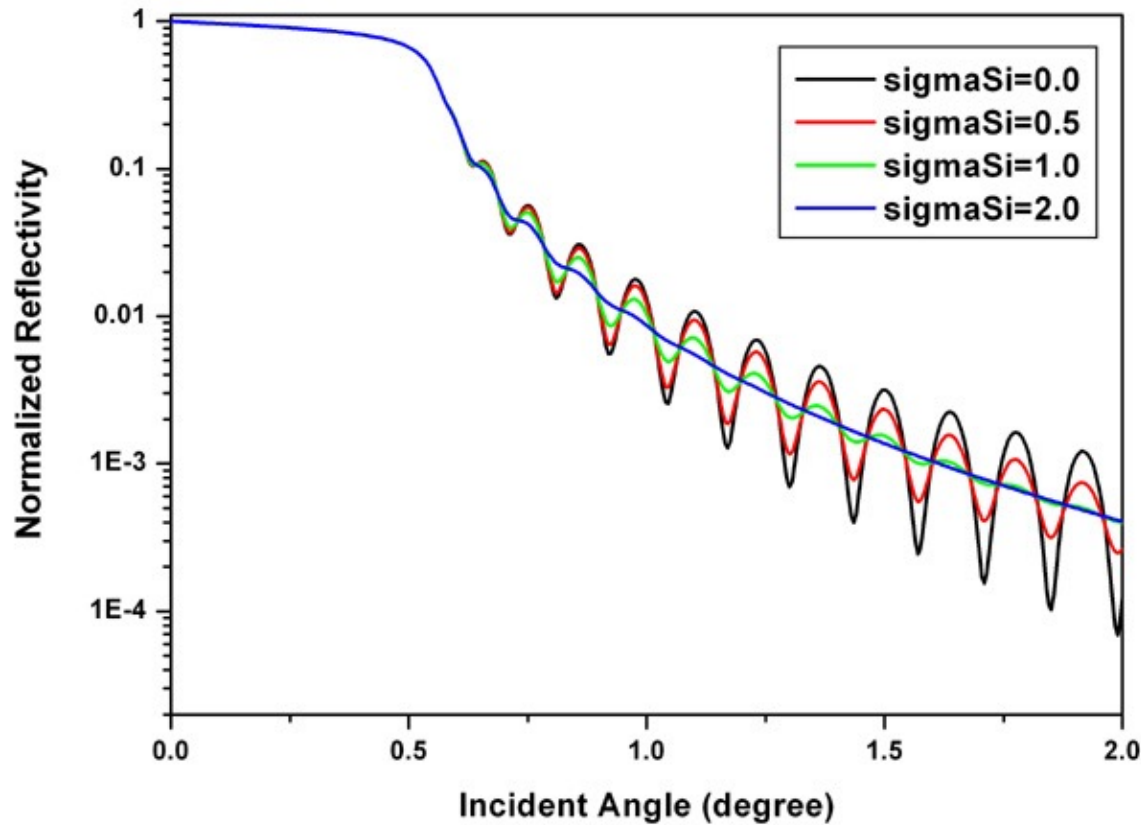


# 上次课程知识点回顾

- 倒易点阵
  - 转动晶体法、单晶劳厄法、粉末法
- X射线的强度
  - 一个电子对X射线的散射（汤姆逊公式）
  - 一个原子对X射线的散射、原子散射因子
  - 一个晶胞对X射线的散射
  - 结构振幅、结构因子
- X光反射（XRR）
  - 测量原理
  - 应用：膜厚、电子密度、表面粗糙度、基片粗糙度

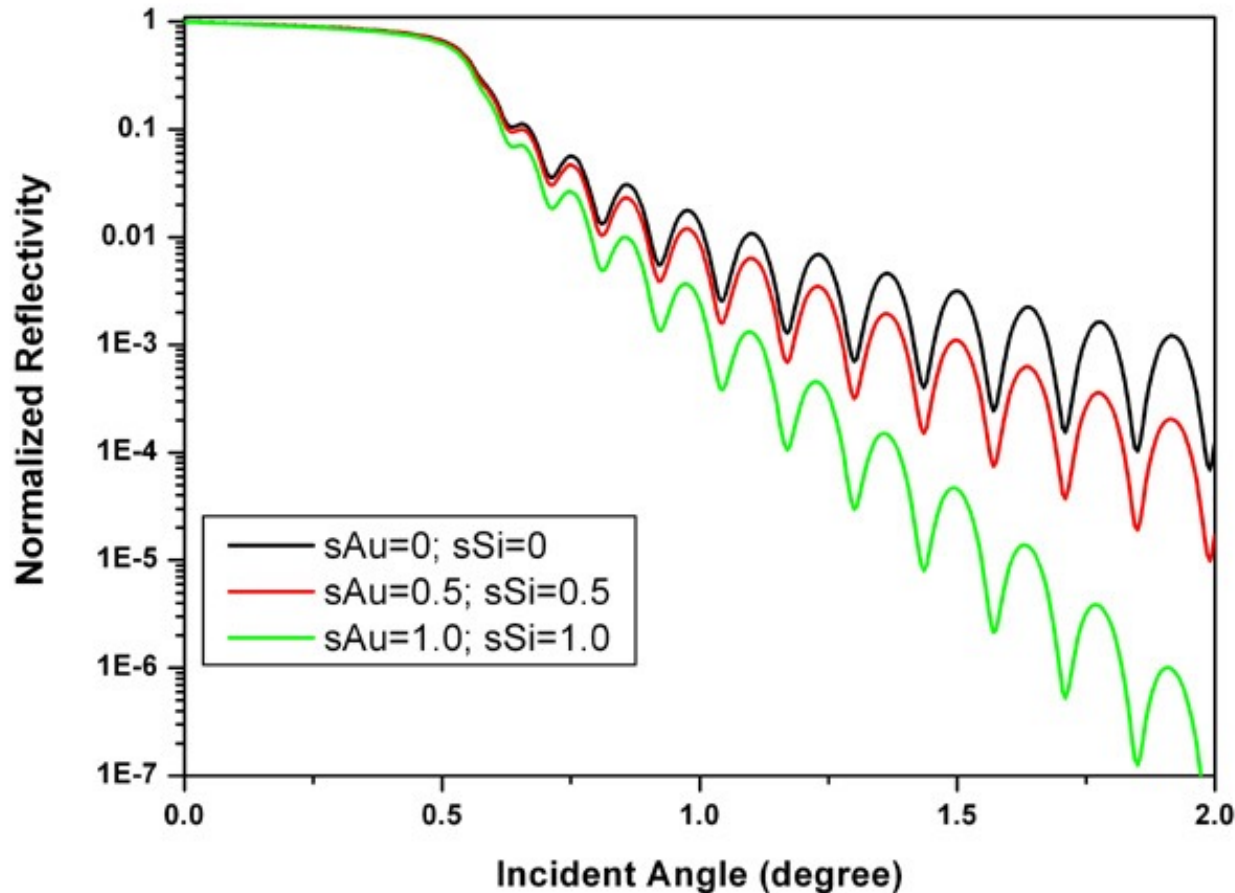
# 基片的粗糙度对反射率的影响



固定膜的粗糙度为0时，基片的粗糙度削弱了振荡峰的幅度。

**Attenuate the oscillation peaks.**

# 粗糙度对反射率的综合影响

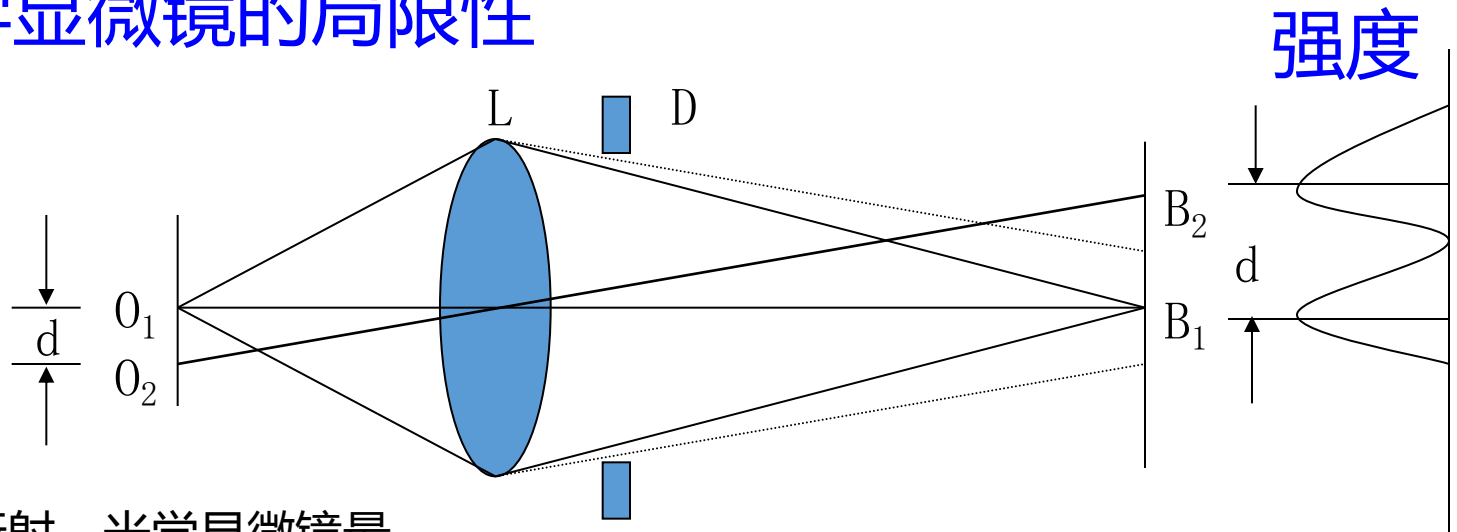


膜的粗糙度衰减强度，基片的粗糙度削弱振荡峰。

# 透射电子显微镜

## 概述

### 一、光学显微镜的局限性



由于光的衍射，光学显微镜最大的分辨能力为

$$d = 0.61 \frac{\lambda}{n \sin \alpha} \approx \frac{1}{2} \lambda$$

对于可见光的波长在390 ~ 770nm之间， $n$ 值最大只能达到1.5~1.6，可得光学显微镜其最大的分辨能力为0.2 $\mu$ m

# 概述

## 一、光学显微镜的局限性

于是，人们用很长时间寻找波长短、又能聚焦成像的光波。

**$\gamma$ 射线→X射线→紫外光→可见光→红外光→微波→无线电波**

利用紫外线，强烈地吸收； $\gamma$ 射线、X射线没有办法使其聚焦

## 二、电子的波动性及波长

- 1897年，Thomson发现了电子。
- 1925年，De Broglie提出物质波的假设，即电子具有微粒性，也具有波动性。
- 1927年，Thompson and Reid 进行了电子衍射实验。

# 概述

## 二、电子的波动性及波长

- 根据De Broglie物质波的假设，电子波长为。

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

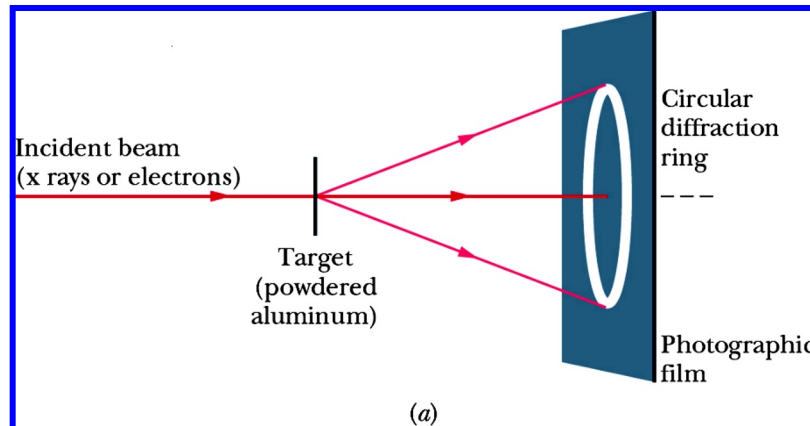
$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2emU}}$$

- 考虑相对论效应

$$U = 100 \text{ kV时,}$$
$$\lambda = 0.00386 \text{ nm}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eU \left( \frac{1 - eU}{2m_0c^2} \right)}}$$

- 电子衍射实验。



# 概述

## 二、电子的波动性及波长

- 1926年，Busch提出了用轴对称的电场和磁场对电子束进行聚集，发展成电磁透镜。
- 1931-1933年，Ruska 等设计并制造了第一台电子显微镜。
- 目前，电镜的分辨率达到 $\text{\AA}$ 数量级，放大倍数达数百万倍。



Electron  
microscope  
constructed  
by Ernst  
Ruska in  
1933  
**1986 Nobel**



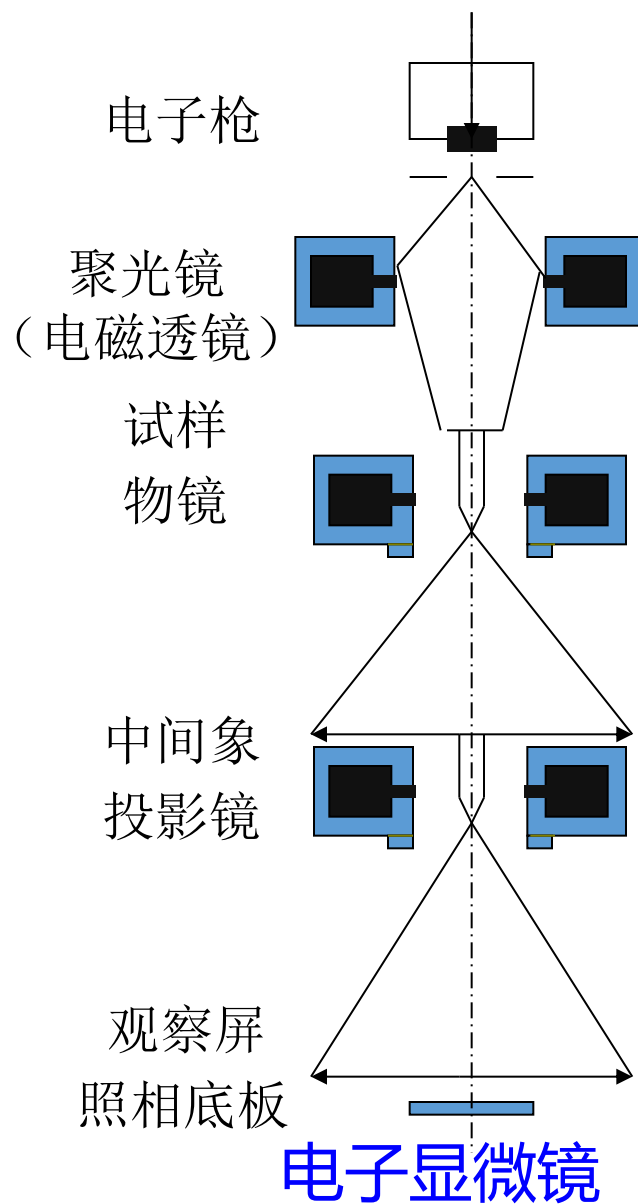
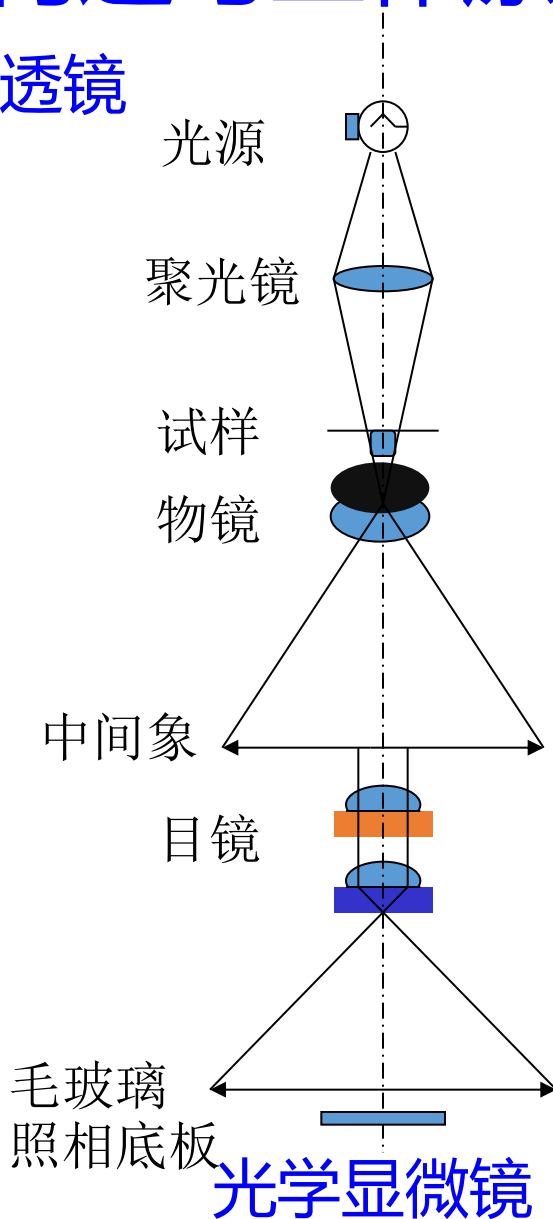
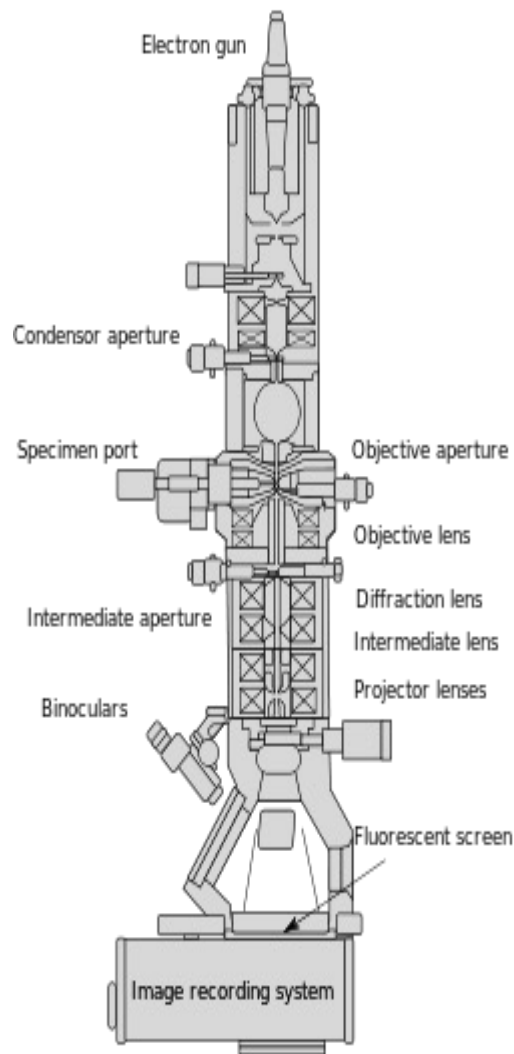
# 透射电子显微镜

视频展示



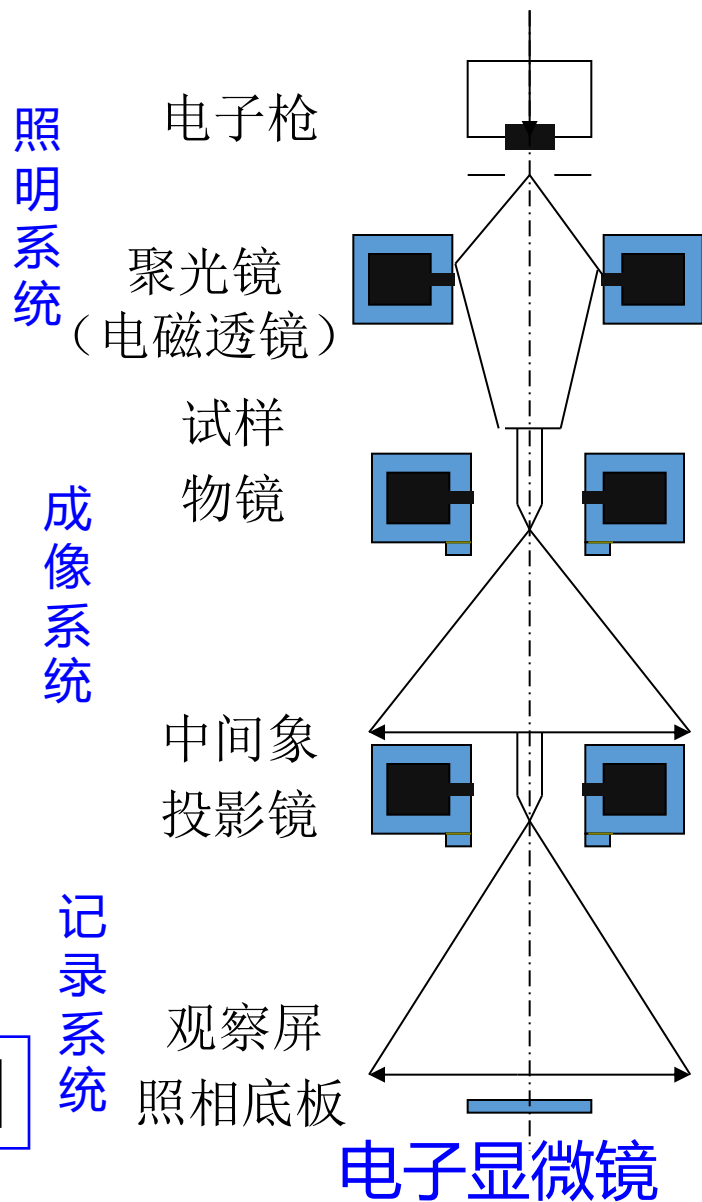
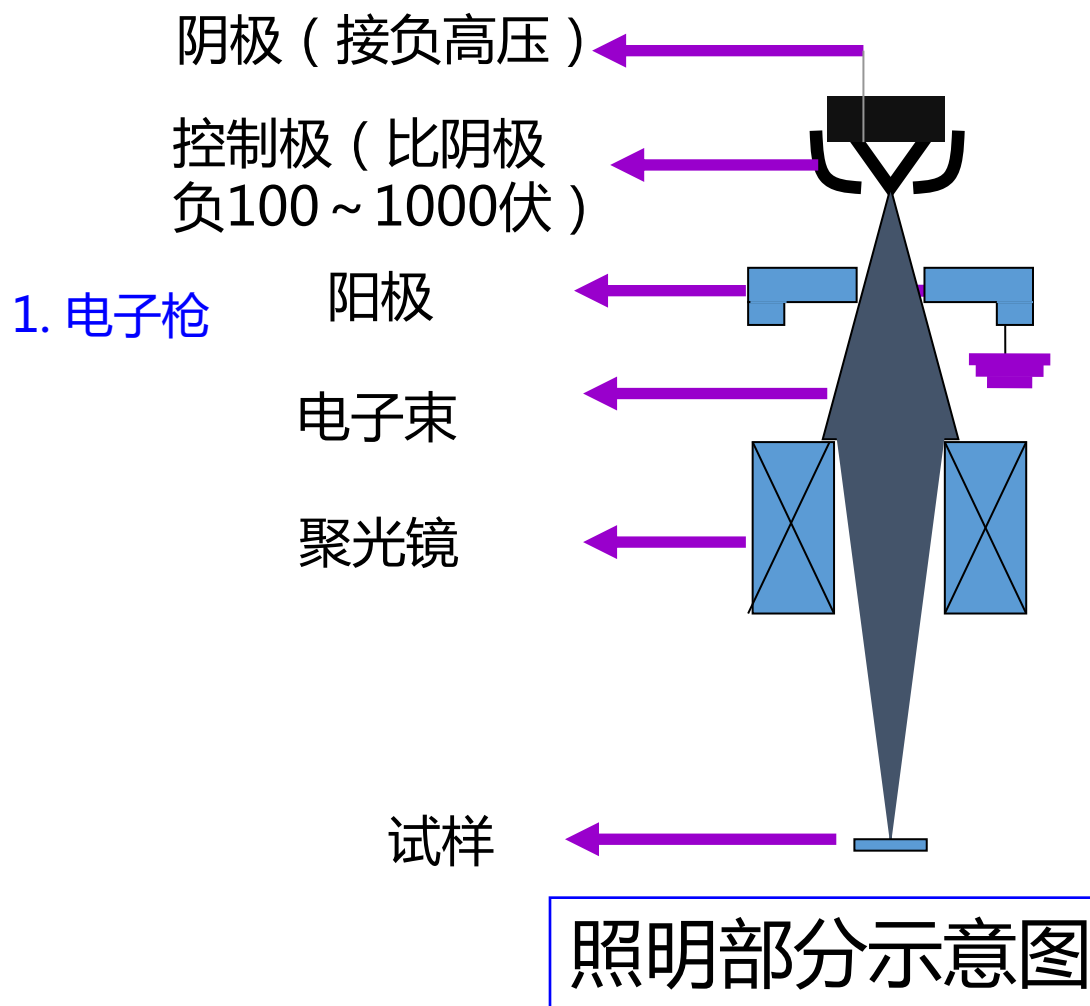
# 透射电镜的构造与工作原理

## 一、电子枪及电磁透镜



# 透射电镜的构造与工作原理

## 一、电子枪及电磁透镜



# 透射电镜的构造与工作原理

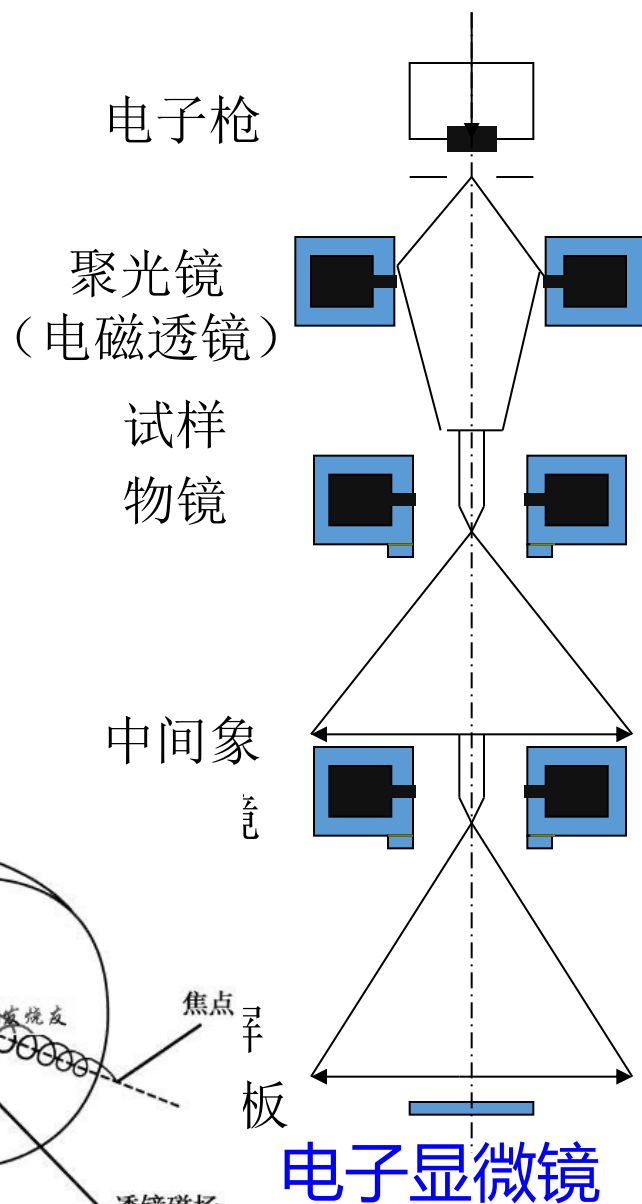
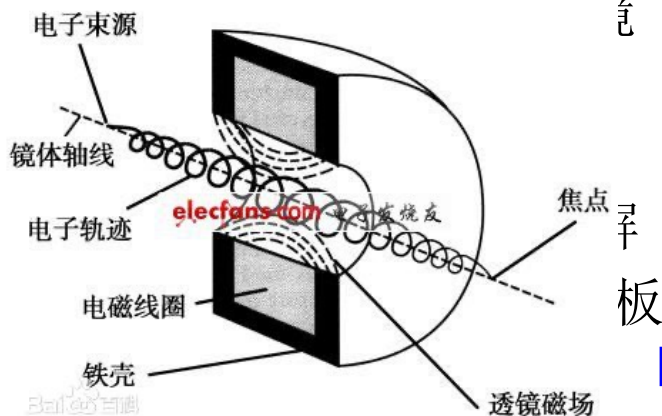
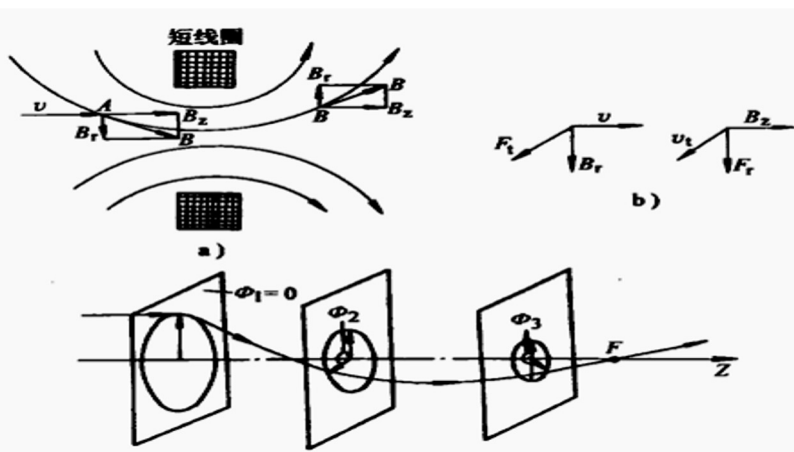
## 一、电子枪及电磁透镜

### 2. 电磁透镜

#### (1) 原理

透射电子显微镜中用磁场来使电子波聚焦成像的装置。电磁透镜实质是一个通电的线圈，它能造成一种轴对称的分布磁场。正电荷在磁场中运动时，受到洛伦兹力的作用即

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$



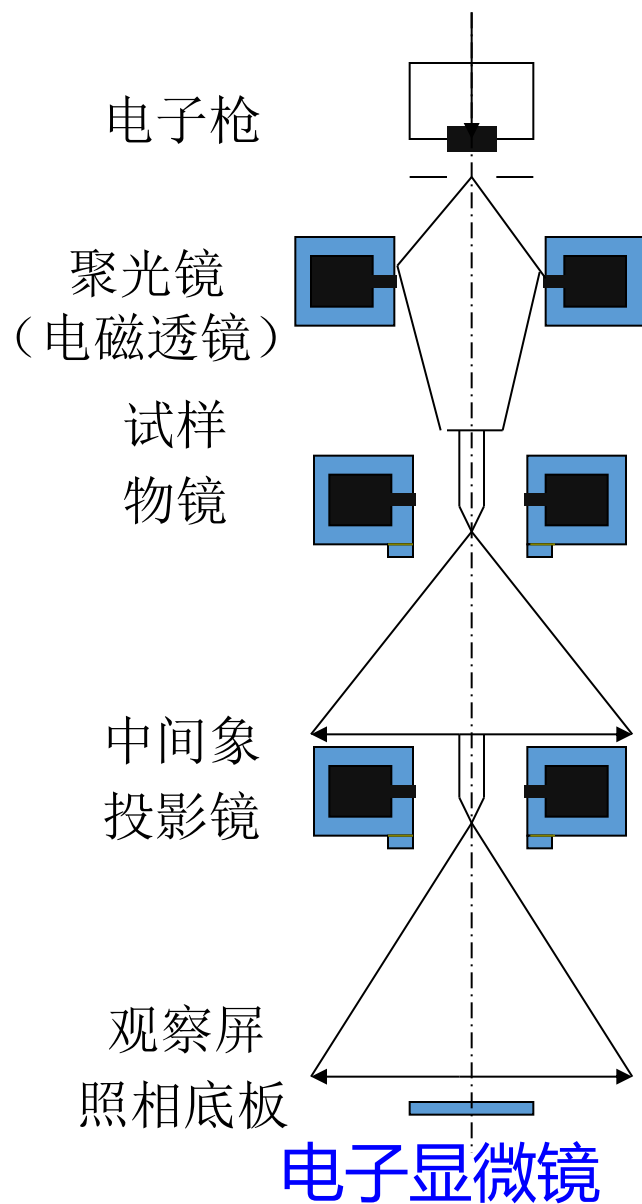
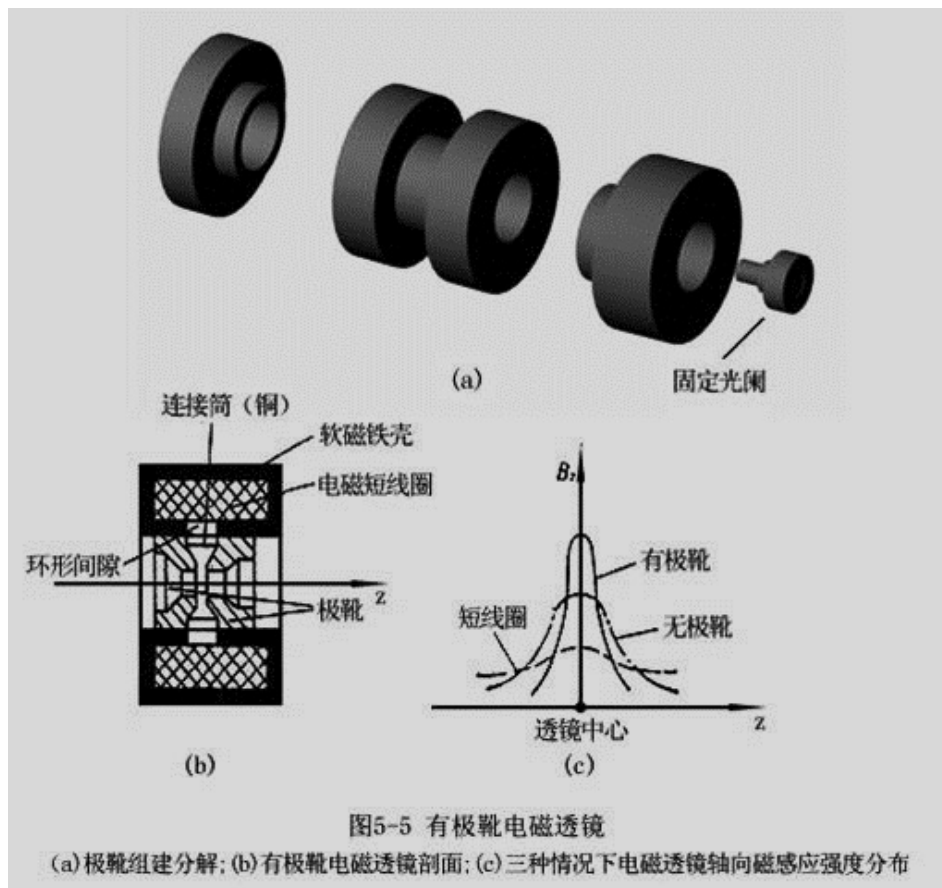
电子显微镜

# 透射电镜的构造与工作原理

## 一、电子枪及电磁透镜

### 2. 电磁透镜

#### (1) 原理



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

(2) 电磁透镜特点：

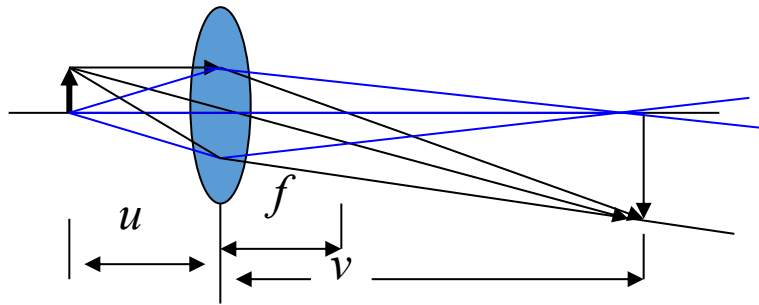
- ① 能使电子偏转会聚成像，不能加速电子；
- ② 总是会聚透镜；
- ③ 改变线圈中的电流强度可很方便地控制焦距、放大率，放大倍数连续可调。

(3) 电磁透镜的光学性质

电磁透镜物距、像距和焦距三者间的关系与光学玻璃透镜相似，满足牛顿透镜方程

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

$u$  - 物距； $v$  - 像距； $f$  - 焦距



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### (3) 电磁透镜的光学性质

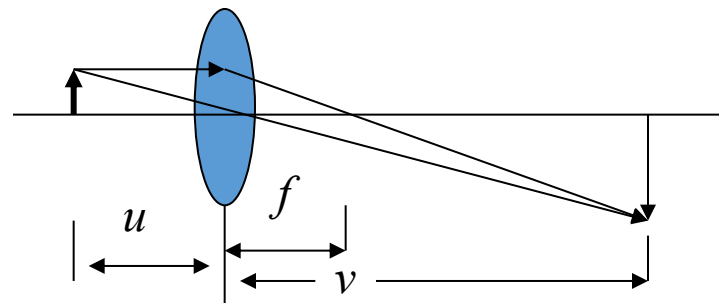
电磁透镜具有光学凸透镜的特点，它们物距、像距和焦距三者间的关系相似，满足牛顿透镜方程

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

$u$  - 物距； $v$  - 像距； $f$  - 焦距

放大倍数为：

$$M = \frac{v}{u} = \frac{f}{u-f} = \frac{v-f}{f}$$



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### (4) 电磁透镜的像差与分辨率

根据瑞利判据，电磁透镜的分辨率为：

$$\Delta r = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \approx \frac{\lambda}{2}$$

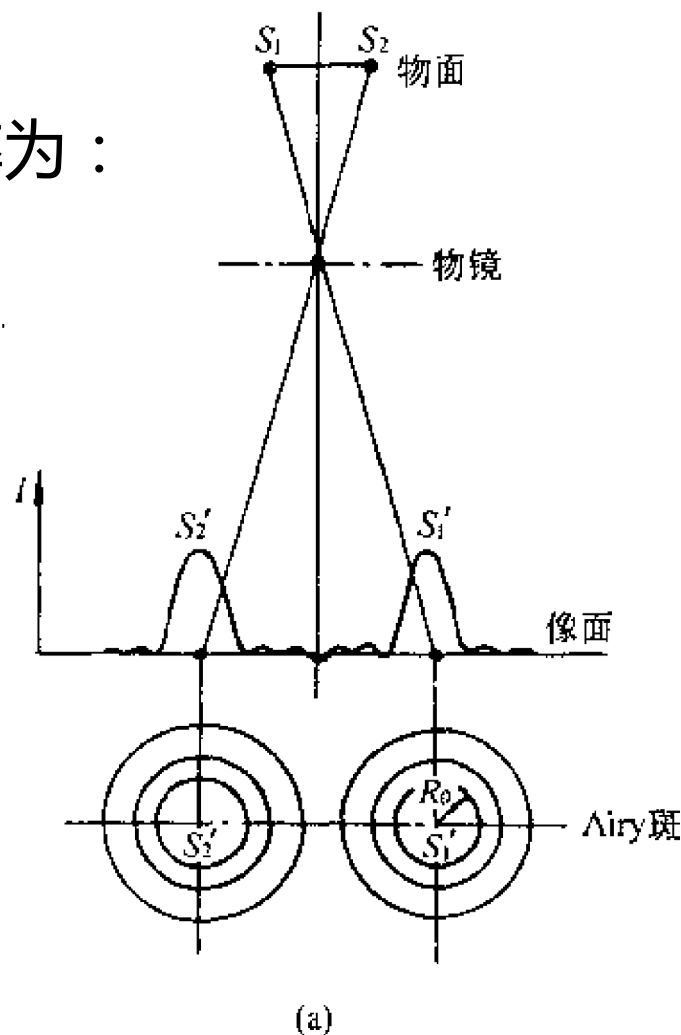
对于  $U=200 \text{ kV}$ ,

$$\lambda=0.00250 \text{ nm} \Rightarrow \Delta r=0.00125 \text{ nm}$$

**仅为理论分辨率！！！！**

但是，实际电磁透镜也存在像差：

**球差、色差、像散**



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### 1) 球差

**球差是由于电子透镜的中心区域和边沿区域对电子的会聚能力不同而造成的。**远轴的电子通过透镜后折射得比近轴电子要厉害得多，以致两者不交在一点上，结果在像平面成了一个半径为 $R_s$ 漫散圆斑，折算到物平面上，得  $\Delta r_s = \frac{R_s}{M}$

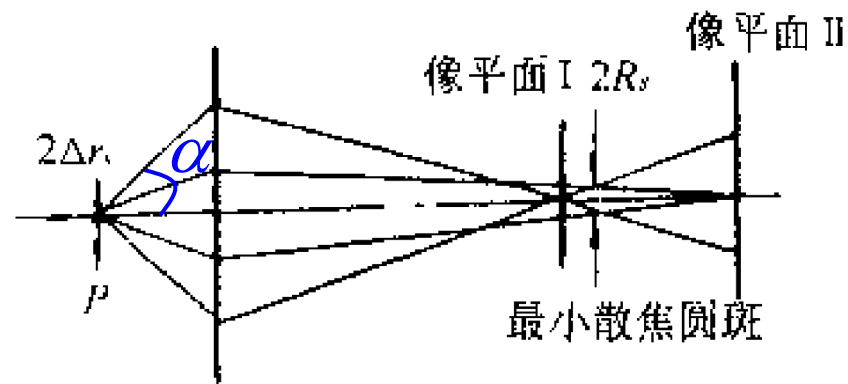
定义

$$\Delta r_s = \frac{1}{4} C_s \alpha^3 \quad \text{-- 球差}$$

$C_s$  -- 球差系数，一般  $\sim f$  (1~3mm)

$\alpha$  -- 孔径半角

物平面上两点距离小于  $2\Delta r_s$  时，则该透镜不能分辨





# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### 2) 色差

**电子的能量不同，从而波长不一造成的。**电子透镜的焦距随着电子能量而改变，因此，能量不同的电子束将沿不同的轨迹运动。产生的漫散圆斑还原到物平面，其半径为  $\Delta r_c = \frac{R_c}{M}$

定义

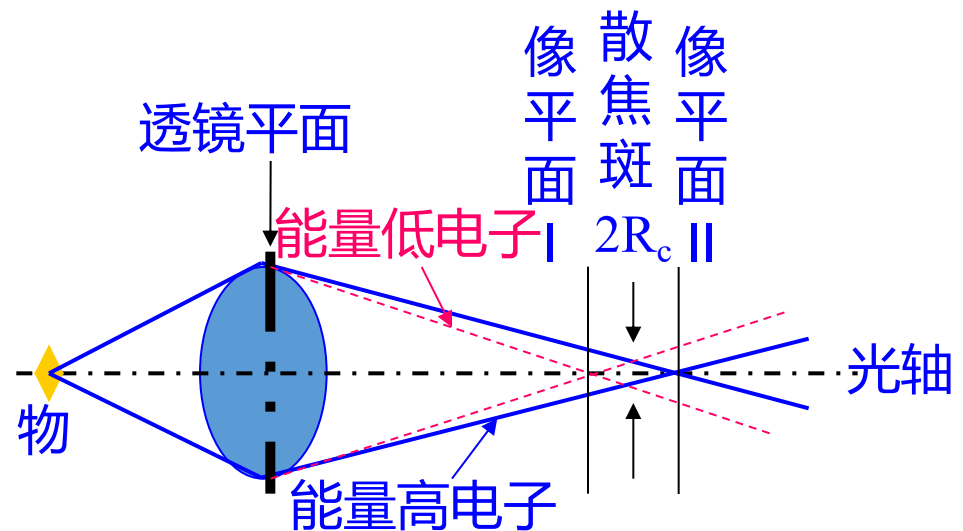
$$\Delta r_c = C_c \alpha \left| \frac{\Delta E}{E} \right| \quad \text{-- 色差}$$

$C_c$  -- 色差系数

$\frac{\Delta E}{E}$  -- 能量变化率

$\alpha$  -- 孔径半角

稳定加速电压来减少色差



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### 3) 像散

**磁场不对称时，就出现象差。可能是由于极靴被污染，或极靴的机械不对称性，或极靴材料各向磁导率差异引起。**有的方向电子束的折射比别的方向强，如图所示，这样，圆形物点的象就变成了椭圆形的漫散圆斑，其平均半径为 $R_A$ ，折算到物平面上，得  $\Delta r_A = \frac{R_A}{M}$

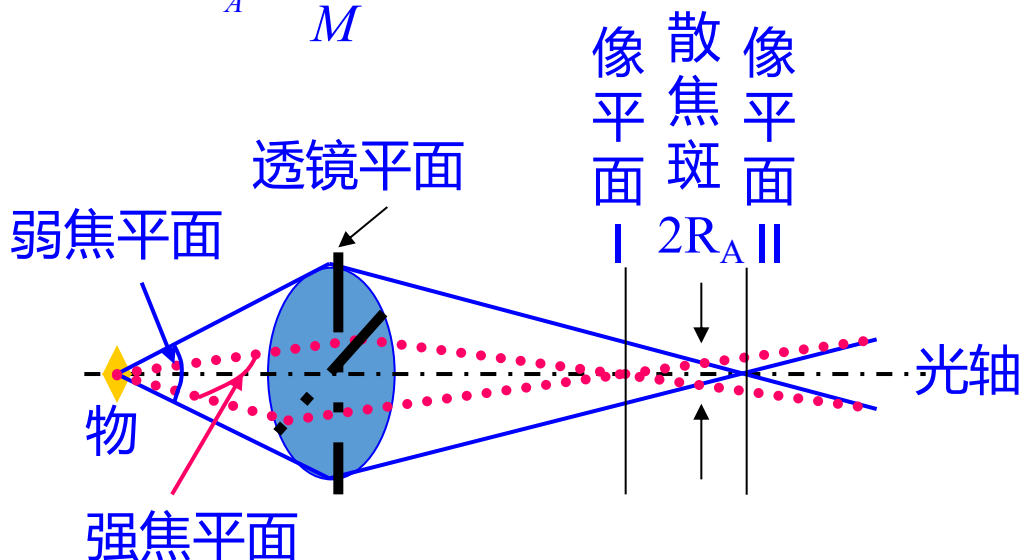
定义

$$\Delta r_A = \Delta f_A \alpha \quad \text{-- 像散}$$

$\Delta f_A$  -- 像散系数，电磁透镜出现椭圆度时造成的焦距差

$\alpha$  -- 孔径半角

物平面上两点距离小于  $2\Delta r_A$  时，则该透镜不能分辨，可以采用消散器来消除



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

**在电磁透镜中，球差对分辨率的影响最为重要，因为没有一种简便的方法使其矫正过来。其他像差在设计和制造时，采取适当的措施是可以消除的。**

# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### 4)电磁透镜分辨率（分辨距离、分辨本领）

**电子透镜中分辨本领基本上决定于球差和衍射。通过减小孔径角的方法来减小球差，提高分辨本领，但过小会由于衍射使分辨本领变差。这就是说，光阑的最佳尺寸应该是球差和衍射两者所限定的值。**

$$\Delta r_0 = 0.61 \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{1}{4} C_s \alpha^3$$

通常， $\alpha \approx 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ rad} \Rightarrow \Delta r_0 \approx 0.1 \text{ nm}$

电子透镜的分辨本领比光学透镜提高了一千倍左右。

# 透射电镜的构造与工作原理

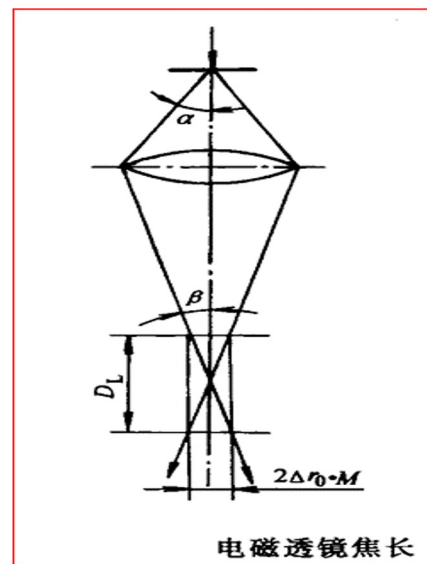
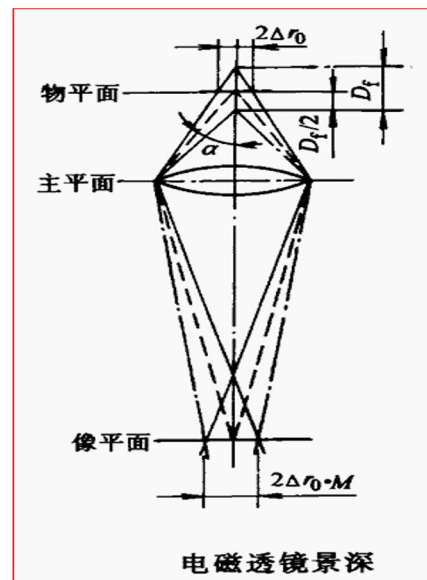
## 2、电磁透镜

### 5) 电子透镜的景深和焦深定义

**景深** - **在保持象清晰的前提下**，试样在物平面上上下沿镜轴可移动的距离，或者说试样超越物平面所允许的厚度。

**焦深（焦长）** - **在保持象清晰的前提下**，象平面沿镜轴可移动的距离，或者说观察屏或照相底版沿镜轴所允许的移动距离。

电子透镜所以有这种特点，是由于所用的孔径角非常小的缘故。这种特点在电子显微镜的应用和结构设计上具有重大意义。



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### 5) 电子透镜的景深和焦深

景深

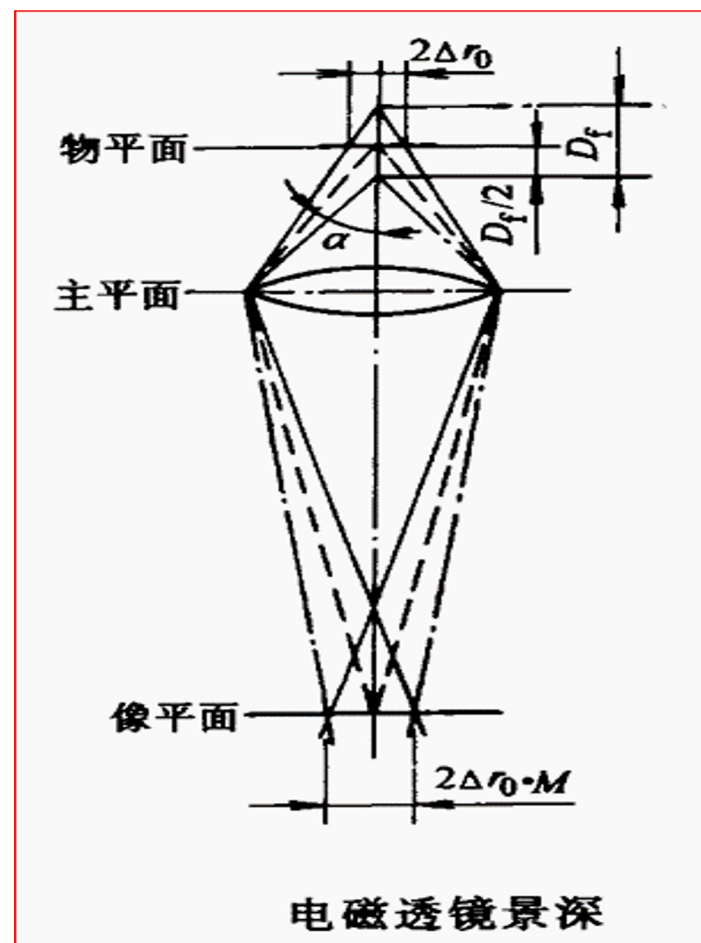
$$D_f = \frac{2\Delta r_0}{\tan \alpha} \cong \frac{2\Delta r_0}{\alpha}$$

取分辨率  $\Delta r_0 = 1 \text{ nm}$ ,

孔径半角  $\alpha = 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ rad}$

则景深  $D_f = 200 \sim 2000 \text{ nm}$

试样(薄膜)一般厚  $50 \sim 100 \text{ nm}$  , 上述景深范围可保证样品整个厚度范围内各个结构细节都清晰可见。



# 透射电镜的构造与工作原理

## 2、电磁透镜

### 5) 电子透镜的景深和焦深 ( 焦长 )

焦深  
( 焦长 )

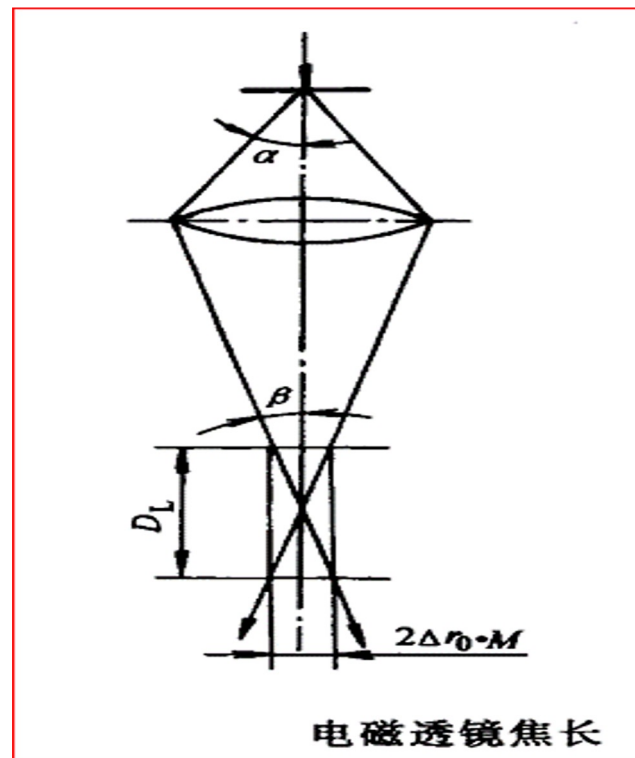
$$D_L = \frac{2\Delta r_0 M}{\tan \beta} \cong \frac{2\Delta r_0 M}{\beta} = \frac{2\Delta r_0 M^2}{\alpha} \quad (\because \beta = \frac{\alpha}{M})$$

取  $\Delta r_0 = 1 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 10^{-2} \text{ rad}$

若  $M = 200$ ,  $D_L = 8 \text{ mm}$

若  $M = 20000$ ,  $D_L = 80 \text{ cm}$

电磁透镜的这一特点给电子显微镜图象的照相记录带来了极大的方便，只要在荧光屏上图象聚焦清晰，在荧光屏上或下十几厘米放置照相底片，所拍得的图象也是清晰的。

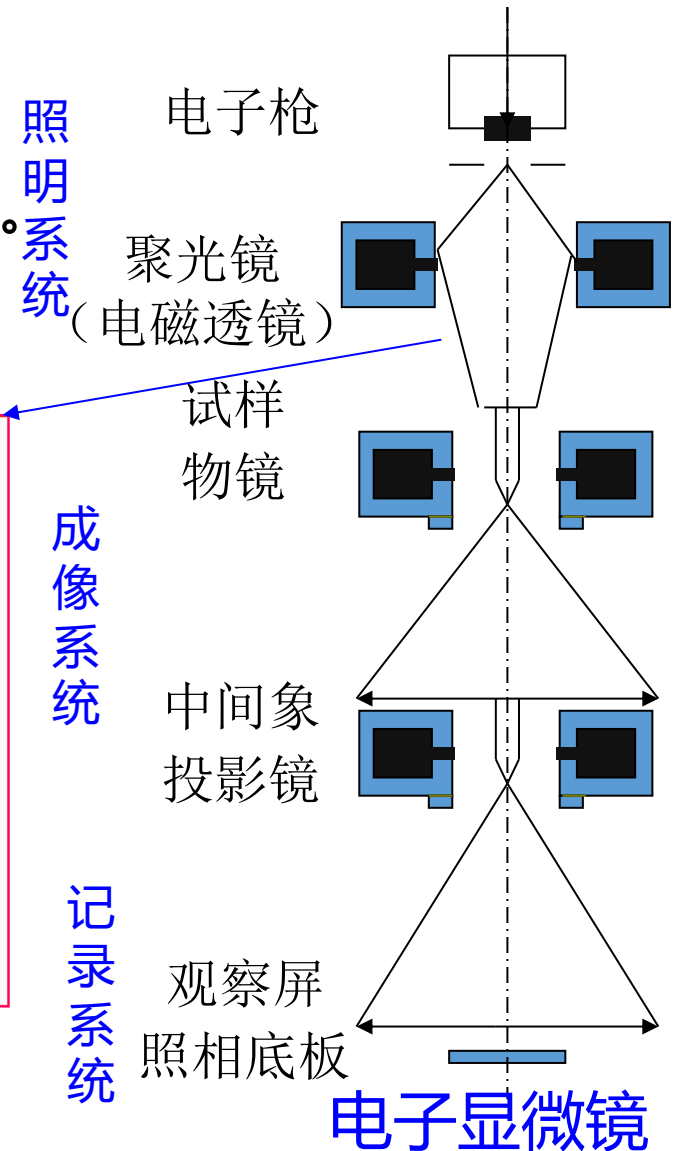
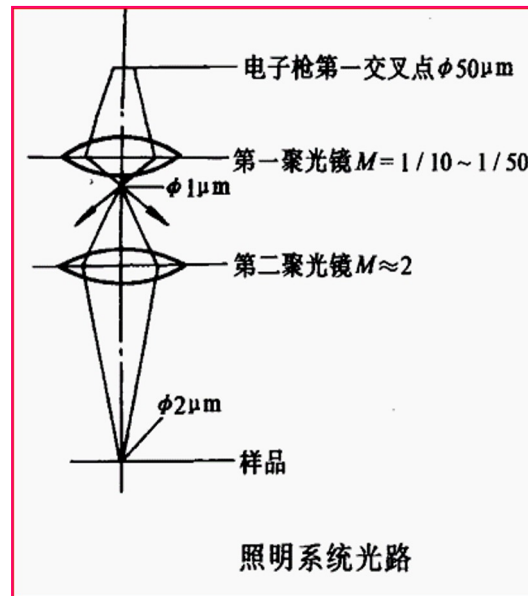


# 透射电镜的构造与工作原理

## 二、照明系统

①组成：由电子枪、聚光镜（1、2级）和相应的平移、对中、倾斜调节装置组成。

②作用：提供一束**亮度高、照明孔径角小、平行度高、束斑小、束流稳定**的照明源。为满足明场和暗场成像需要，照明束可在 $2^\circ - 3^\circ$ 范围内倾斜。





# 透射电镜的构造与工作原理

## 二、照明系统

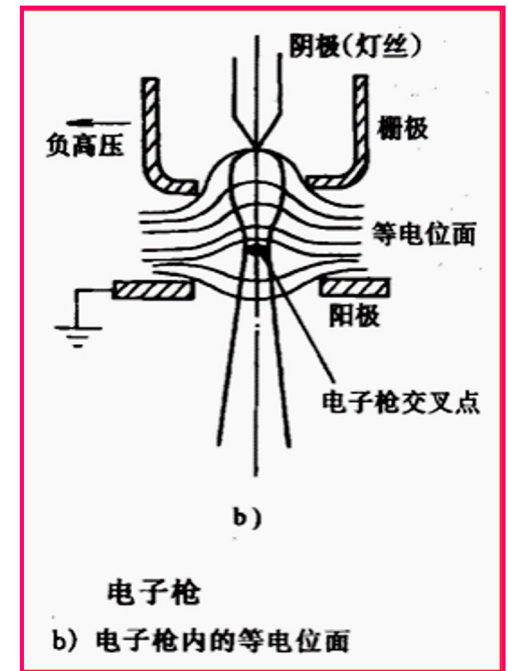
### (一) 电子源和电子枪

电子枪是电镜的电子源。其作用是发射并加速电子，并会聚成交叉点。

目前电子显微镜使用的电子源有两类：

- 热电子源—加热时产生电子，W丝，LaB<sub>6</sub>
- 场发射源—场发射阴极的**面积较小、能量集中，便于将电子束聚焦于一个很小的点，以提高分辨率**

从电子枪发射出的电子束，束斑尺寸大，相干性差，平行度差，为此，需进一步会聚成近似平行的照明束，这个任务由聚光镜实现，通常有两级聚光镜来聚焦。



# 透射电镜的构造与工作原理

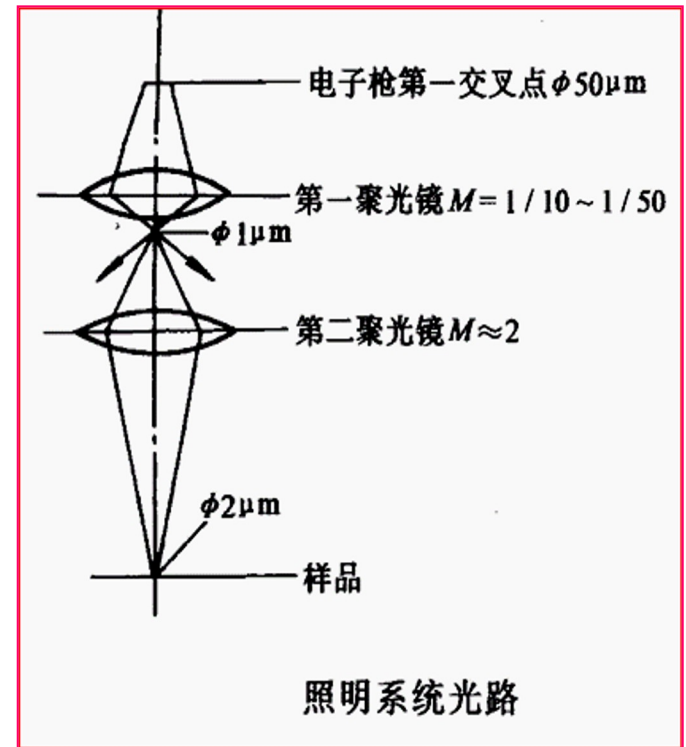
## 二、照明系统

### (二) 聚光镜系统

聚光镜的作用是会聚电子枪发射出的电子束，调节照明强度、孔径角和束斑大小。一般采用双聚光镜系统，如图所示。

$C_1$  — 强磁透镜

$C_2$  — 弱磁透镜，长焦，小 $\alpha$



为了调整束斑大小，在 $C_2$ 聚光镜下装一个聚光镜光阑。通常经二级聚光后可获得几 $\mu\text{m}$ 的电子束斑；为了减小像散，在 $C_2$ 下还要装一个消像散器，以校正磁场成轴对称性的；电子枪还可以倾斜 $2^\circ - 3^\circ$ ，以实现中心磁场成像。

# 透射电镜的构造与工作原理

## 三、成像系统与成像方法

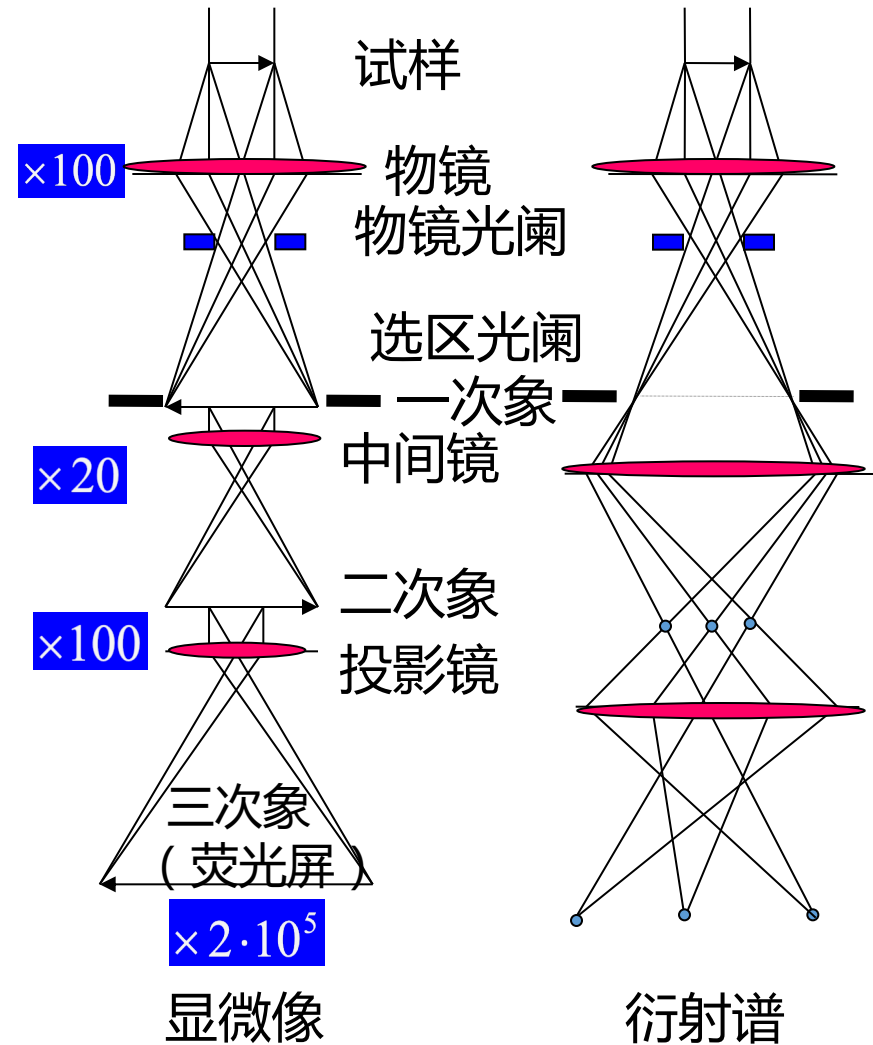
由**物镜、物镜光阑、选区光阑、中间镜和投影镜**组成。

### 1. 物镜

用来获得第一幅高分辨率电子显微图像或电子衍射花样的透镜。**电镜的分辨率主要取决于物镜，必须尽可能地降低像差。**

物镜通常为强励磁、短焦透镜 ( $f = 1-3\text{mm}$ )，放大倍数100 - 300倍，目前，高质量的物镜其分辨率可达0.1nm。

物镜的分辨率主要决定于极靴的形状和加工精度，极靴间距越小，分辨率就越高。为进一步减小物镜球差，在物镜后焦面上安放物镜光阑。



# 透射电镜的构造与工作原理

## 三、成像系统与成像方法

由物镜、物镜光阑、选区光阑、中间镜和投影镜组成。

### 1. 物镜

**物镜光阑**：装在物镜背焦面，直径20 - 120 $\mu\text{m}$ ，无磁金属制成（Pt、Mo等）

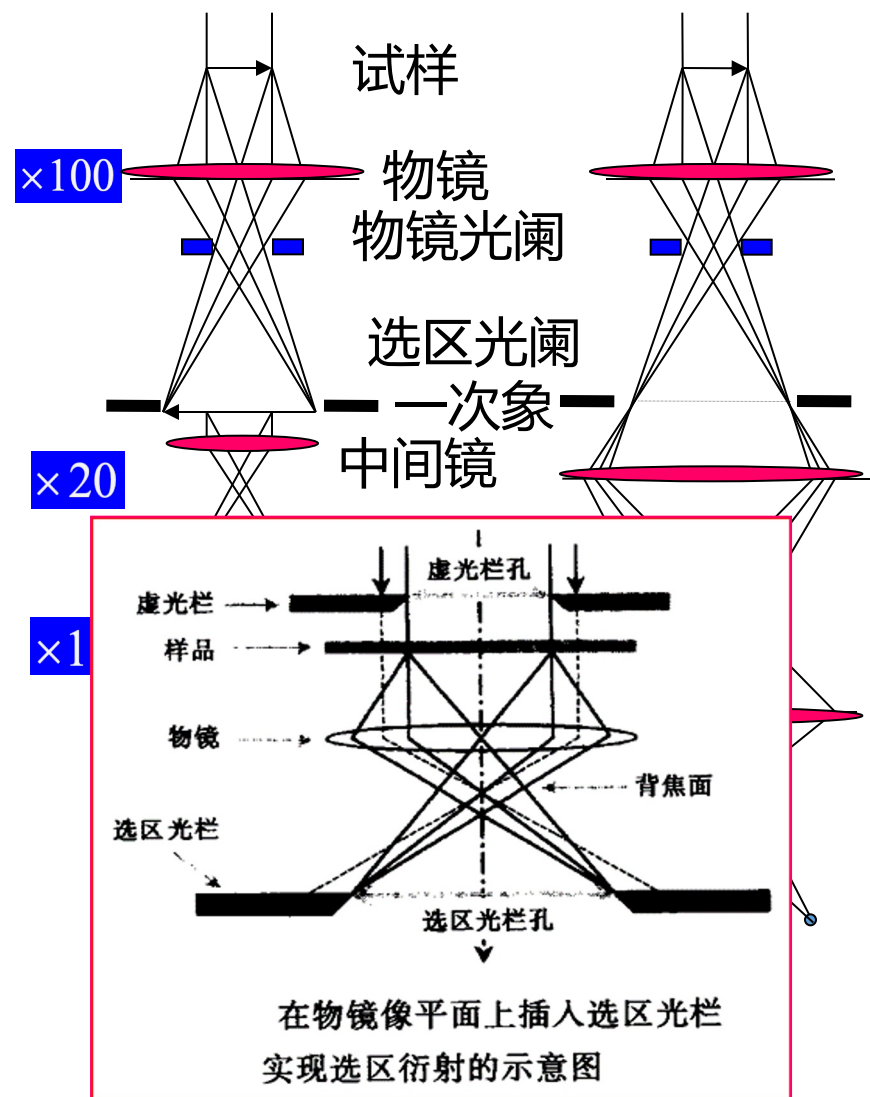
作用：

- **提高像衬度**
- 减小孔径角，从而减小像差
- 进行暗场成像

### 选区光阑

**装在物镜像平面上**，直径20-400  $\mu\text{m}$

作用：**对样品进行微区衍射分析。**



# 透射电镜的构造与工作原理

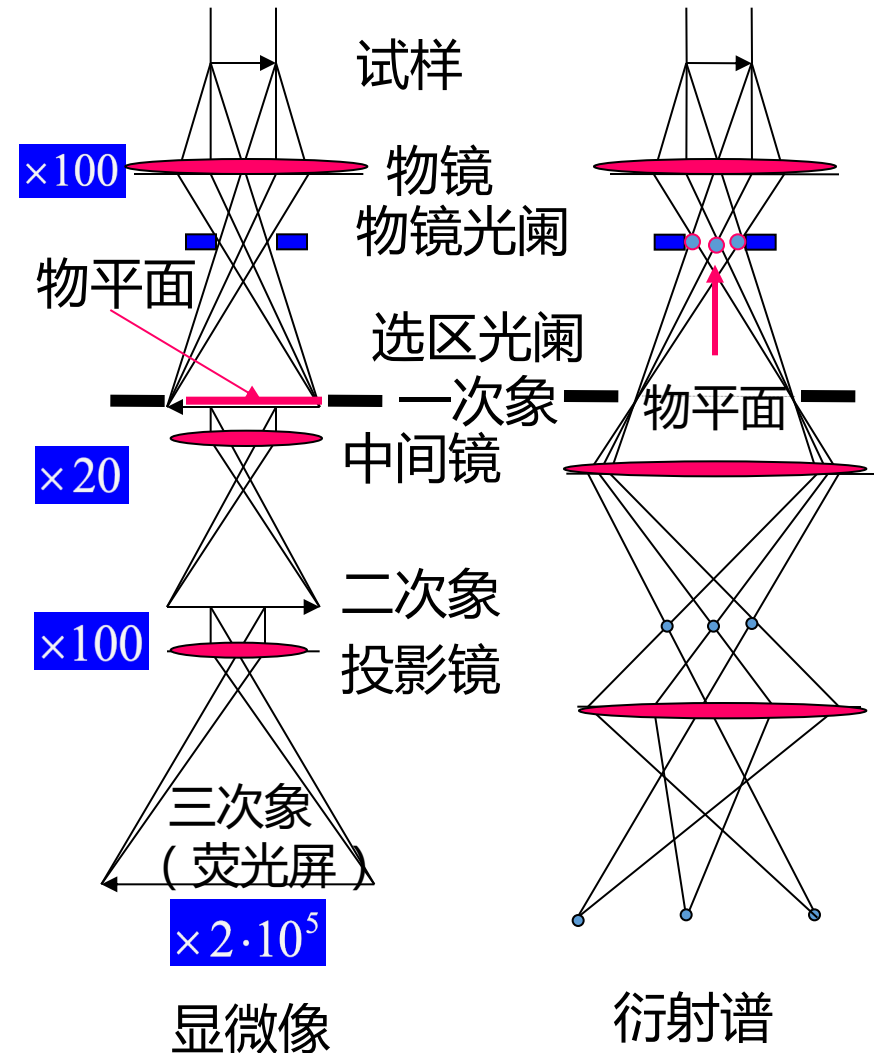
## 三、成像系统与成像方法

由物镜、物镜光阑、选区光阑、中间镜和投影镜组成。

### 2. 中间镜

中间镜是一个弱励磁、长焦距、变倍率透镜，放大倍数可调节1 - 20倍作用：

- 控制电镜总放大倍数(如图20万倍)
- 成像/衍射模式选择：
  - 如果把中间镜的物平面和物镜的像平面重合，则在荧光屏得到显微图像成像模式
  - 如果把中间镜的物平面和物镜的背焦面重合则在荧光屏得到电子衍射花样衍射模式。



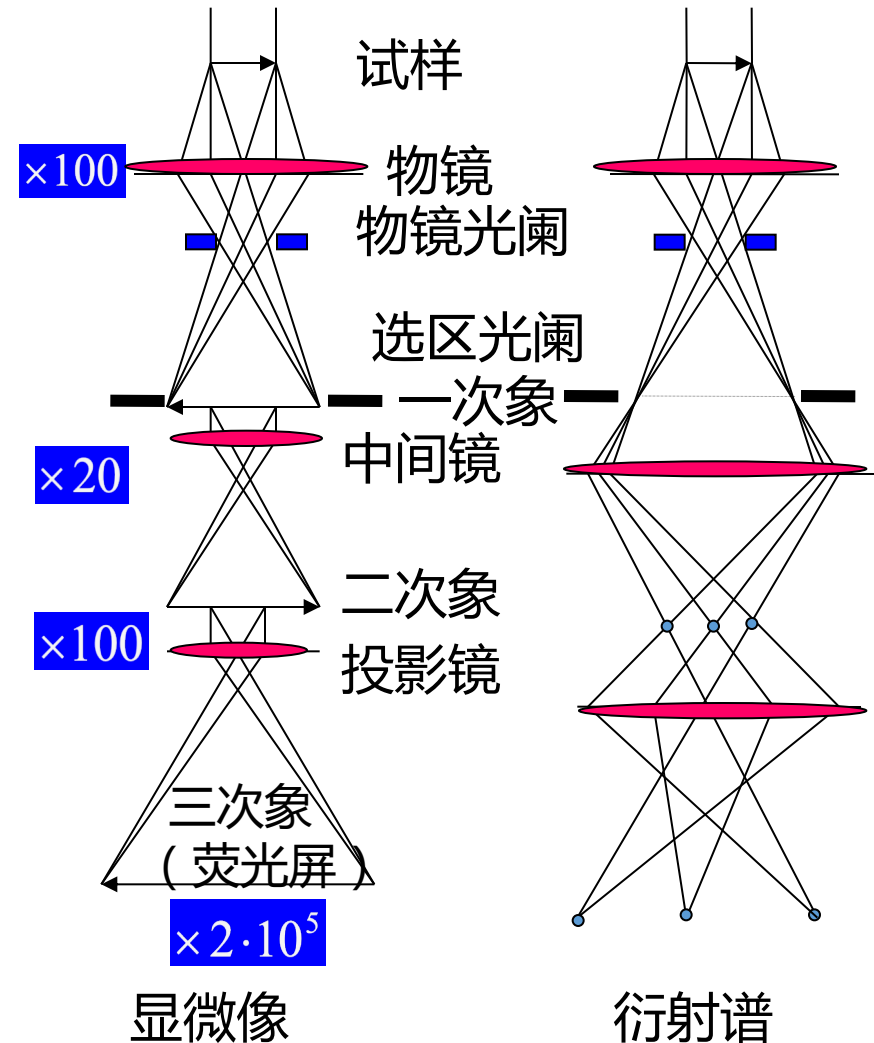
# 透射电镜的构造与工作原理

## 三、成像系统与成像方法

由物镜、物镜光阑、选区光阑、中间镜和投影镜组成。

### 3. 投影镜

- 短焦、强磁透镜，进一步放大中间镜的像。投影镜内孔径较小，使电子束进入投影镜孔径角很小。
- 景深大，改变中间镜放大倍数，使总倍数变化大也不影响图象清晰度。
- 焦深长，放宽对荧光屏和底片平面严格位置要求。

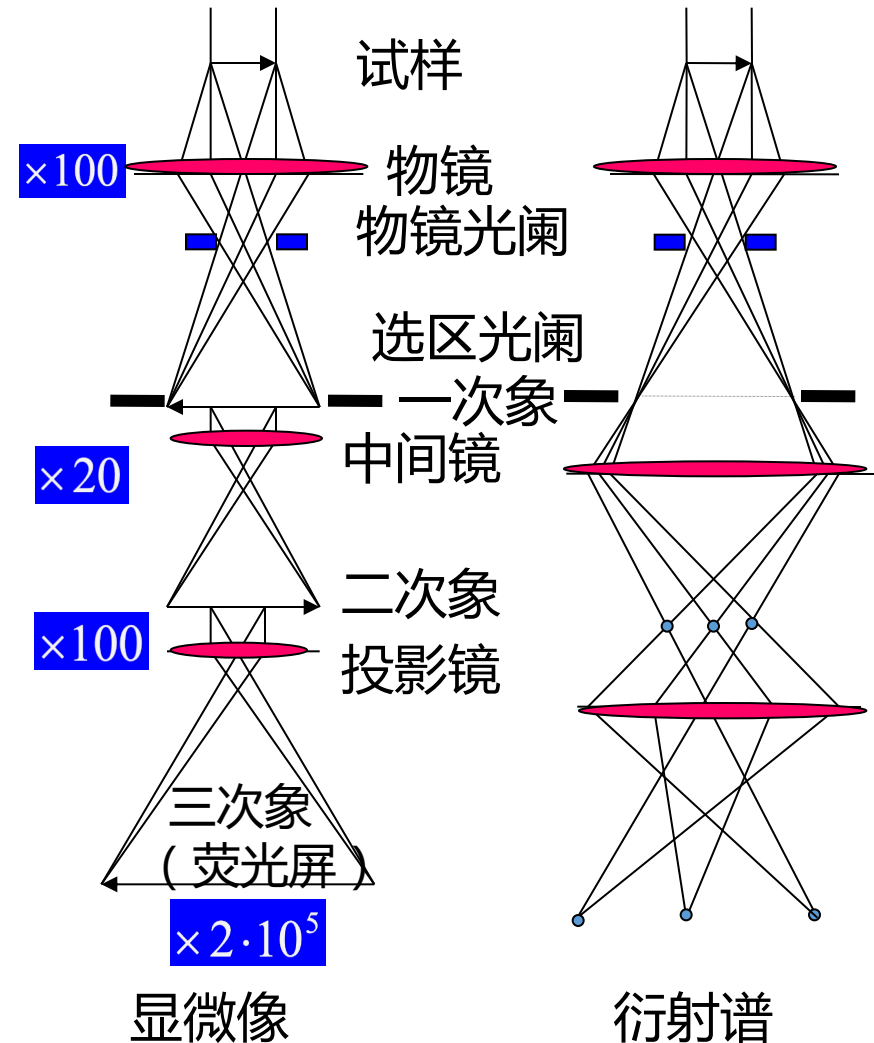


# 透射电镜的构造与工作原理

## 四、观察记录系统

观察和记录系统包括荧光屏和照相机机构。

- 荧光屏涂有在暗室操作条件下，人眼较敏感、发绿光的荧光物质，有利于高放大倍数、低亮度图像的聚集和观察。
- 传统照相机构是一个装在荧光屏下面，可以自动换片的照相暗盒。胶片是一种对电子束曝光敏感、颗粒度很小的溴化物乳胶底片，曝光时间很短，一般只需几秒钟。现代电镜装有电子数码照相装置/CCD



# 透射电子显微镜

视频展示