

第十二章 电子衍射

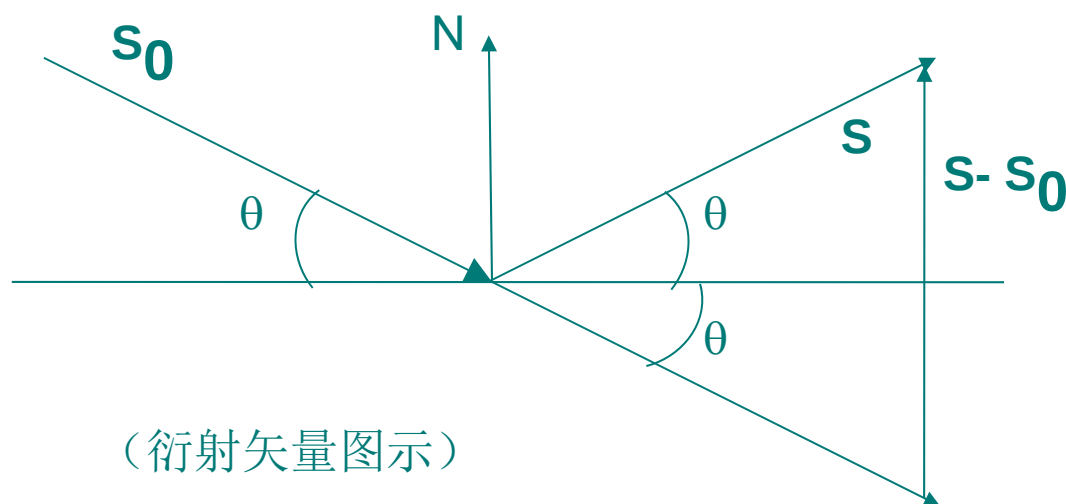
- 概述
- 倒易点阵与厄瓦尔德球图解法
- 电子衍射原理
- 电子显微镜中的电子衍射
- 单晶电子衍射花样标定
- 复杂电子衍射花样

12.1 倒易点阵知识回顾

当束X射线被晶面P反射时，假定N为晶面P的法线方向，入射线方向用单位矢量 $\vec{S}_0$ 表示，衍射线方向用单位矢量 $\vec{S}$ 表示，则 $\vec{S}-\vec{S}_0$ 为衍射矢量。

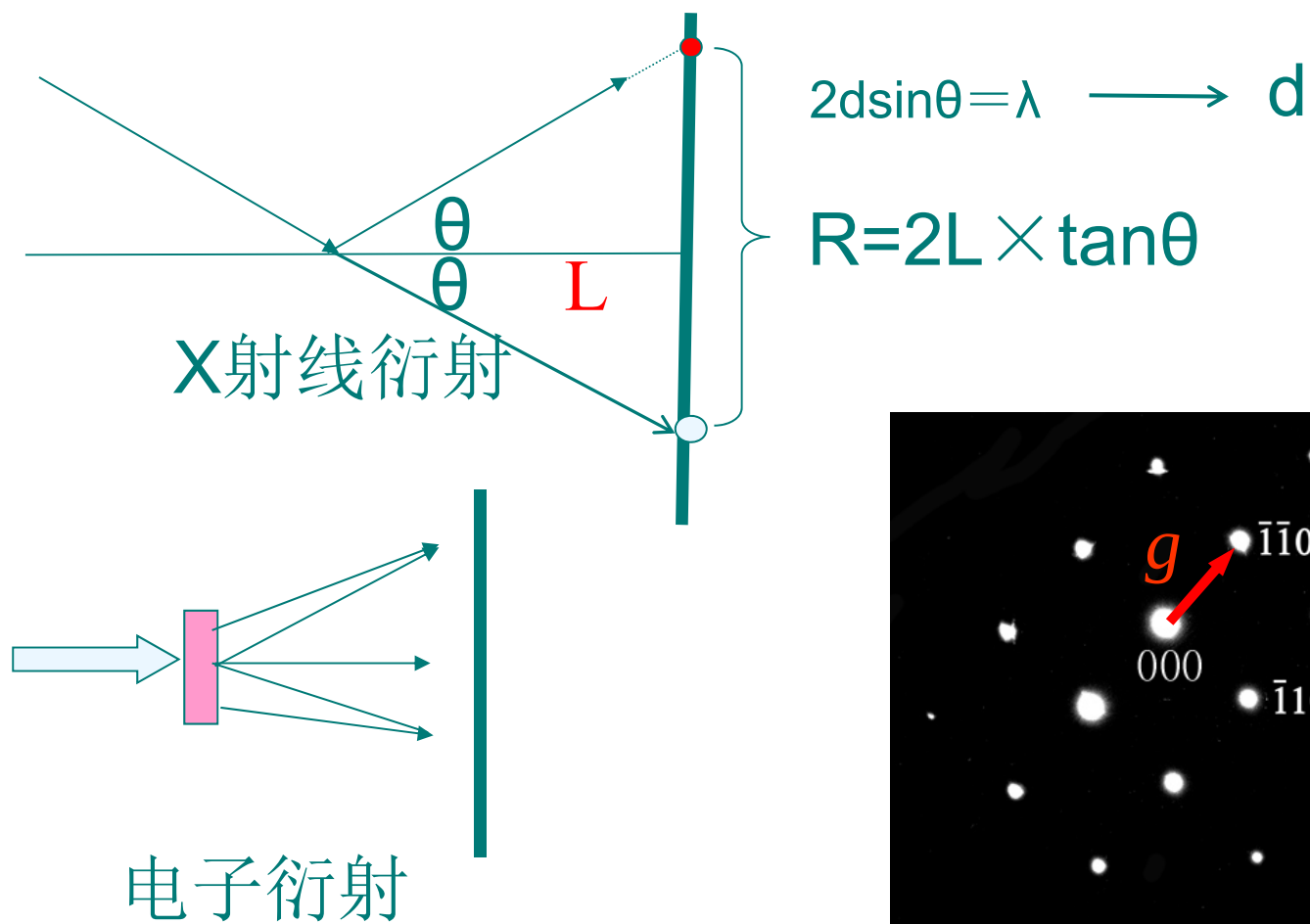
$$|\vec{S} - \vec{S}_0| = 2 \sin \theta = \frac{\lambda}{d_{HKL}}$$

$$\frac{\vec{S}}{\lambda} - \frac{\vec{S}_0}{\lambda} = \vec{R}_{HKL}^* = H \vec{a}^* + K \vec{b}^* + L \vec{c}^*$$



倒易点阵的来源

12.1 倒易点阵知识回顾



(一)、倒易点阵的定义

1、定义：对于一个由 $[\vec{a} \ \vec{b} \ \vec{c}]$ 定义的正点阵，都有一个对应的倒易点阵，其基轴满足

$$\begin{bmatrix} \vec{a} \\ \vec{b} \\ \vec{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{a}^* & \vec{b}^* & \vec{c}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

构成倒易点阵，

$$\vec{r}_{hkl}^* = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$$

我们规定倒易格子的每个一结点代表正空间的一组相互平行的等间距的晶面，且使该倒易矢量（倒易空间的原点到结点的矢量）垂直于正空间的晶面，矢量的模为正空间面网的面间距

倒易矢量的性质

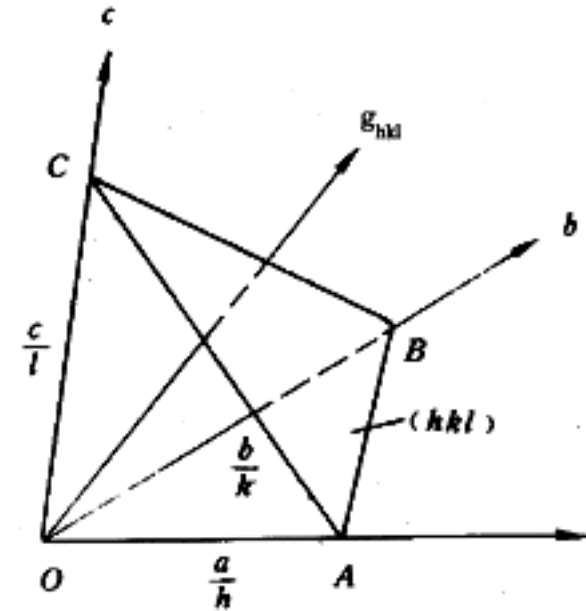
(1) $\mathbf{a}^* \cdot \mathbf{b} = \mathbf{a}^* \cdot \mathbf{c} = \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{a} = \mathbf{b}^* \cdot \mathbf{c} = \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{a} = \mathbf{c}^* \cdot \mathbf{b} = 0$

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

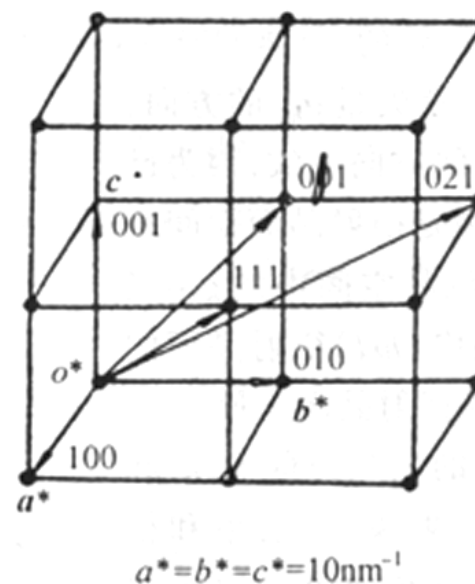
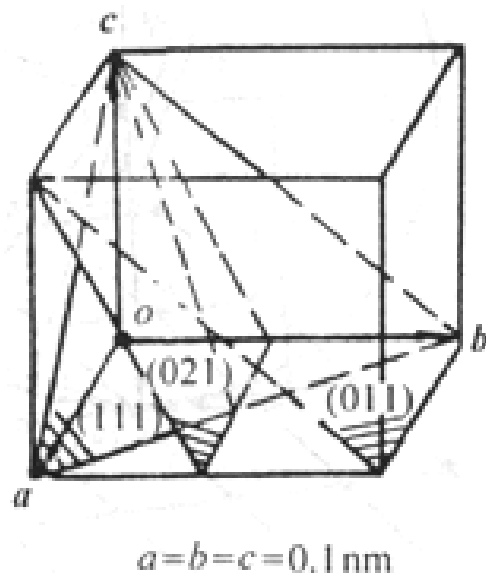
(2) 从倒易点阵原点向任一倒易阵点所连接的矢量叫倒易矢量，表示为：

$$\mathbf{g}_{hkl}^* = h\mathbf{a}^* + k\mathbf{b}^* + l\mathbf{c}^*$$

(3) 倒易矢量 $\mathbf{g}_{hkl}^*$ 垂直于正点阵中相应的 (hkl) 晶面，或平行于它的法向 N_{hkl} 。



(4) 倒易点阵中的一个点代表的是正点阵中的一组晶面。



正点阵和倒易点阵的几何关系

(5) 倒易矢量的长度等于正点阵中相应晶面间距的倒数，即：

$$g_{hkl} = 1/d_{hkl}$$

(6) 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。这时倒易矢量 $\mathbf{g}_{hkl}^*$ 与相应指数的晶向 $[hkl]$ 平行。

(7) 对斜方（正交）点阵，有 $\mathbf{a}^*//\mathbf{a}$ ， $\mathbf{b}^*//\mathbf{b}$ ， $\mathbf{c}^*//\mathbf{c}$ ， $a^*=1/a$ ， $b^*=1/b$ ， $c^*=1/c$ 。

§ 12-2 电子衍射原理

REAL SPACE

e – beam with $\mathbf{k} = \frac{1}{\lambda}$

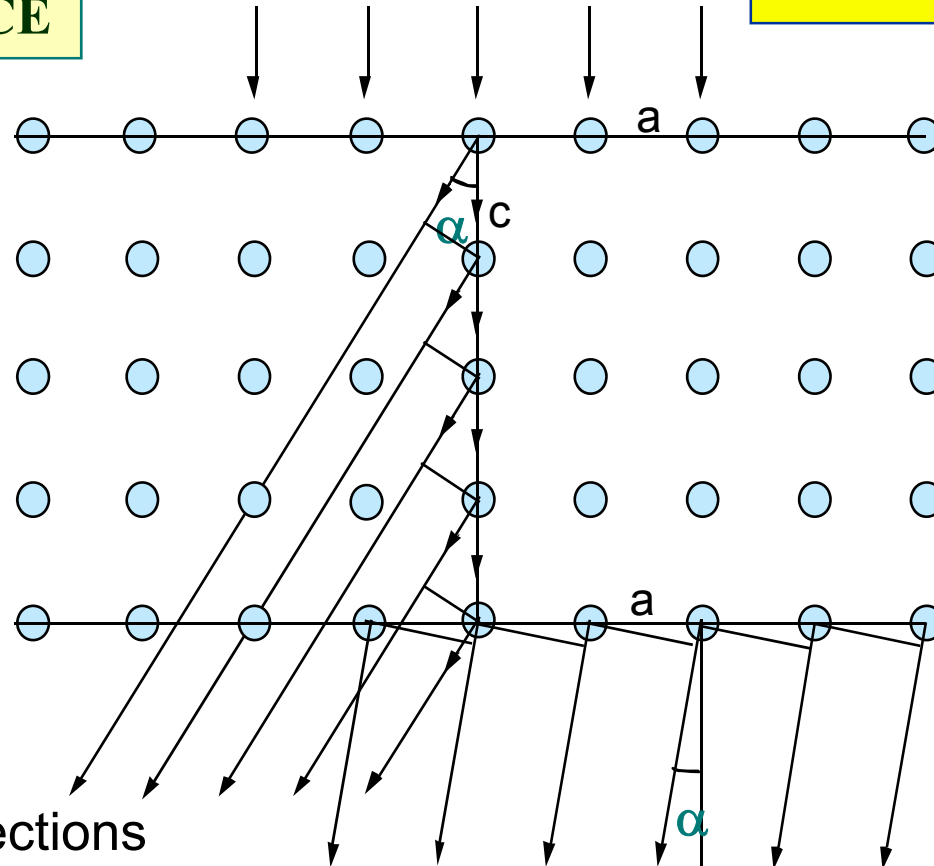
**A crystal
with a, b, c**

HOLZ reflections
(higher-order Laue zone)

if $c(1 - \cos\alpha) = n\lambda$

ZOLZ reflections
(zero-order Laue zone)

if $a \sin\alpha = n\lambda$



❖ 与X射线衍射一样，只有在满足布拉格定律的条件下，才能产生衍射。

加速电压/kV	100	120	200	300	400
电子波长/Å	0.037	0.0335	0.0251	0.0197	0.0164

∴ λ 为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ nm 数量级

$$\therefore \sin \theta = \frac{\lambda}{2d} \approx 10^{-2}$$

$$\theta \approx 10^{-2} \text{ rad} < 1^\circ$$

这表明，电子衍射的衍射角总是非常小的，也就是只有几乎与电子束平行的晶面才能产生衍射；另一方面，由于 λ 非常小，对实际衍射晶面来说产生多级衍射的机会就非常大。

$$2d' \sin \theta = n\lambda$$

电子衍射与X射线衍射相比的优点

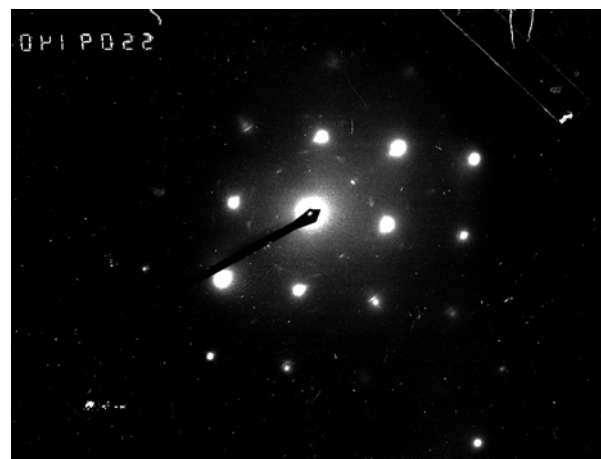
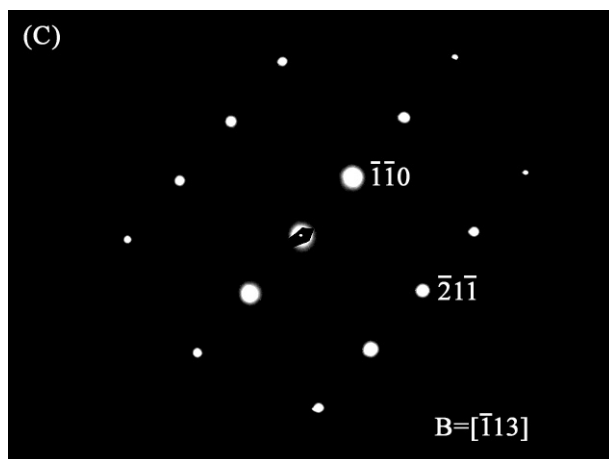
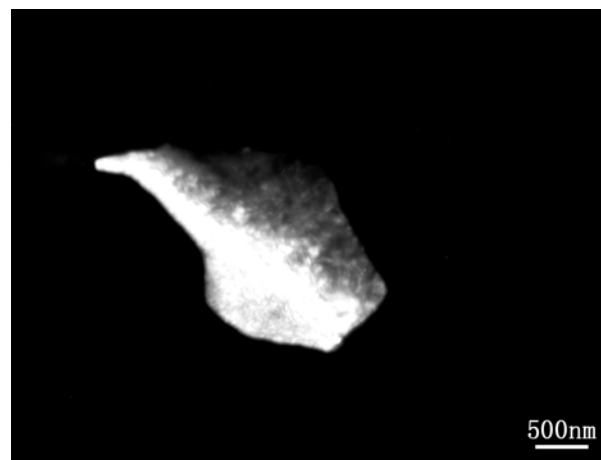
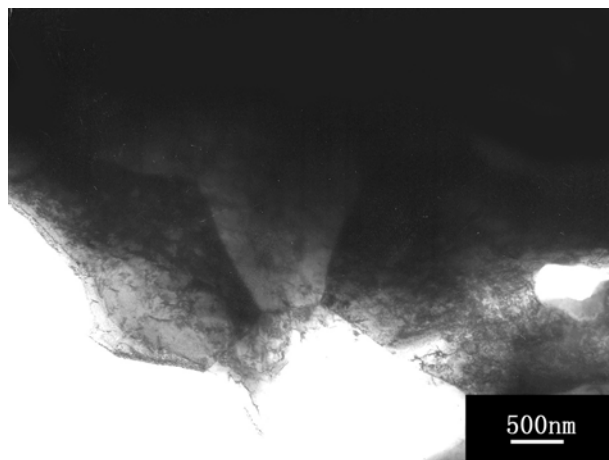
电子衍射能在同一试样上将形貌观察与结构分析结合起来。



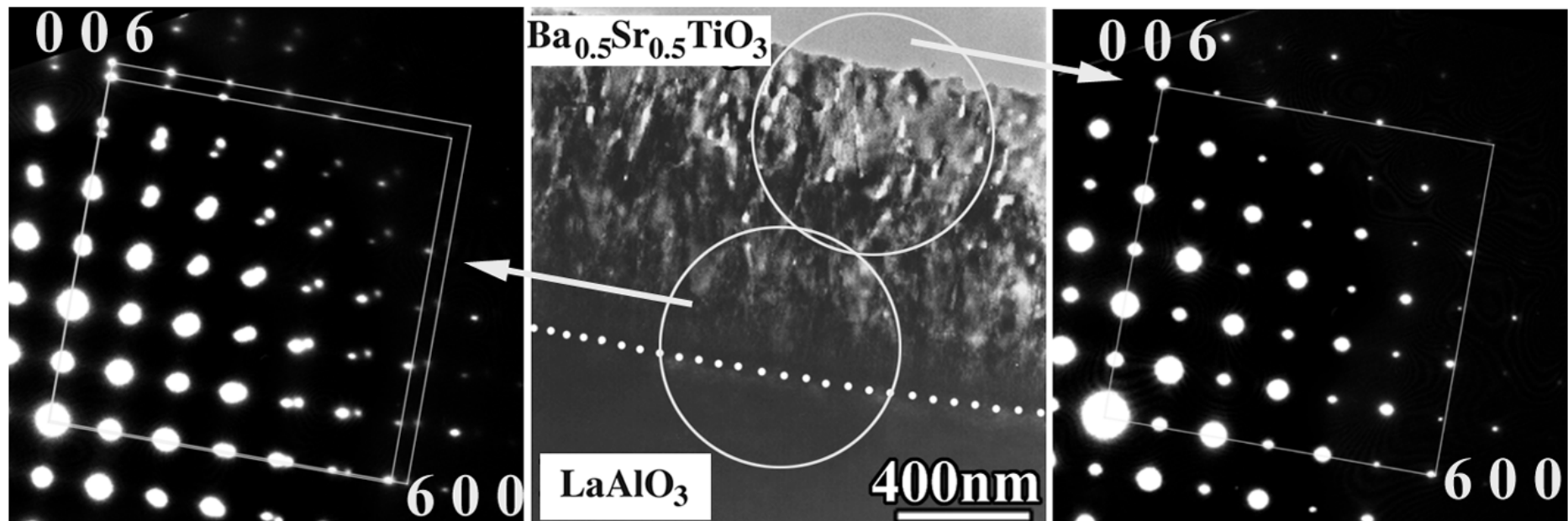
电子波长短，单晶的电子衍射花样宛如晶体的倒易点阵的一个二维截面在底片上放大投影，从底片上的电子衍射花样可以直观地辨认出一些晶体的结构和有关取向关系，使其研究晶体结构比X射线的简单。



物质对电子散射主要是核散射，因此散射强，约为X射线一万倍，曝光时间短。



Selected area electron diffraction (SAED) Patterns of a ceramic film



J. H. Chen, et al. Applied Physics Letters (2002) 87, 1291



电子衍射分析中的不足之处

- ❖ 电子衍射强度有时几乎与透射束相当，以致两者产生交互作用，使电子衍射花样，特别使强度分析变得复杂，不能象X射线那样从测量衍射强度来广泛地测定结构；
- ❖ 散射强度高导致电子透射能力有限，要求试样薄，这就使试样制备工作较X射线复杂；
- ❖ 在精度方面也远比X射线衍射低。

厄瓦尔德球图解法

以 $1/\lambda$ 为半径，正空间晶面 (hkl) 与入射束的交点 O 为圆心作一个球，这就是厄瓦尔德球（或称为反射球。若有倒易阵点 G （指数为 hkl ）正好落在厄瓦尔德球的球面上，则相应的晶面组 (hkl) 与入射束的方向满足布拉格条件，即 G 为 (hkl) 晶面在球上的衍射斑点。

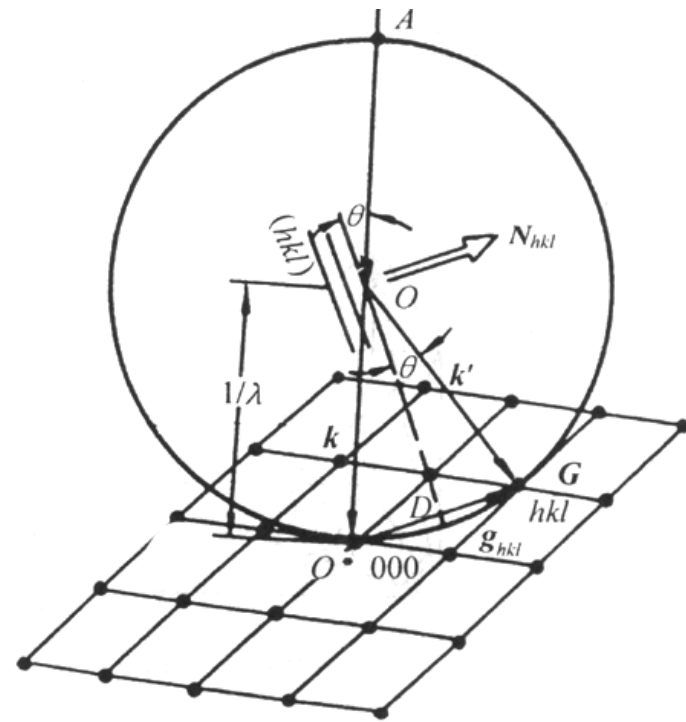


图 10-4 厄瓦尔德球作图法

证明如下：

O^* 为倒易点阵原点， $O^*G=g$

$$k = k' = \frac{1}{\lambda}, \quad k' - k = g$$

$$\overline{O^*D} = \overline{OO^*} \sin \theta$$

$$g/2 = k \sin \theta$$

又 $g = 1/d, k = \frac{1}{\lambda}$

$$\therefore 2d \sin \theta = \lambda$$

即厄瓦尔德球图解法就是布拉格定律的几何表达形式。

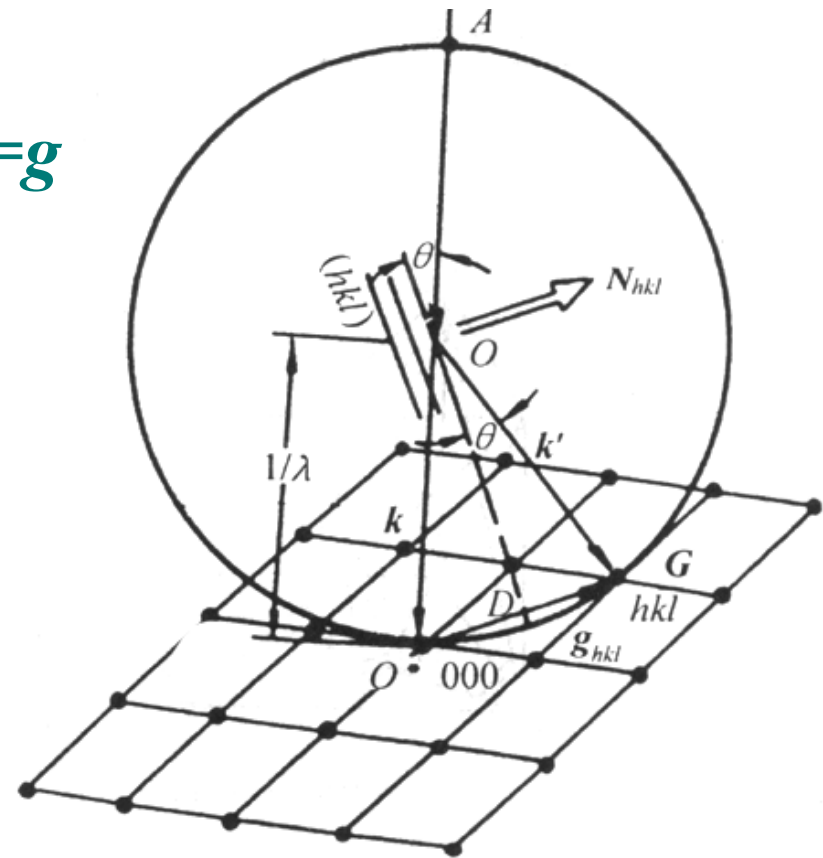


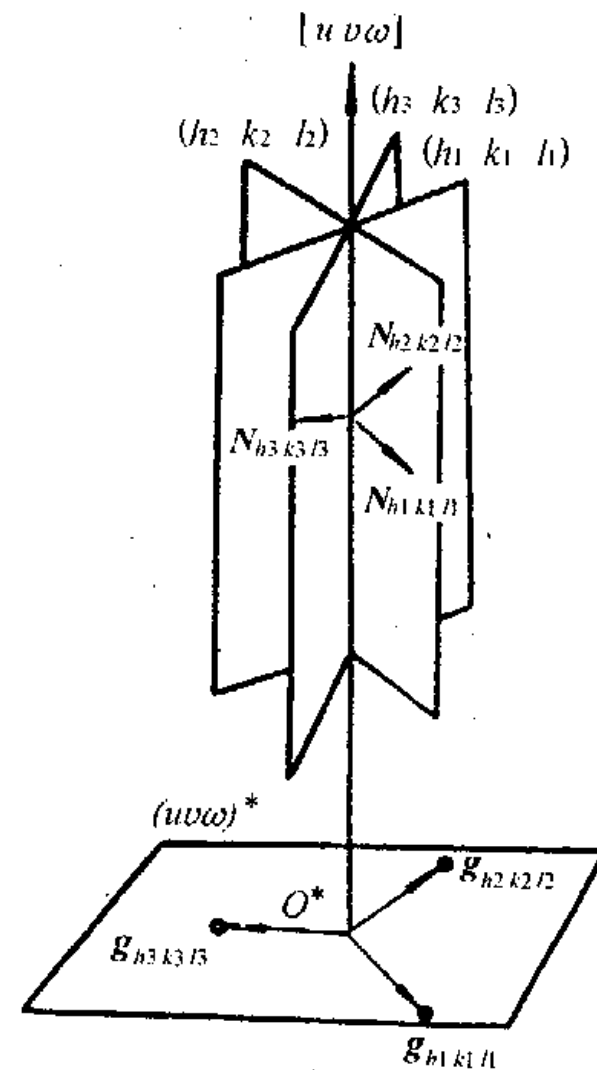
图 10-4 爱瓦尔德球作图法

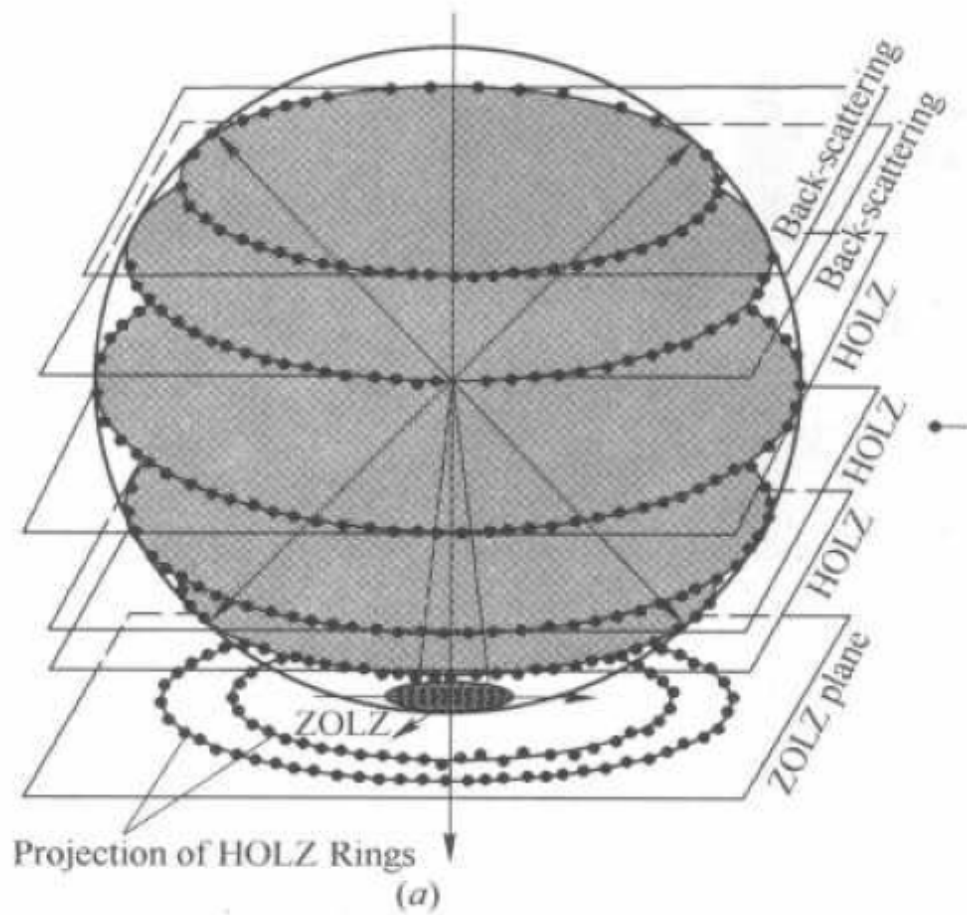
矢量 $\mathbf{g}_{hkl}$ 的方向和衍射晶面的法向一致， $\mathbf{g}_{hkl}$ 的模是衍射晶面间距的倒数，因此倒易空间的 $\mathbf{g}_{hkl}$ 矢量具有了代表正空间中(hkl)衍射晶面的特性，它又叫做衍射晶面矢量。

厄瓦尔德球内的三个矢量 $\mathbf{k}$ 、 $\mathbf{k}'$ 和 $\mathbf{g}_{hkl}$ 清楚地描绘了入射束、衍射束和衍射晶面之间的相对关系。如果能记录到倒易空间各个方向倒易矢量（点）的排列方式，就可以通过坐标变换，推测出正空间中各衍射晶面间的相对方位，从而得出正空间晶体的晶格参数，这就是电子衍射分析要解决的主要问题。

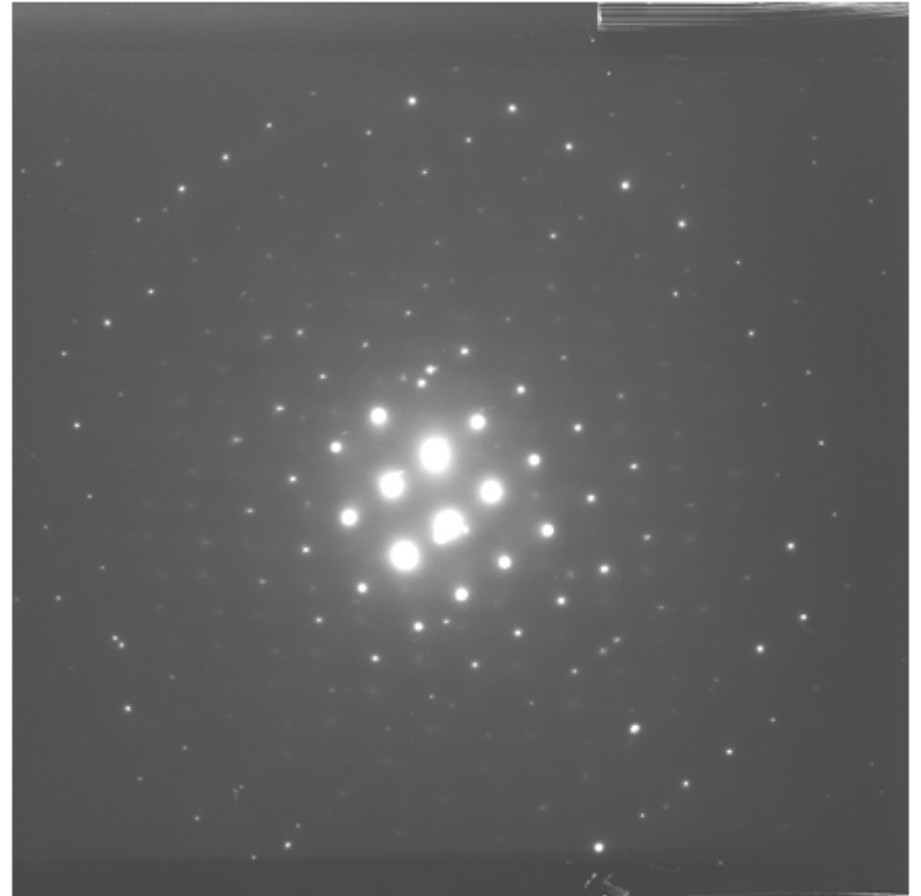
零层倒易截面

- ❖ 倒易点阵是一个三维点阵，把 $\mathbf{g}_{hkl} \cdot \mathbf{r} = 0$ 时的倒易面称为零层倒易截面。
- ❖ 当 $\mathbf{g}_{hkl} \cdot \mathbf{r} = n$ 时为 n 阶倒易面。
- ❖ 标准电子衍射花样是标准零层倒易截面的比例图像，倒易阵点的指数就是衍射斑点的指数（即正空间晶面指数）。通过电子衍射花样上任意两个 $\mathbf{g}_{hkl}$ 矢量指数就可求出晶带指数（根据晶带定律）。





高阶倒易截面与厄瓦尔德球



电子衍射花样

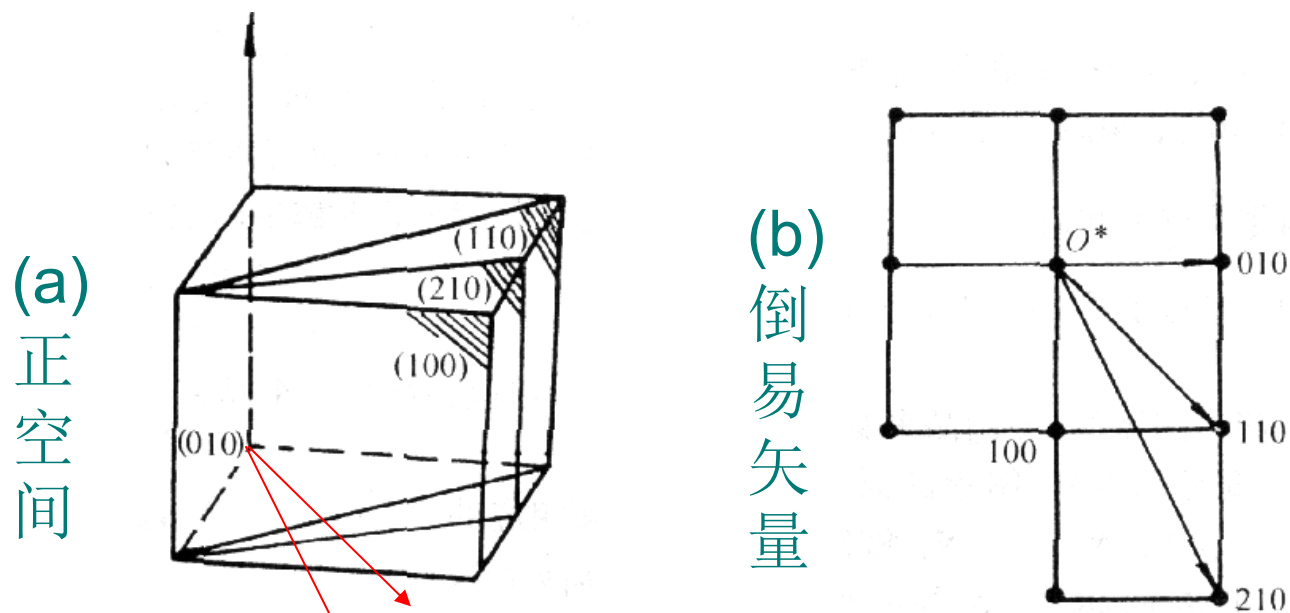


图10-6 立方晶体[001]晶带的倒易平面

对 $\mathbf{B}=[uvw]$ 的零层倒易截面内各倒易阵点的指数受到两个条件的制约：

(1) 各倒易阵点和晶带轴指数间必须满足晶带定律，

即： $hu + kv + lw = 0$

(2) 只有不产生消光的晶面指数，即其结构因子不为0。

结构因子——倒易点阵的权重

- ❖ 从X射线衍射已经知道，衍射束强度：

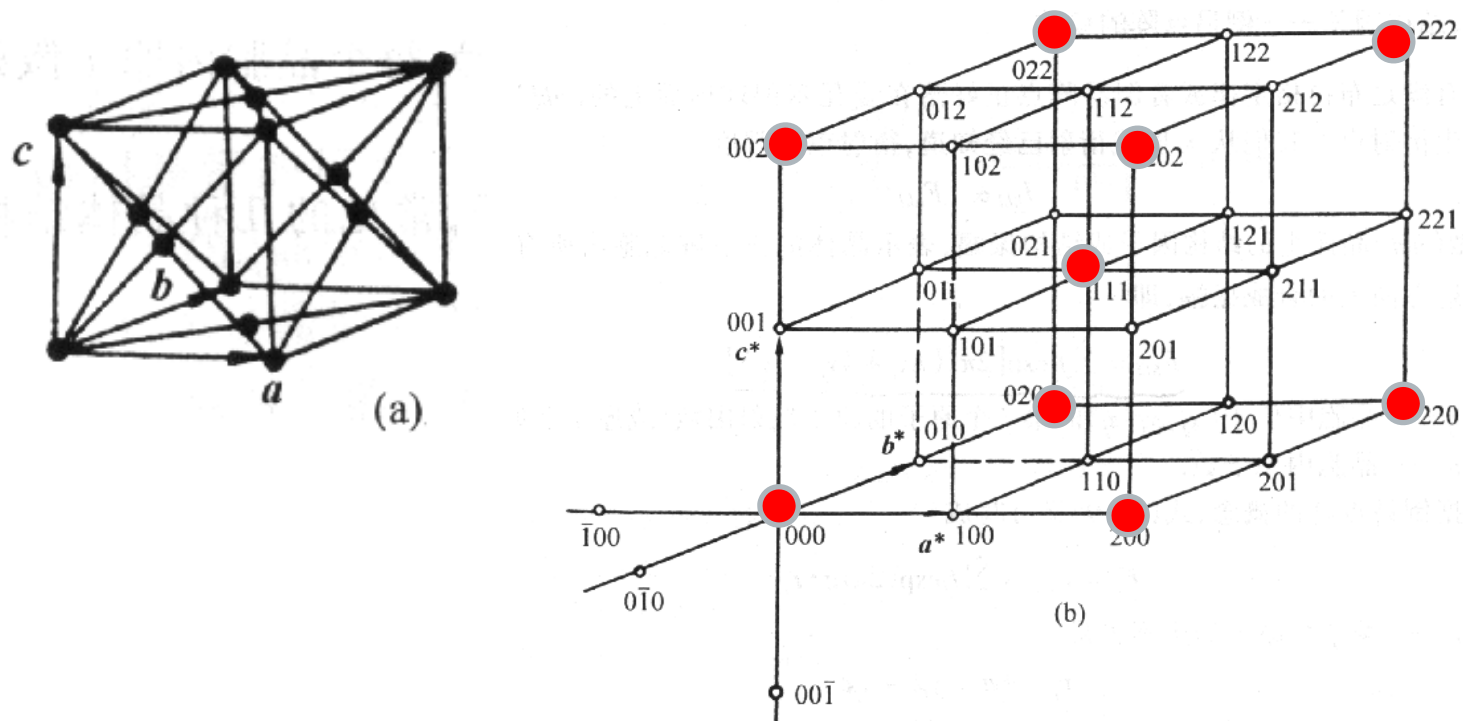
$$I_{\text{相对}} = P|F|^2 \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} A(\theta) e^{-2M}$$

- ❖ 对单晶电子衍射来说，每一个倒易斑点对应特定定向的一组晶面的衍射，因此衍射强度不包含多重因子，其它影响多晶粉末X射线衍射强度的因子在单晶电子衍射花样中也很小，因此，主要考虑结构因子对强度的影响。

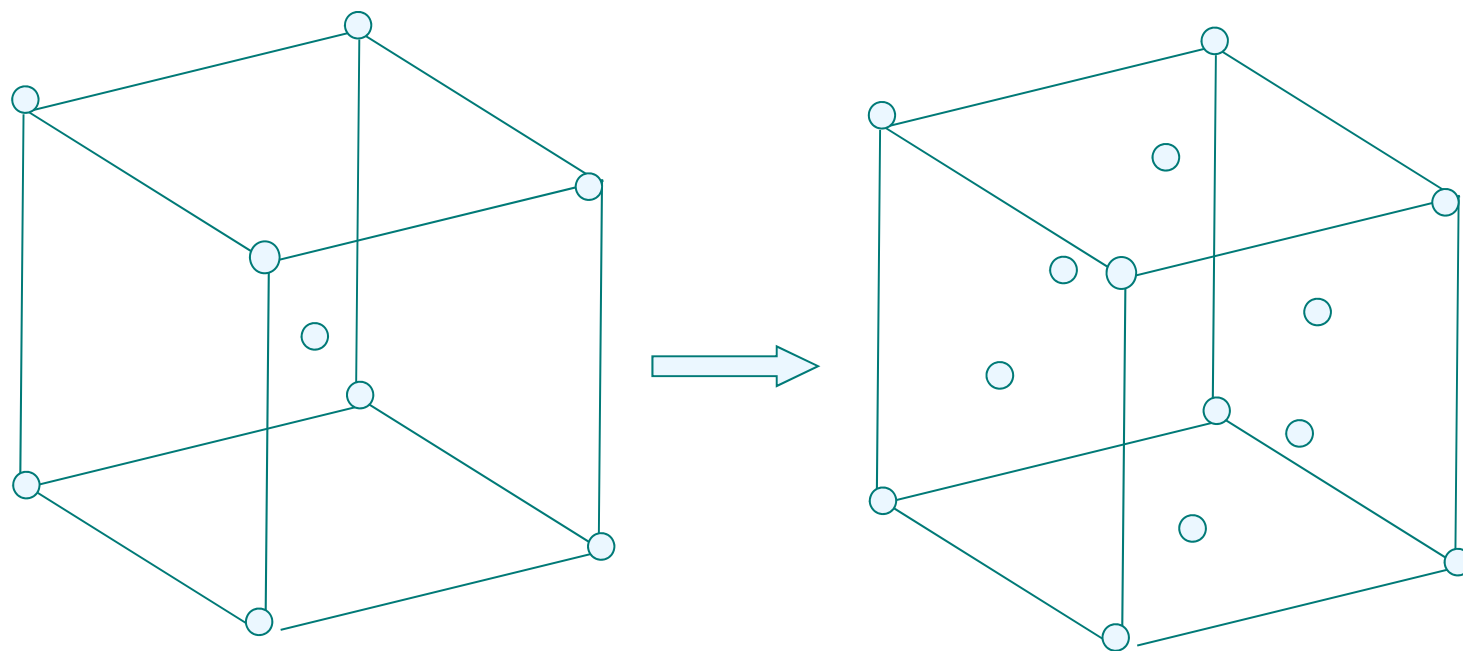
$$I_{hkl} \propto |F_{hkl}|^2$$

❖ 当 $F_{hkl}=0$ 时， $I=0$ ，这叫结构消光。

点阵结构	简单	底心	体心	面心	密排六方
结构因子 F^2_{hkl}	f^2	$h+k=$ 偶数 $4f^2$	$h+k+l=$ 偶数 $4f^2$	h,k,l 为同性数 时 $16f^2$	$h+2k=3n$ n (为整数) $l=$ 奇数时， 0
					$h+2k=3n$ $l=$ 偶数时， $4f^2$
		$h+k=$ 奇数 0	$h+k+l=$ 奇数 0	h,k,l 为异性数 时 0	$h+2k=3n+1$ $l=$ 奇数时， $3f^2$
					$h+2k=3n+1$ $l=$ 偶数时， f^2

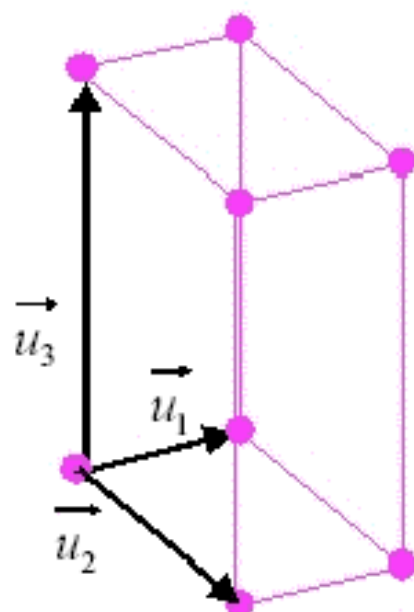


❖ 图10-8 面心立方点阵晶胞(a)及其倒易点阵(b)

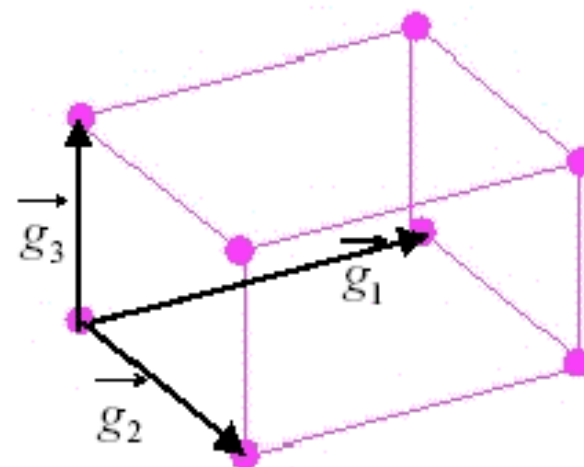


体心立方点阵晶胞及其倒易点阵

Examples of 3-D reciprocal lattices



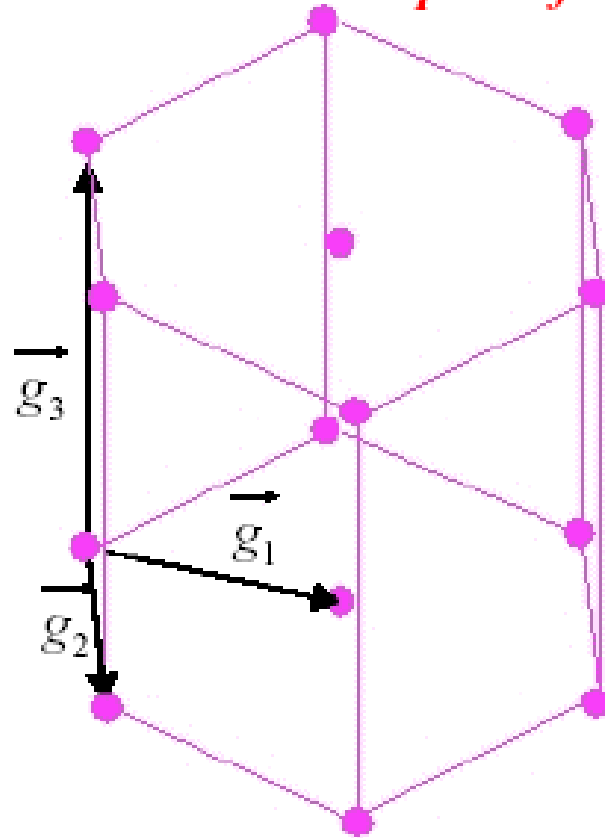
Simple Orthorhombic Bravais Lattice
with $u_1 > u_2 > u_3$



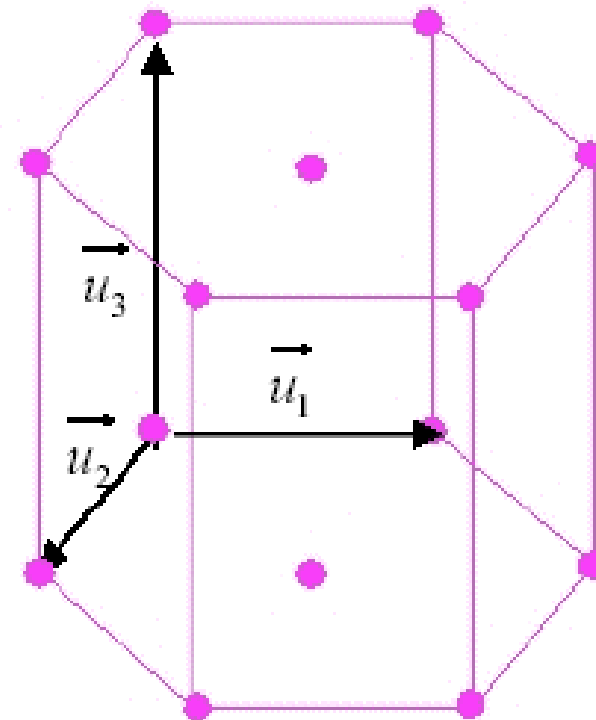
Reciprocal Lattice
Note: $g_1 < g_2 < g_3$

- Long lengths in real space imply short lengths in reciprocal space and vice versa

Examples of 3-D reciprocal lattices



Reciprocal Lattice



Hexagonal Bravais Lattice

- **Reciprocal lattice is also hexagonal, but rotated**

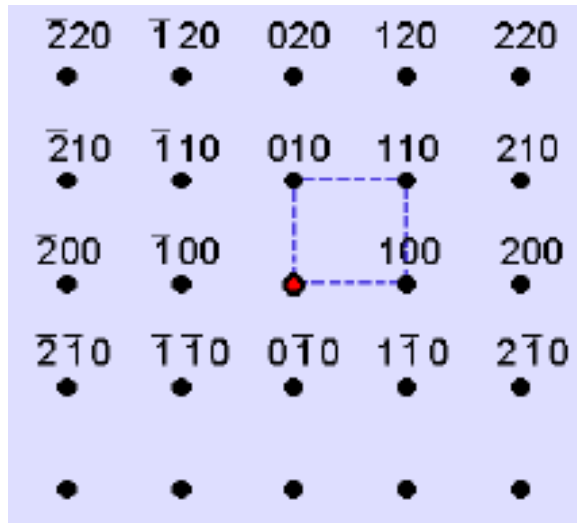
几种非初级点阵的倒易点阵

正空间点阵	底心 (C)	面心 (F)	体心 (I)	菱面体 (R) 六角 (H)
倒易点阵	底心 (C)	体心 (I)	面心 (F)	菱面体 (R) 六角 (H)

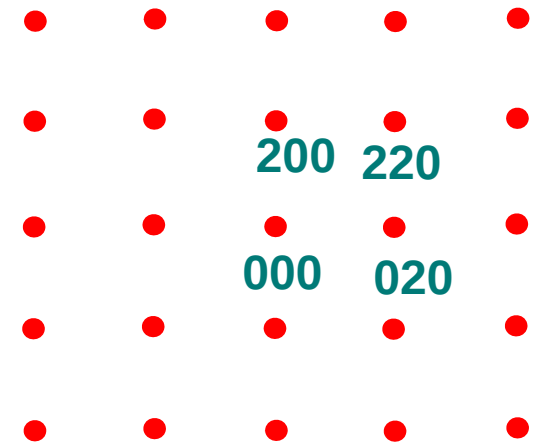
注意：

- ❖ 对立方晶体（指简单立方、体心立方、面心立方、金刚石立方）而言，晶带轴相同时，标准电子衍射花样有某些相似之处，但因消光条件不同，衍射晶面的指数是不一样的。

$B=[001]$ 下相同花样不同晶体的倒易矢量的指数标定

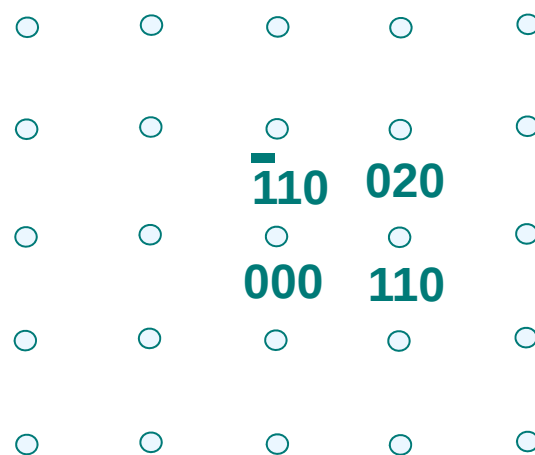


体心立方的零层倒易截面



面心立方的零层倒易截面

简单立方的零层倒易截面



偏离矢量与倒易点阵扩展

理论上获得衍射花样的条件:

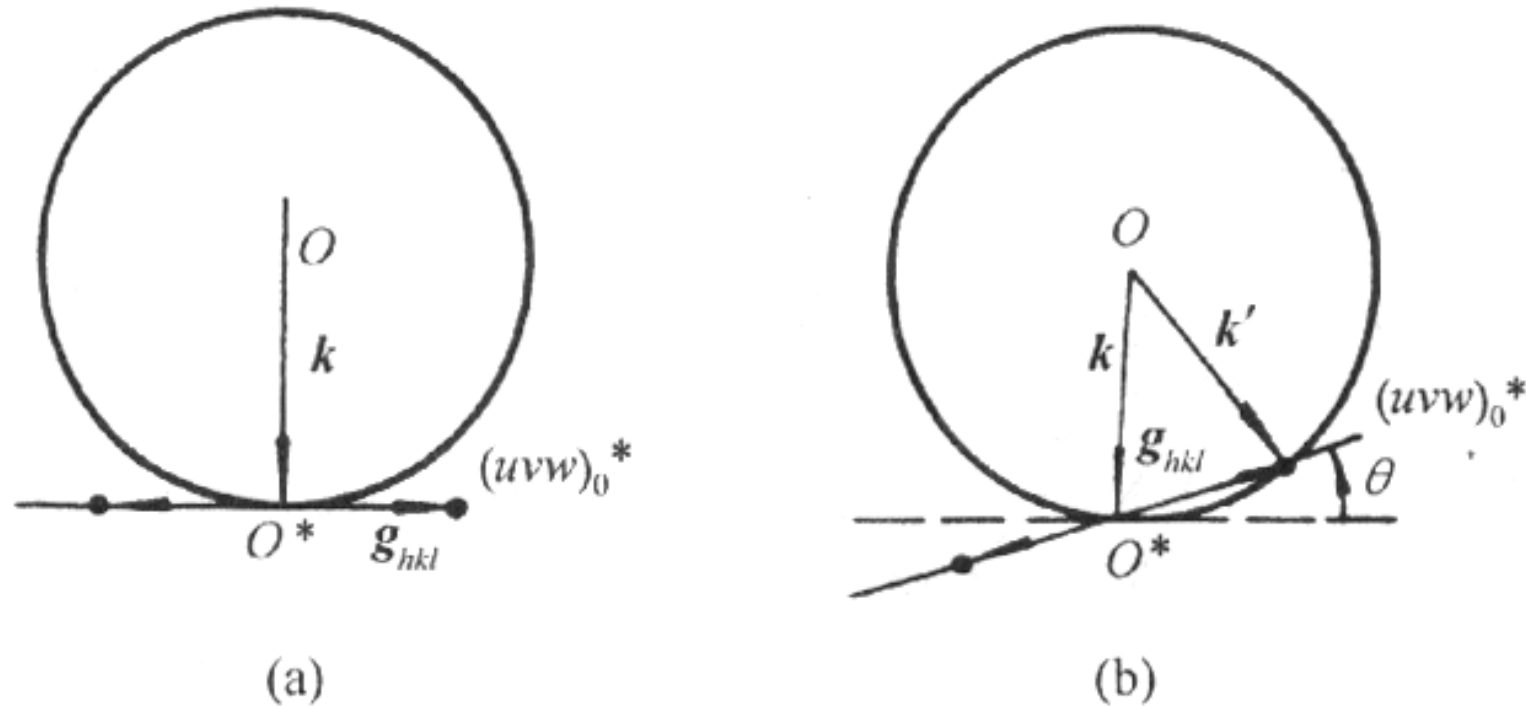


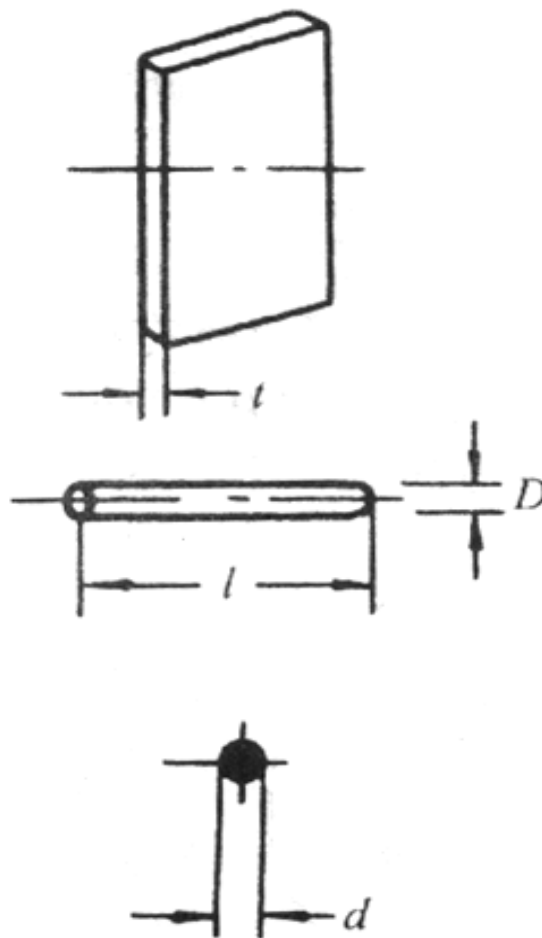
图 10-9 理论上获得零层倒易截面比例图像(衍射花样)的条件
(a)倒易点是一个几何点,入射电子束和 $(uvw)_0^*$ 垂直时不可能产生衍射束;
(b)倾斜 θ 角后, hkl 阵点落在爱瓦尔德球面上才有衍射束产生

晶体尺寸效应对衍射强度：

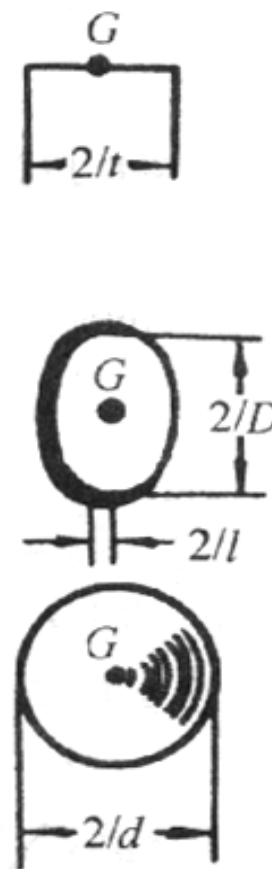
$$B = \frac{\lambda}{t \cos \theta}$$

$$\Delta\theta_a = \frac{\lambda}{2N_a \sin \theta}$$

$$\Delta\theta_b = \frac{\lambda}{2N_b \sin \theta}$$



样品晶体形状



倒易点阵

❖ 图10-10 倒易点阵因样品晶体的形状和尺寸而扩展（**G**为阵点中心）

- ❖ 由于倒易阵点具有一定形状，因此在偏离布拉格角范围 $\pm\Delta\theta_{\max}$ 内，倒易点也有可能与厄瓦尔德球面相接触而产生衍射。

如图是倒易杆与厄瓦尔德球相交的情况，当 2θ 偏离 $\Delta\theta$ 时，倒易杆中心至与厄瓦尔德球面交截点的距离可用矢量 $\mathbf{s}$ 表示， $\mathbf{s}$ 就是**偏离矢量**。

$\Delta\theta$ 为正时， $\mathbf{s}$ 矢量为正，
反之为负；

精确符合布拉格条件时，
 $\Delta\theta=0$ ， $\mathbf{s}=0$

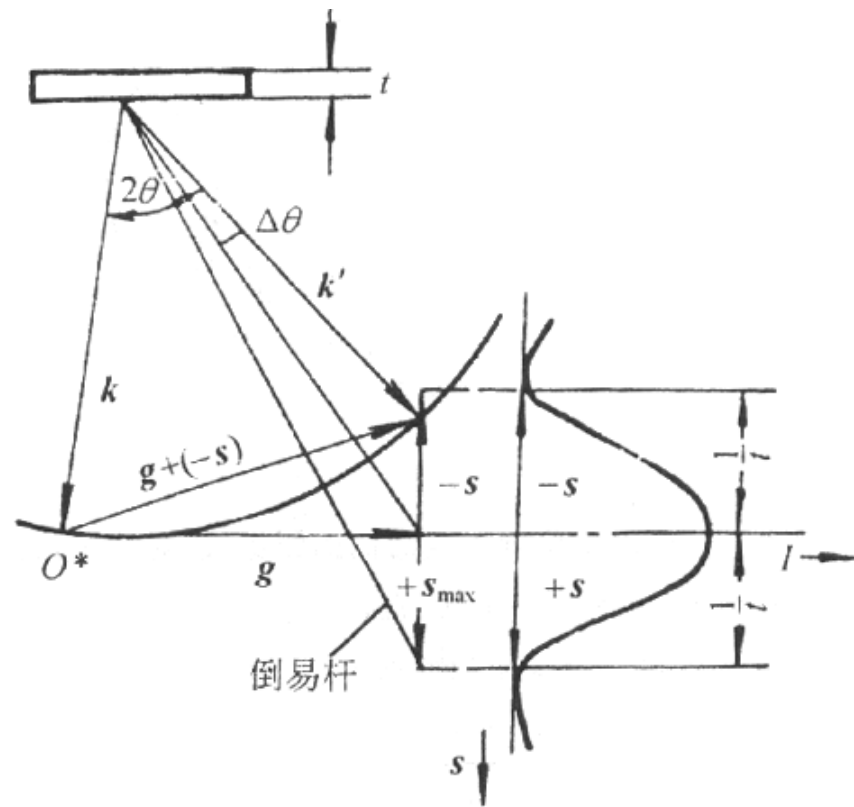


图10-11 倒易杆和它的强度分布

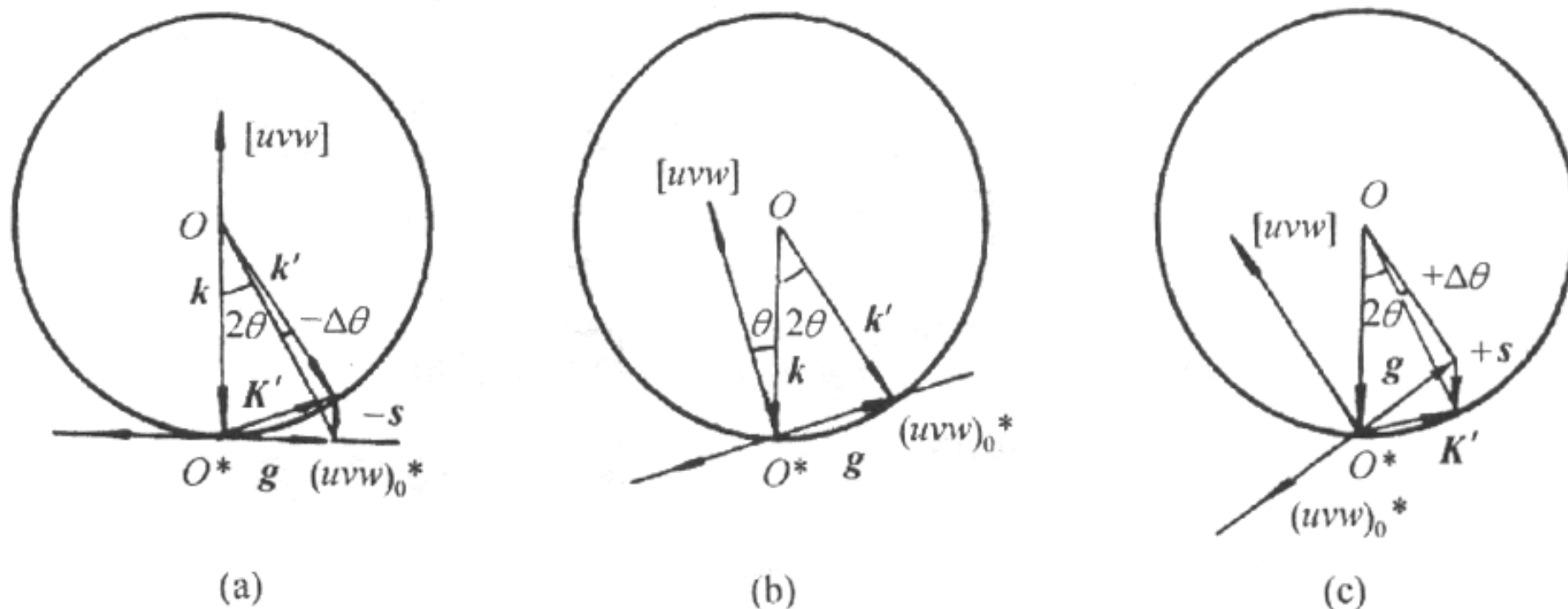


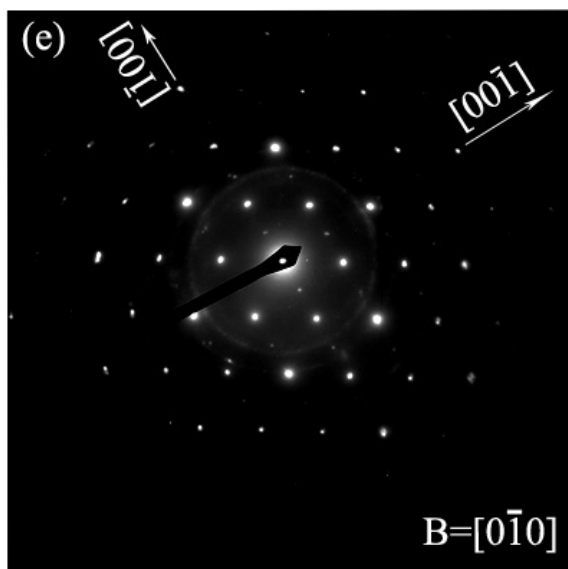
图 10-12 倒易杆和爱瓦尔德球相交时的三种典型情况

(a) 对称入射 $\Delta\theta < 0$ $s < 0$; (b) 满足布拉格衍射条件 $\Delta\theta = 0$ $s = 0$; (c) $\Delta\theta > 0$ $s > 0$

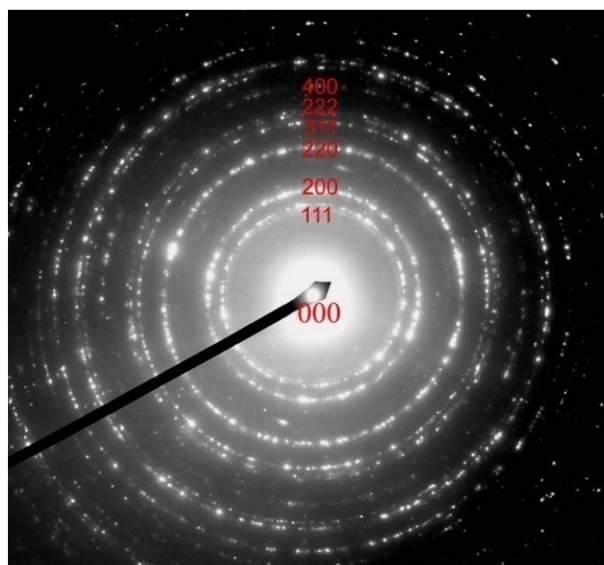
- ❖ 薄晶体电子衍射时，倒易点阵延伸成杆状是获得零层倒易截面比例图像（即电子衍射花样）的主要原因，其它原因有：电子束的波长短，使厄瓦尔德球在小角度范围内接近平面；加速电压波动，使得厄瓦尔德球面有一定厚度；电子束有一定的发散度等。

电子衍射花样特征

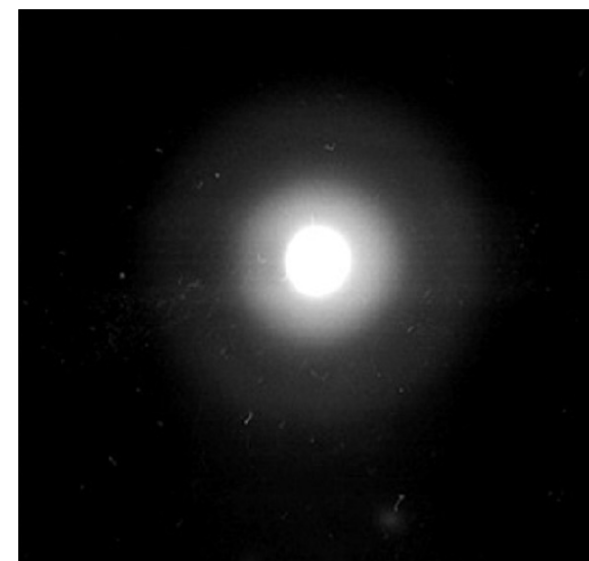
- 单晶体：一般为斑点花样；
- 多晶体：同心圆环状花样；
- 无定形试样（非晶）：弥散环。



单晶电子衍射花样



多晶电子衍射花样

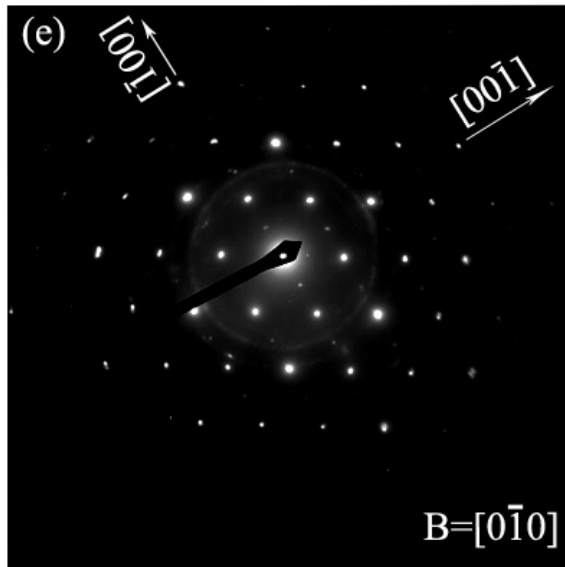


非晶电子衍射花样

本课程需要掌握的内容为：

- 单晶体： 一般为斑点花样；
- 多晶体： 同心圆环状花样；
- 无定形试样（非晶）： 弥散环。

单晶材料的电子衍射特征

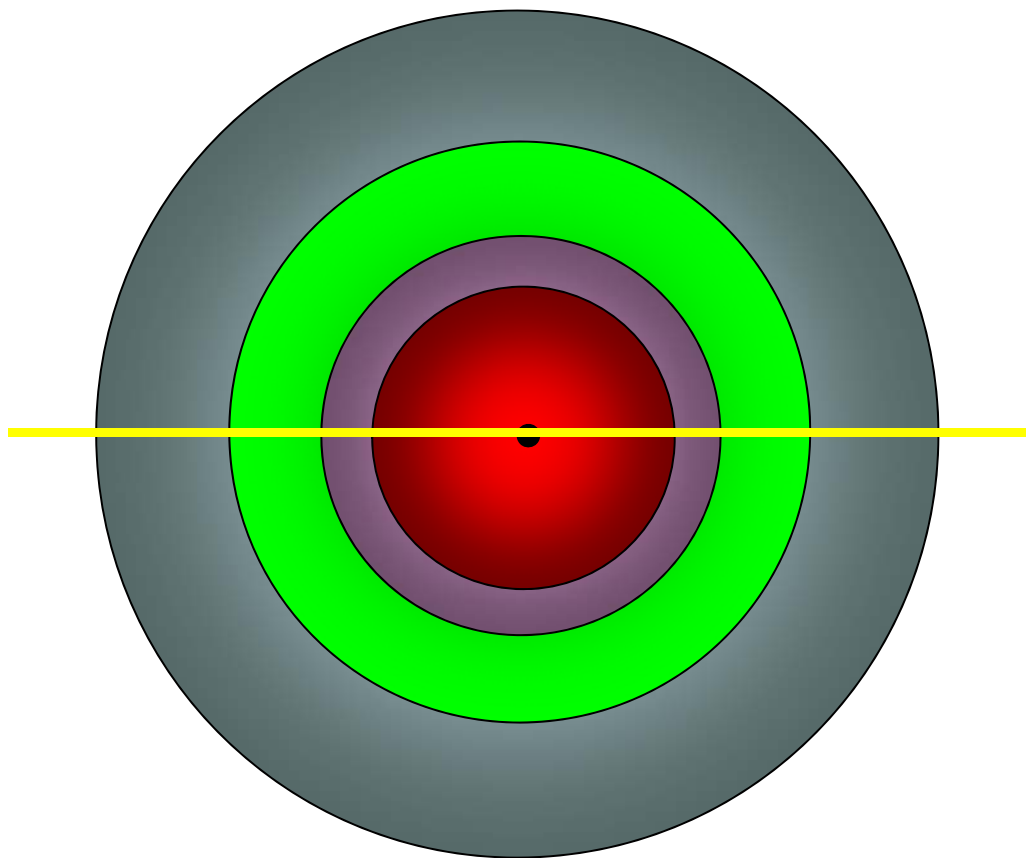


- ❖ 明锐的衍射斑点，靠近透射电子束的衍射斑点有较高的强度，外侧衍射束的强度逐渐降低；
- ❖ 衍射斑点的间距与晶面距离的倒数成正比；
- ❖ 衍射斑点形成规则的几何形状-二维网格；
- ❖ 衍射斑点的几何形状与二维倒易点阵平面上倒易阵点的分布是相同的；
- ❖ 电子衍射图的对称性可以用一个二维倒易点阵平面的对称性加以解释。

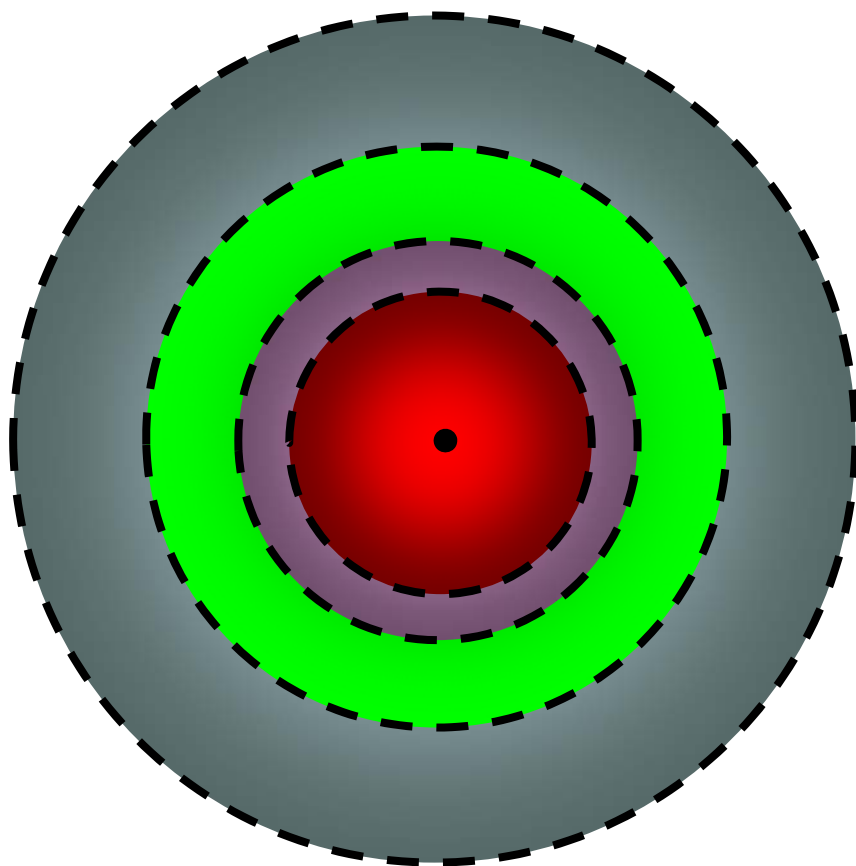
多晶材料的电子衍射

如果晶粒尺度很小，且晶粒的结晶学取向在三维空间是随机分布的，产生衍射束的样品中包含了众多的晶粒，涵盖了所有的晶体取向，如同多晶材料的**XRD**一样，各个方向都会产生。从倒易点阵考虑，即同名晶面族对应的倒易阵点在倒易空间中的分布是等几率的，无论电子束沿任何方向入射，同名晶面族对应的倒易阵点与反射球面相交的轨迹都是一个圆环，由此产生的衍射束均为圆形环线。所有衍射束形成的衍射花样为一组围绕透射束的同心圆环。

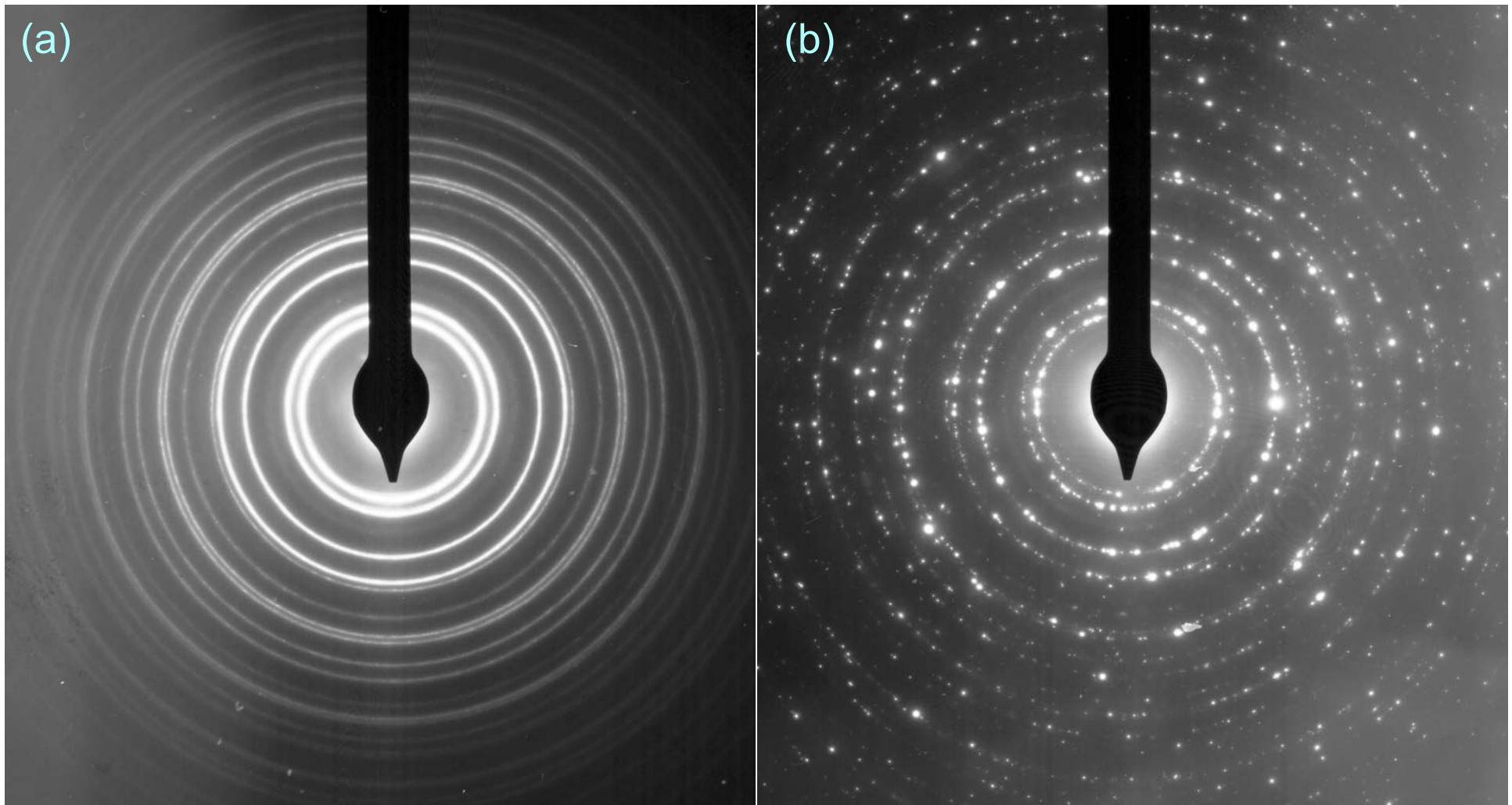
多晶体的倒易空间特征



如果包含有足够多的晶粒，每一个同名正点阵晶面对应的倒易阵点在倒易空间中的分布形成一个以倒易点阵原点为球心的球面。反射球面与它们相交得到的轨迹都是一些半径恒定的，并且以倒易点阵原点为中心同心圆环。



减少参与衍射的晶粒数，保持晶粒平均尺度不变，就相当于在各个同指数倒易阵点形成的同心倒易球面上取出一些倒易点，使得这些倒易球面不再是连续的球面。它们相交得到的轨迹都是一些半径恒定的，并且以倒易点阵原点为中心同心圆弧线或衍射斑点。



图(a): 参与衍射的晶粒数量非常多;

图(b): 相比图(a)参与衍射的晶粒数量略有减少。

NiFe多晶纳米薄膜的电子衍射

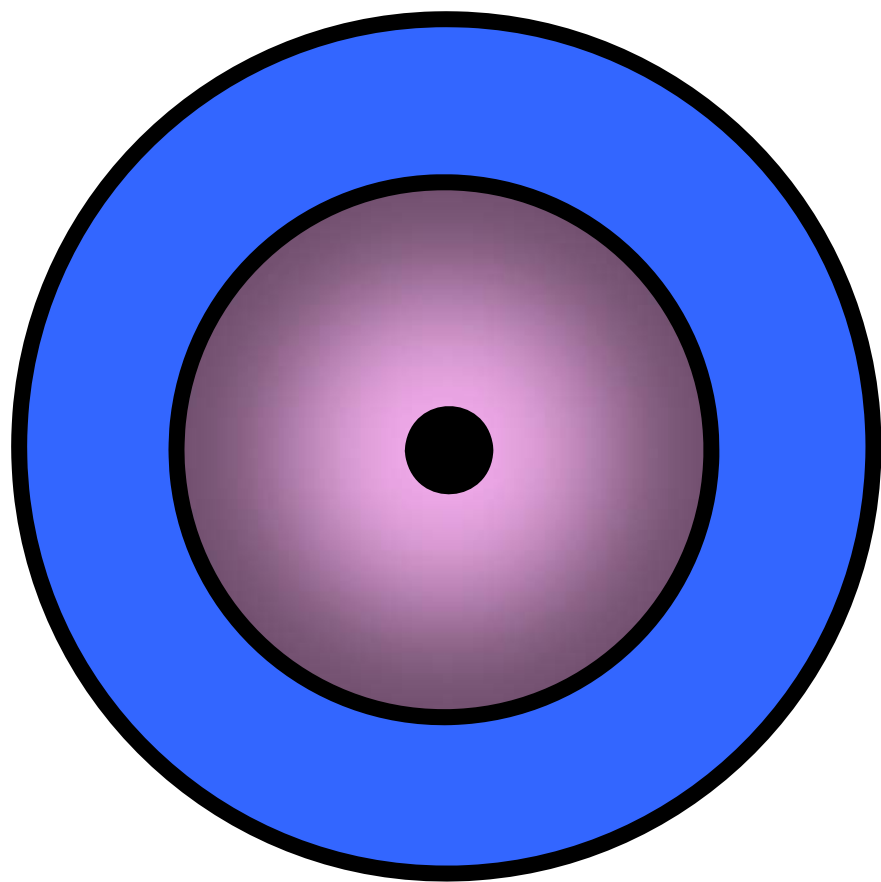
多晶体的电子衍射特征

1. 半径恒定的同心圆环衍射线;
2. 同心圆环的半径正比于点阵晶面间距的倒数。

非晶态物质衍射

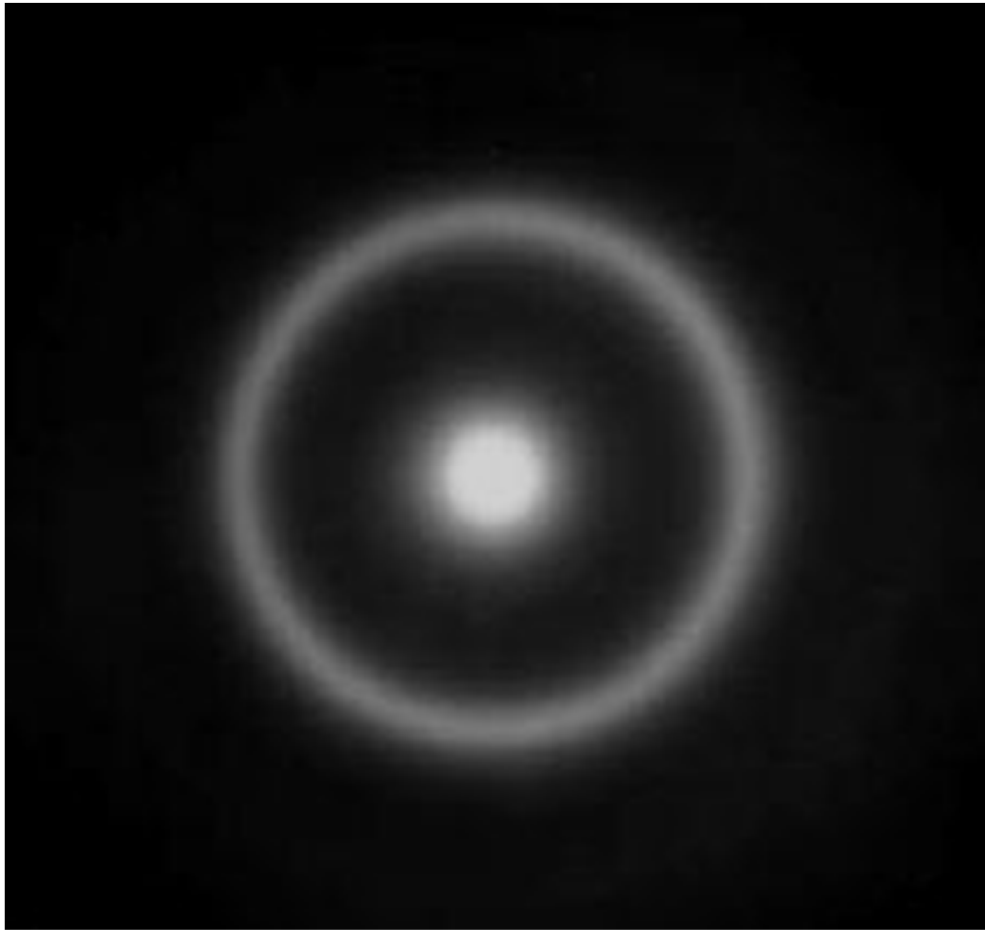
非晶态结构物质的特点是原子的分布在非常小的范围内有一定的序，即每个原子的近邻原子的排列仍具有一定的规律，呈现一定的几何特征。原子排列的短程有序使得许多非晶态材料中仍然较好地保留着相应晶态结构中所存在的近邻配位情况，可以形成具有确定配位数和一定大小的原子团，如四面体，八面体或其它多面体单元。

不再具有平移周期性，因此也不再有点阵和单胞。



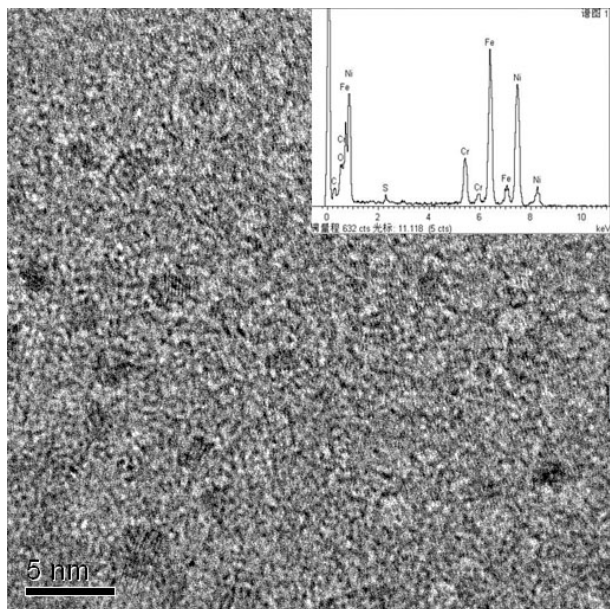
非晶态材料中原子团形成的这些多面体在空间的取向是随机分布的。由于单个原子团或多面体中的原子只有近邻关系，反映到倒空间也只有对应这种原子近邻距离的一或两个倒易球面。反射球面与它们相交得到的轨迹都是一或两个半径恒定的，并且以倒易点阵原点为中心同心圆环。

非晶态材料电子衍射图的特征

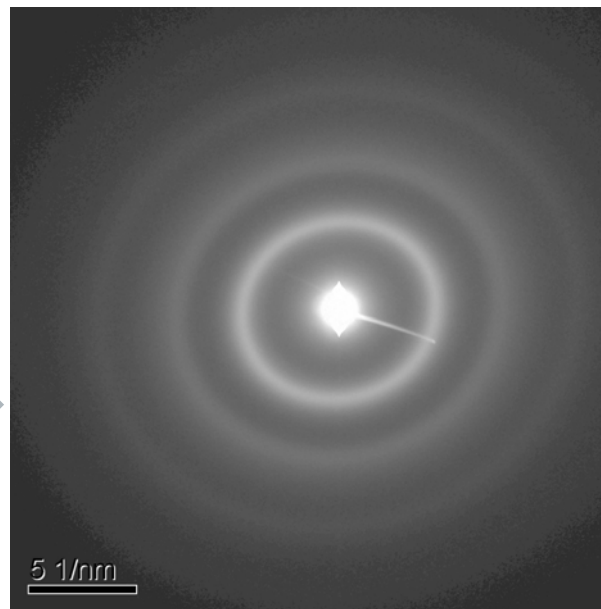


由于单个原子团或多面体的尺度非常小，其中包含的原子数目非常少，倒易球面也远比多晶材料的厚。所以，非晶态材料的电子衍射图只含有一个或两个非常弥散的衍射环。

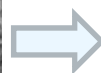
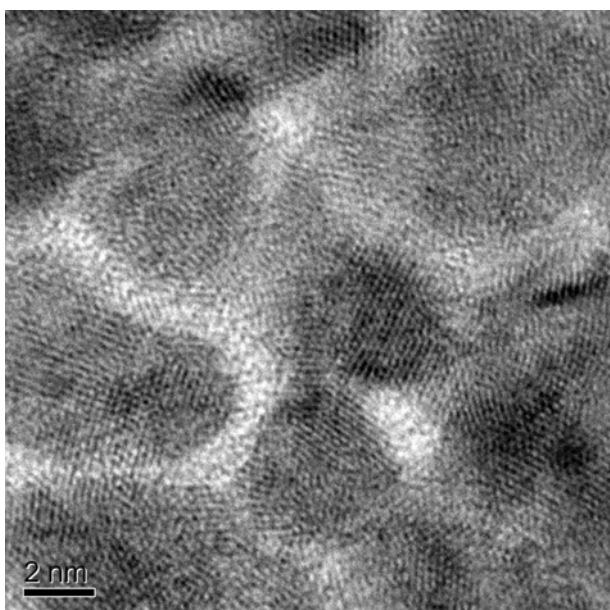
镀态



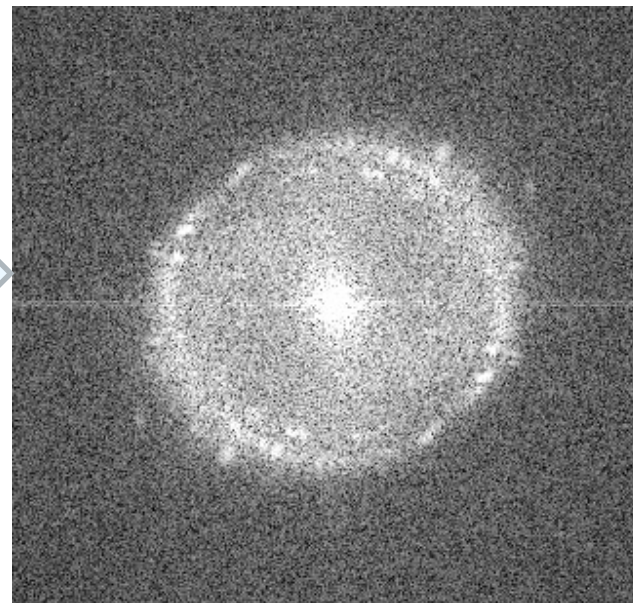
非晶为主，但含有纳米晶



热处理后



纳米晶



化学镀Ni薄膜

电子衍射基本公式

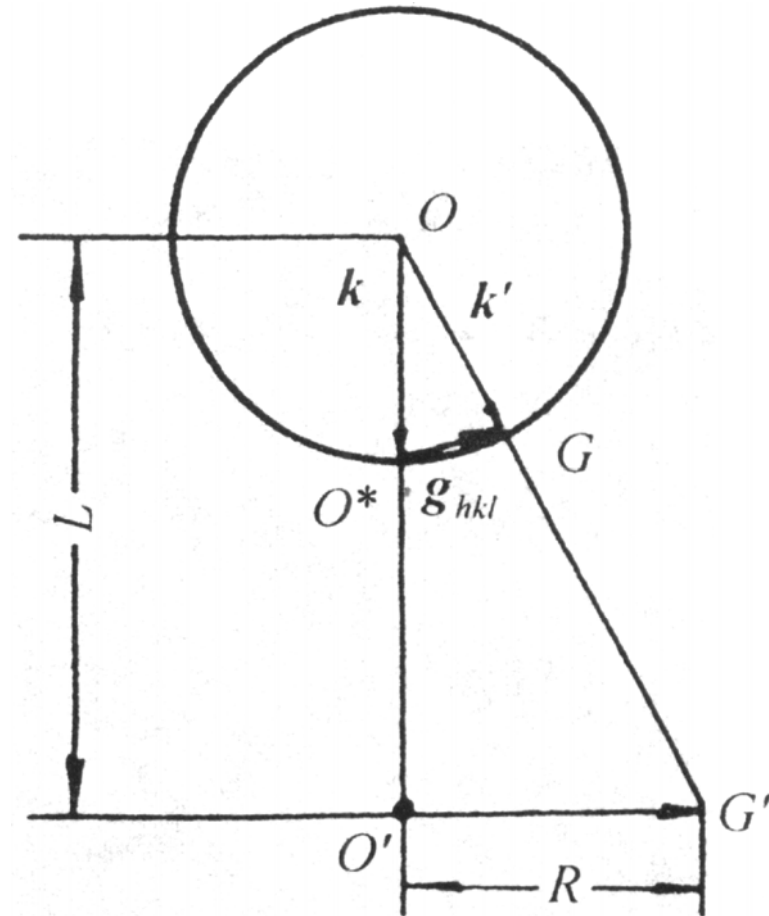
$$\frac{R}{L} = \frac{g_{hkl}}{k}$$

$$g_{hkl} = \frac{1}{d_{hkl}}, k = \frac{1}{\lambda}$$

$$R = \lambda L \frac{1}{d} = \lambda L g = Kg$$

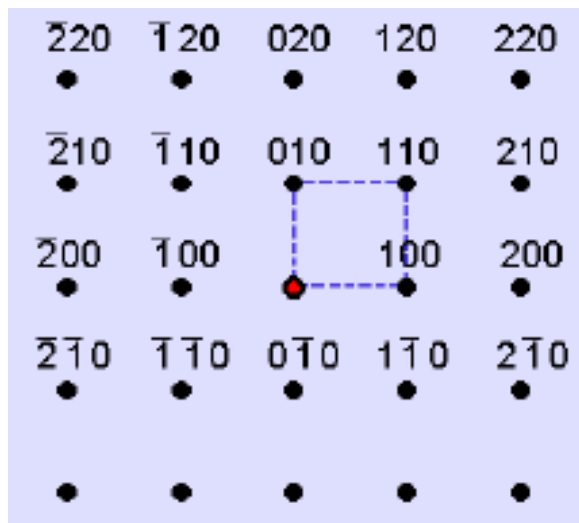
$$\mathbf{R} // \mathbf{g}_{hkl}$$

- ❖ 通常将 $K = \lambda L = Rd$ 称为相机常数，而 L 被称为相机长度。

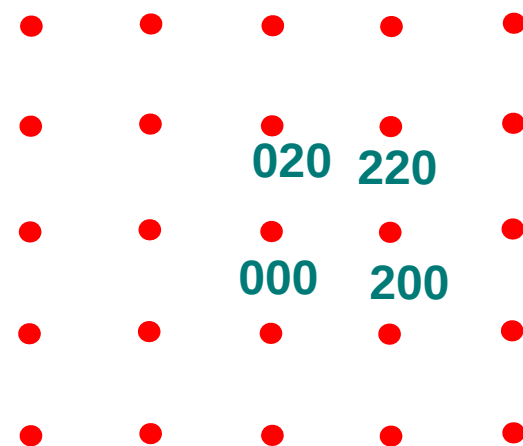


- ❖ 在采用电子衍射确定晶体结构的工作中，往往只凭一张衍射斑点不能充分确定其晶体结构，而往往需要同时摄取同一晶体不同晶带的多张衍射斑点（即系列倾转衍射）方能准确地确定其晶体结构。

B=[001]下相同花样不同晶体的倒易矢量的指数标定

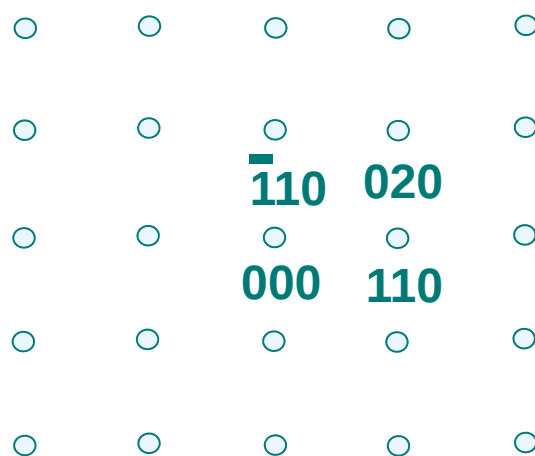


体心立方的零层倒易截面



面心立方的零层倒易截面

简单立方的零层倒易截面



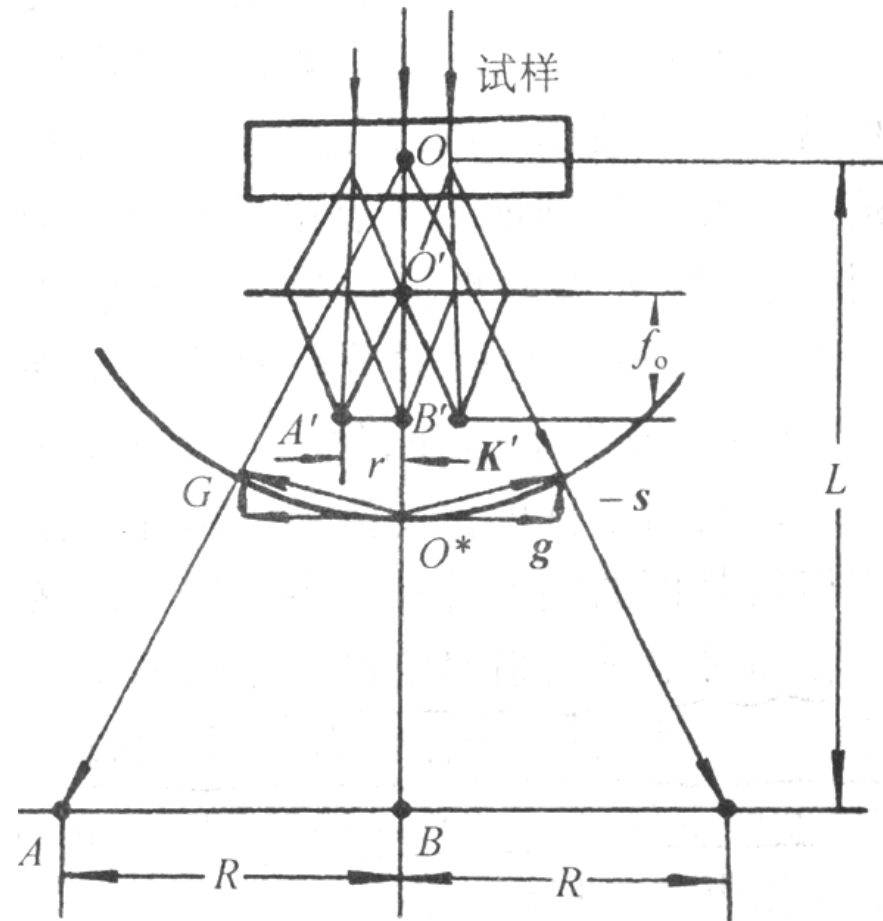
§ 10-3 电子显微镜中的电子衍射

❖ 一、有效相机常数

前一节讲的相机长度 L 和 R 与物镜的焦距 f_0 和 r 相当。电镜中进行电子衍射操作时，焦距 f_0 起到了相机长度的作用。由于中间镜和投影镜放大作用，最终的相机长度应如下：

$$L' = f_0 M_I M_P$$

有效相机常数： $K' = \lambda L' = R'd$



二、选区电子衍射

如果在物镜的像平面处加入一个选区光阑，那么只有**A'B'**范围的成像电子能够通过选区光阑，并最终在荧光屏上形成衍射花样。这一部分的衍射花样实际上是由样品的**AB**区域提供的，因此利用选区光阑可以非常容易分析样品上微区的结构细节。但是一般最小区域大小为**300nm**。

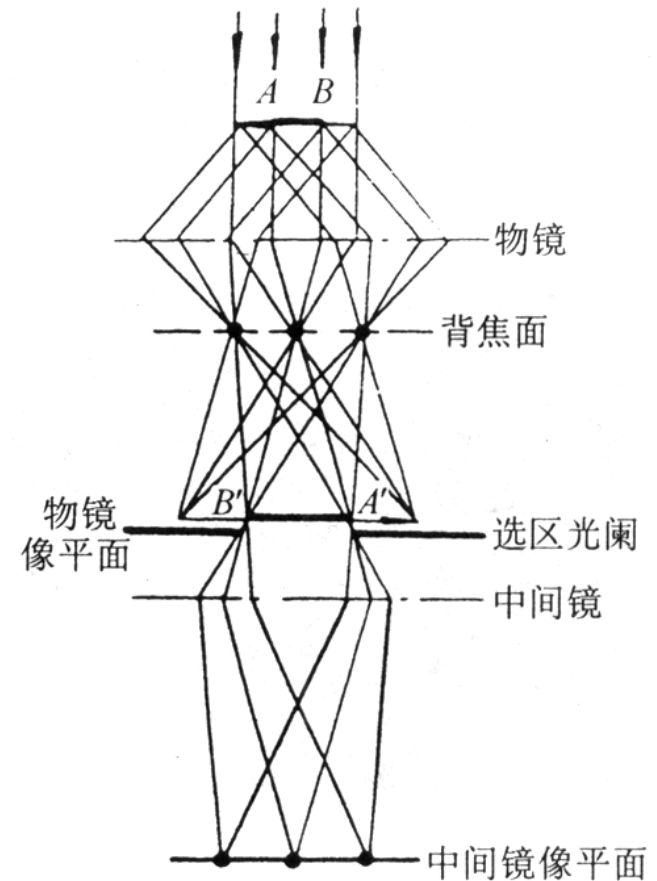
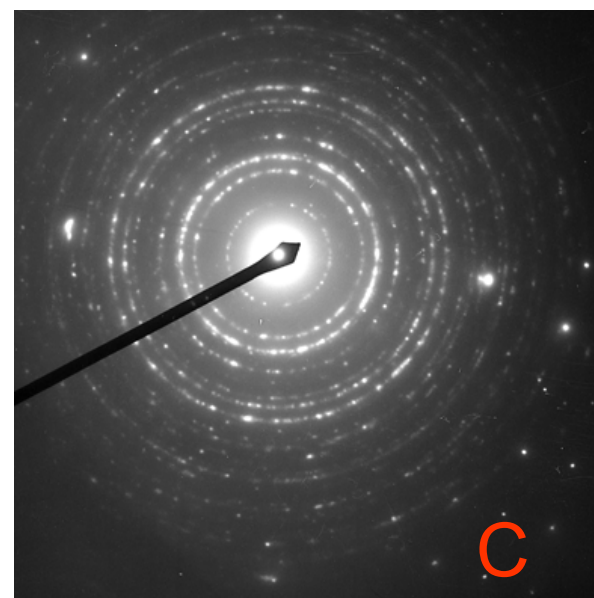
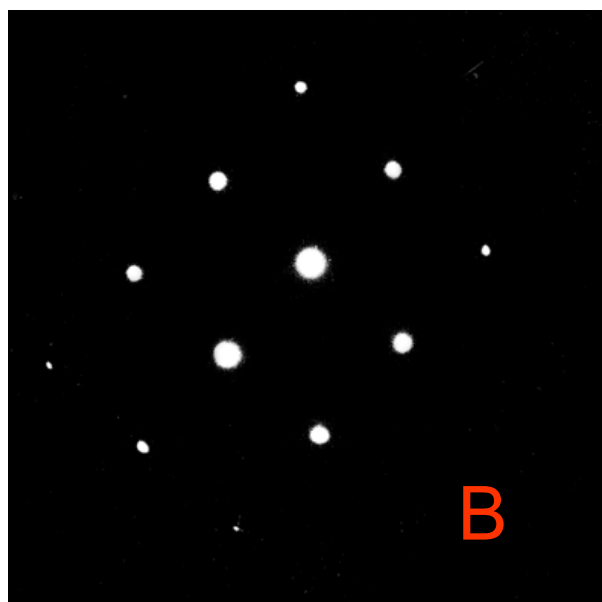
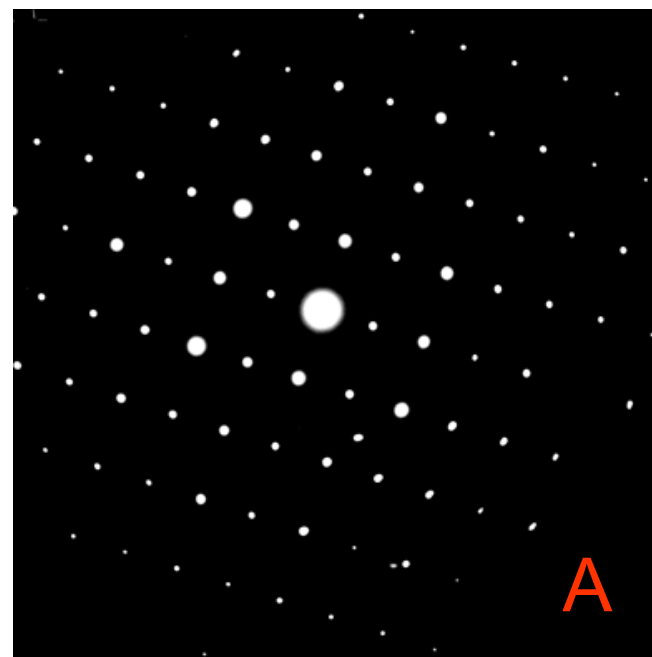
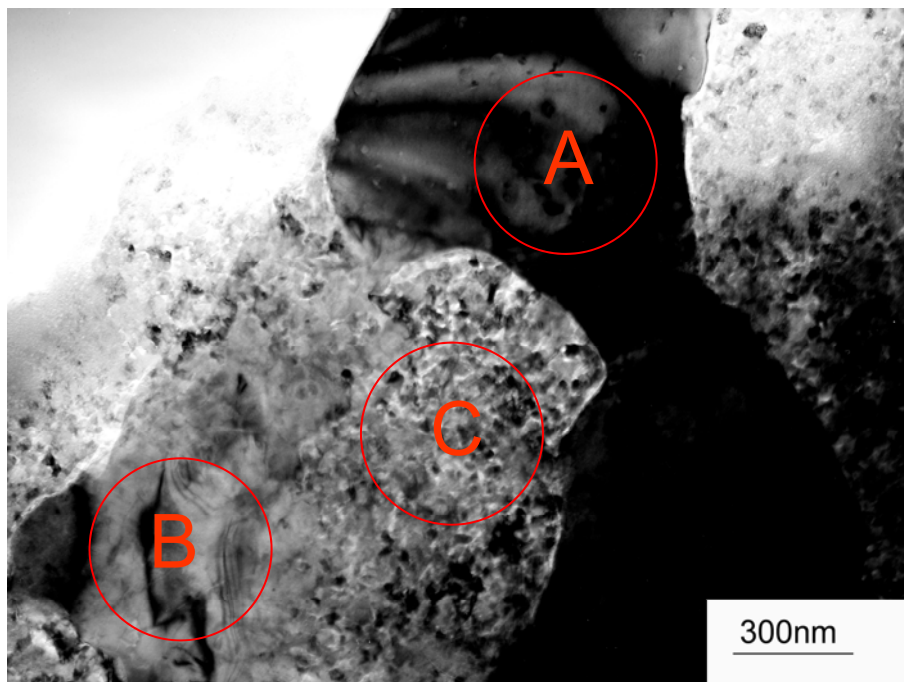
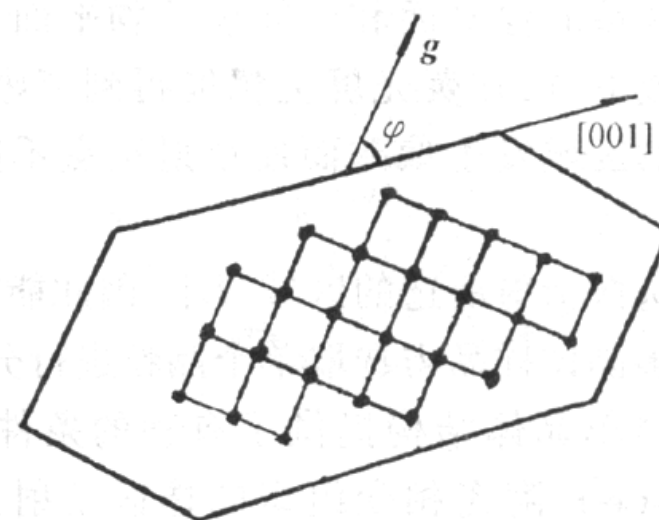


图 10-16 选区电子衍射原理图



三、磁旋转角

- ❖ 因为电子束在镜筒中是螺旋线轨迹前进的，在图像操作和衍射操作中，电子运动轨迹不同，这样就会造成图像和电子衍射花样磁转角差：
- ❖ $\varphi = \varphi_i - \varphi_d$
- ❖ 有的**TEM**安装有磁转角自动补正装置，在分析时就不必考虑磁转角的影响。



MoO₃晶体

§ 10-4 单晶体电子衍射花样的标定

❖ 基本任务

- ❧ 确定花样中斑点的指数及其晶带轴方向 $[uvw]$;
- ❧ 确定样品的点阵类型、物相和位向。

❖ 一般分析任务可分为两大类:

- ❧ 测定新结构, 这种结构的参数是完全未知的, 在 **ASTM** 卡片中和其它文献中都找不到;
- ❧ 鉴定旧结构, 这种结构的参数前人已作过测定, 要求在这些已知结构中找出相符合的结构来。

单晶体衍射花样的标定（指数化）任务

- 1、确定图谱中各衍射斑点的指数（ hkl ）（所以“标定”又称“指数化”）；
- 2、利用晶带定理，由斑点指数确定该图谱的晶带轴 $[uvw]$ ；
- 3、如果产生衍射图谱的点阵类型为未知时，确定产生该衍射谱的晶体点阵类型（如面心立方，体心立方，密排六方等）。

电子衍射花样标定步骤

分2类情况进行标定：

- 1、产生衍射图谱的点阵类型为已知时；
- 2、产生衍射图谱的点阵类型为未知时。

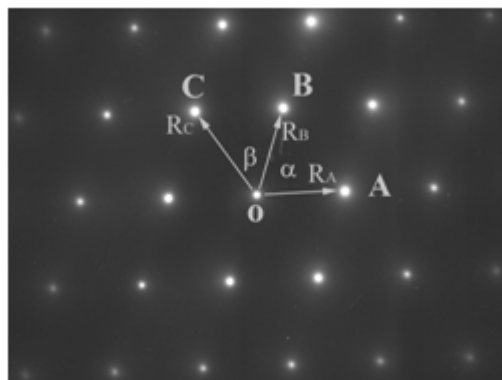
电子衍射花样标定步骤

- ❖ 产生衍射图谱的点阵类型为已知时的标定方法：
 - ❖ 1、尝试—校核法（常用方法）；
 - ❖ 2、与标准衍射花样对照（要核对 R_i/R_j 比值，以及 R_i 、 R_j 矢量间的夹角）。

电子衍射花样标定步骤

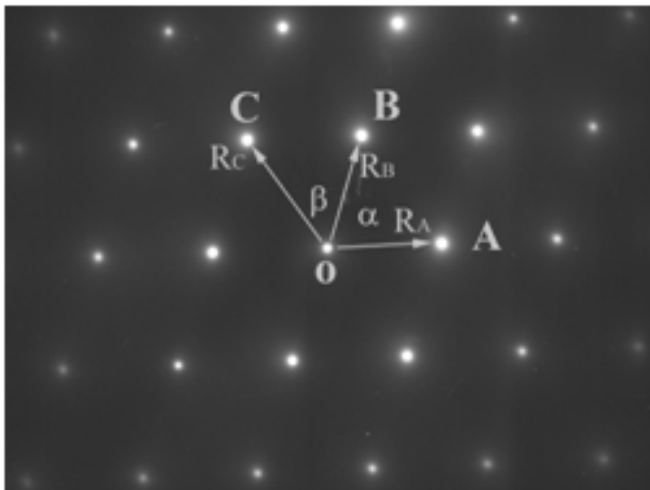
❖ 用尝试--校核法标定的主要步骤:

- 1、选择: 在图谱上(至少)选3个不在一条直线上的衍射斑点, 设为A, B, C。
- 2、测量: 测量图谱中心(000)到所选斑点的半径距离 R_A, R_B, R_C 。
- 3、测量: 测量 R_A 与 R_B , 以及 R_B 与 R_C 间的夹角 α 、 β 。
- 4、计算: 用衍射基本公式 $L\lambda = R_i d_i$ 分别计算与 R_A, R_B, R_C 相当的晶面间距 d_i ($L\lambda$ 为电镜的相机常数)。



❖ 用尝试--校核法标定的主要步骤:

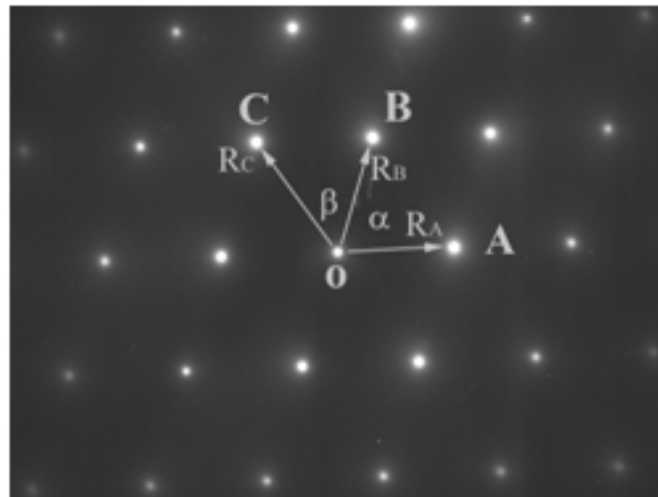
- 5、选择: 按已知的点阵类型, 查PDF卡数据并依据衍射消光条件, 选取与 d_i 相应的晶面族 $\{h_i k_i l_i\}$ 。
- 6、选择+校核: 对其中任意2个晶面族, 如 $\{h_A k_A l_A\}$ 和 $\{h_B k_B l_B\}$, 给出确切的晶面指数 $(h_A k_A l_A)$ 和 $(h_B k_B l_B)$; 并计算此2晶面间夹角 α , 如果此角与实测值符合, 则进行下一步, 不然的话, 重新选择同属于 $\{h_B k_B l_B\}$ 晶面族的具体晶面 $(h_B k_B l_B)$, 直到夹角 α 符合为止。



注意: 采用逆时针夹角 α 为正

用尝试--校核法标定的主要步骤:

- 7、**计算**: 利用 $\mathbf{R}_i$ 矢量运算法则 (加、减, 反向和倍乘) 确定其余衍射斑点的指数。
- 8、**计算**: 应用**晶带定理** $\mathbf{g} \cdot \mathbf{r} = 0$, 并采用右螺旋法则求衍射图谱的晶带轴 $\mathbf{B} = [\mathbf{uvw}]$; 一般采用右手法则叉乘法求晶带轴: $\mathbf{B} = \mathbf{R}_A \wedge \mathbf{R}_B = \mathbf{R}_C \wedge \mathbf{R}_A$
- 9、**核对自洽性**: 检查标定结果的**自洽性**, 即所标指数必须与实际情况一致; 除保证实测夹角与计算夹角相符之外, 还可以用标准极射赤面投影核对。



任取不在同直线上的两个斑点（如 $h_1k_1l_1$ 和 $h_2k_2l_2$ ）确定晶带轴指数 $[uvw]$ 。

$$[uvw] = \vec{R}_1 \times \vec{R}_2$$

$$\begin{array}{ccccc} h_1 & | & k_1 & \nearrow & l_1 \\ & & \searrow & \nearrow & \\ h_2 & | & k_2 & \searrow & l_2 \end{array} \quad \begin{array}{ccccc} h_1 & | & k_1 & \nearrow & l_1 \\ & & \searrow & \nearrow & \\ h_2 & | & k_2 & \searrow & l_2 \end{array} \quad \begin{array}{ccccc} h_1 & | & k_1 & \nearrow & l_1 \\ & & \searrow & \nearrow & \\ h_2 & | & k_2 & \searrow & l_2 \end{array}$$

$u \quad v \quad w$

- ❖ 事实上，单晶电子衍射花样就是倒易点阵内以入射电子束方向为法线的零层倒易截面放大像。如果我们预先画出各种晶体点阵主要晶带的倒易截面，以此作为不同入射条件下的标准花样，则实际观察记录到的衍射花样，可以直接通过与标准花样的对照，写出斑点指数并确定晶带轴方向。

表1 衍射花样的测量和计算结果
Al, $a = 0.40491\text{nm}$; 相机常数 $L\lambda=20.8\text{mm}\text{\AA}$

斑点	R测量值 (mm)	d测量值 (nm)	d计算 (PDF)值 (nm)	夹角 α $R_A \wedge R_B$	夹角 β $R_B \wedge R_C$	晶面族 $\{hkl\}$	选定晶 面(hkl)
A	9.0	0.231	0.2365	测量值 71.0°		$\{111\}$	$(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$
B	9.0	0.231	0.2365	计算值 70.52°	测量值 55.0°	$\{111\}$	$(\bar{1}11)$ 或 $(11\bar{1})$
C	10.2	0.204	0.2048		计算值 54.74°	$\{200\}$	(002) 或 (200)

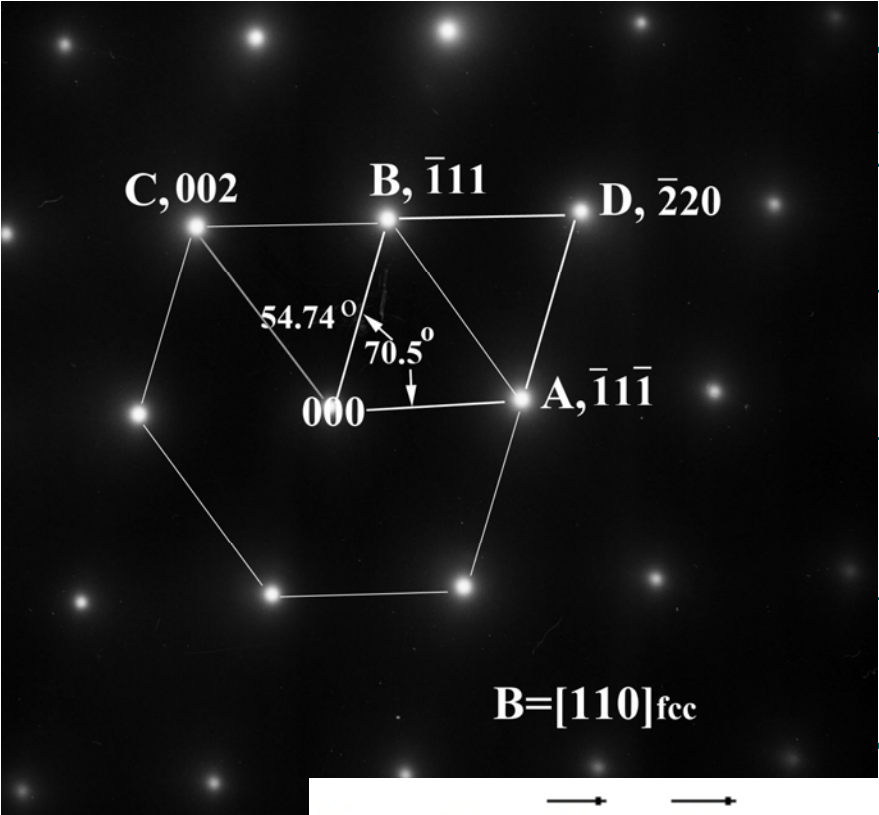


$$\cos\varphi = \frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2}{|\vec{r}_1||\vec{r}_2|}$$

注意：采用逆时针夹角 α 为正

表1 衍射花样的测量和计算结果

Al, $a = 0.4096\text{nm}$; 相机常数 $L\lambda=20.8\text{mmA}$



	夹角 α $R_A \wedge R_B$	夹角 β $R_B \wedge R_C$	晶面族 $\{hkl\}$	选定晶 面(hkl)
	测量值 71.0°		$\{111\}$	$(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$
	计算值 70.52°	测量值 55.0°	$\{111\}$	$(\bar{1}11)$
		计算值 54.74°	$\{200\}$	(002)

$$[uvw] = \vec{R}_1 \times \vec{R}_2$$

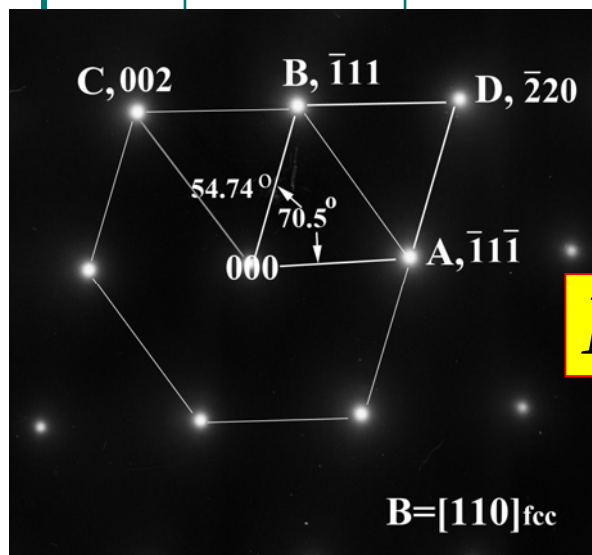
$$\begin{array}{c|c|c|c|c} h_1 & k_1 & l_1 & h_1 & k_1 & l_1 \\ h_2 & k_2 & l_2 & h_2 & k_2 & l_2 \end{array}$$

$$u \quad v \quad w$$

晶带轴 $\mathbf{B}=[110]$;
利用矢量加、减和倍乘
方法标定其他斑点。

表1 衍射花样的测量和计算结果
Al, $a = 0.4096\text{nm}$; 相机常数 $L\lambda=20.8\text{mm}\text{\AA}$

斑点	R测量值 (mm)	d测量值 (nm)	d计算 (PDF)值 (nm)	夹角 α $R_A \wedge R_B$	夹角 β $R_B \wedge R_C$	晶面族 $\{hkl\}$	选定晶 面(hkl)
A	9.0	0.231	0.2365	测量值 71.0°		$\{111\}$	$(\underline{1}11)$
B	9.0	0.231	0.2365	计算值 70.52°	测量值 55.0°	$\{111\}$	$(\underline{1}11)$
C	10.2	0.204	0.2048		计算值 54.74°	$\{200\}$	(002)

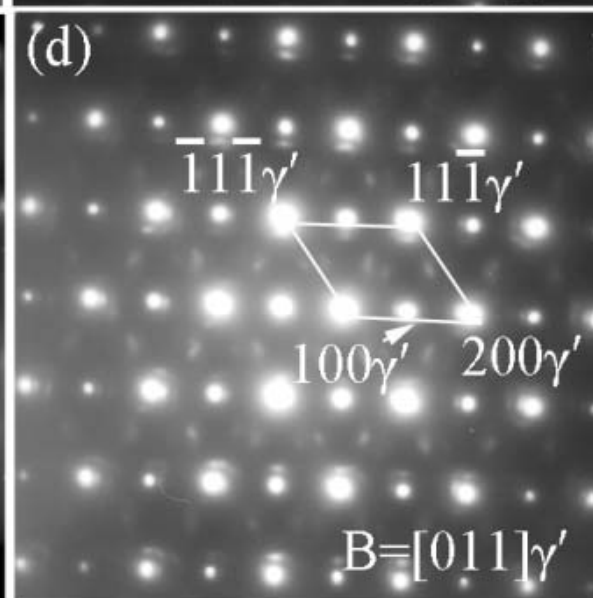
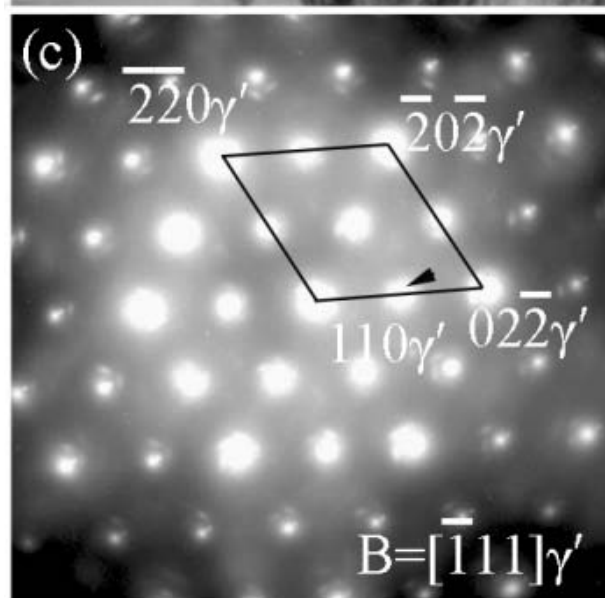
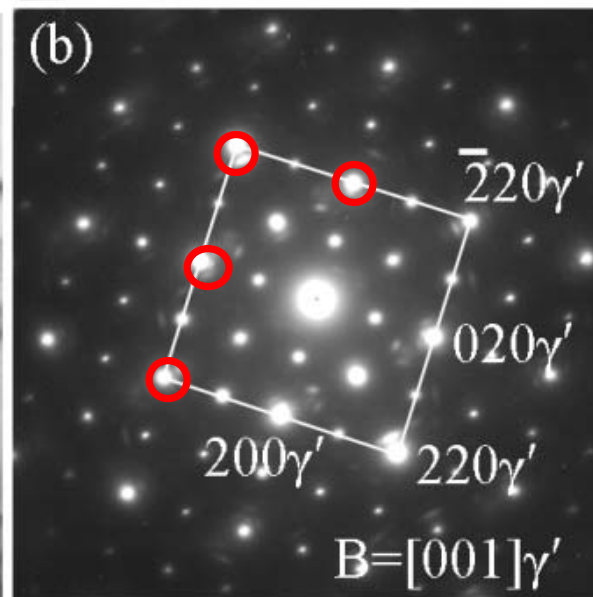
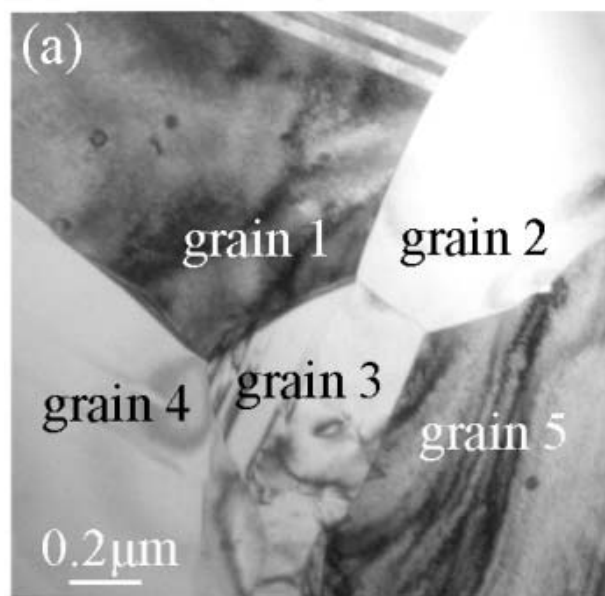


$$Rd = \lambda L$$

$$K = L' \lambda = Rd = 9 \times 0.2365 = 21.105$$

$$= 21.1 \text{ (mm}\text{\AA}\text{)}$$

校正的相机常数



思考：
请标出
图b中红
色圈斑
点的指
数。

电子衍射花样标定步骤

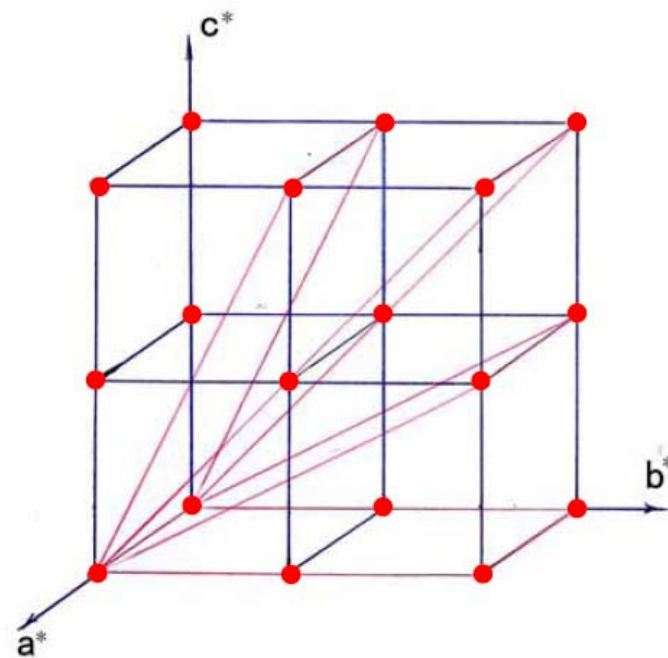
❖ 产生衍射花样的点阵类型为未知时的标定方法：

- 1、多数情况下，根据合金成分，相图和热处理（相变）历史，并根据X-射线衍射结果，大致确定合金体系中存在哪些相（晶体点阵）然后按所估计的相，采用尝试—校核法进行标定。工作量比较大。
- 2、在某些特殊情况下，采用比值法标定，如FCC和BCC两相混合的情况。

旋转晶体重构三维倒易点阵法

通过绕晶体某一特定晶轴旋转试样，获得一系列电子衍射花样，根据这些电子衍射花样和旋转角度，重构三维倒易点阵，可确定未知结构所属晶系及点阵参数。

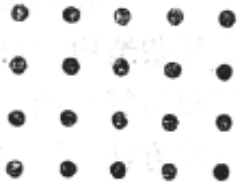
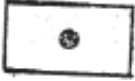
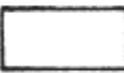
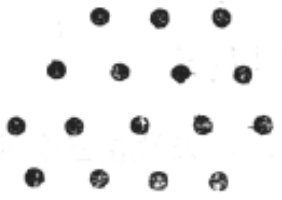
建议：先利用电子衍射谱的对称性确定晶系，再找到倒易基矢，最后绕基矢旋转。



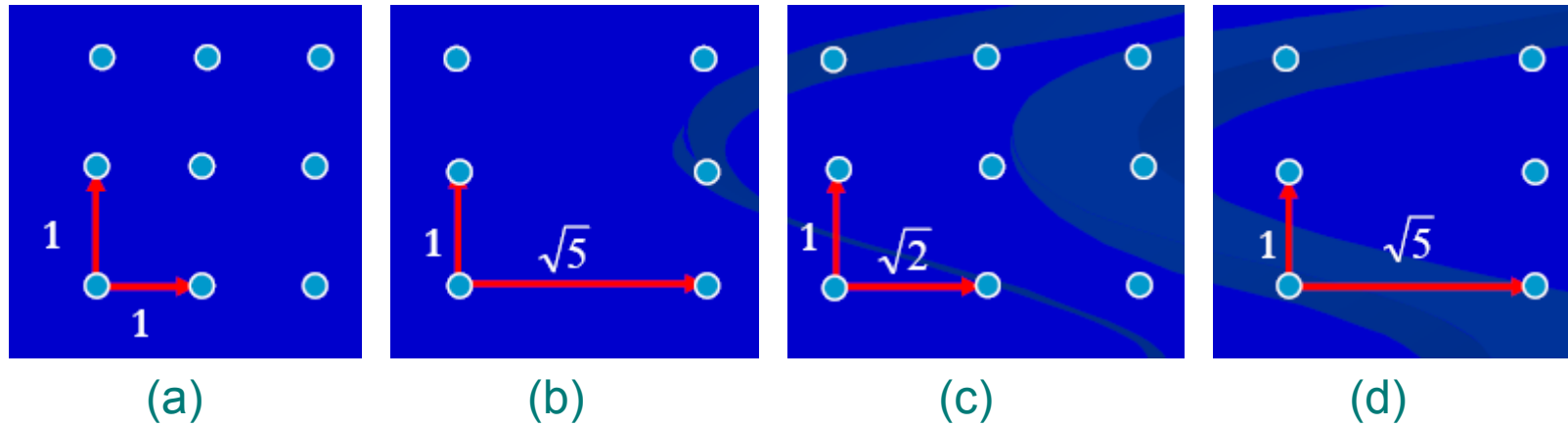
•不同结构晶体的电子衍射谱具有不同的对称特征。利用电子衍射谱的对称性（如右图）可迅速判断其所属的晶系。

电子衍射谱的对称特征

二维点阵布拉维胞 电子衍射谱的特征 可能归属的晶系

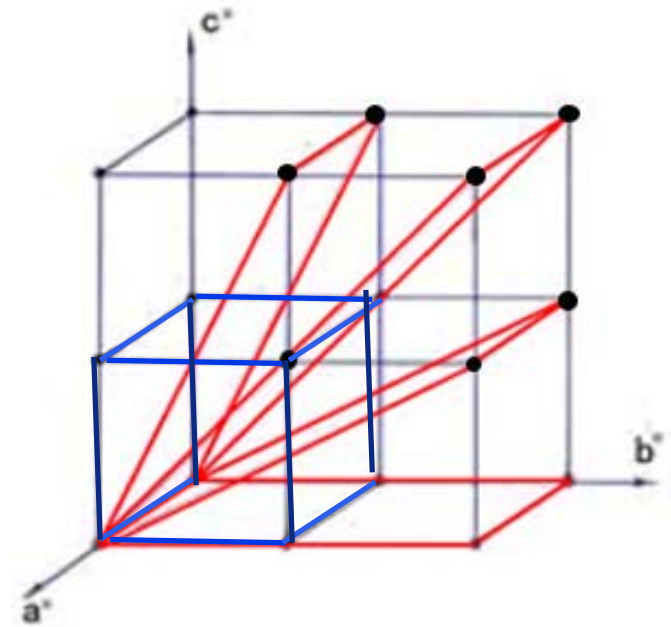
1			立方、四方
	正方		
2			六角、三角、立方
	六角		
3			单斜、正交、四方 六角、菱形、立方
	菱形 (有心矩形)		
4			同上
	矩形		
5			所有晶系
	平行四边形		

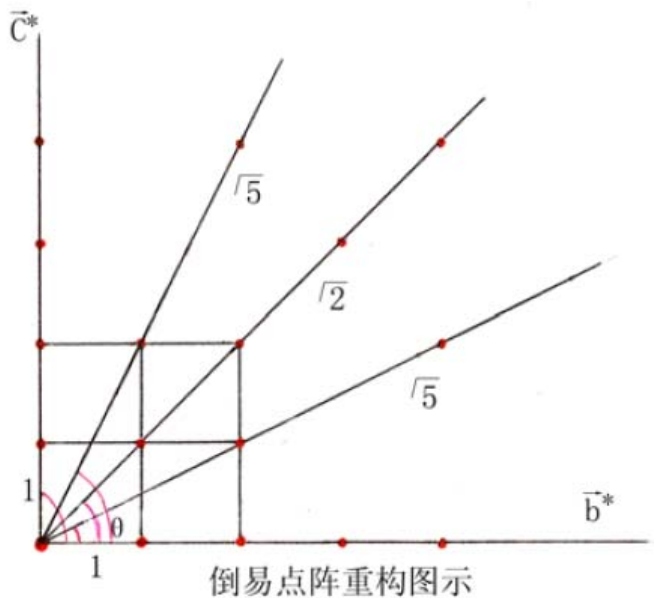
例1，某晶体的电子衍射花样如下图(a)，现试求其晶体结构。



在电子衍射操作中将花样(a)绕竖直短边为轴逆时针旋转得到另外三张衍射花样(b)、(c)、(d)，并记录相应的倾转角就可构成右图倒易空间三维图。再从倒易空间三维图求出 $\mathbf{a}^*$ 、 $\mathbf{b}^*$ 、 $\mathbf{c}^*$ 。最后再从倒易空间转换为正空点阵。

最后得出该晶体为简单立方。





两个需要说明的问题

*特定晶轴的选择应选择最密排的电子衍射，有可能对应晶体的单胞参数

* 旋转角的确定在电镜中使用双倾台，旋转角由两个方向倾转角合成得到：

$$\cos \theta = \cos \Delta \alpha \cos \Delta \beta + 2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin^2 \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{2} \right)$$

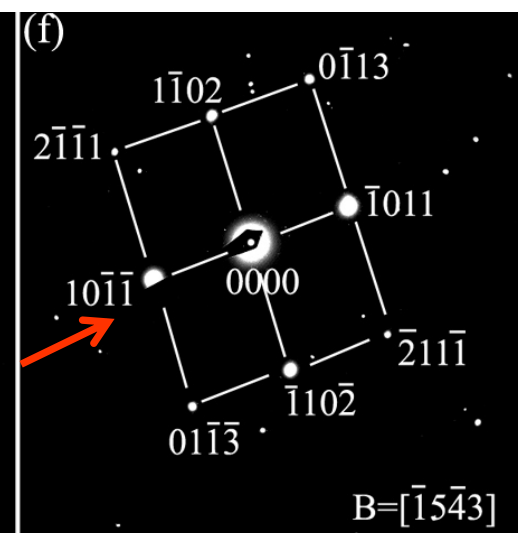
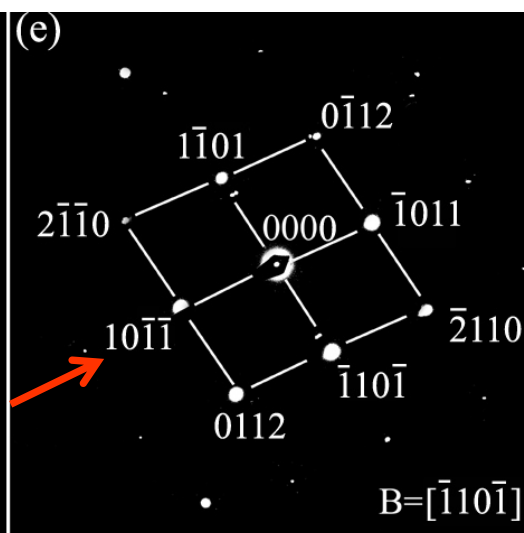
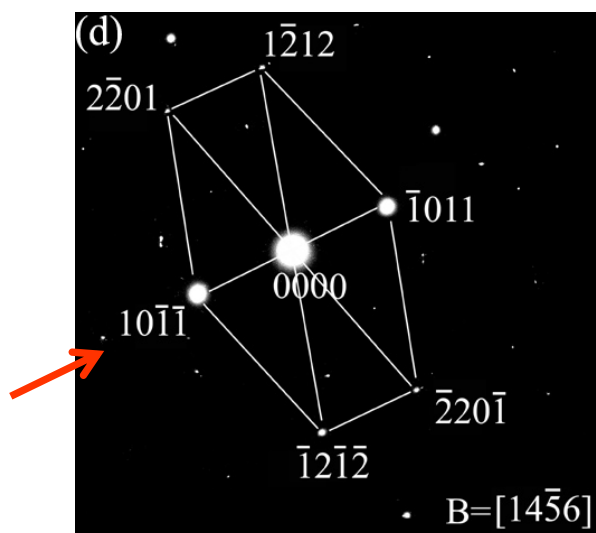
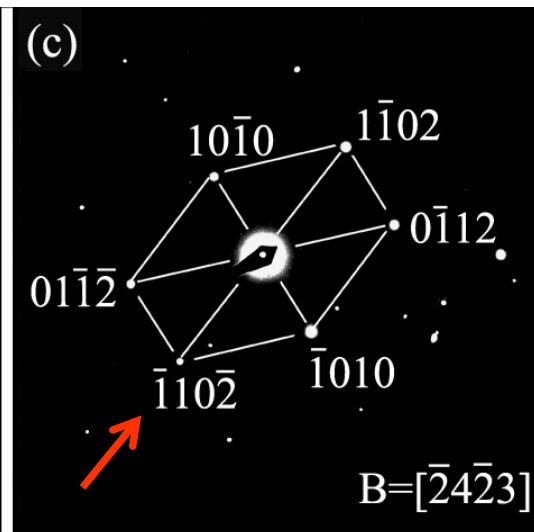
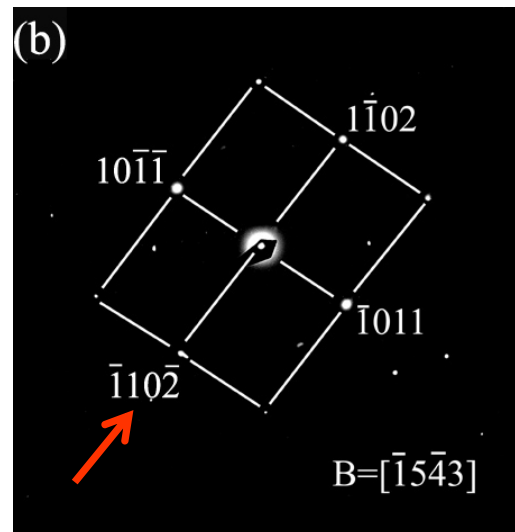
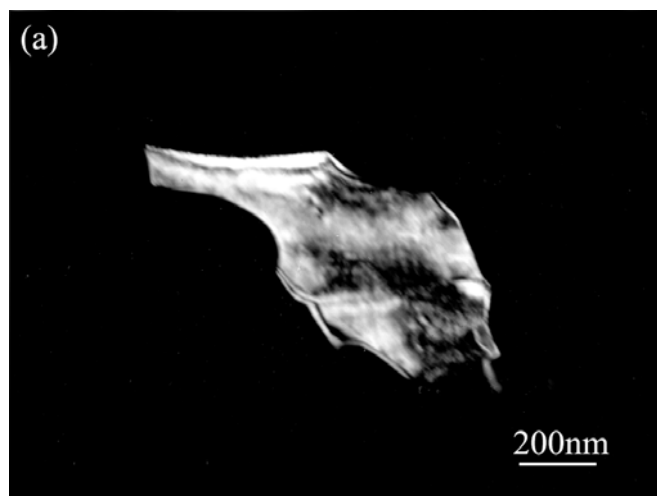
其中

$$\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \quad \Delta \beta = \beta_2 - \beta_1$$

近似处理为

$$\cos \theta \approx \cos \Delta \alpha \cos \Delta \beta$$

例题：六方结构的M7X3的结构确定过程介绍。

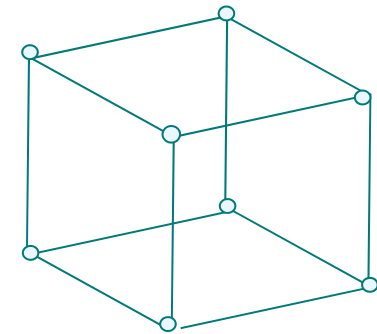


单晶电子衍射花样标定实例

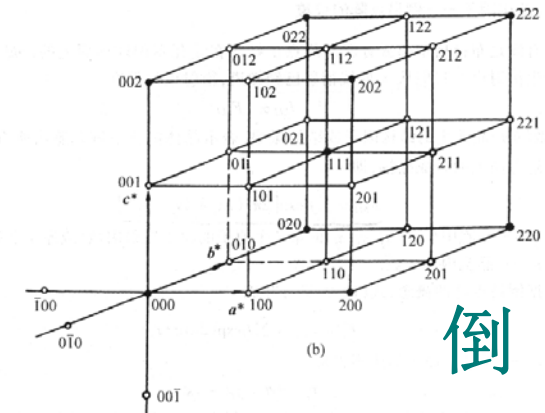
❖ 如图为某一 **体心立方** 晶体的电子衍射花样，试标定。已知，

$R_A=7.3\text{mm}$, $R_B=12.7\text{mm}$,
 $R_C=12.6\text{mm}$, $R_D=14.6\text{mm}$,
 $R_E=16.4\text{mm}$, $\alpha=73^\circ$;

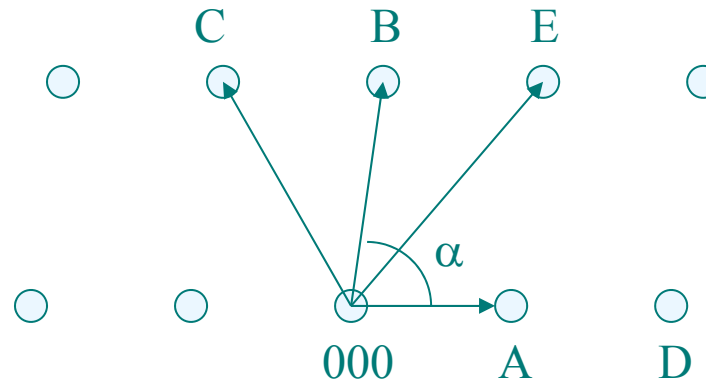
加速电压**200kV**，相机长度
800mm。



正



倒



1) 比值法求解:

斑点编号	A	B	C	D	E
R/mm	7.3	12.7	12.6	14.6	16.4
R ²	53.29	161.29	158.76	213.16	268.96
R _j ² / R _A ²	1	3.03	2.98	4	5.05
(R _j ² / R _A ²)×2	2	6.05	5.96	8	10.1
N	2	6	6	8	10
{hkl}	110	211	211	220	310
Hkl	110	2-11	1-21	220	301

$$\text{验证 } \vec{g}_{110} \times \vec{g}_{2\bar{1}1} = 73^\circ 13'$$

$$\begin{array}{c} 1 \mid 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \mid 0 \\ 2 \mid \bar{1} \quad 1 \quad 2 \quad \bar{1} \mid 1 \\ \hline 1 \quad \bar{1} \quad \bar{3} \end{array}$$

晶带轴为 $[1\bar{1}\bar{3}]$ ，或倒易面为 $(1\bar{1}\bar{3})^*$

此为体心立方，点阵常数 $a = 0.388\text{nm}$

2) 查表法求解:

已知**bcc**结构, 且 $R_A=7.3\text{mm}$, $R_B=12.7\text{mm}$, $\alpha=73^\circ$

$$R_B/R_A = 12.7 \div 7.3 = 1.74$$

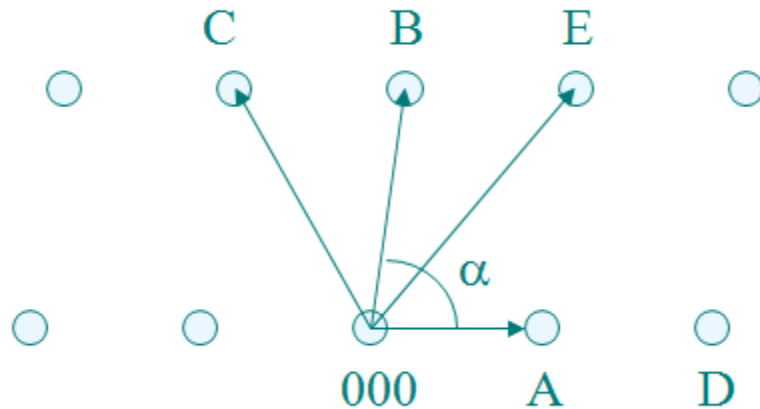
以 $R_B/R_A=1.7397$ 值和 $\alpha=73^\circ$ 来查P304附录14中的马氏体表 (一)

找到第七行, 得出**A**的指数为**-110**, **B**的指数为**-2-11**, 晶带轴为**[113]**。

3) 查标准电子衍射花样法求解:

已知**bcc**结构，且 $R_A=7.3\text{mm}$ ， $R_B=12.7\text{mm}$ ， $\alpha=73^\circ$

$$R_B/R_A = 12.7 \div 7.3 = 1.74$$

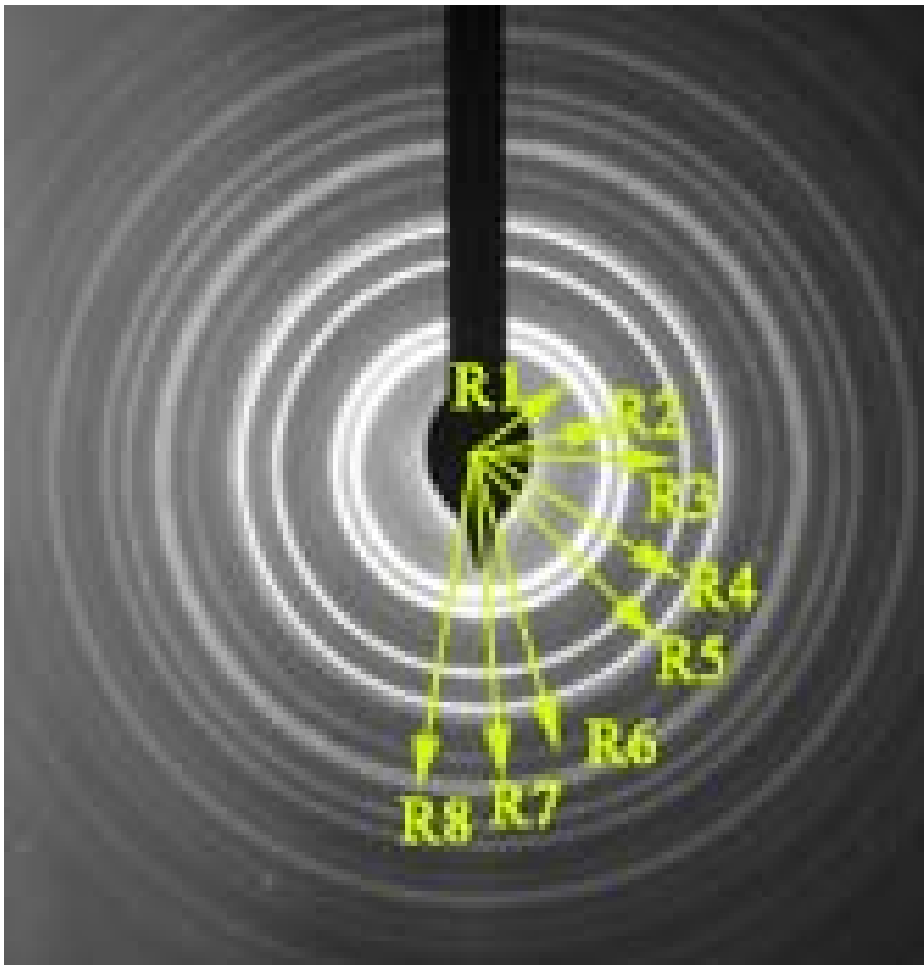


查P294体心立方的标准衍射图，发现图(h)与本题的花样相符，因此可直接写出：

得出**A**的指数为**110**，**B**的指数为**-12-1**，晶带轴为**[-113]**

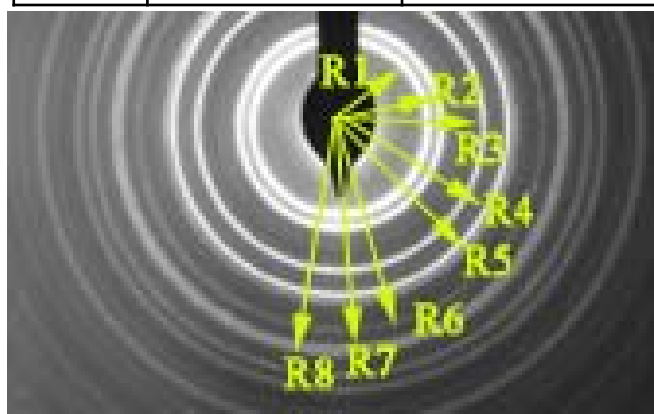
例题2

某立方晶体的多晶电子衍射花样的如下图，试求该晶体的结构和电子衍射花样的晶带轴指数。



解：测量各个圆环半径，然后从最小的圆环开始构成一组数列，按照XRD所述的仅根据 d 值数列的规律来分析该组同心圆环所反映的晶体结构和各个圆环的晶面指数。

	测量值 (mm)	R^2	与 R_1^2 比值	整数化	取N	{hkl}
R1	7.9	62.41	1	3	3	111
R2	9.2	84.64	1.356193	4.068579	4	200
R3	12.8	163.84	2.62522	7.875661	8	220
R4	15.1	228.01	3.653421	10.96026	11	311
R5	15.9	252.81	4.050793	12.15238	12	222
R6	18.4	338.56	5.424772	16.27432	16	400
R7	20	400	6.409229	19.22769	19	331
R8	20.6	424.36	6.799551	20.39865	20	420

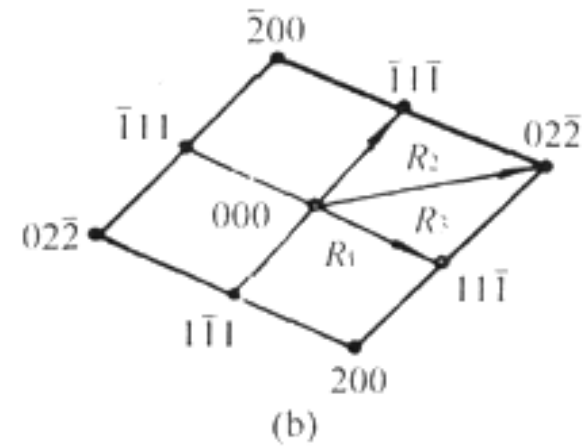
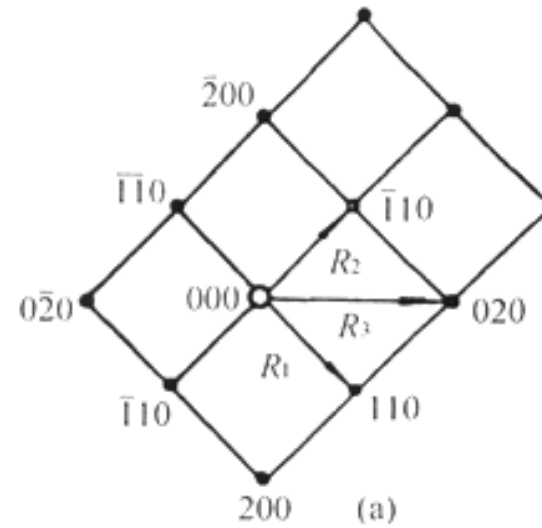


得出：此晶面结构为面心立方结构

复合电子花样的标定



马氏体的衍射斑点
 奥氏体的衍射斑点



§ 12-5 复杂电子衍射花样

- ❖ 高阶劳厄斑点
- ❖ 超点阵斑点
- ❖ 二次衍射斑点
- ❖ 孪晶斑点
- ❖ 菊池衍射花样

高阶劳厄斑点

- ❖ 点阵常数较大的晶体，其倒易点阵的倒易面间距较小，如果晶体很薄，则倒易杆很长，因此与厄瓦尔德球面相交的不只是零层倒易面，其上层或下层的倒易平面上倒易杆均有可能和厄瓦尔德球面相交，从而形成高阶劳厄区，如图。
- ❖ 高阶劳厄斑点并不构成一个晶带，它们符合广义晶带定律。由于高阶斑点和零层斑点分布规律相同，因此只要求出它们之间的水平位移矢量，便可对高阶劳厄区斑点进行标定。
- ❖ 高阶劳厄斑点可以给出晶体更多的信息，如可消除**180**度不唯一性和测定垂直于电子入射方向的面间距。

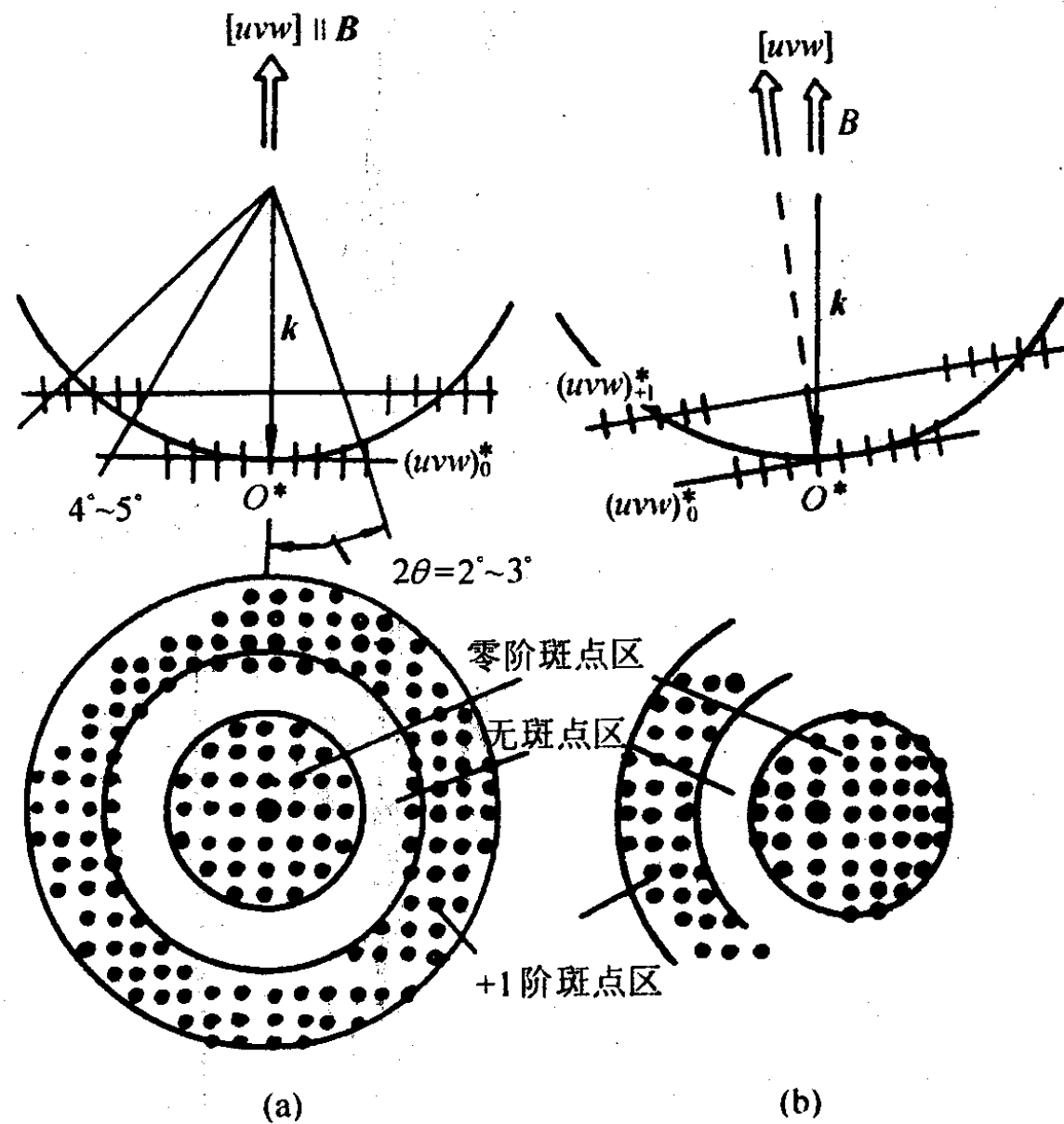
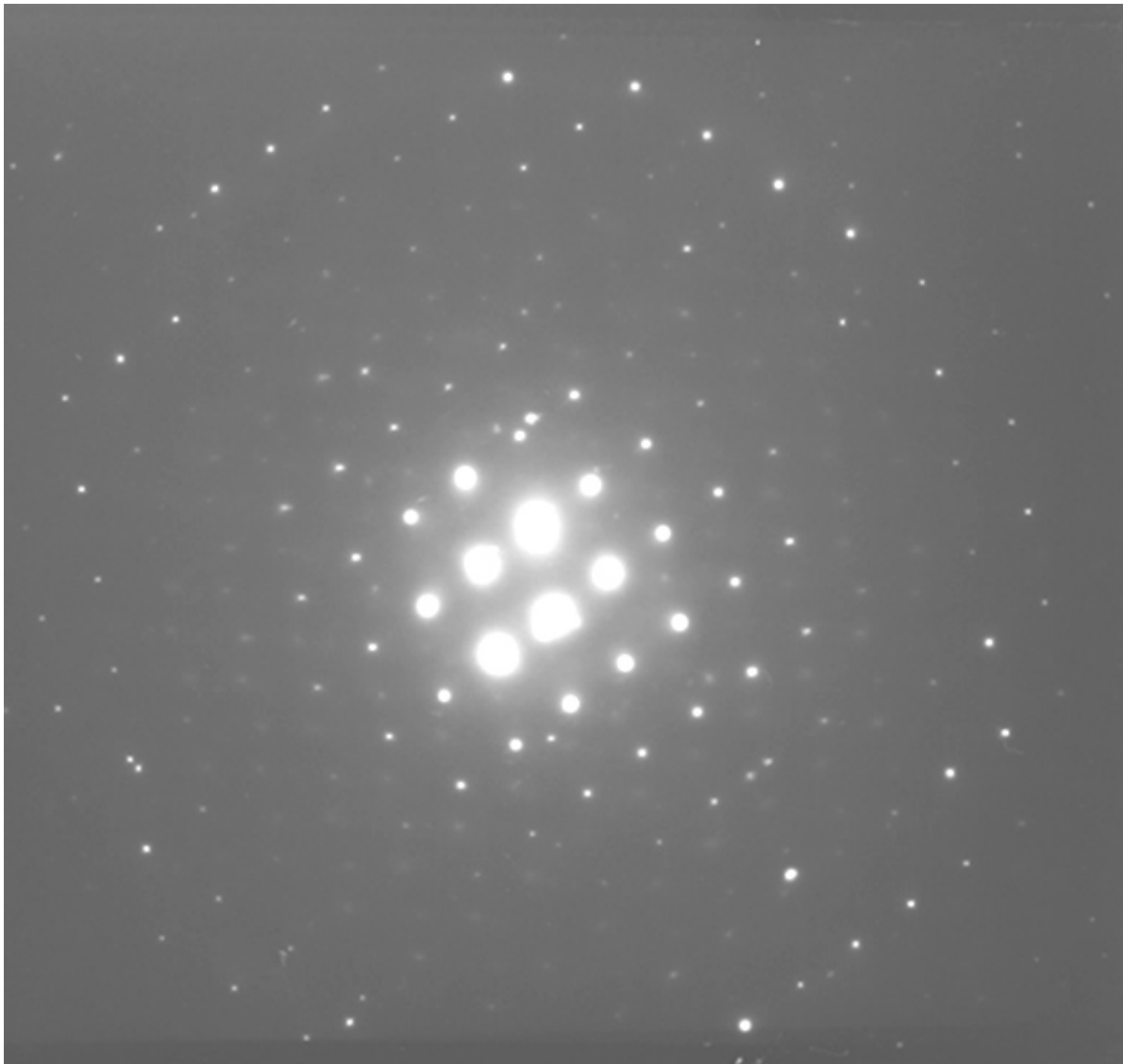


图 10-23 对称入射(a)和不对称入射(b)时的高阶劳爱斑点分布



超点阵斑点

- ❖ 当晶体内部的原子或离子产生有规律的位移或不同种原子产生有序排列时，将引起其电子衍射结果的变化，即可以使本来消光的斑点出现，这种额外的斑点称为超点阵斑点。

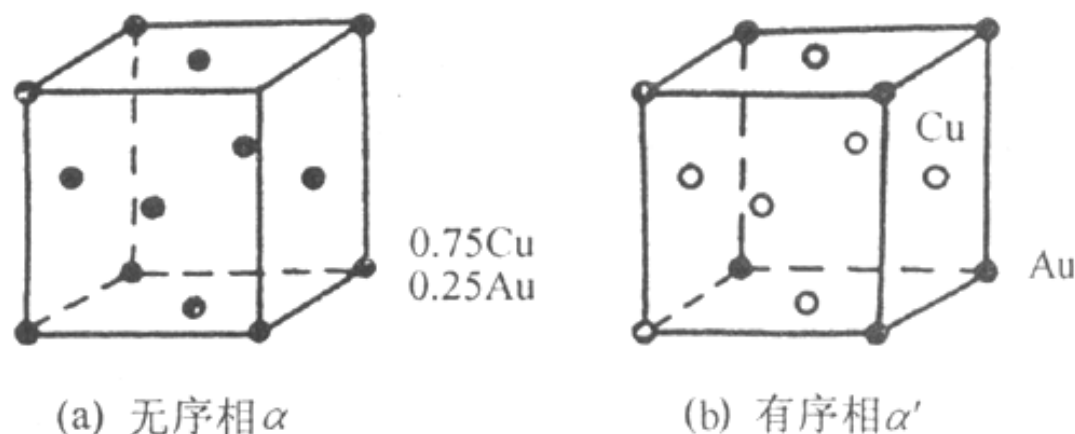


图 10-24 AuCu_3 合金中各类原子所占据的位置

在 AuCu_3 有序相中，
当 hkl 全奇全偶时，
结构因子 $F = f_{\text{Au}} + 3f_{\text{Cu}}$ ；
当 hkl 奇偶混杂时，
 $F = f_{\text{Au}} - f_{\text{Cu}}$ ，
即并不产生消光，
但这些超点阵斑点强度低。
如右图中小斑点所示。



二次衍射斑点

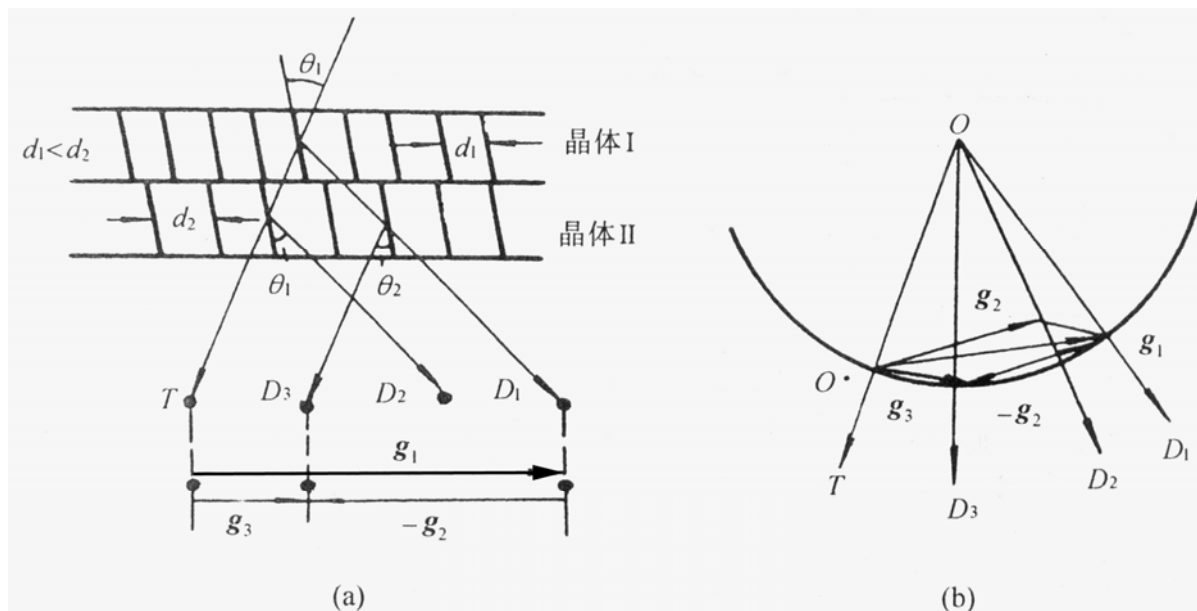


图 10-26 二次衍射斑点示意图

(a)重叠的两个晶体及相应的 g 矢量； (b)用爱瓦尔德球图解表示各 g 矢量之间的相对位置

- ❖ 当入射电子束照射到一个由两层晶体组成的试样上，如果两个晶面接近平行、晶面间距有差别 ($d_1 < d_2$)，第一个晶体的 ($h_1 k_1 l_1$) 面各入射束正好成布拉格角，则有一次衍射束 D_1 产生，而 D_1 和第二个晶体的晶面 ($h_2 k_2 l_2$) 之间也满足布拉格条件，从而产生二次衍射束 D_3 。如图。

•二次衍射

对**FCC**或**BCC**单晶体而言，当上下两晶体取向相同或者某些特定取向时，其二次衍射产生的斑点与正常斑点重合；而当上下两晶体存在取向差时，则在正常斑点的基础上出现卫星斑点。

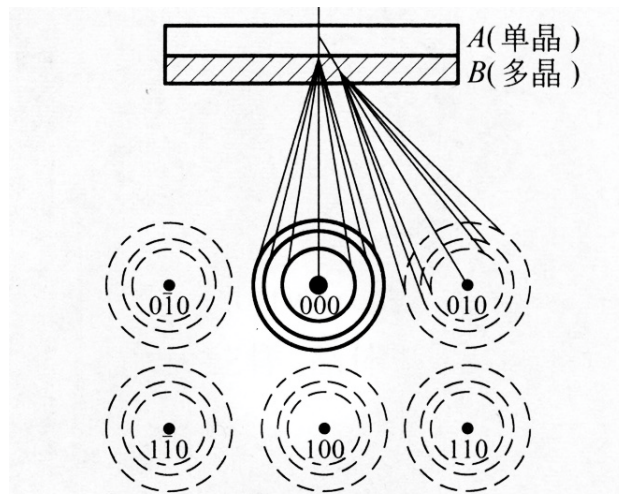
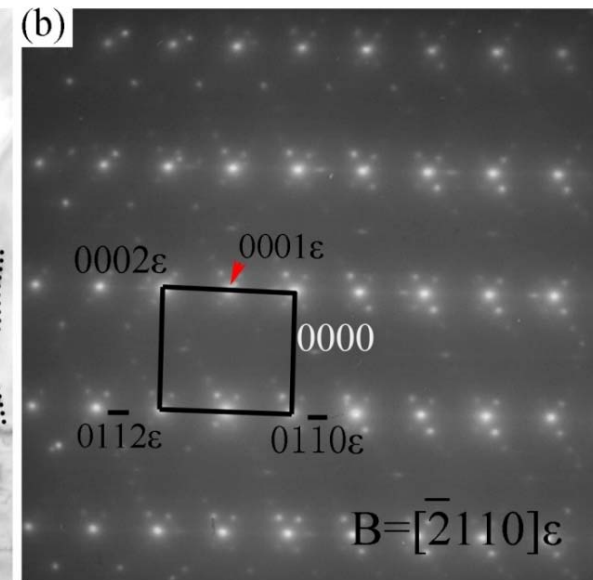
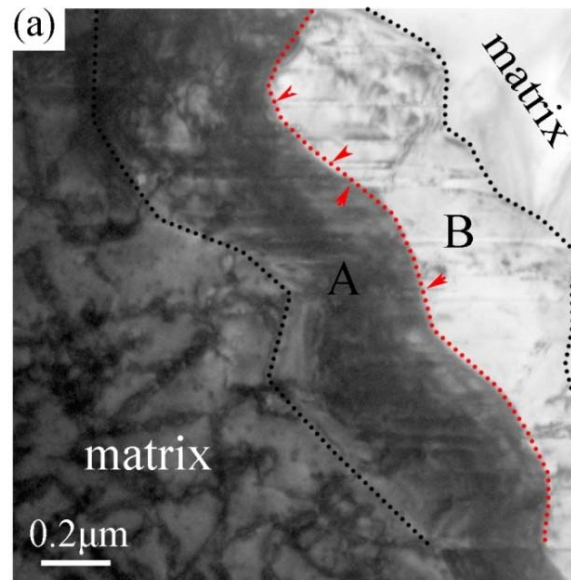
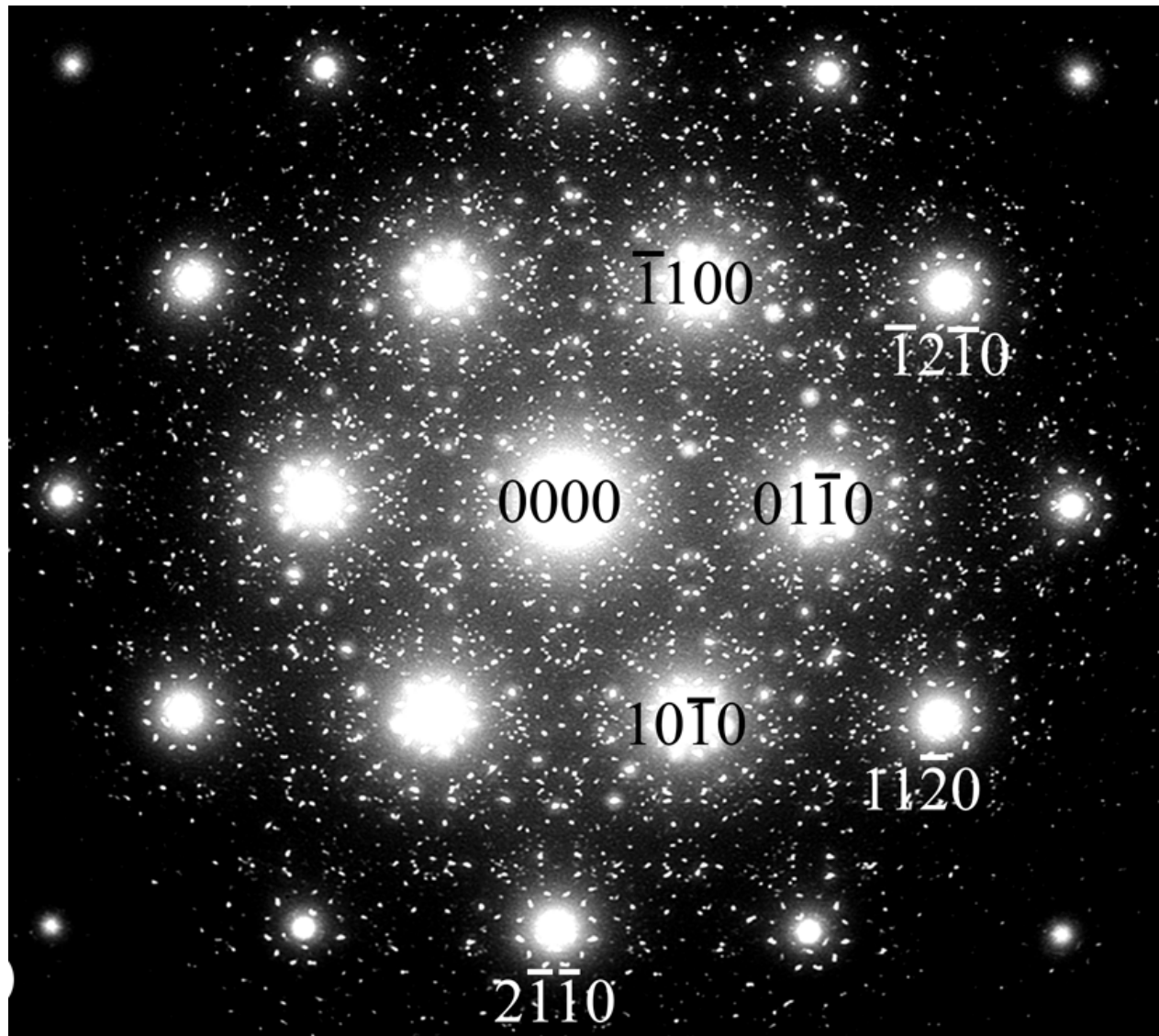


图 4-25 电子束相继通过单晶、多晶试样时产生的电子衍射谱

实点·是一次衍射,虚线---是二次衍射





罗承萍等, **Mg**合金的电子衍射花样

• 织构电子衍射花样

当多晶试样中存在织构时，则其多晶电子衍射花样出现由弧段构成的环状花样。

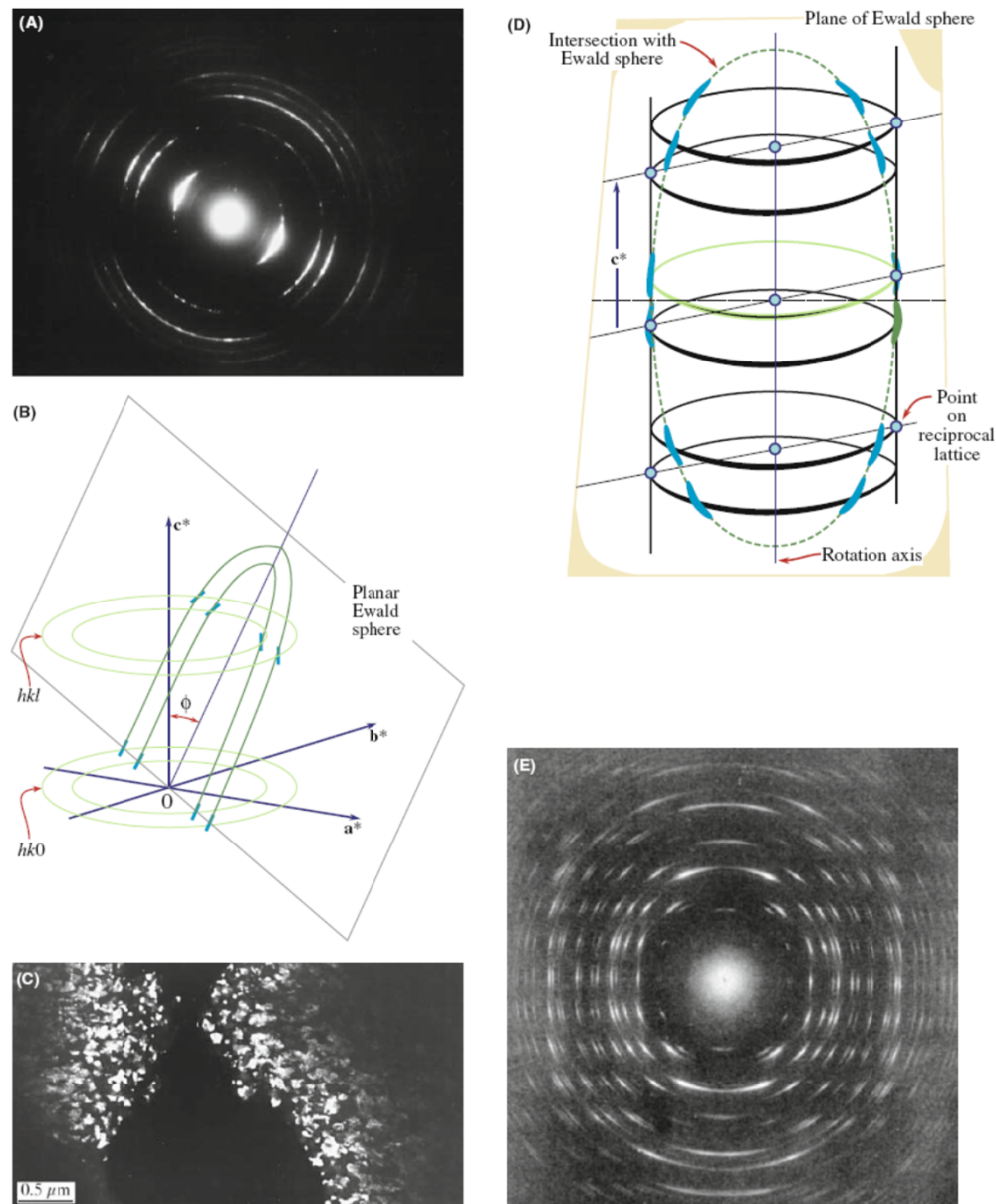


FIGURE 18.10. (A) A textured ring pattern where the rings are more intense over a certain angular range. (B) The corresponding interception of the Ewald sphere (plane) with the reciprocal lattice. (C) A DF image of the textured grains, taken from a brighter portion of one of the hkl rings, showing an equiaxed structure. In (D) the specimen is textured about a direction at an angle to the beam, so the Ewald sphere creates elongated spots or arcs in the DP (E).

孪晶斑点

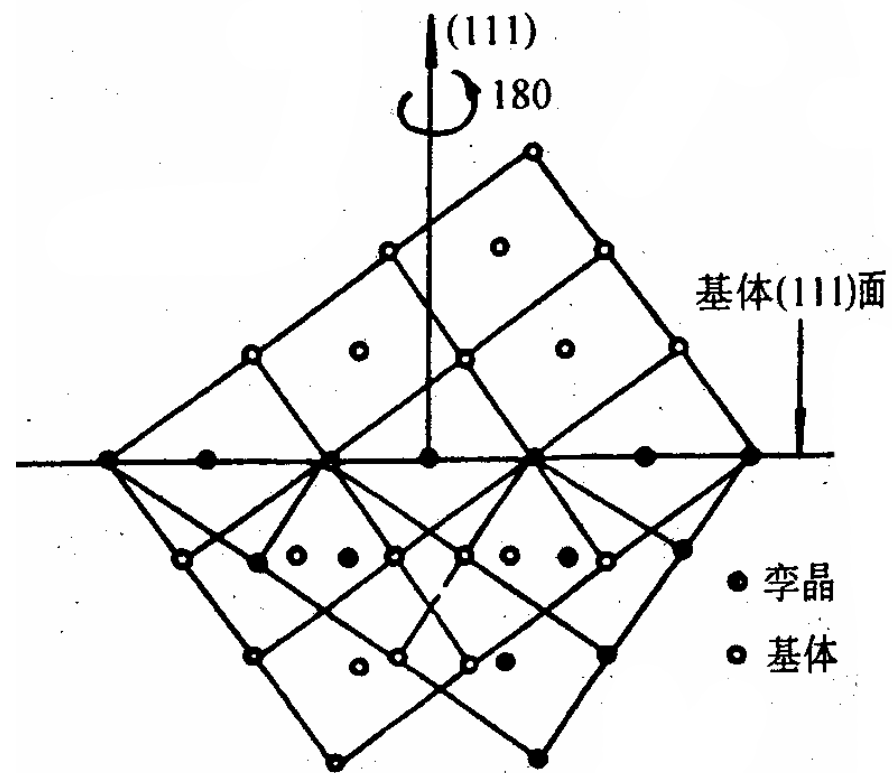
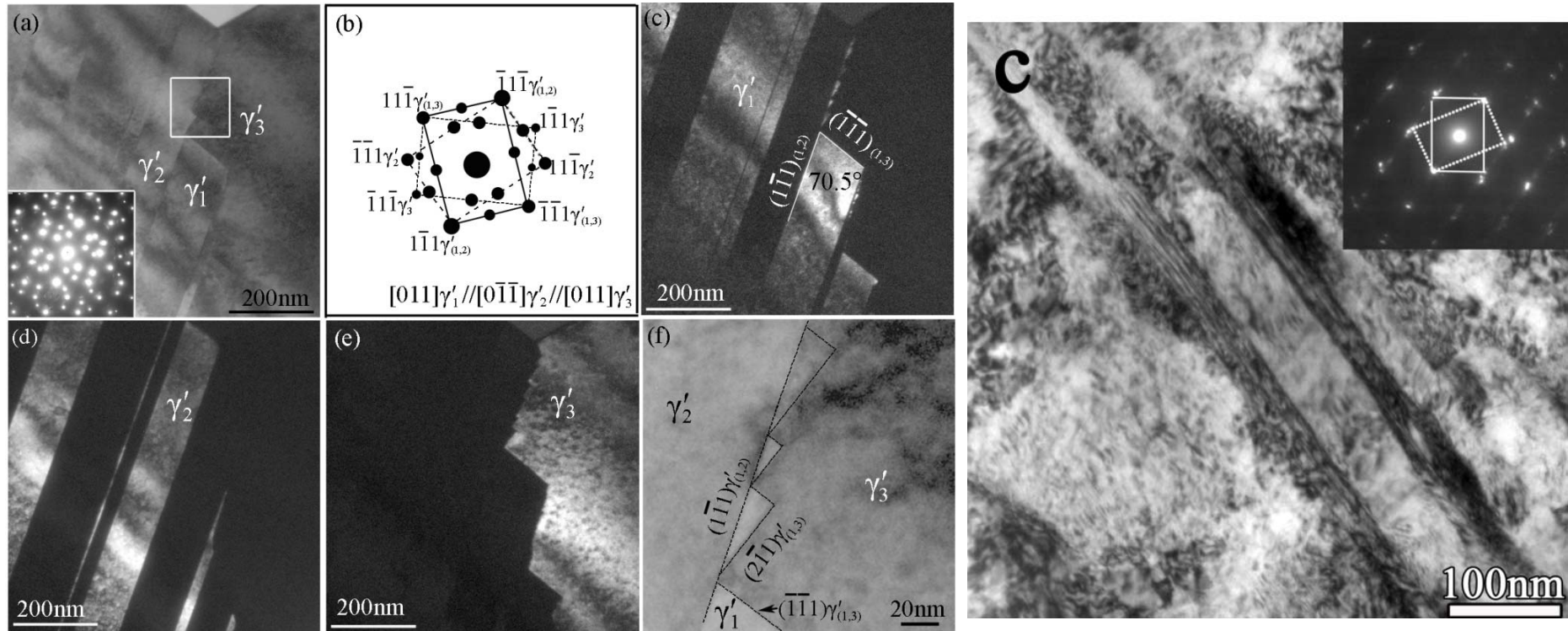


图 10-27 晶体中基体和孪晶的对称关系

孪晶电子衍射花样

- 结构相同的**两部分晶体**按一定的取向关系呈**对称排列**并合在一起，称为孪晶。许多常见的金属及其合金在某些状态下，都可能有孪晶存在，如铜合金、镍合金中的退火孪晶，高碳钢淬火状态下的马氏体孪晶、低碳钢在低温下变形生成的形变孪晶，等等。如果按照孪晶本身的形成方式，可以概括地把孪晶分为两大类型：一类是**生长孪晶**，它是在晶体生长过程中或以扩散为主要方式的相变中形成的。如，液态金属的结晶、气相沉积、电镀层的外延生长、固态下的再结晶及退火过程中生成的孪晶。另一类是在晶体塑性变形过程中或以切变为主要方式的相变中形成的孪晶，称为**形变孪晶**。如，体心立方金属晶体在低温塑性变形过程中形成的孪晶以及马氏体相变过程中形成的孪晶。

下面分别介绍这两类孪晶在透射电镜下所显示的形貌。

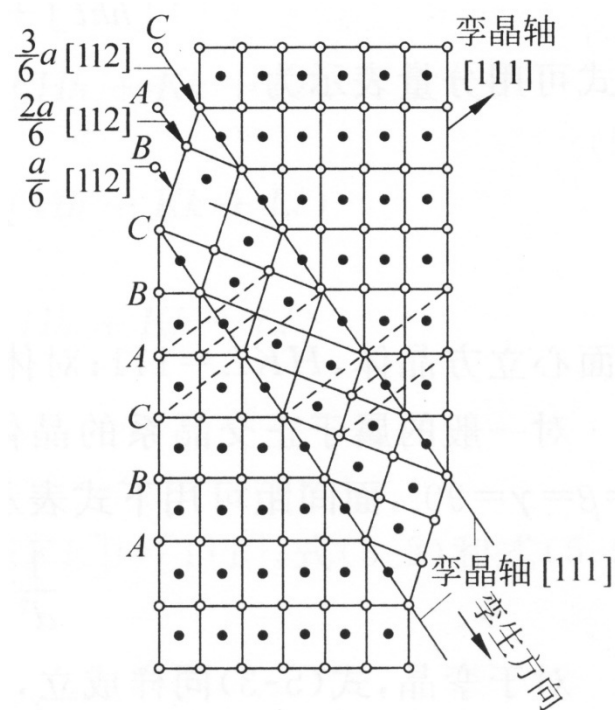


生长 γ' -Fe₄N孪晶

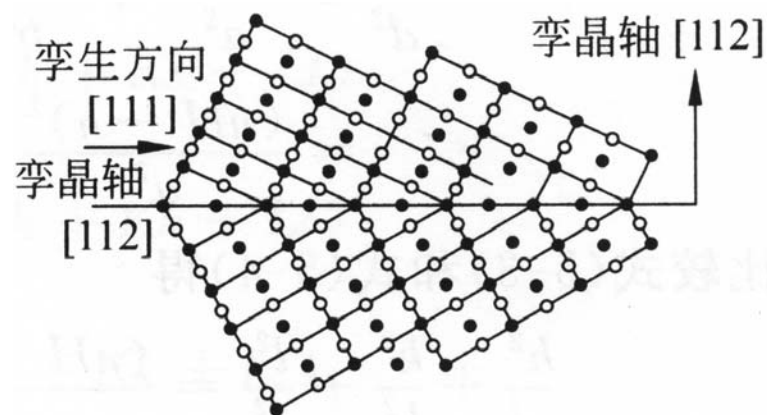
TWIP钢中形变孪晶

下面介绍孪晶的晶体几何特征，孪晶倒易点阵对称关系，然后介绍孪晶电子衍射图的矩阵方法，最后着重讨论立方晶体孪晶电子衍射图的分析与标定。

在面心立方、体心立方和密排六方金属晶体中，孪晶比较常见。面心立方晶体中，孪晶面为 $\{111\}$ ，孪生方向为 $\langle 112 \rangle$ ；体心立方晶体中，孪晶面为 $\{112\}$ ，孪生方向 $\langle 111 \rangle$ 。



FCC晶体

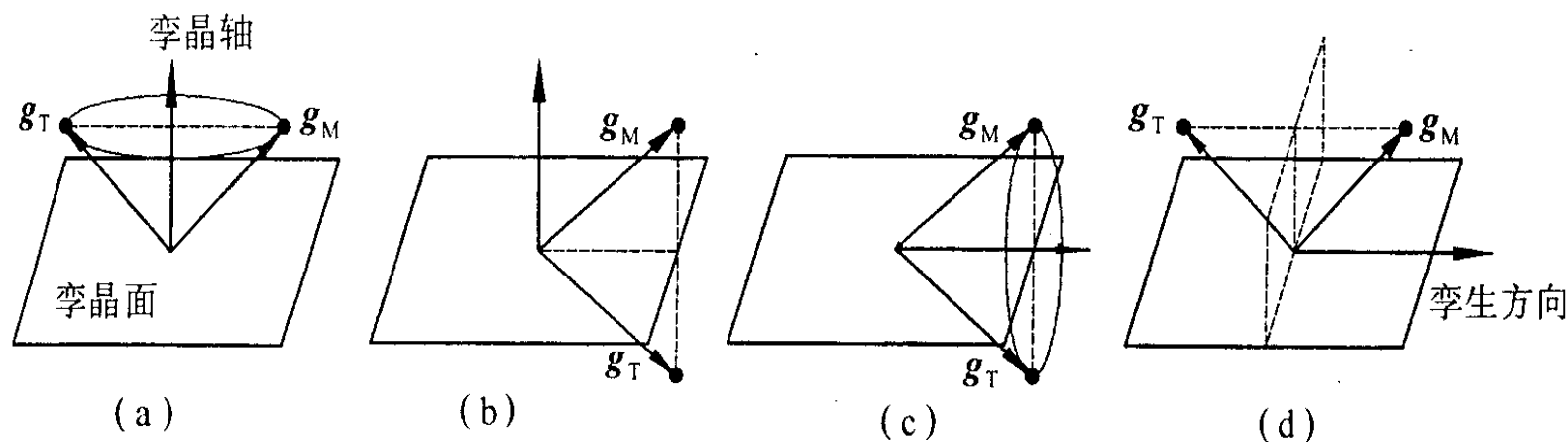


BCC晶体

对于高对称性的立方晶体，我们无须区分反映孪晶和旋转孪晶，因为二者是等效的，这一点已在上述分析中得以证实。体心立方的{**112**}孪晶和面心立方的{**111**}孪晶，如果不考虑孪晶面指数的区别，则它们所反映的对称关系也是等效的，这是体心立方{**112**}孪晶和面心立方{**111**}孪晶相互间所具有的一个重要性质。

孪晶倒易点阵的对称关系

如前所述，晶体点阵和倒易点阵互为倒易而共存，若正点阵中存在孪晶关系，则相应的倒易点阵也一定存在孪晶关系。已经知道，正点阵中基体和孪晶同名指数的晶面具有对称关系，相应的倒易矢量之间也一定有对称关系，正点阵中基体和孪晶同名的晶向有对称关系，相应的倒易平面之间也一定有对称关系。正如孪晶晶体点阵所存在的对称关系那样，孪晶的倒易矢量也存在四种相应的情况(参见下图)。



- (a) 以孪晶轴为轴旋转 180° 对称; (b) 以孪晶面为镜面反映对称;
(c) 以孪生方向为轴旋转 180°; (d) 以垂直于孪生方向的晶面为镜面反映对称

图 3-3 孪晶倒易矢量的四种对称关系

电子衍射图是二维倒易截面阵点排列的反映，孪晶电子衍射图中衍射斑点的排列也能反映孪晶的上述四种对称关系。如果对孪晶电子衍射图的分析，只是为了斑点指数标定，以及确定取向关系等几何方面的问题，则无需区分反映对称和旋转对称，四种对称关系可以简化为两种旋转对称关系。利用基体和孪晶的同名倒易矢量相对于孪晶轴或孪生方向有二次旋转对称关系这一性质，只要将基体的倒易阵点绕孪晶轴或孪生方向旋转 **180°** ，就可以得出与其同名的孪晶倒易阵点，这是分析孪晶电子衍射图的基础。

右下图是二次旋转孪晶基体倒易矢量和同名指数的孪晶倒易矢量相对孪晶轴对称分布的示意图。因为 $\mathbf{g}_M$ 绕孪晶轴 $\mathbf{r}_A$ 旋转 180° 后将与同名指数的 $\mathbf{g}_T$ 相重合，所以二者与 $\mathbf{r}_A$ 之间的夹角相等，且矢量长度也相等，因此有

$$\mathbf{g}_M \cdot \mathbf{r}_A = \mathbf{g}_T \cdot \mathbf{r}_A$$

$$hU+kV+lW = h^tU+k^tV+l^tW \quad (3-1)$$

$\mathbf{g}_M$ ——基体倒易矢量，其指数为 $(hkl)_M$

$\mathbf{g}_T$ ——孪晶倒易矢量，其指数为 $(hkl)_T$ ；

$\mathbf{g}_A$ ——孪晶面所对应的倒易矢量，其指数为 $[HKL]$ ；

$\mathbf{r}$ ——孪晶轴(孪晶面的法线)，其指数为 $[uvw]$ ；

$h^t k^t l^t$ -孪晶倒易矢量 $\mathbf{g}_T$ 在基体倒易点阵坐标系统中的指数。

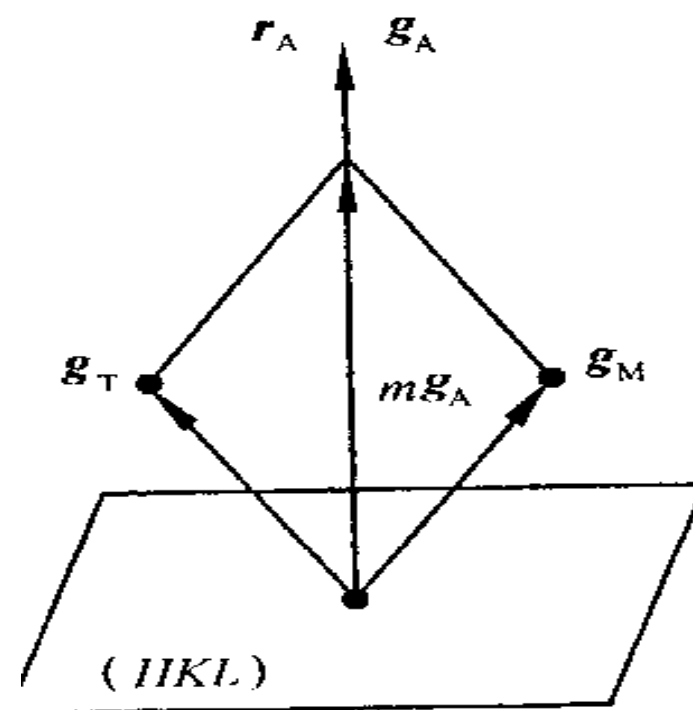
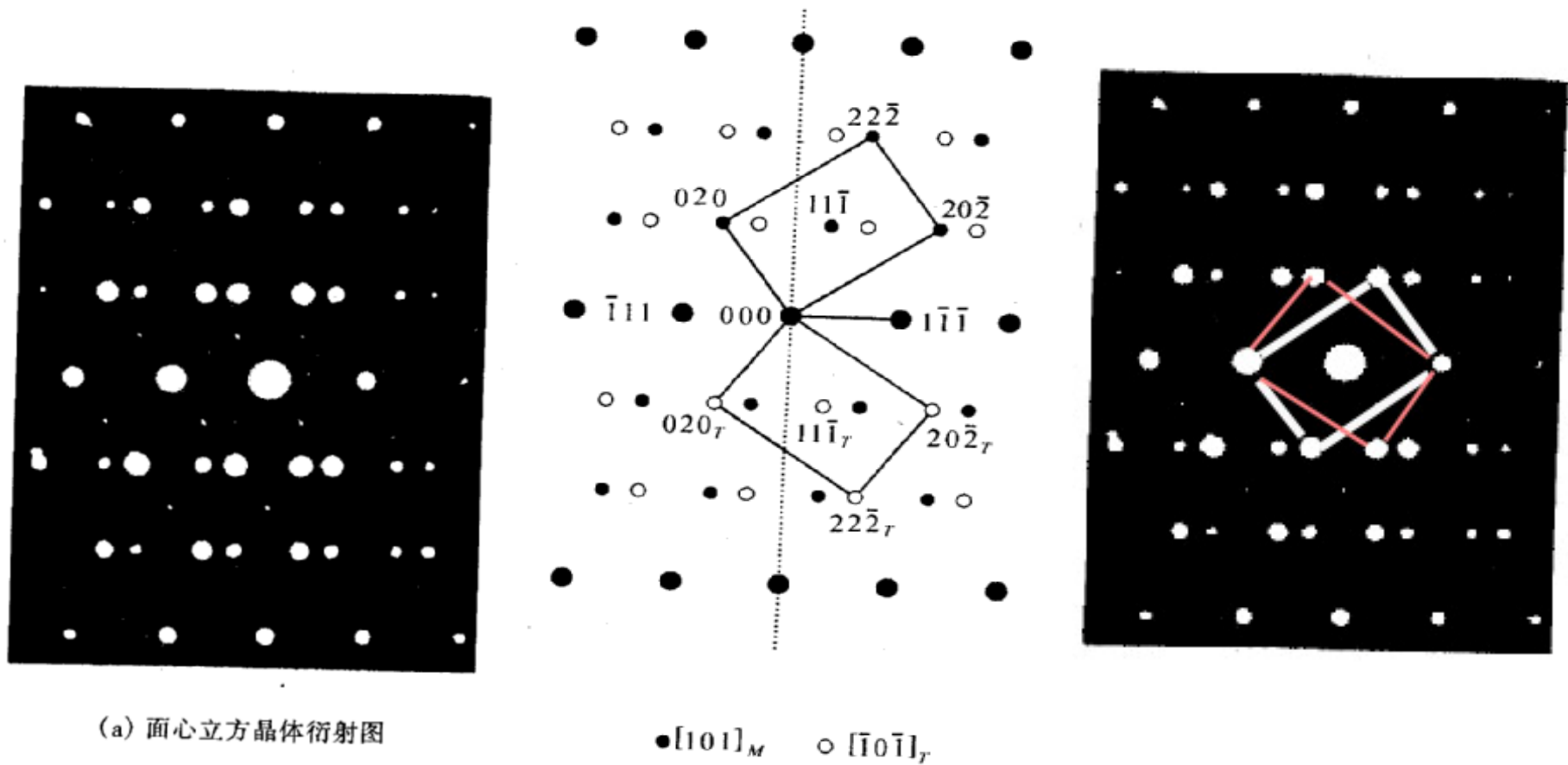


图 3-4 基体与孪晶倒易矢量的对称关系

例 1 已知下图 (a) 是面心立方金属孪晶，当孪晶面与入射束平行时获得的电子衍射图，试标定其指数。



(a) 面心立方晶体衍射图

● $[101]_M$ ○ $[101]_T$

(b) 标定结果

面心立方孪晶衍射谱

对面心立方晶体而言，其{111}孪晶面只有4种可能；体心立方晶体的{112}孪晶面有12中可能。因此计算机很容易按照下列公式计算出面心立方晶体和体心立方晶体的全部孪晶倒易点在基体倒易空间中的位置。可制得标准的孪晶衍射位置表或者衍射图谱。

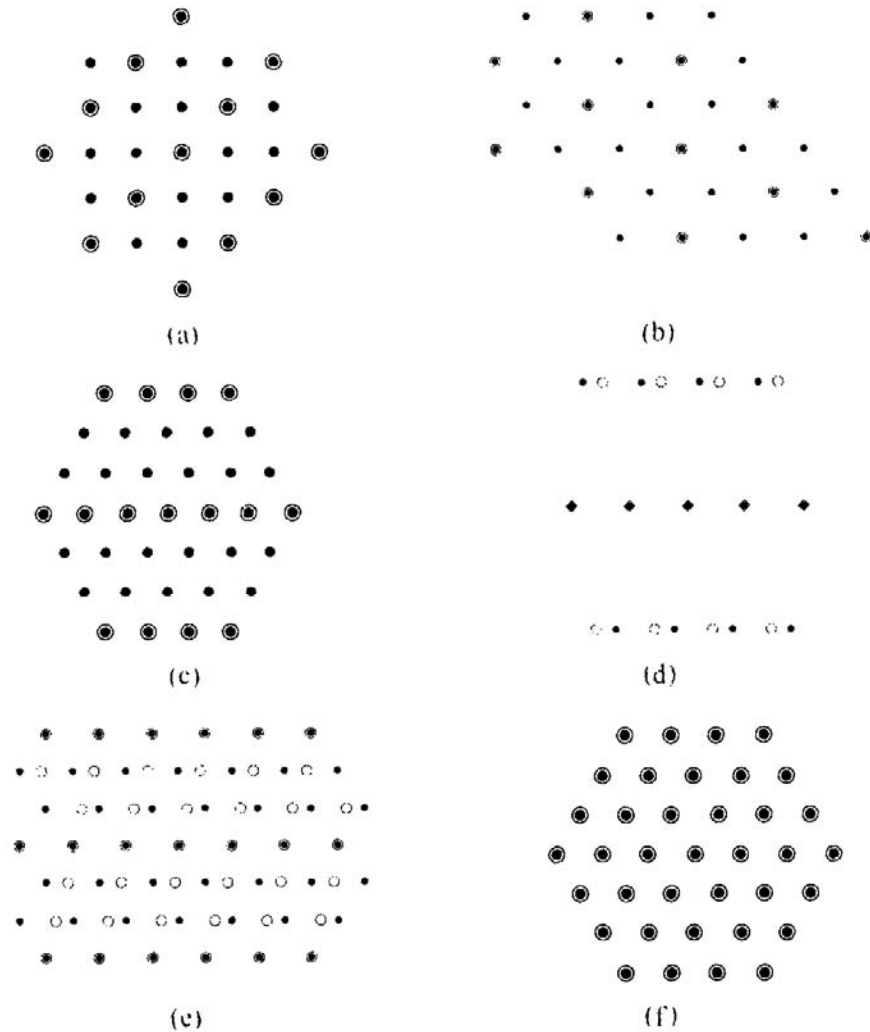
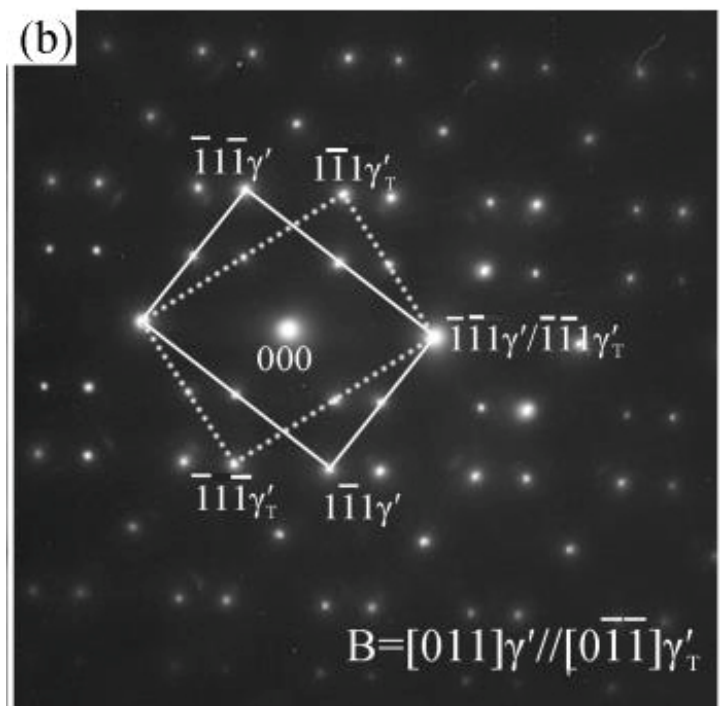
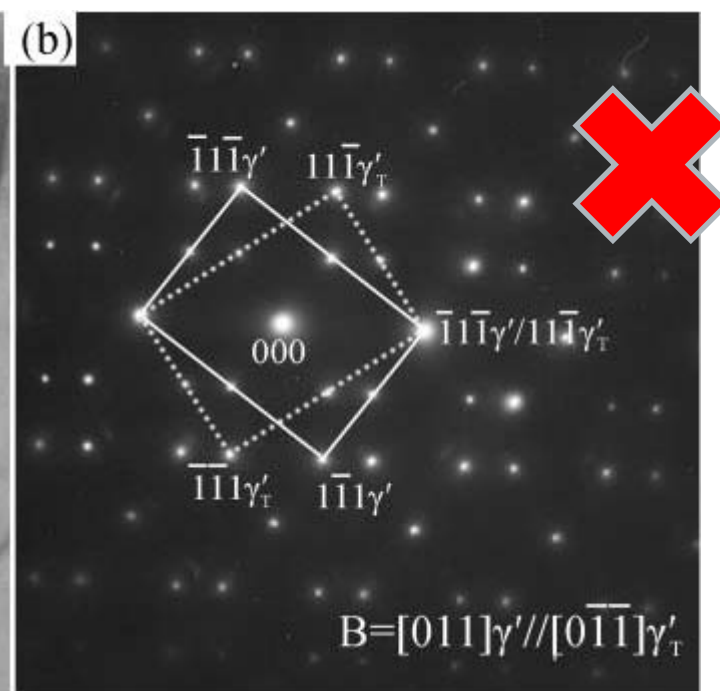
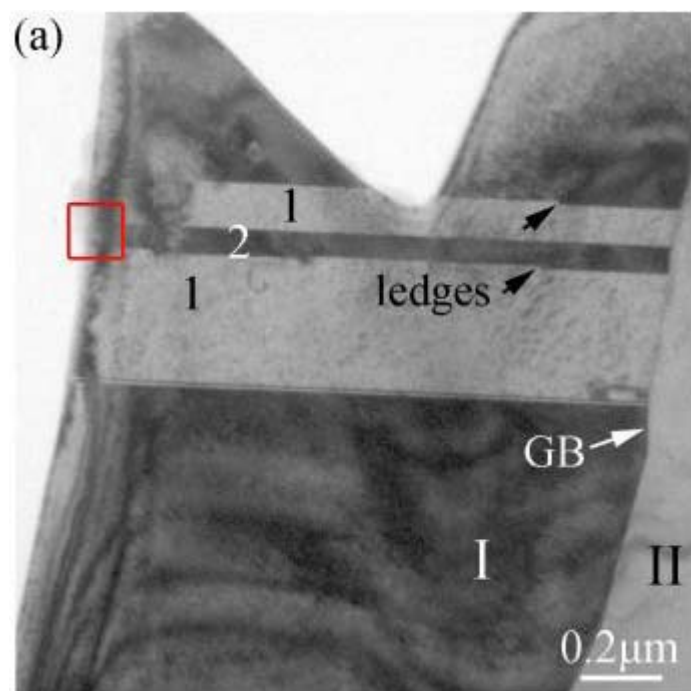
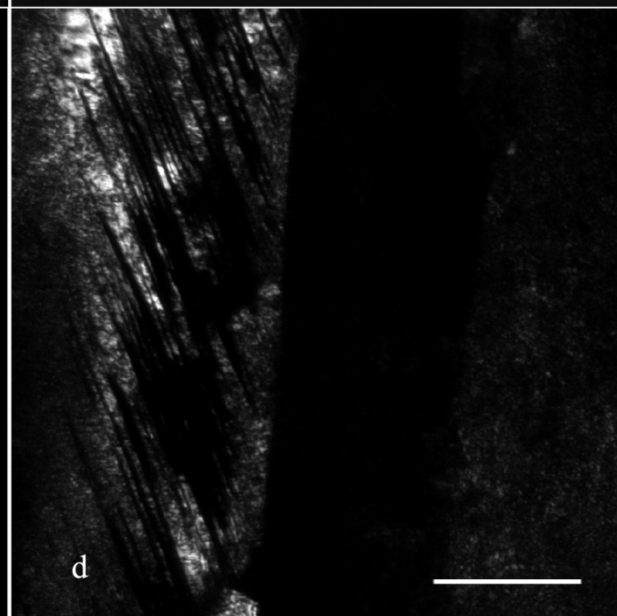
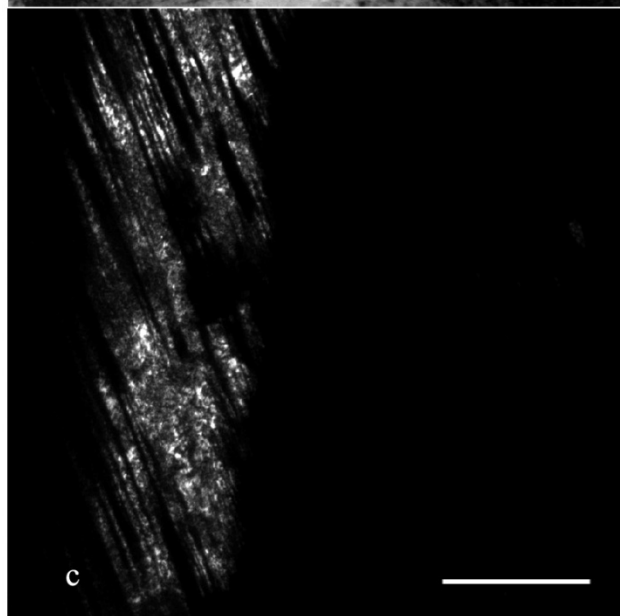
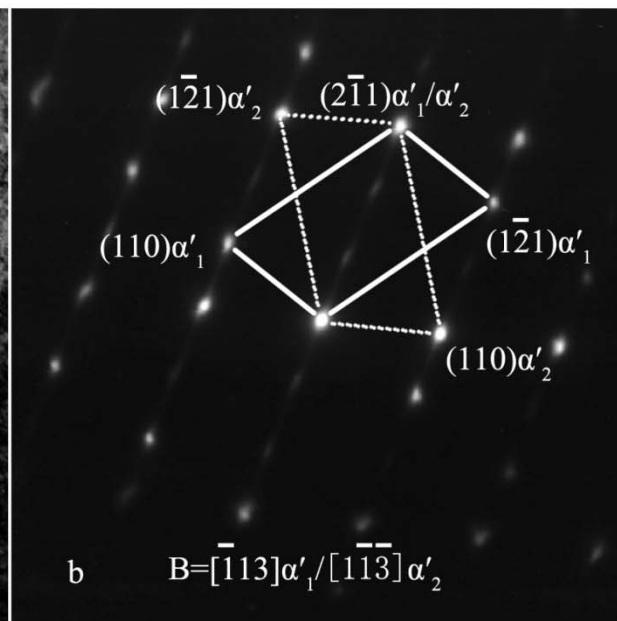
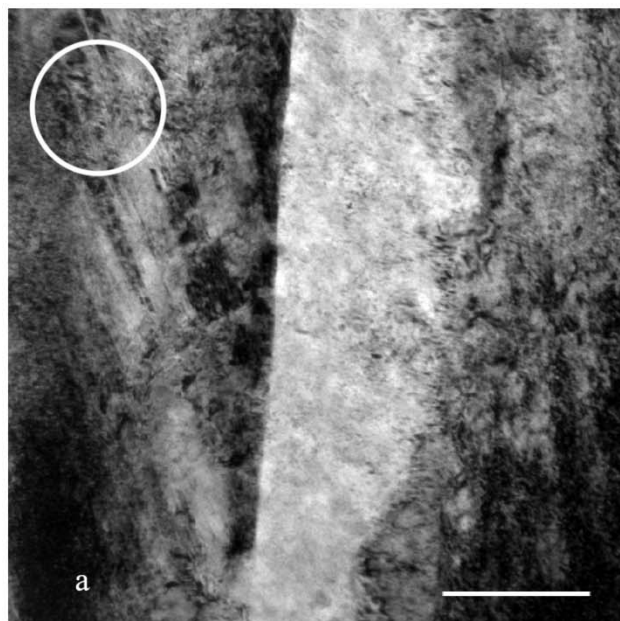


图 5-3 孪晶电子衍射谱

(a) (100) $\bar{h}$ ($\bar{1}22$) $\cdot$ T; (b) (011) $\cdot$ //(411) $\cdot$ T; (c) ($\bar{1}\bar{1}$) $\cdot$ //($\bar{1}5\bar{1}$) $\cdot$ T;
(d) (123) $\cdot$ //(321) $\cdot$ T; (e) (0 $\bar{1}\bar{1}$) $\cdot$ //(0 $\bar{1}\bar{1}$) $\cdot$ T; (f) (111) $\cdot$ //(111) $\cdot$ T

$$\left. \begin{aligned} h' &= \frac{2p}{p^2 + q^2 + r^2}(hp + kq + lr) - h \\ k' &= \frac{2q}{p^2 + q^2 + r^2}(hp + kq + lr) - k \\ l' &= \frac{2r}{p^2 + q^2 + r^2}(hp + kq + lr) - l \end{aligned} \right\}$$





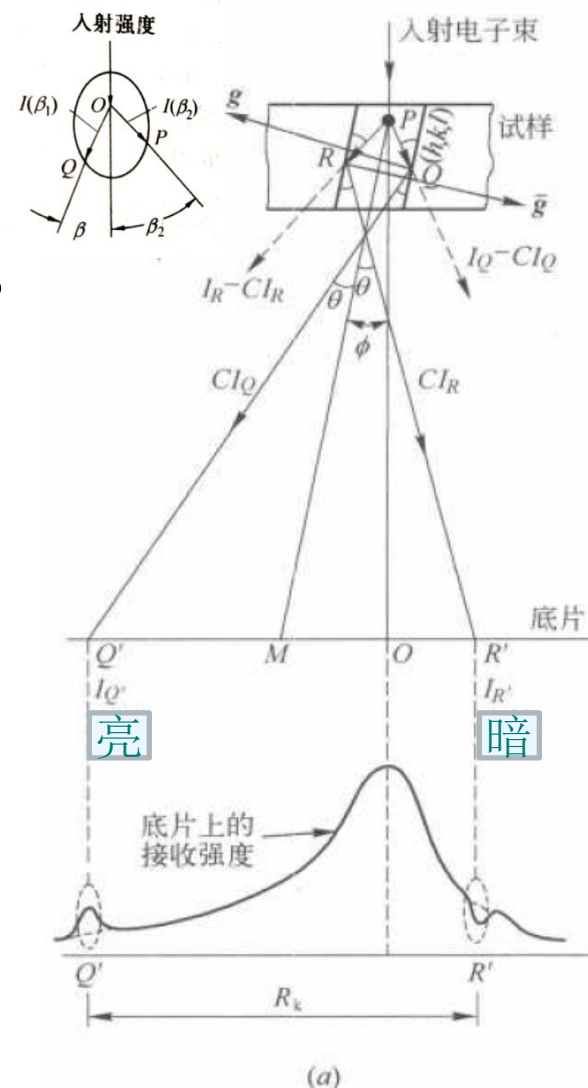
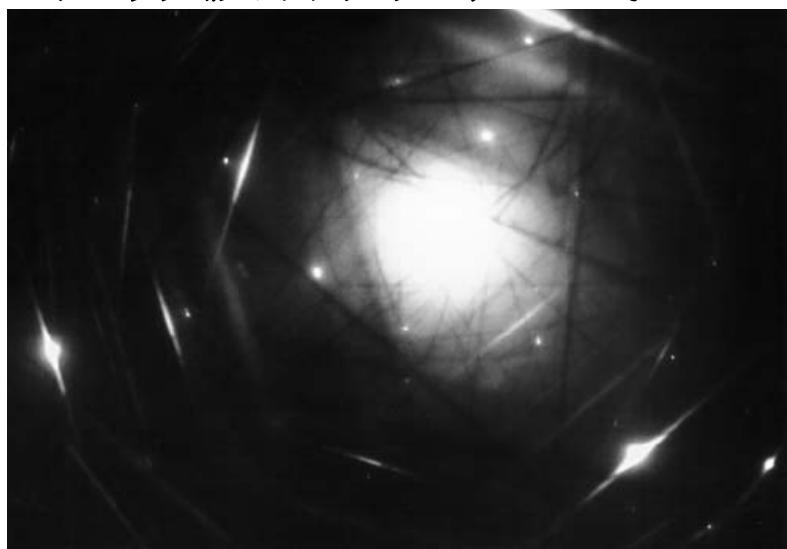
- ❖ 在一般情况下立方系的面心立方晶体和体心立方晶体中基体与孪晶的倒易点阵有 $\frac{1}{3}$ 相重合。故孪晶衍射斑点的出现是在特定的取向下的，不能认为在衍射花样上没有孪晶斑点就断定试样中不存在孪晶。

一、菊池衍射原理及菊池线分析方法

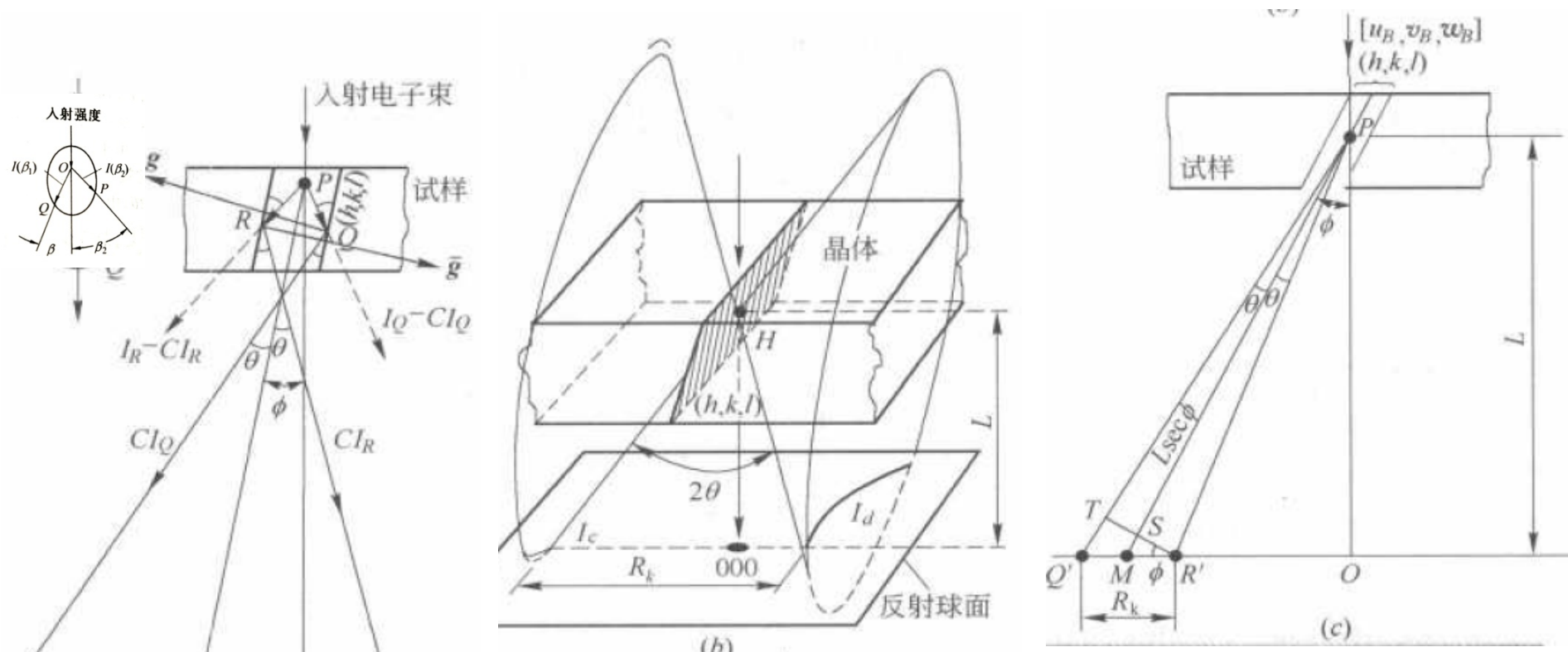
1.1 菊池衍射原理

当试样晶体比较完整，沿电子束入射方向的试样厚度又比较合适时，衍射谱上经常出现成对的线状花样。

1928年菊池（S.Kikuchi）首先对这种线状花样进行了解释，因此这种线状花样被称为菊池线。



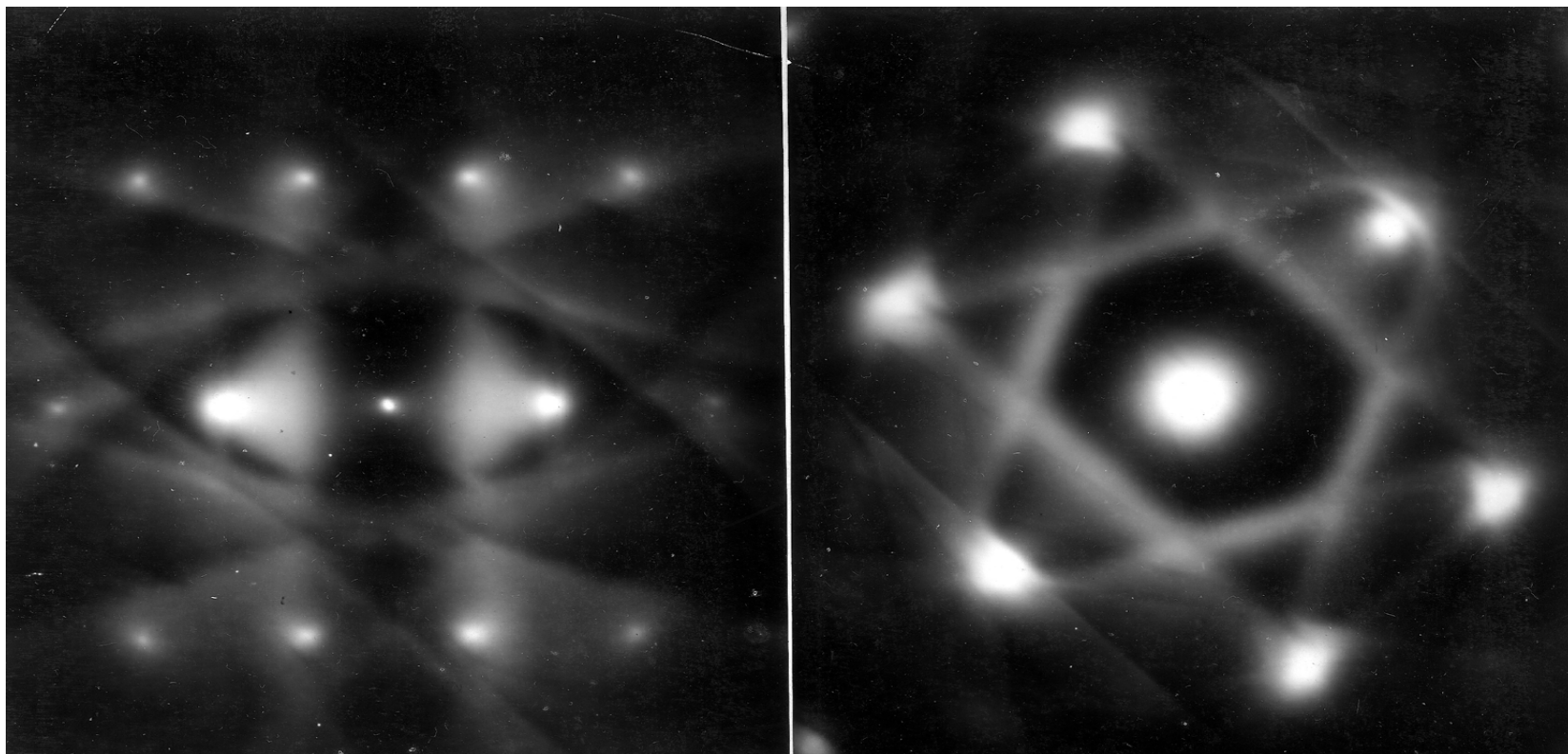
1.2 菊池花样形成几何学

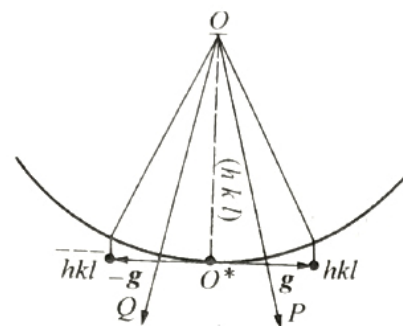


$$\begin{aligned}
 TR' &= R_k \cos \phi = TS + SR' \\
 &= 2TS = 2(\theta \cdot L \sec \phi) \\
 &= 2(\theta \cdot L \cdot 1/\cos \phi) \\
 R_k \cos^2 \phi &= 2\theta \cdot L \\
 \theta &= R_k \cos^2 \phi / 2L
 \end{aligned}$$

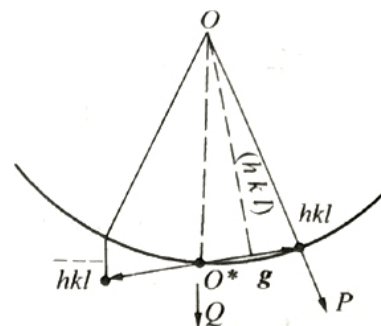
$$\begin{aligned}
 \frac{1}{d} &= (2\sin \theta) / \lambda \approx 2\theta / \lambda \\
 \frac{1}{d} &= (R_k \cos^2 \phi) / L\lambda \\
 R_k &= L\lambda \sec^2 \phi \left(\frac{1}{d} \right) \\
 R_k &= L\lambda \sec^2 [\tan^{-1} OM / L] \left(\frac{1}{d} \right)
 \end{aligned}$$

菊池衍射花样

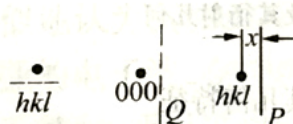
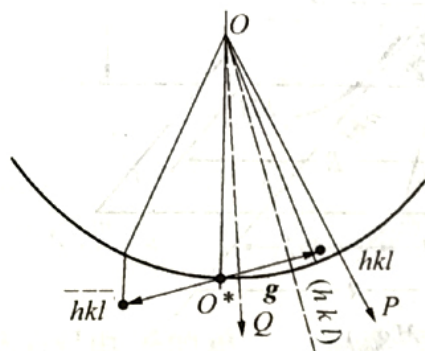




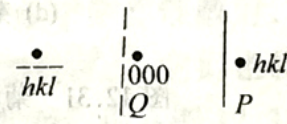
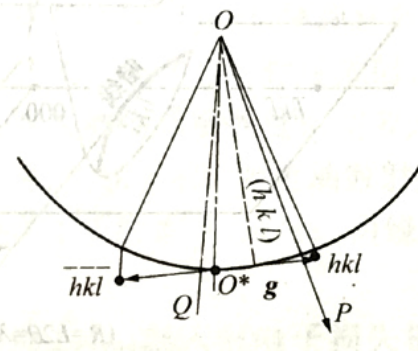
(a) 对称入射($s_{+g}=s_{-g}$)($B \parallel [uvw]$)



(b) 双光束条件($s_{+g}=0$)



(c) $s_{+g} > 0$



(d) $s_{+g} < 0$

图 12.32 不同入射条件(不同晶体位向)下菊池线对的位置

2.3 菊池图的用途

引用**Williams**书上的话：

KIKUCHI MAP

Making a Kikuchi map is a highly recommended exercise if you are going to be doing detailed diffraction-contrast images/SAD experiments because familiarity with the Kikuchi map will help you to immediately identify the orientation of your specimen on your TEM screen.

TEM操作过程中经常利用菊池图来倾转试样，以找到需要的晶带轴。因此对菊池图的熟悉非常重要！

2.3 菊池花样的应用

- (1) 精确测定取向关系；
- (2) **Bragg**衍射时的偏离矢量**S**测定；
- (3) 晶体结构的测定（主要在**EBSD**中采用）。

本章重点

- ❖ 电子衍射与X射线衍射相比有什么特点
- ❖ 特定结构的电子衍射花样的特点
- ❖ 厄瓦尔德球图解法与布拉格定律的关系
- ❖ 结构因子与倒易斑点的权重
- ❖ 电子衍射基本公式： $K=\lambda L=Rd$
- ❖ 有效相机常数
- ❖ 怎样实现电子衍射操作
- ❖ 掌握立方晶系的单晶电子衍射花样的标定方法
- ❖ 掌握立方晶系的多晶电子衍射花样的标定方法
- ❖ 了解面心立方孪晶的特点
- ❖ 菊池花样的形成原因和应用。