

第一章

1、电子波有何特征？与可见光有何异同？

答：

电子波特征：电子波属于物质波。电子波的波长取决于电子运动的速度和质量，

$\lambda = \frac{h}{mv}$ 若电子速度较低，则它的质量和静止质量相似；若电子速度具有极高，则

必须经过相对论校正。

电子波和光波异同：

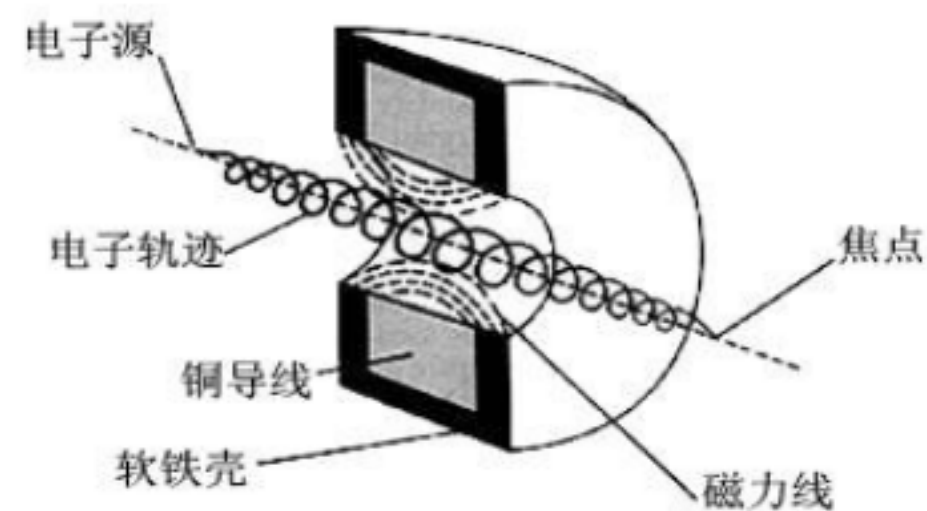
不同：不能通过玻璃透镜会聚成像。但是轴对称的非均匀电场和磁场则可以让电子束折射，从而产生电子束的会聚与发散，达到成像的目的。电子波的波长较短，其波长取决于电子运动的速度和质量，电子波的波长要比可见光小 5 个数量级。另外，可见光为电磁波。

相同：电子波与可见光都具有波粒二象性。

补充：光学显微镜的分辨本领取决于照明光源的波长。

2、分析电磁透镜对电子波的聚焦原理，说明电磁透镜的结构对聚焦能力的影响。

聚焦原理：电子在磁场中运动，当电子运动方向与磁感应强度方向不平行时，将产生一个与运动方向垂直的力（洛伦兹力）使电子运动方向发生偏转。在一个电磁线圈中，当电子沿线圈轴线运动时，电子运动方向与磁感应强度方向一致，电子不受力，以直线运动通过线圈；当电子运动偏离轴线时，电子受磁场力的作用，运动方向发生偏转，最后会聚在轴线上的一点。电子运动的轨迹是一个圆锥螺旋曲线。



右图短线圈磁场中的电子运动显示了电磁透镜聚焦成像的基本原理：结构的影响：

- 1) 增加极靴后的磁线圈内的磁场强度可以有效地集中在狭缝周围几毫米的范围内；
- 2) 电磁透镜中为了增强磁感应强度，通常将线圈置于一个由软磁材料（纯铁或低碳钢）制成的具有内环形间隙的壳子里，此时线圈的磁力线都集中在壳内，磁感应强度得以加强。狭缝的间隙越小，磁场强度越强，对电子的折射能力越大。
- 3) 改变励磁电流可以方便地改变电磁透镜的焦距

3、电磁透镜的像差是怎样产生的，如何消除和减少像差？

像差有几何像差（球差、像散等）和色差

球差是由于电磁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；为了减少

由于球差的存在而引起的散焦斑，可以通过减小球差系数和缩小成像时的孔径半角来实现

像散是由透镜磁场的非旋转对称而引起的；透镜磁场不对称，可能是由于极靴内孔不圆、上下极靴的轴线错位、制作极靴的材料材质不均匀以及极靴孔周围局部污染等原因导致的。像散可通过引入一个强度和方向都可以调节的矫正电磁消像

散器来矫正

色差是由于入射电子波长（或能量）不同造成的；使用薄试样和小孔径光阑将散射角大的非弹性散射电子挡掉，也可以采取稳定加速电压的方法来有效减小色差。

4、说明影响光学显微镜和电磁透镜分辨率的关键因素是什么？如何提高电磁透镜分辨率？

光学显微镜的分辨本领取决于照明光源的波长；球差是限制电磁透镜分辨本领的主要因素；孔径半角减小，球差减小，但从衍射效应来看，减小使 Δr_0 变大，分辨本领下降，关键是电磁透镜确定电磁透镜的最佳孔径半角，使衍射效应 Airy 斑和球差散焦斑尺寸大小相等，表明两者对透镜分辨本领影响效果一样。

5、电磁透镜景深和焦长主要受哪些因素影响？说明电磁透镜的景深大、焦长长，是什么因素影响的结果？假设电磁透镜没有像差，也没有衍射 Airy 斑，即分辨率极高，此时它的景深和焦长如何？

景深受分辨本领和孔径半角的影响

焦长受分辨本领、放大倍数和孔径半角的影响

电磁透镜景深大、焦长长，是孔径半角影响的结果

分辨率极高，景深和焦长将减小（趋于 0）

第二章

1. 透镜电镜主要由几大系统构成？各系统之间关系如何？

透射电镜由电子光学系统、电源与控制系统、真空系统三部分组成。

电子光学系统是核心，其它两个部分为辅助部分，三大系统相互联系，缺一不可。

2. 照明系统的作用是什么？它应满足什么要求？

作用：提供一个亮度高，照明孔径角小，平行度好，束流稳定的照明电子束。

为满足明场与暗场成像需要，照明束可在 $2\sigma \sim 3\sigma$ 范围内倾斜。

3. 成像系统的主要构成及其特点是什么？

构成：成像系统主要由物镜、中间镜和投影镜组成。

1) 物镜。特点：是强激磁短焦距的透镜（ $f = 1 \sim 3 \text{ mm}$ ），透射电子显微镜分辨本领的高低主要取决于物镜；放大倍数较高，一般在 100~300 倍；最高分辨率可达 0.1nm 左右。物镜的背焦面上有物镜光阑（4）在电子显微镜进行图像分析时，物镜和样品之间的距离总是固定不变的。

2) 中间镜。特点：弱激磁长焦距；可变倍率，可在 0~20 倍调节（其放大倍数大于 1，放大物镜像；放大倍数小于 1 时，缩小物镜像）。主要利用中间镜的可变倍率来控制电镜的放大倍率数。

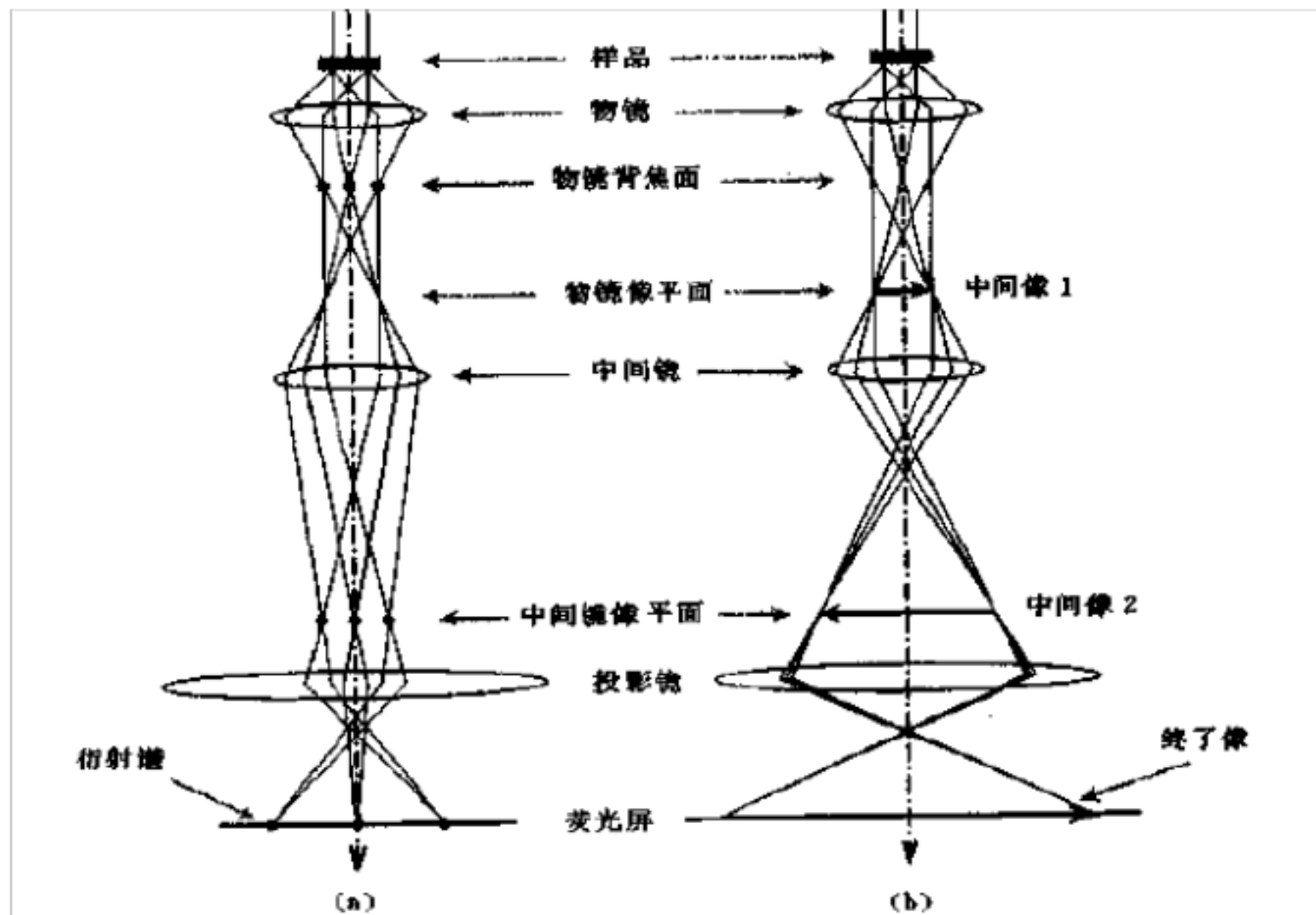
3) 投影镜。特点：（1）强激磁短焦距透镜；孔径角很小，因此景深和焦长都非常大。作用是把中间镜放大（或者缩小）的像（或者衍射花样）进一步放大，并投在荧光屏上。

4. 分别说明成像操作与衍射操作时各级透镜（像平面与物平面）之间的相对位置关系，并画出光路图。

（要知道）成像操作：如果把中间镜的物平面和物镜的像平面重合，则在荧光屏上得到一幅放大像，这就是成像操作

（要知道）衍射操作：如果把中间镜的物平面和物镜的背焦面重合，则在荧光屏上得到一幅电子衍射花样，这就是衍射操作

光路图如下：



图透射电镜成像系统的两种基本操作

(a)将衍射谱投影到荧光屏 (b)将显微像投影到荧光屏

5. 透射电镜中有哪些主要光阑，在什么位置？其作用如何？

透射电镜中有聚光镜光阑、物镜光阑、选区光阑三类主要光阑。

1) 聚光镜光阑 —— 第二聚光镜下方，限制照明孔径角。

2) 物镜光阑 (衬度光阑) —— 常安放在物镜的后焦面上，作用是 减小物镜孔径角，以减小像差，获得衬度较大的、质量较高的显微图像； 在物镜的后焦面上套取衍射束的斑点 (副焦点) 成像 —— 获得暗场像。

3) 选区光阑 (场限光阑或视场光阑) —— 常安放在物镜的像平面上。

主要作用：用于选区衍射，也就是选择样品上的一个微小的区域进行晶体结构分析，限制电子束只能通过光阑孔限定的微区成像。

6. 点分辨率和晶格分辨率有何不同？同一电镜的这两种分辨率哪个高？为什么？

1) 点分辨率：透射电镜刚能分清的两个独立颗粒的间隙或中心距离。在非相干照明条件下，点分辨率是振幅衬度。

2) 晶格分辨率：当电子束射入样品后，通过样品的透射束和衍射束间存在位相差。由于透射和衍射束间的位相不同，它们间通过动力学干涉在相平面上形成能反映晶面间距大小和晶面方向的条纹像，即晶格条纹像

晶格分辨率与点分辨率是不同的，点分辨率就是实际分辨率，晶格分辨率的晶格条纹像是因位相差引起的干涉条纹，实际是晶面间距的比例图像。

晶格分辨率更高。

1. 复型样品在透镜电镜下的衬度是如何形成的？

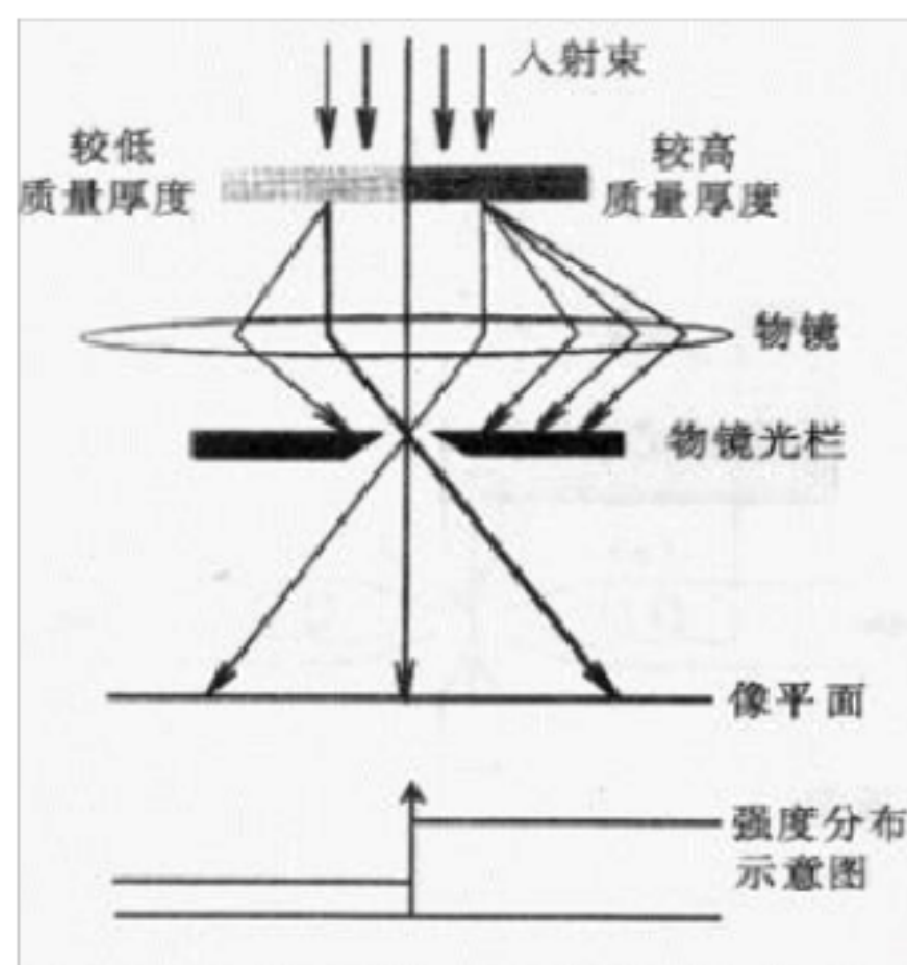
衬度是指在荧光屏或照片底片上，眼睛能观察到的光强度或感光度的差别。

1) 所谓小孔径角成像是指在物镜背焦平面上沿径向插入一个小孔径的物镜光阑，挡住散射角大于 θ_c 的电子，只允许散射角小于 θ_c 的电子通过物镜光阑参与成像，而图像的衬度就取决于透过物镜光阑投影到荧光屏或照相底片上不同区域的电子强度差别。

2) 质厚衬度原理是建立在非晶体样品中原子对入射电子的散射和衍射电子显微镜小孔径角成像基础上的成像原理，是解释非晶态样品电子显微图像衬度的理论依据。

补充：（掌握）质厚衬度原理：非晶（复型）样品电子显微图像衬度是由于样品不同微区间存在原子序数或厚度的差异而形成的，即质厚衬度。它是建立在非晶样品中原子对电子的散射和透射电子显微镜小孔径角成像的基础上的。

质厚衬度的成像原理见下图。



2. 说明如何用透射电镜观察超细粉末的尺寸和形态？如何制备样品？

关键工作是粉末样品的制备，样品制备的关键是如何将超细粉的颗粒分散开来，各自独立而不团聚。

制备样品：方法主要包括胶粉混合法和支持膜分散粉末法。 P133

第三、四章

1、分析电子衍射与 X 衍射有何异同？

相同：原理相似，以满足（或基本满足）布拉格方程作为产生衍射的必要条件
两种衍射技术所得到的衍射花样在几何特征上也大致相似。

不同：电子波波长比 X 射线短得多，在同样满足布拉格条件时，它的衍射角 θ 很小，约为 10^{-2} rad，X 射线衍射角最大可接近 $\frac{\pi}{2}$

进行电子衍射操作时采用薄晶样品，薄样品的倒易阵点会沿着样品厚度方向延伸成杆状，因此，增加了倒易阵点和埃瓦尔德球相交截的机会，结果使略为偏离

布拉格条件的电子束也能发生衍射。

因为电子波波长短，可以认为电子衍射产生的衍射斑点大致分布在一个二维倒易截面内。

原子对电子的散射能力远高于它对 X 射线的散射能力（约高出四个数量级），故电子衍射束的强度较大，摄取衍射花样时曝光时间仅需数秒钟。

2. 倒易点阵与正点阵之间的关系如何？倒易点阵与电子衍射斑点之间有何对应关系？

倒易点阵与正点阵之间的关系：

正倒点阵异名基矢点乘为 0，同名基矢点乘为 1，即

$$\mathbf{a}^* \cdot \mathbf{b} = \mathbf{a}^* \cdot \mathbf{c} = \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{a} = \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{c} = \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{a} = \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{b} = 0 \quad \mathbf{a}^* \cdot \mathbf{a} = \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{b} = \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{c} = 1$$

倒易矢量 \mathbf{g}_{hkl} 垂直于正点阵中相应的 (h, k, l) 晶面，或平行于它的法向 \mathbf{N}_{hkl} ；

倒易点阵中的一个点代表的是正点阵中的一组晶面。

倒易矢量的长度等于正点阵中相应晶面间距的倒数，即 $g_{hkl} = 1/d_{hkl}$

对正交点阵，有

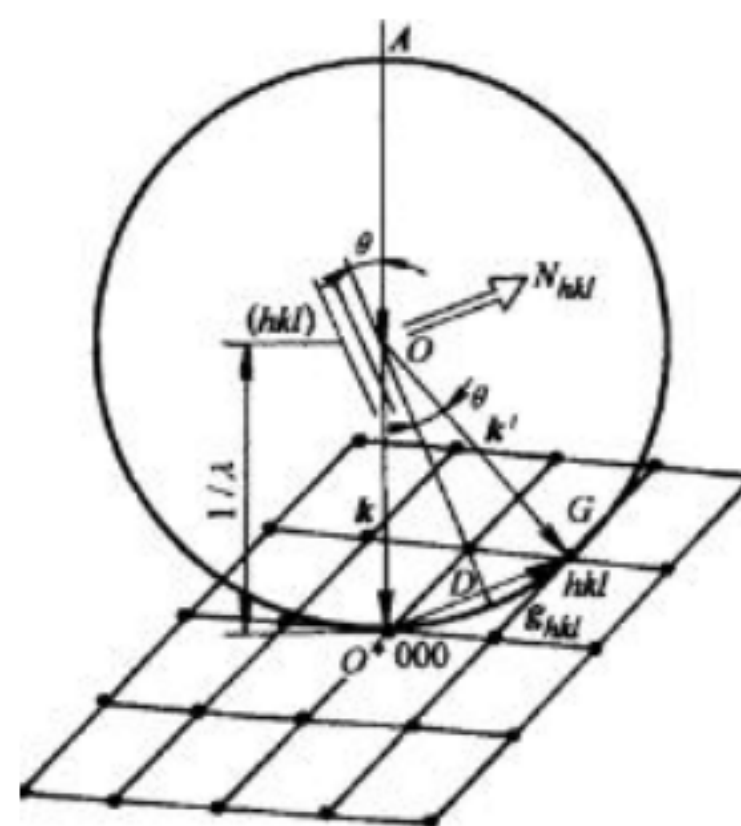
$$\mathbf{a}^* \parallel \mathbf{a}, \mathbf{b}^* \parallel \mathbf{b}, \mathbf{c}^* \parallel \mathbf{c}, \mathbf{a}^* = \frac{1}{a}, \mathbf{b}^* = \frac{1}{b}, \mathbf{c}^* = \frac{1}{c}$$

只有在立方点阵中，晶面法向和同指数的晶向是重合（平行）的。即倒易矢量

\mathbf{g}_{hkl} 是与相应的指数的晶 $[hkl]$ 平行的。

倒易点阵与电子衍射斑点之间的对应关系：电子衍射斑点就是与晶体相对应的倒易点阵中某一截面上阵点排列的像。

3. 用爱瓦尔德图解法证明布拉格定律



爱瓦尔德球作图法

以 O 为中心， $\frac{1}{\lambda}$ 为半径作一个球，入射波矢量为 \mathbf{k} ， $k = \frac{1}{\lambda}$ 。

此时若有倒易阵点 G（指数为 hkl）正好落在爱瓦尔德球的球面上，则相应的晶面组（hkl）与入射束方向满足布拉格条件，而衍射束方向即 \mathbf{OG} ，或者写成波矢量为 \mathbf{k}' ，其长度也为 $\frac{1}{\lambda}$ 。

根据倒易矢量的定义， $\mathbf{OG} = \mathbf{g}$ ，于是得到

$$\mathbf{k}' - \mathbf{k} = \mathbf{g}$$

由 O 向 \mathbf{OG} 作垂线，垂足为 D，因为 $\mathbf{g} \parallel \mathbf{N}_{hkl}$ ，所以 OD 就是正空间中（hkl）晶面的方位，若它与入射束方向的夹角为 θ ，则有

$$\overline{O^*D} = \overline{OO^*} \sin \theta, \quad \frac{g}{2} = k \sin \theta, \quad g = \frac{1}{d}, \quad k = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow 2d \sin \theta = \lambda$$

4、何为零层倒易截面和晶带定理？说明同一晶带中各种晶面及其倒易矢量与晶带轴之间的关系。

零层倒易截面：由于晶体的倒易点阵是三位点阵，如果电子束沿晶带轴 $[uvw]$ 的反向入射时，通过原点 O^* 的倒易平面只有一个，我们把这个二维平面叫做零层倒易面。

晶带定理：因为零层倒易面上的各倒易矢量都和晶带轴 $r = [uvw]$ 垂直，故有

$$\vec{g}_{hkl} \cdot \vec{r} = 0, \text{ 即 } hu + kv + lw = 0. \text{ 这就是晶带定理。}$$

关系：同一晶带中各个晶面与晶带轴平行，其倒易矢量与晶带轴垂直。

5、为何对称入射（ $B//[uvw]$ ）时，即只有倒易点阵原点在爱瓦尔德球球面上，也能得到除中心斑点以外的一系列衍射斑点？

由于实际的样品晶体都有确定的形状和有限的尺寸，因而它们的倒易阵点不是一个几何意义上的点，而是沿着晶体尺寸较小的方向发生扩展，扩展量为该方向上实际尺寸倒数的 2 倍。

6、说明多晶、单晶及非晶衍射花样的特征及形成原理。

多晶衍射花样：多晶体的电子衍射花样是一系列不同半径的同心圆环。

多晶取向完全混乱，可看作是一个单晶体围绕一点在三维空间内旋转，故其倒易点是以倒易原点为圆心， (hkl) 晶面间距的倒数为半径的倒易球，与反射球相截为一个圆。所有能产生衍射的半点都扩展为一个圆环，故为一系列同心圆环。

单晶衍射花样：单晶体的电子衍射花样由排列的十分整齐的许多斑点组成。

倒易原点附近的球面可近似看作是一个平面，故与反射球相截的是而为倒易平面，在这平面上的倒易点阵都坐落在反射球面上，相应的晶面都满足 Bragg 方程，因此，单电子的衍射谱是而为倒易点阵的投影，也就是某一特征平行四边形平移的花样。

非晶衍射花样：非晶态物质的电子衍射花样只有一个漫散的中心斑点。非晶没有整齐的晶格结构

形成原理：其形成原理与 X 射线相似，是以满足（或基本满足）布拉格方程作为产生衍射的必要条件，同时要满足结构因子不等于 0。

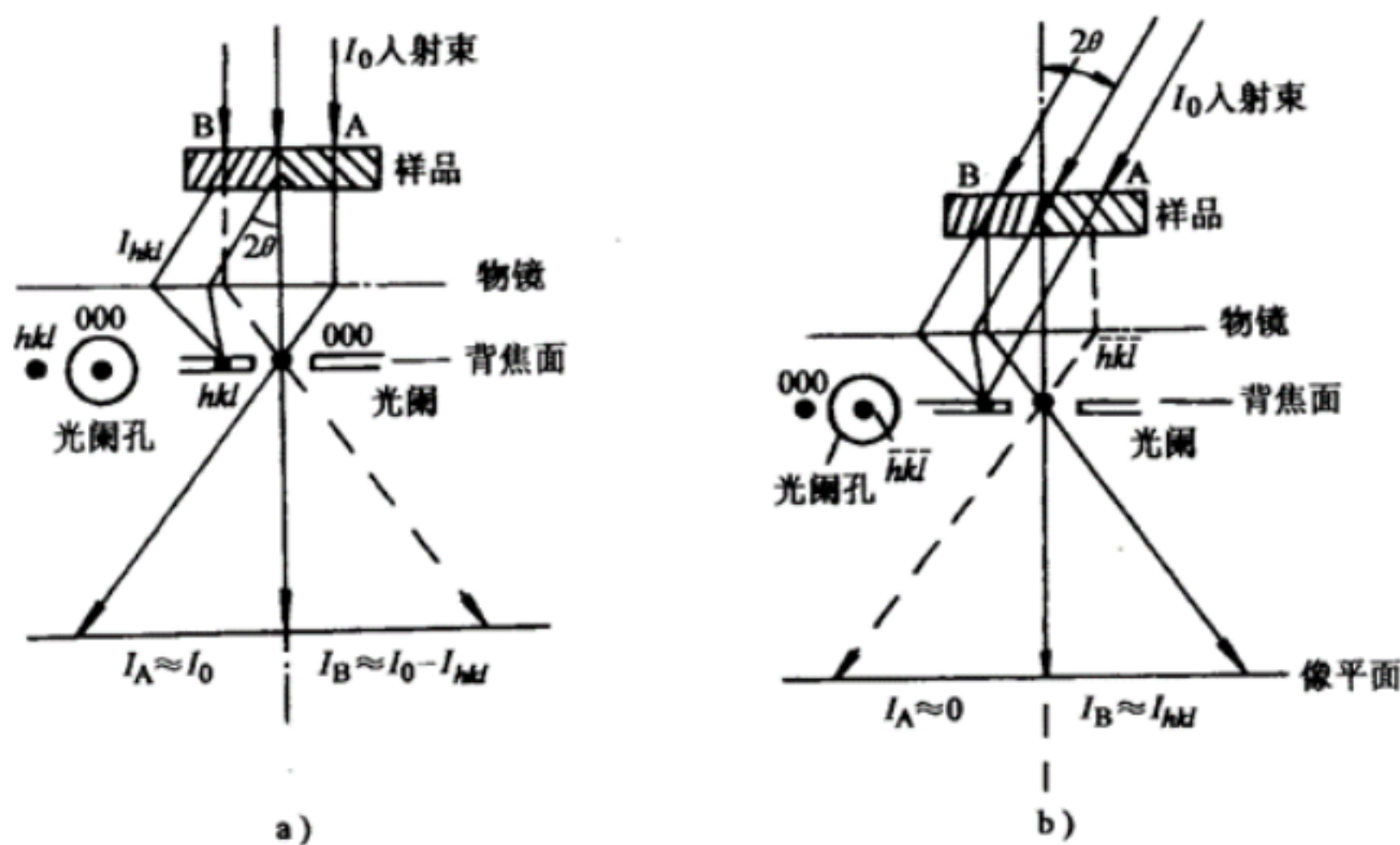
7、什么是衍射衬度？它与质厚衬度有什么区别？

衍射衬度：由于样品中不同位向的晶体的衍射条件（位向）不同而造成的衬度差别叫衍射衬度。

区别：质厚衬度是非晶态复型样品的成像原理，而衍射衬度是晶体薄膜样品的成像原理。质厚衬度是由于样品不同微区间存在的原子序数或厚度的差异而形成的，而衍射衬度利用的是样品中晶体位向的不同而造成衬度差别而形成的。

8、画图说明衍射成像原理，并说明什么是明场像，暗明场像和中心暗场像。

答：



衍射成像原理

a) 明场像 b) 中心暗场衍射成像

明场像：如图 a) 所示，让透射束通过物镜光阑而把衍射束挡掉得到图像衬度的方法，叫做明场（BF）成像，所得到的像叫做明场像。

暗场像：如果把 a) 中物镜光阑位置移动一下，使其光阑孔套住 hkl 斑点，而把透射束挡掉，可以得到暗场（DF）像。

中心暗场像：习惯上常以另一种方式产生暗场像，即把入射电子束方向倾斜 2θ 角度，使 B 晶粒的 \overline{hkl} 晶面组处于强烈衍射的位向，而物镜光阑仍在光轴位置。

此时只有 B 晶粒的 \overline{hkl} 衍射束正好通过光阑孔，而透射束被挡掉，如图 b) 所示，这叫做中心暗场像。

第五章

1. 电子束入射固体样品表明会激发哪些信号？它们有哪些特点和用途？

二次电子：二次电子能量较低，在电场作用下可呈曲线运动翻越障碍进入检测器，因而能使样品表面凹凸的各个部分都能清晰成像。二次电子强度与试样表面的几何形状、物理和化学性质有关。1) 对样品表面形貌敏感 2) 空间分辨率高 3) 信号收集效率高，是扫描电镜成像的主要手段。

背散射电子（BE）：通常背散射电子的能量较高，基本上不受电场的作用而呈直线进入检测器。背散射电子的强度与试样表面形貌和组成元素有关。对样品物质的原子序数敏感

分辨率和信号收集效率较低。

吸收电子（AE）：吸收电子与入射电子强度之比和试样的原子序数、入射电子的入

射角、试样的表面结构有关。利用测量吸收电子产生的电流，既可以成像，又可以获得不同元素的定性分布情况，它被广泛用于扫描电镜和电子探针中。 1)随着原子序数的增大，背散射电子增多，吸收电子较少； 2)吸收电流图像的衬度正好与背散射电子图像相反。

特征 X 射线：以辐射形式放出，产生特征 X 射线。各元素都有自己的特征 X 射线，可以用来进行微区成分分析和晶体结构研究。

俄歇电子 (AUE)：每一种元素都有自己的特征俄歇能谱。 1)适合分析轻元素及超轻元素 2)适合表面薄层分析 (<1nm)(如渗氮问题)

透射电子 (TE)：如果试样只有 10~20nm 的厚度，则透射电子主要由弹性散射电子组成，成像清晰。如果试样较厚，则透射电子有相当部分是非弹性散射电子，能量低于 E_0 ，且是变量，经过磁透镜后，由于色差，影响了成像清晰度。 1)质厚衬度效应 2)衍射效应 3)衍衬效应

感应电导：在电子束作用下，由于试样中电子电离和电荷积累，试样的局部电导率发生变化。(电子感生电导)用于研究半导体。

荧光：(阴极发光)各种元素具有各自特征颜色的荧光，因此可做光谱分析。大多数阴极材料对杂质十分敏感，因此可以用来检测杂质。

各种物理信号产生的深度和广度：

俄歇电子 <1nm；二次电子 <10nm；

背散射电子 >10nm；X 射线 1 μ m

2. 扫描电镜的分辨率受哪些因素影响？用不同的信号成像时，其分辨率有何不同？所谓扫描电镜的分辨率是指用何种信号成像时的分辨率？

在其他条件相同的情况下（如信噪比、磁场条件及机械振动等）电子束的束斑大小、检测信号的类型以及检测部位的原子序数是影响扫描电子显微镜分辨率的三大因素。

成像分辨率 (nm)：二次电子 5-10，背散射电子 50-200，吸收电子 100-1000 特征 X 射线 100-1000，俄歇电子 5-10

所谓扫描电镜的分辨率是指二次电子像的分辨率。

3.扫描电镜的成像原理与透射电镜有何不同？

它不用电磁透镜放大成像，而是用类似电视显影显像的方式，利用细聚焦电子束在样品表面扫描激发出来的各种物理信号来调制成像的。

4. 二次电子和背散射电子像在显示表面形貌衬度时有何相同与不同之处？

相同：都可以利用收集到的信号进行形貌分析

不同：二次电子像主要反映试样表面的形貌特征。像的衬度是形貌衬度，主要决定于试样表面相对于入射电子束的倾角。试样表面光滑平整（无形貌特征），倾斜放置时的二次电子发射电流比水平放置时大，一般选在 45 度左右。用二次电子信号作形貌分析时，可以在检测器收集栅上加一正电压（一般为 250-500V），来吸引能量较低的二次电子，使它们以弧形路线进入检测器，这样在样品表面某些背向检测器或凹坑等部位上逸出的二次电子也能对成像有所贡献，图像层次增加，细节清楚。

用背散射电子信号进行形貌分析时，其分辨率要比二次电子低，因为背散射电子是在一个较大的作用体积内被入射电子激发出来的，成像单元变大是分辨率降低的原因。

背散射电子的能量很高，它们以直线轨迹逸出样品表面，对于背向检测器的样品表面，因检测器无法收集到背散射电子而变成一片阴影，因此在图像上显示出很强的衬度，以至失去细节的层次，不利于分析。

5. 当电子束入射重元素和轻元素时，其作用体积有何不同？各自产生的信号的分辨率有何特点？

电子束入射轻元素作用体积呈水滴状，电子束入射重元素样品时，作用体积不呈水滴状，而是半球状，电子束进入表面后立即横向扩展，分辨率不高。

第六章

1. 电子探针仪与扫描电镜有何异同？电子探针仪如何与扫描电镜和透射电镜配合进行组织结构和微区化学成分的同位分析？

电子探针的镜筒及样品室和扫描电镜没有本质上的差别，但在检测器部分使用的额是 X 射线谱仪，专门用来测定特征波长（WDS）或特征能量（EDS），以此来对微区化学成分进行分析。

电子探针一般作为附件安装在扫描电镜或透射电镜上，满足微区组织形貌、晶体结构及化学成分三位一体分析的需要。

2. 简述能谱仪、波谱仪在分析工作中的优缺点

能谱仪与波谱仪比较

优点：

探测效率高。能谱仪的灵敏度比波谱仪高一个数量级。

能谱仪可同时对分析点所有元素进行测定。波谱仪只能逐个测量每种元素的特征波长。

能谱仪的结构比波谱仪简单。

能谱仪不必聚焦。因此对样品表面没有特殊要求，适合于粗糙表面的分析工作。

缺点：

分辨率比波谱仪低。

能谱仪只能分析原子序数大于 11 的元素，而波谱仪可测定原子序数 4-92 之间的所有元素。

能谱仪的 Si(Li) 探头必须用液氮冷却。