§ 15.6　德布罗意波
实物粒子的波粒二象性

一、德布罗意假设

波动性描述：　波长 λ ，频率 ν 等……

粒子性描述：　动量 P ，能量 E 等……

波动性 → 光 ← 粒子性

粒子性 → 实物粒子 ← 波动性?

(*Louis Victor de Broglie*，1892 -1987, 法国物理学家。因提出的物质波假设，开创了量子物理，为人类研究微观领域内物体运动的基本规律指明了方向，获1929年诺贝尔物理学奖)

德布罗意认为： 实物粒子与光子相类似具有波粒二象性。在一定条件下也会表现出波动性。这种波称作**物质波**或**德布罗意波**。

一质量为 m 、速度为 v 的粒子其能量和动量为：

$$\begin{cases} E = mc^2 = h\nu \\ p = m\mathrm{v} = \dfrac{h}{\lambda} \end{cases}$$

（德布罗意关系）

则该物质波或德布罗意波的波长和频率分别为：

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad , \quad \nu = \frac{E}{h}$$

（德布罗意公式）

$$\begin{cases} \lambda = \dfrac{h}{p} = \dfrac{h}{m\mathrm{v}} = \dfrac{h}{m_0\mathrm{v}}\sqrt{1-\mathrm{v}^2/c^2} \\ \nu = \dfrac{E}{h} = \dfrac{mc^2}{h} = \dfrac{m_0c^2}{h}\Big/\sqrt{1-\mathrm{v}^2/c^2} \end{cases}$$

如果v<<c，则该粒子所具有的物质波波长为：

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{h}{m_o\mathrm{v}} \quad , \quad \nu = \frac{m_0c^2}{h}$$

试估算：对一般低速粒子而言，$\nu =$ ？，$\lambda =$ ？

例 估算动能为200eV的电子束的德布罗意波波长。

分析: $E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2(\gamma - 1) \longrightarrow \gamma - 1 = E_k / m_0c^2$

若 $E_k << E_0 = m_0c^2$, $\gamma \to 1$, $v << c, m \approx m_0 , E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2$

解 由于 $E_k << m_o c^2 = 0.512 MeV$, 则

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_o}} = 8.4 \times 10^6 m/s$$

$$\lambda \approx \frac{h}{m_o v} = 8.67 \times 10^{-2} nm$$

例 估算一颗质量为40g，速度为1000m/s的子弹的德布罗意波波长。

解 子弹运动的速度远小于光速，其动量为：

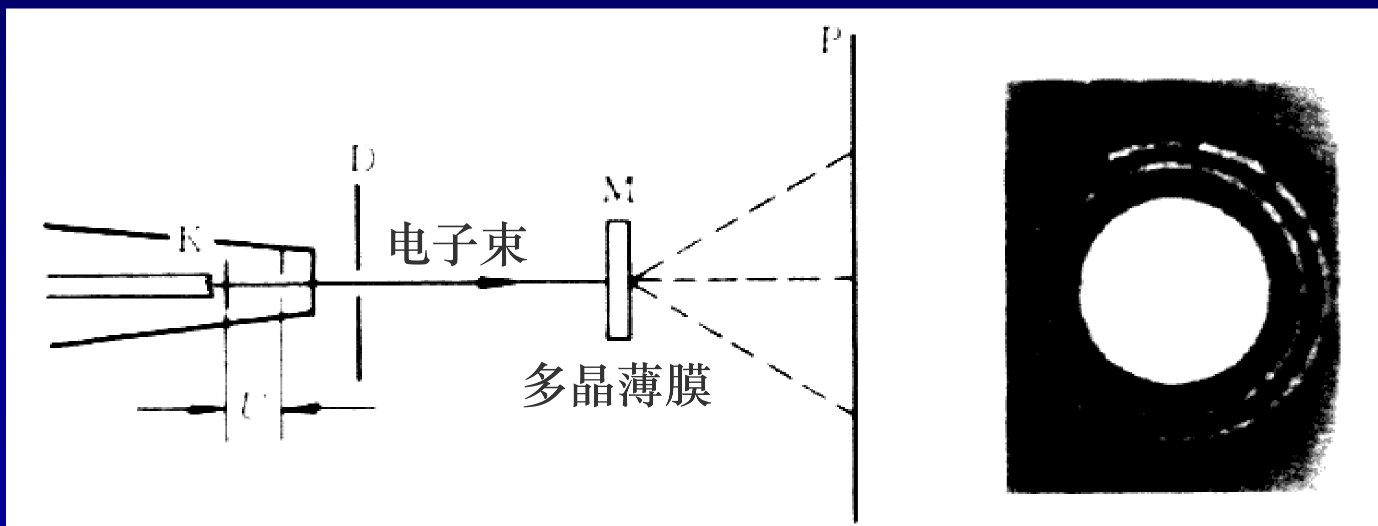
$$p = m_o \mathrm{v} = 40 kg \cdot m / s$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = 1.66 \times 10^{-26} m$$

可知，对于宏观低速运动物体，其物质波波长很小，可忽略其波动效应。

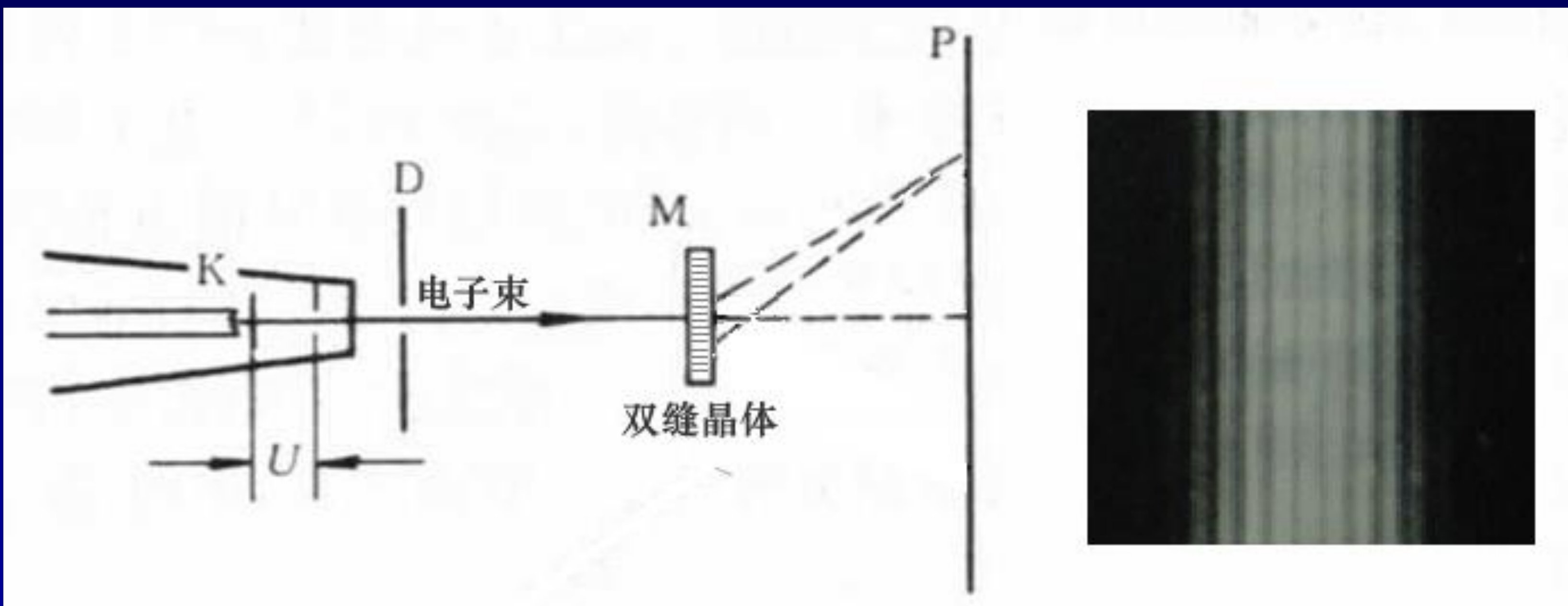
二.德布罗意波的实验验证

1927年，英国物理学家汤姆孙（*G.P.Thomson*，1892-1975）独立地观察到电子透过多晶薄片时的衍射现象。为此，与美国物理学家戴维孙、革末共同获得1937年诺贝尔物理学奖。



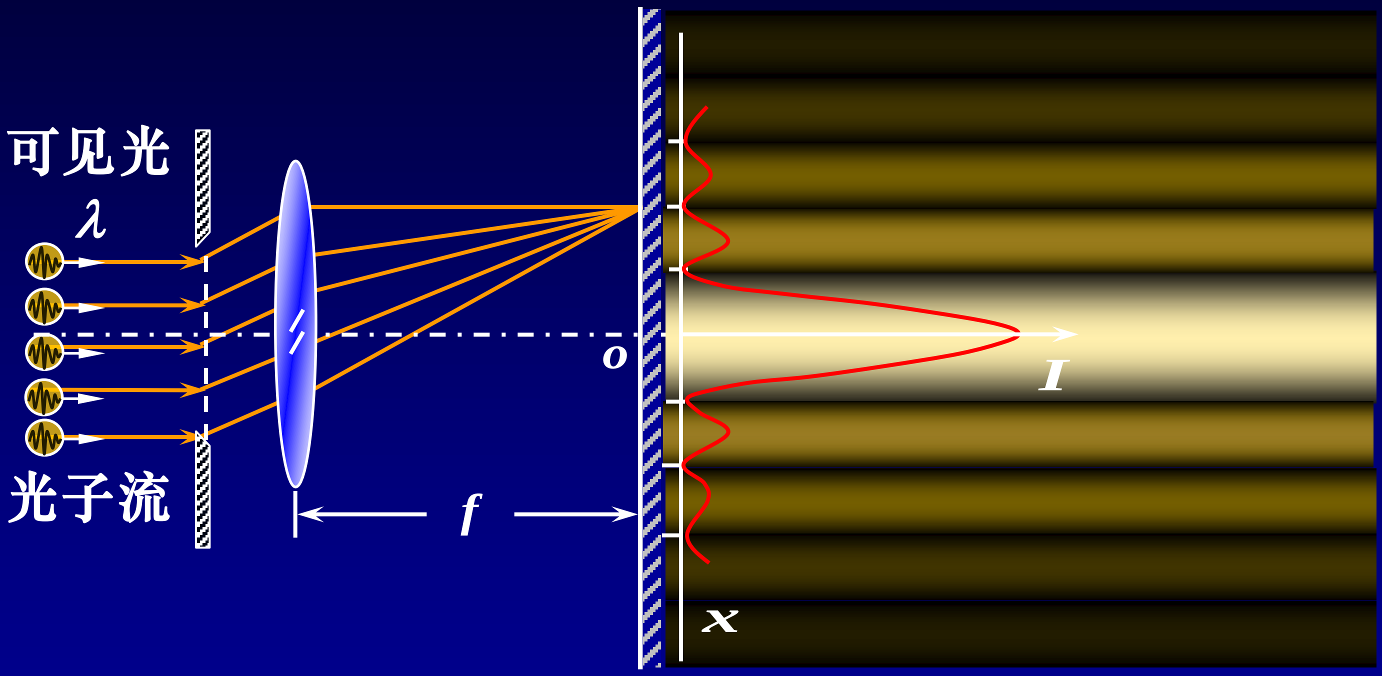
电子透过多晶薄片时的衍射现象

1961年，约恩逊让一束加速电子流通过自己制出的缝间距只有1.0μ m的多缝，观测到类似光的多缝干涉一样的图样。



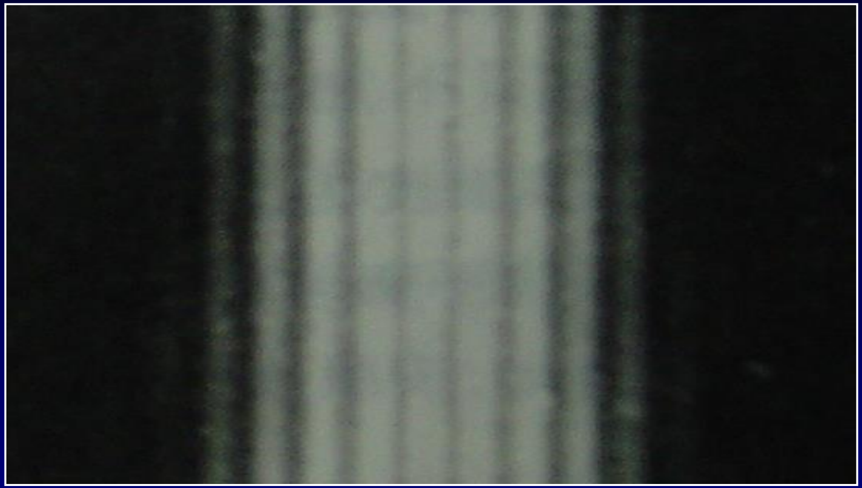
电子通过双缝的衍射图样

德布罗意波是什么性质的波？



光强大的地方，光子数大： $N \propto I$

德布罗意波是什么性质的波?



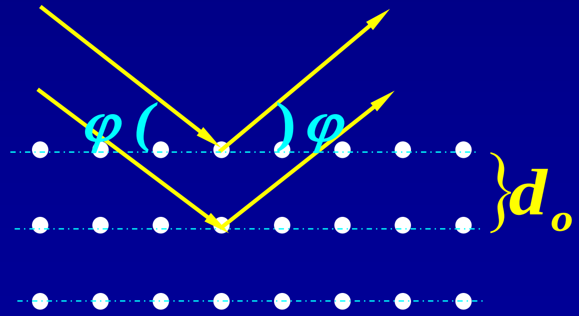
☻德布罗意波强度大的地方，粒子出现的概率也越大!
德布罗意波强度∝粒子在该处邻近出现的概率。

☻缔合在粒子上的物质波既不是机械波，也不是电磁波，是一种概率波!

德布罗意波关系式的进一步验证

1927年，美国物理学家戴维逊(*C.G.Davisson*，1881-1859)、革末(*L.H.Germer*，1896-1971)用实验证实了电子具有波动性。

x-射线在晶体表面反射时，干涉加强应该满足：



$$2d_o \sin\varphi = k\lambda$$

类似地:

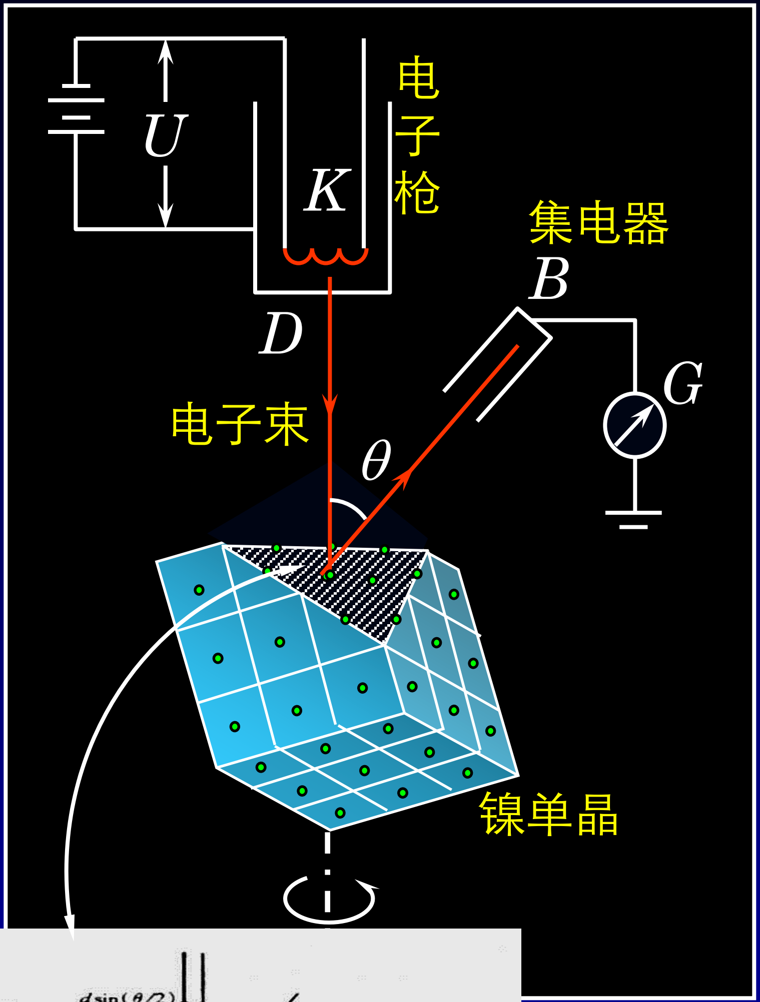
$$\varphi = \frac{\pi - \theta}{2} \qquad d_o = d\sin\frac{\theta}{2}$$

$$2d_o \sin\varphi = 2d\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2} = k\lambda$$

$$d \cdot \sin\theta = k\lambda$$

将 $\lambda = \dfrac{h}{m_0 \mathrm{v}}$, $\mathrm{v} = \sqrt{\dfrac{2eU}{m_0}}$ 代入:

$$d \cdot \sin\theta = k\frac{h}{\sqrt{2em_0U}}$$



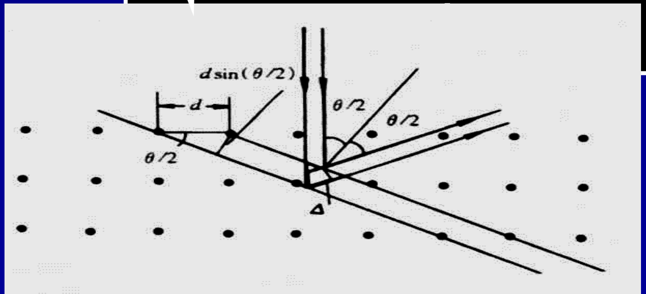


图 19－30　两相邻晶面电子束反射射线的干涉

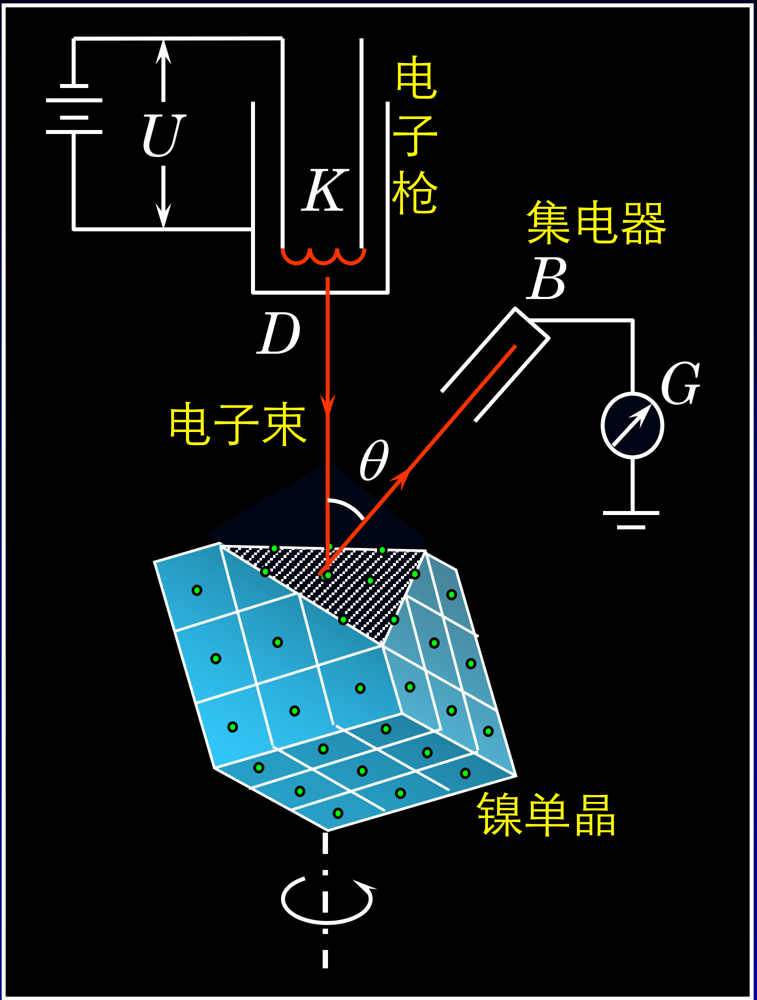
$$\sqrt{U} = \frac{kh}{d \cdot \sin\theta \sqrt{2em_0}}$$

实验中保持 $\theta = 50^{\circ}$ 不变。镍单晶的晶格常数 $d = 0.215nm$，代入各常数，得：

$$U \approx 55.587k^2$$

k=1时，$U \approx 55.587$ V

即：当加速电压U=55.587V时，集电器中的电流应出现一次最大值！



实验中发现 U=54 V 时，电流达到最大值!

实验值与理论值接近!

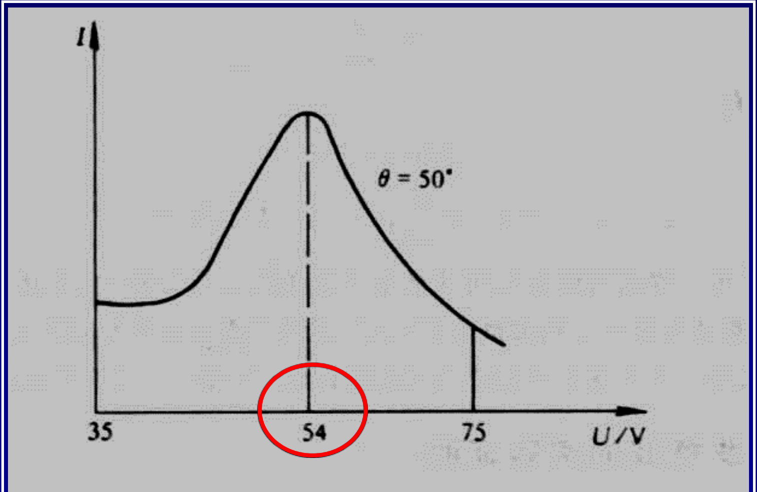
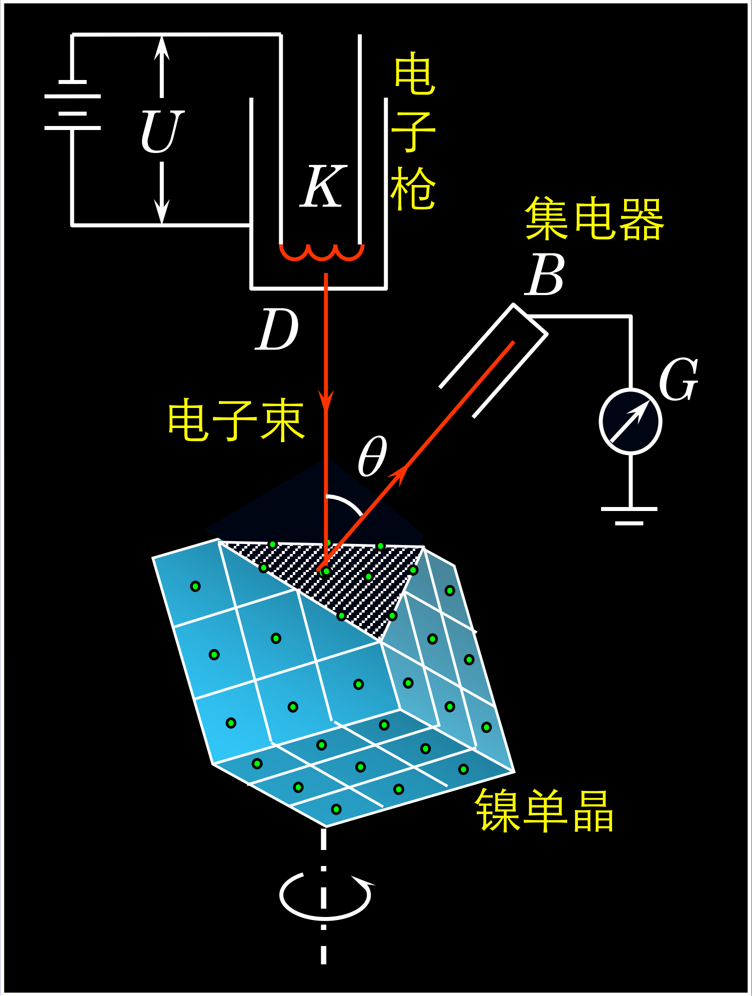


图 19－29　在散射角 θ = 50°、加速电压 U = 54 V 时，电流出现峰值



应用 德国人鲁斯卡在1932年研制出了世界上第一台**电子显微镜**。如今电子显微镜的分辨本领已经可达到0.2nm。