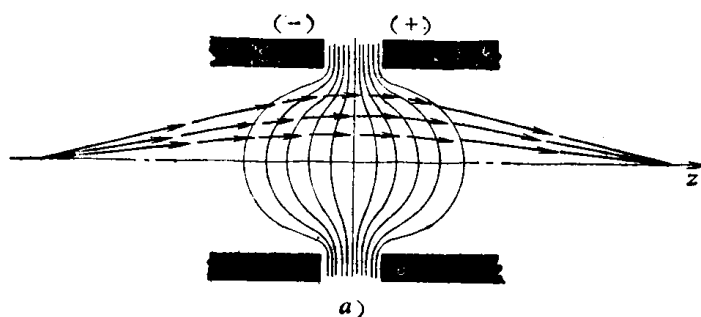


图1-7 静电透镜

a) 双圆筒静电透镜 b) 静电单透镜, 无论中间电极电位 U_c 是正还是负 (相对 U_0 而言) 最终总是会聚的透镜 c) 光学玻璃凸透镜光路