


第四章 电子显微分析

4.1 概述



4.1 概述

分辨本领，是指显微镜能分辨的样品上两点间的最小距离。通常，我们以物镜的分辨本领来定义显微镜的分辨本领。光学透镜分辨率为：

$$d_0 = 0.61\lambda / (n \sin \alpha) = 0.61 \lambda / \text{NA}$$

式中， λ 一是照明束波长 [nm] ；

α 一是透镜孔径半角；

n 一是物方介质折射率；

$n \sin \alpha$ 或 **N.A** 称为数值孔径。

引言

在物方介质为空气的情况下，任何光学透镜系统的**NA**值小于**1**。即使采用油浸透镜（**n=1.5**， α 一般为**70°—75°**）**N.A**值也不会超过**1.35**。这样

$$d_0 \approx \frac{1}{2} \lambda$$

即透镜的分辨本领主要取决于照明束波长 λ 。若用波长最短的可见光（ $\lambda = \mathbf{400nm}$ ）作照明源，则

$$d_0 = \mathbf{200nm}$$

电子束

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U}}$$

$$\lambda = \frac{1.226}{\sqrt{U}} \text{ [nm]}$$

当电子速度与光速**c**可比时,电子波长需经相对论校正

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U(1 + \frac{eU}{2m_0c^2})}}$$

$$= \frac{1.226}{\sqrt{U(1 + 0.9788 \times 10^{-6}U)}} \text{ [nm]}$$

电子显微镜的分辨率

当加速电压为**100kV**时，电子束的波长约为可见光波长的十万分之一。因此，若用电子束作照明源，显微镜的分辨本领要高得多。但是，电子透镜的孔径半角的典型值仅为 **$10^{-2} \sim 10^{-3} \text{rad}$** 。如果加速电压为**100kV**，孔径半角为 **10^{-2}rad** ，那么分辨本领为

$$d_0 = 0.61 \frac{3.7 \times 10^{-3}}{10^{-2}} = 0.225 \text{ [nm]}$$

控制电子束的运动在电子光学领域中主要使用电磁透镜装置。但电磁透镜在成像时会产生**像差**。

像差分为**几何像差**和**色差**两类。

几何像差：由于透镜磁场几何形状上的缺陷而造成的像差。

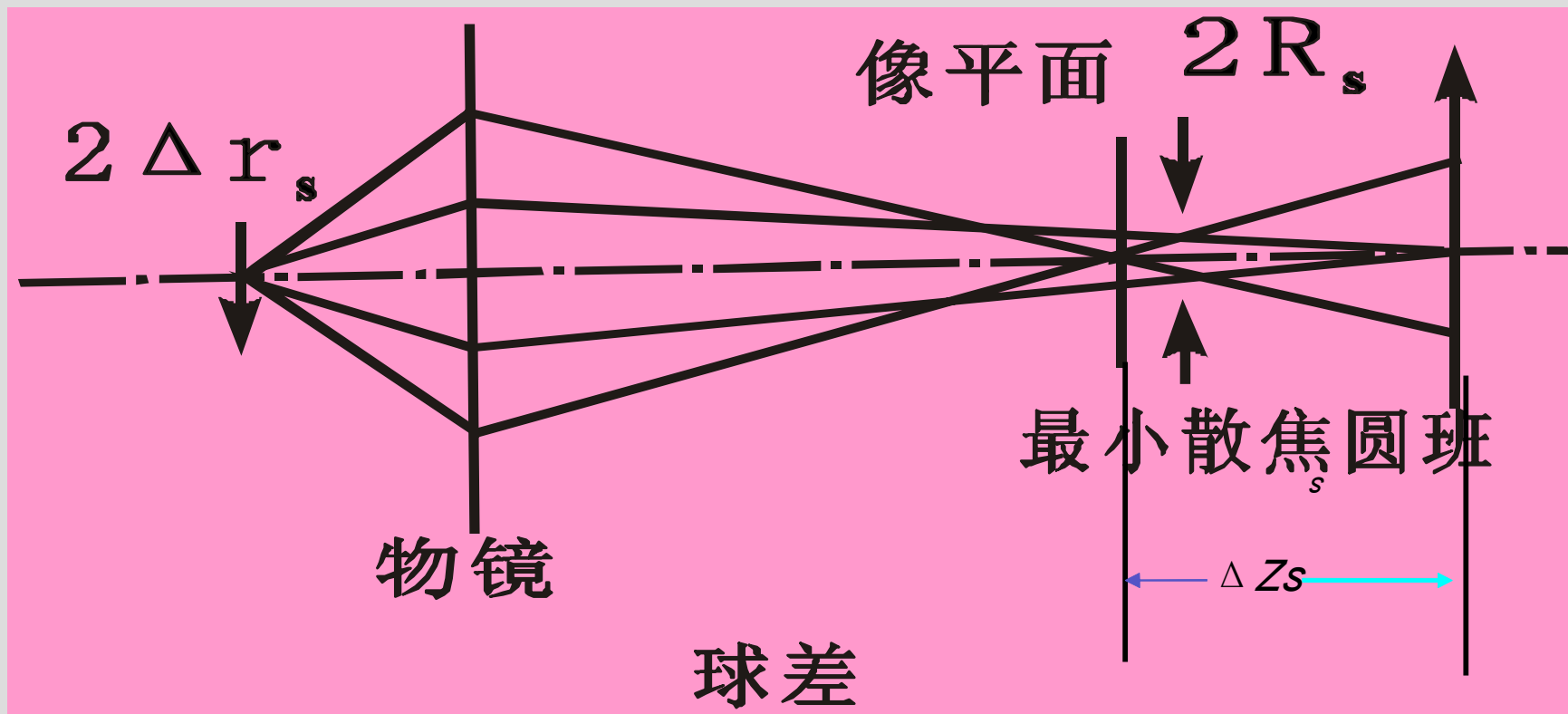
色差：由于电子波的波长或能量发生一定幅度的改变而造成的像差。

像差分**球差**、**像散**、**色差**等，其中，球差是限制电子透镜分辨本领最主要的因素。

球差的大小，可以用球差**散射圆斑半径** R_s 和**纵向球差** ΔZ_s 两个参量来衡量。

R_s 是指在傍轴电子束形成的像平面(也称高斯像平面)上的散射圆斑的半径。

ΔZ_s 是指傍轴电子束形成的像点和远轴电子束形成的像点间的纵向偏离距离。



轴线上的物点，也不可避免地要产生球差。

计算表明，在球差范围内距高斯像平面 $3/4 \Delta Z_s$ 处的散射圆斑的半径最小，只有 $R_s/4$ 。习惯上称它为最小截面圆。

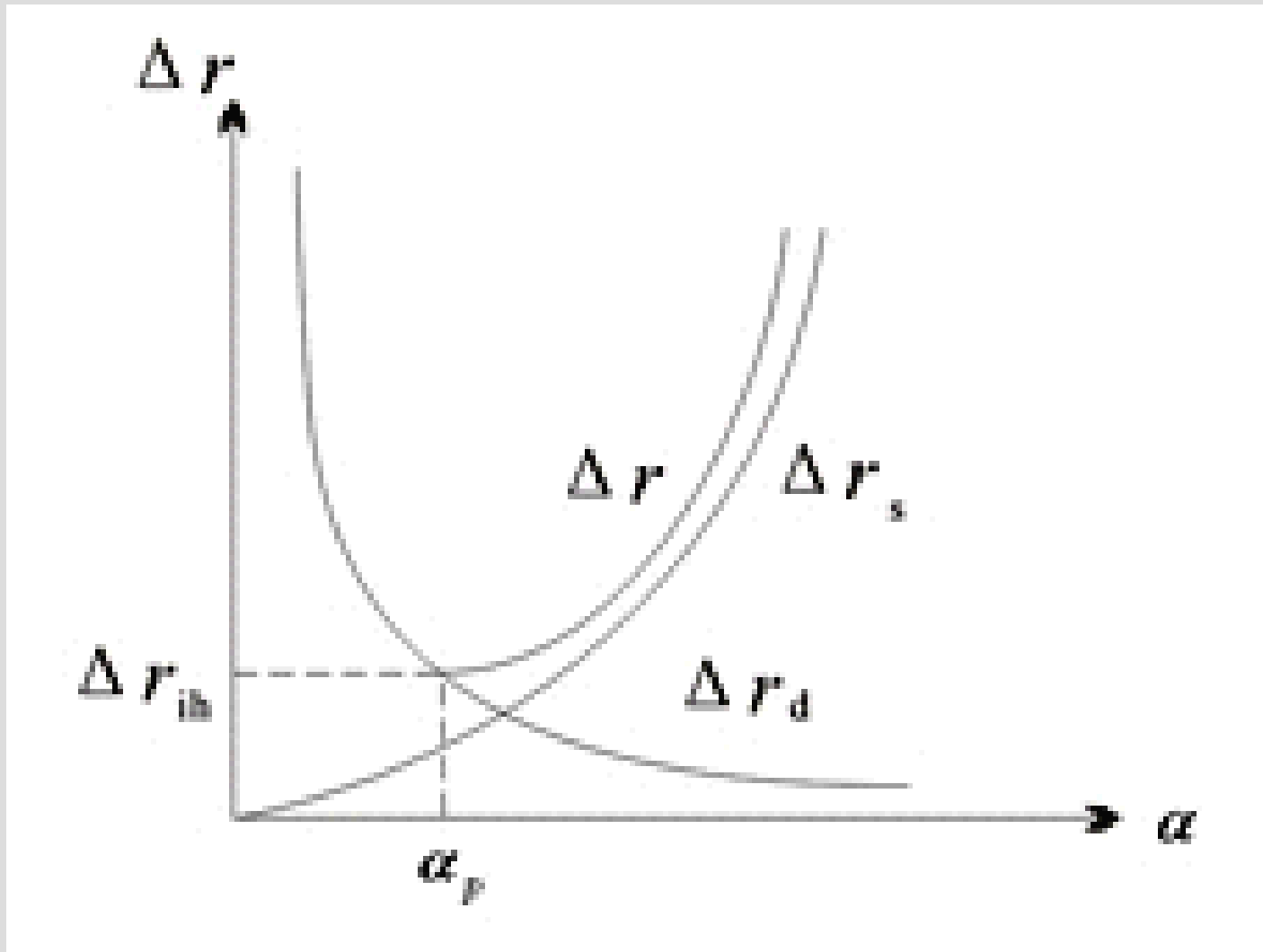


图4.2由球差和衍射所决定的电磁透镜的分辨本领 r 对孔径半角 α 的依赖性

$$d_0 = 1.22 C_s^{1/4} \lambda^{3/4}$$

该式表达了由球差和衍射所决定的理论分辨本领。

相应的最佳孔径半角为：

$$\alpha_p = (0.2 \lambda / C_s)^{1/4}$$

普遍式为：

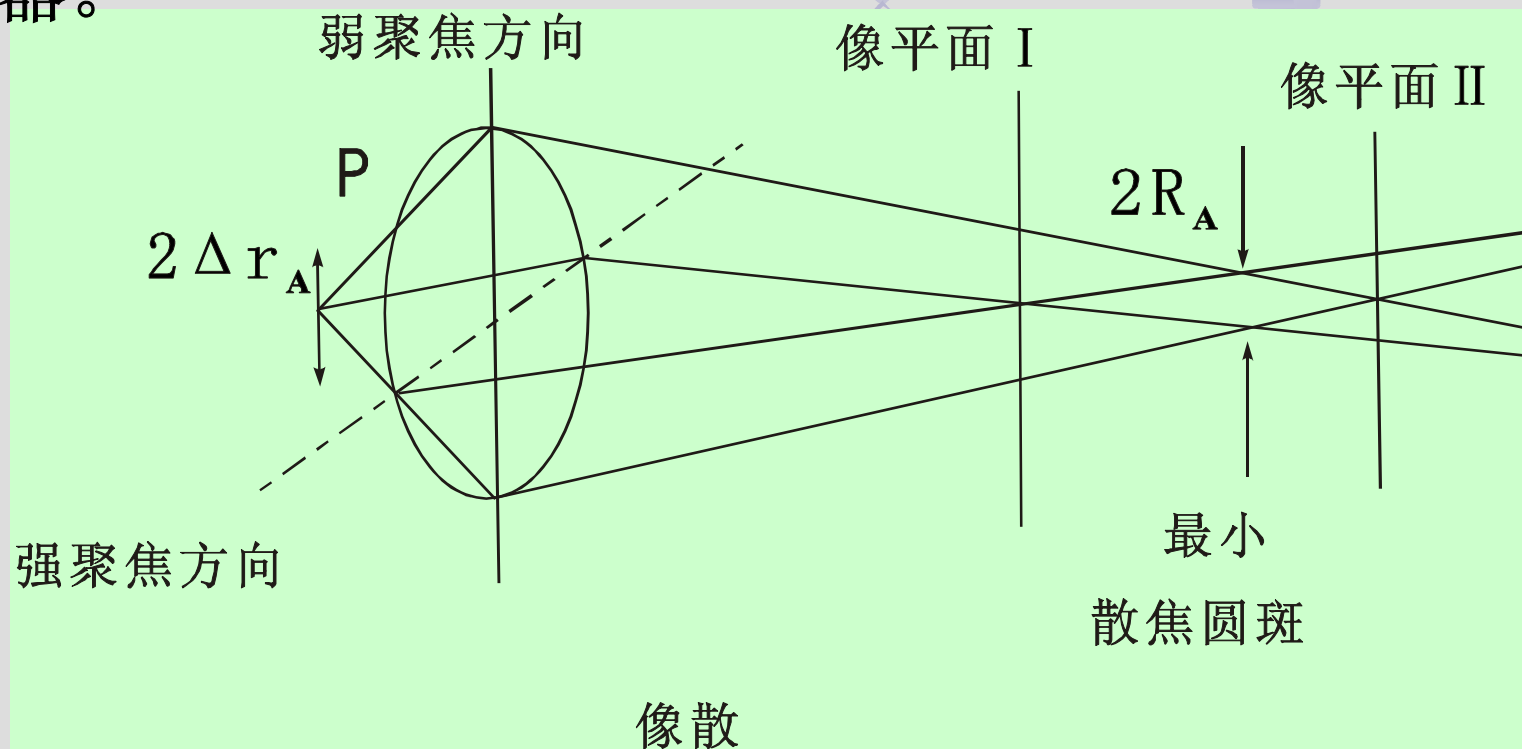
$$d_0 = A C_s^{1/4} \lambda^{3/4}$$
$$\alpha_p = B (\lambda / C_s)^{1/4}$$

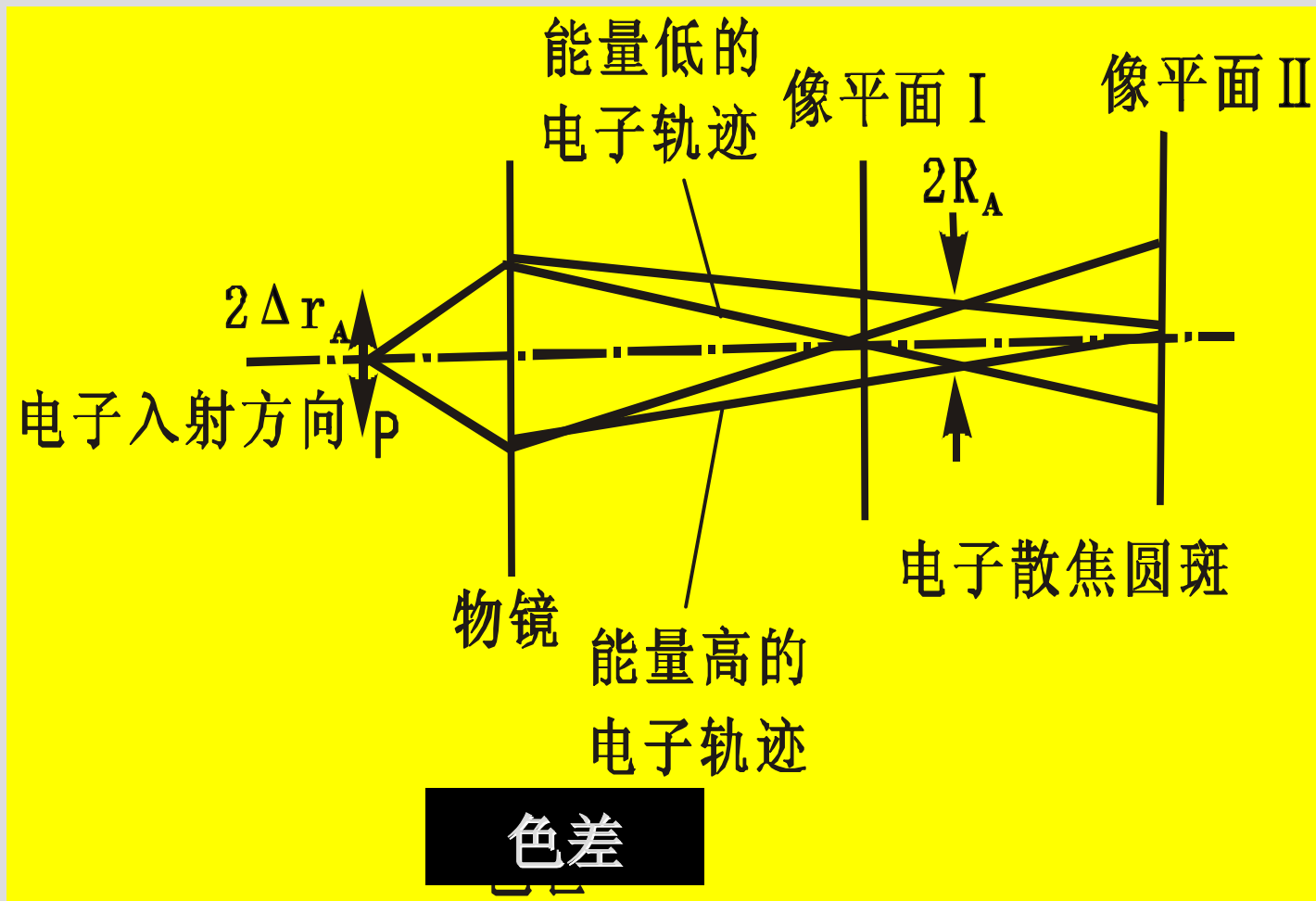
而且可得：

$$\Delta d_0 \alpha_p = AB \lambda$$

像散：像散是由透镜磁场的非旋转对称而引起。

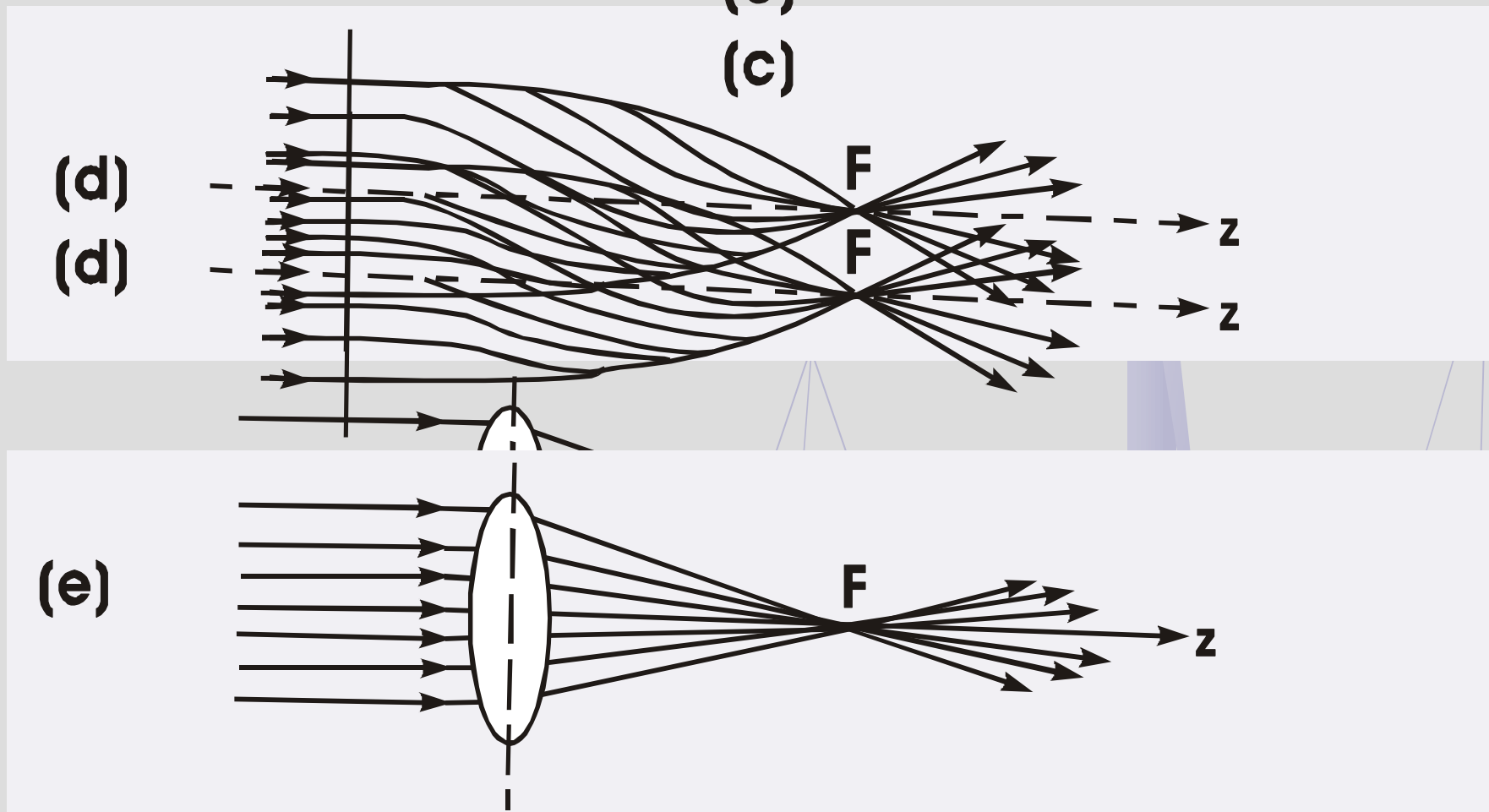
如果电磁透镜在制造过程中已经存在固有的像散，则可以通过引入一个强度和方位都可以调节的矫正磁场来进行补偿，这个能产生矫正磁场的装置称为消像散器。





色差：是由于入射电子波长（或能量）的非单一性造。

电磁透镜



电子与物质的作用

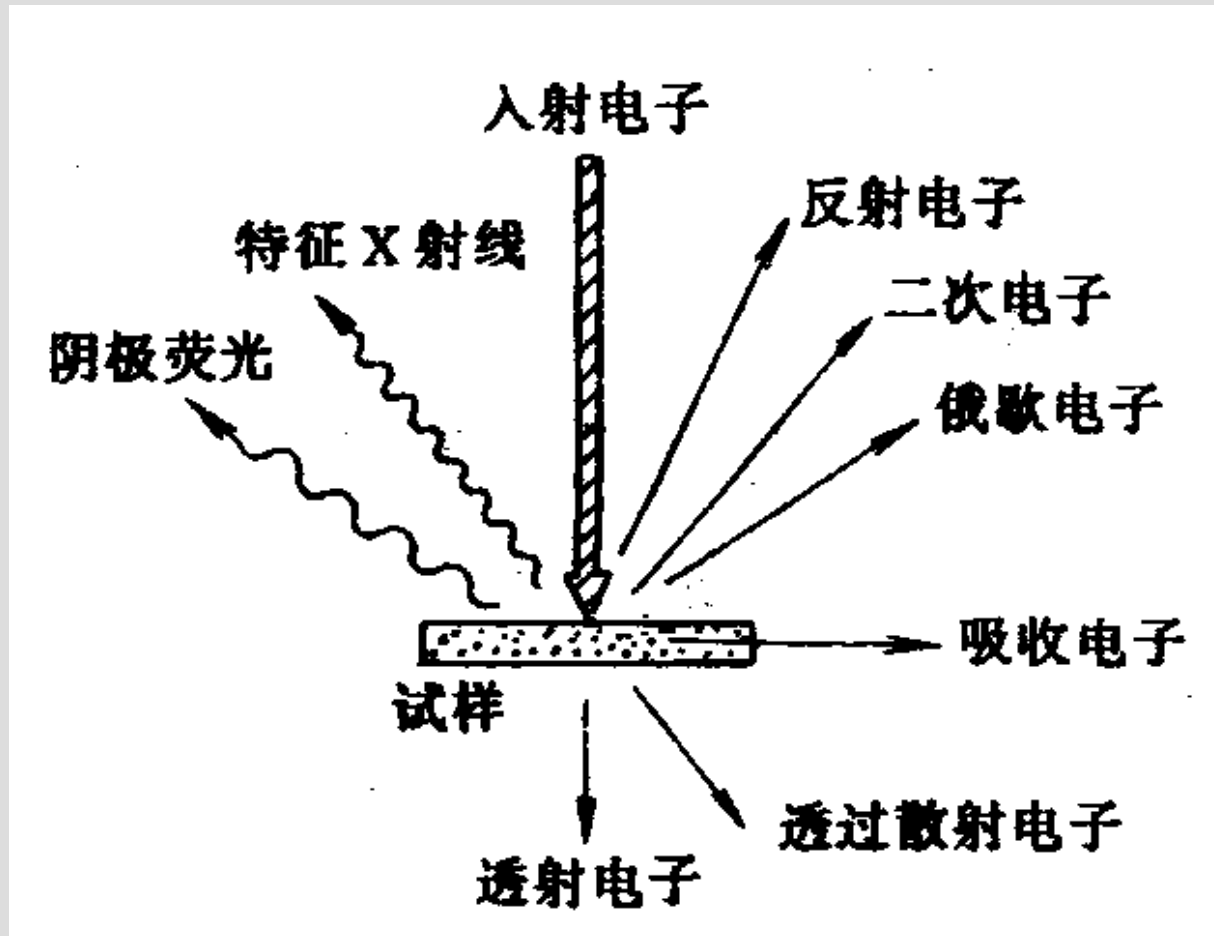


图1电子与物质的作用