

# 上讲回顾

## ◆ 金属的力学性能

1、弹性：**弹性模量** $E = \sigma_e / \epsilon_e$

2、塑性：**端面收缩率** $\psi$ ，**伸长率(延伸率)** $\delta$

3、强度：**屈服强度**，**抗拉强度**，**疲劳强度**，**高温强度**

4、硬度：布氏硬度，洛氏硬度等

5、韧性：冲击韧性

6、比强度

## ◆ 金属的其他性能

1、物理性能

2、化学性能

3、工艺性能

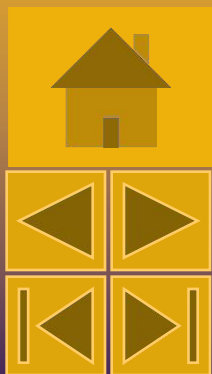


# 工程材料及成型技术基础



## 第二章 金属的晶体结构

工程学院  
邵 威

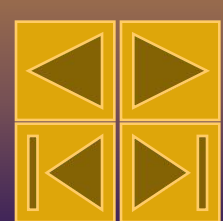




## 第二章 金属的晶体结构

# Crystal Structure of Metal

- ❖ 晶体结构的基础知识
- ❖ 实际金属的晶体结构与晶体缺陷





# 第一节 晶体结构的基础知识

## 一.晶体与非晶体的基本概念

### 1.晶体 ( crystal ) 的基本概念:

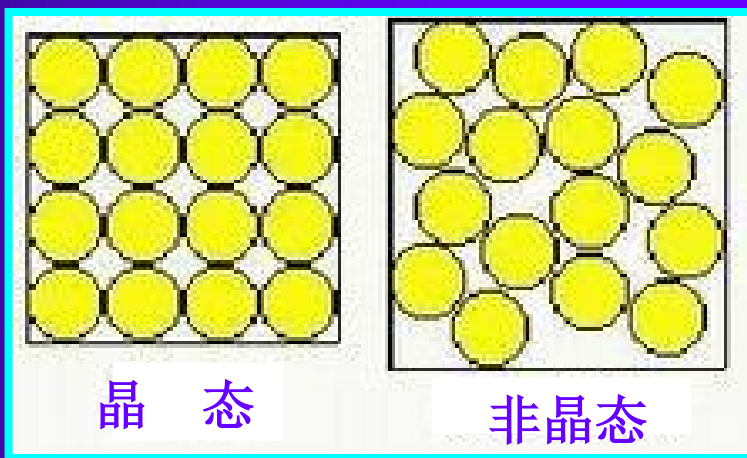
物体内部的原子 ( 或分子 ) 在三维空间中, **按一定规律作周期性排列**的固体。

**晶体物质所具有的性质:** 固定的熔点; **各向异性**等。 例如, 所有的金属、食盐等。

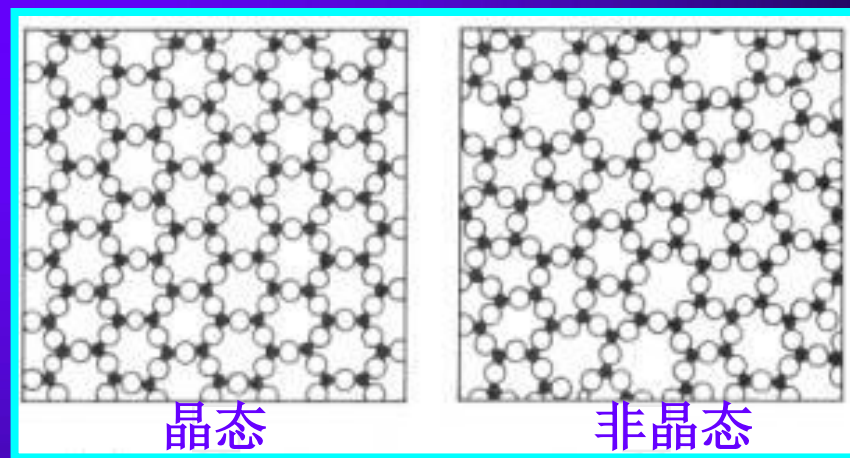


## 2.非晶体 ( non- crystal )的基本概念:

物体内部的原子呈散乱分布, 其物理和力学性能各向同性。例如, 普通玻璃、松香等。



金属的结构

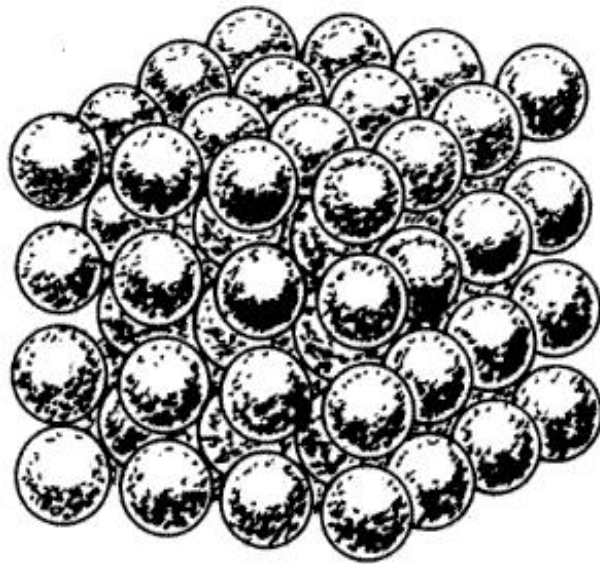


SiO<sub>2</sub>的结构

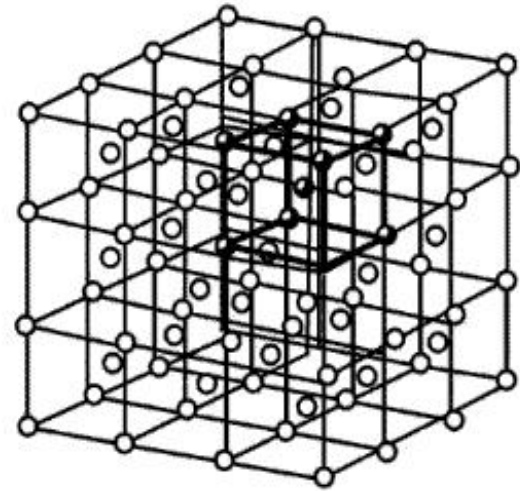


## 二.晶体学(crystallography)的基本知识

1.晶格(crystal lattice): 用以描述晶体中原子排列规律的空间点阵格架。



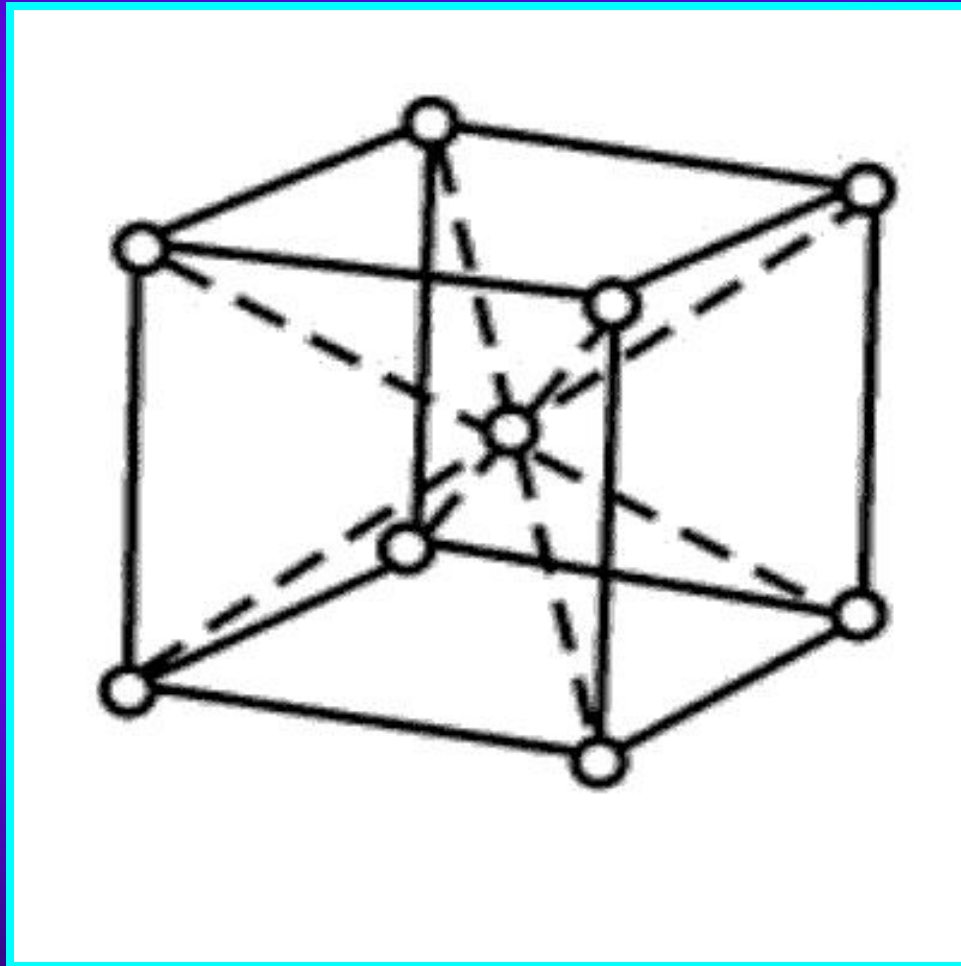
(a) 原子堆砌模型



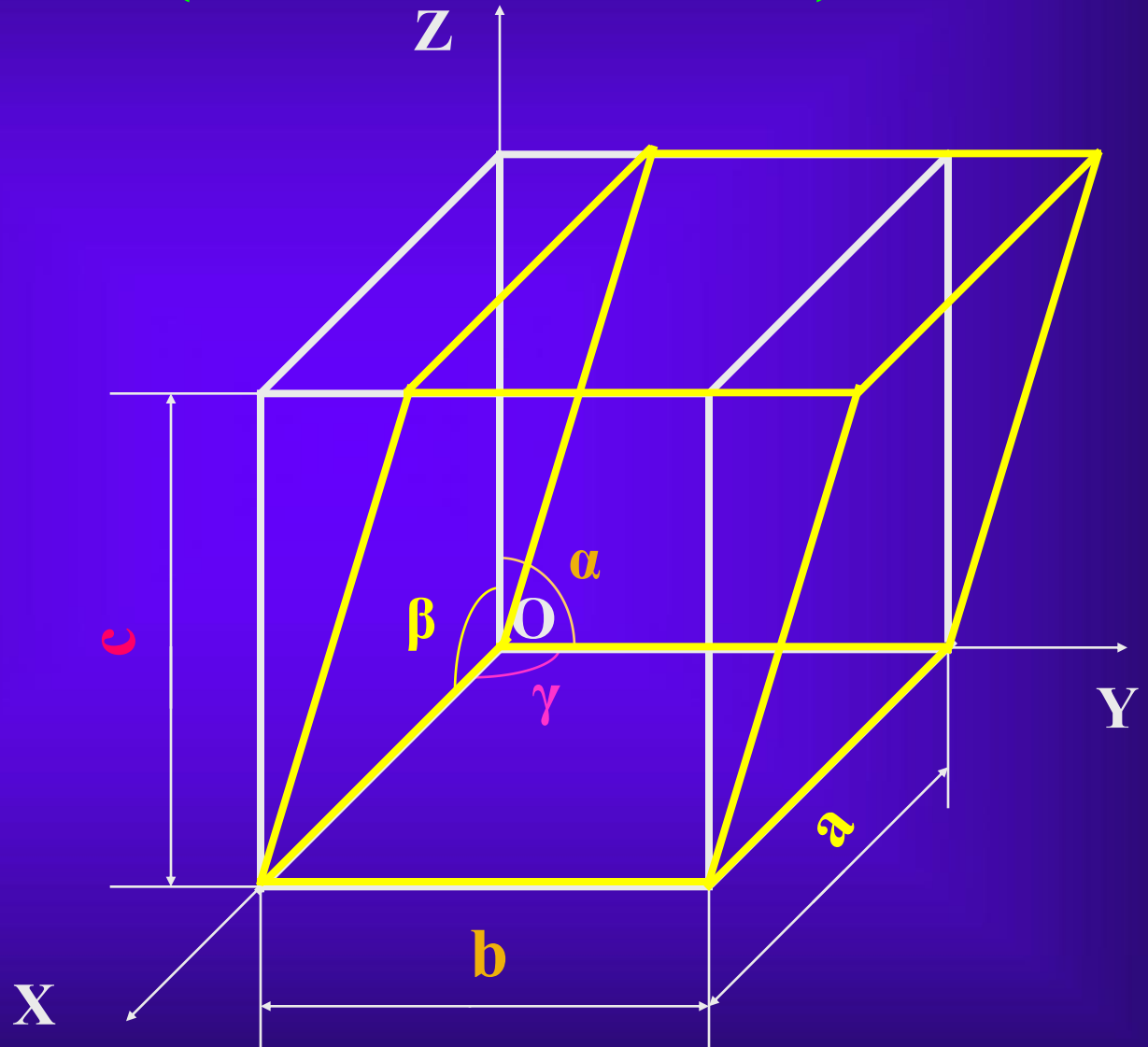
(b) 晶格



2.晶胞 ( unit cell ):能完全反映晶格特征的最小几何单元。



### 3. 晶格常数 ( lattice constant ) :



## 4.晶系与布拉菲点阵

1855年,法国学者布拉维(Bravais)用数学方法证明了空间点阵共有且只能有十四种,并归纳为七个晶系:



## 4.晶系与布拉菲点阵

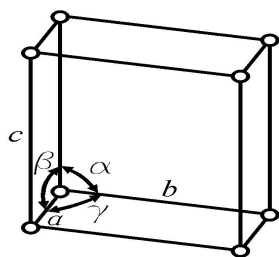
1855年,法国学者布拉维(Bravais)用数学方法证明了空间点阵共有且只能有十四种,并归纳为七个晶系:

- 1). 三斜晶系  $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$  ;
- 2). 单斜晶系  $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$  ;
- 3). 正交晶系  $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ;
- 4). 六方晶系  $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$  ;
- 5). 菱方晶系  $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ;
- 6). 正方晶系  $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ;
- 7). 立方晶系  $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ;

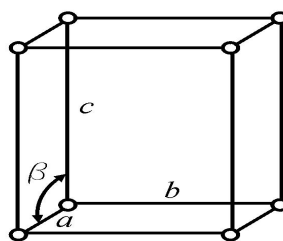




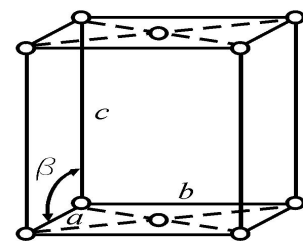
# 布拉菲空间点阵晶胞



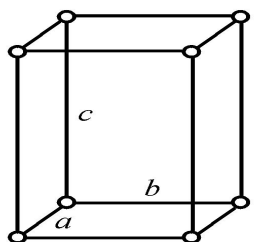
1



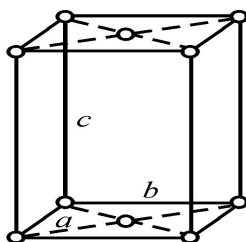
2



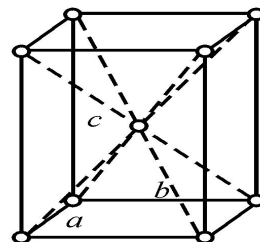
3



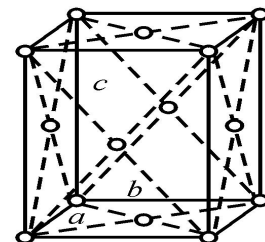
4



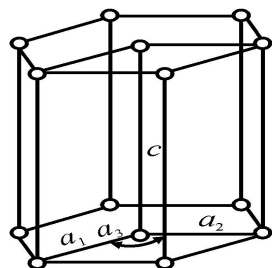
5



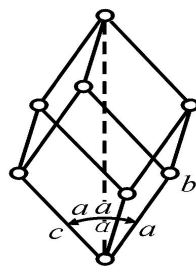
6



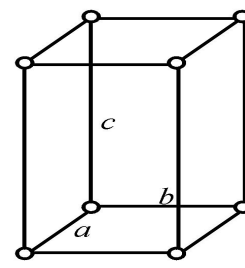
7



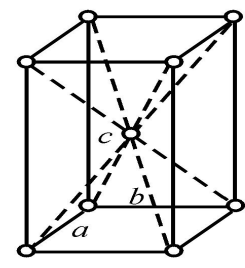
8



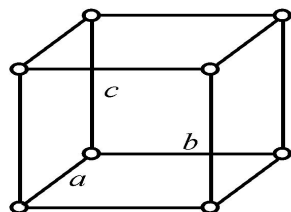
9



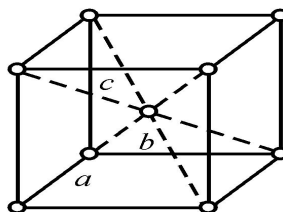
10



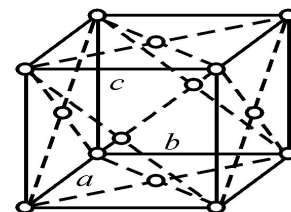
11



12



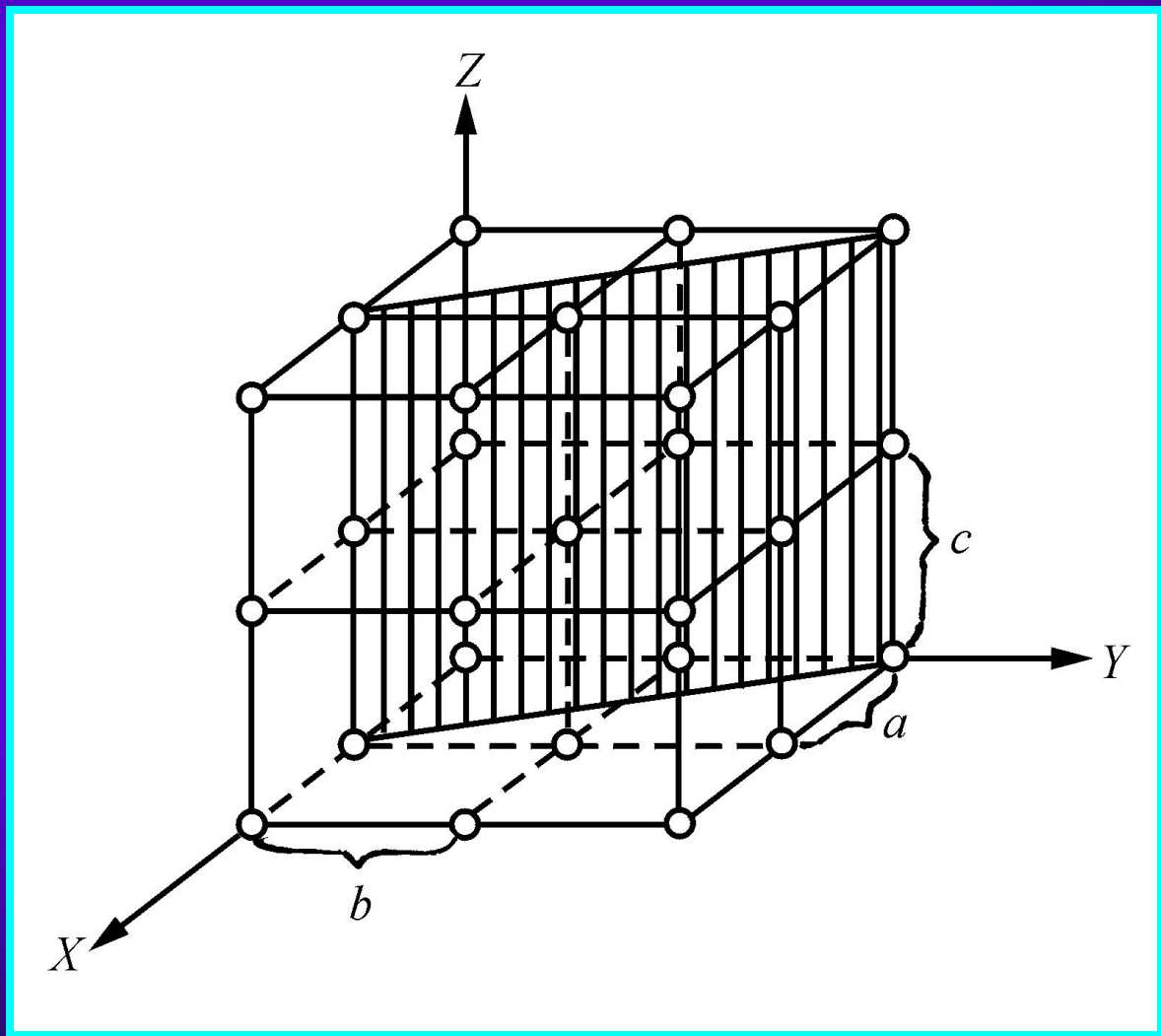
13



14

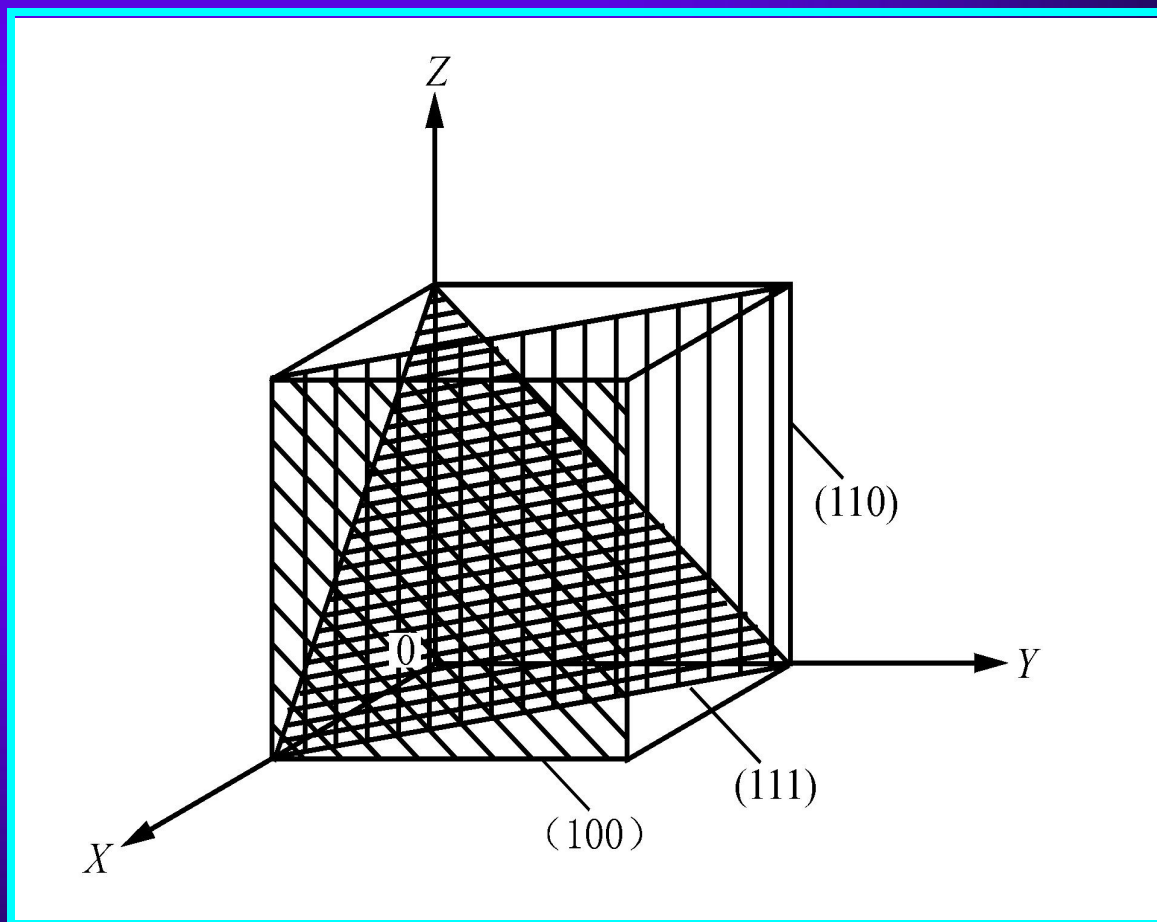


**5.晶面(crystal face):** 在晶格中由一系列原子所构成的平面称为晶面。

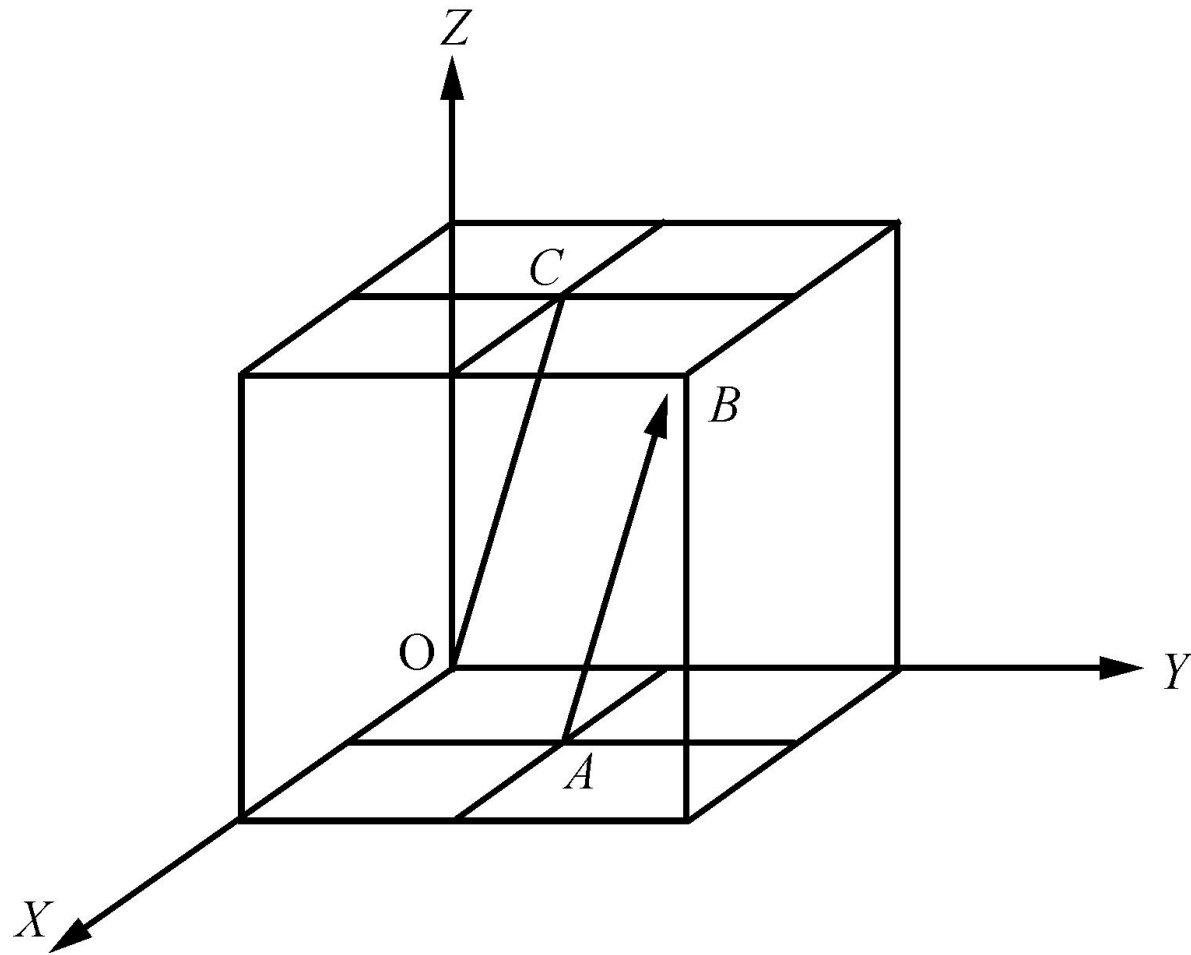


## 6.晶面指数(indices of crystallographic plane):用密勒(Miller)指数对晶格中某一晶面进行标定。

使用方法:  
设置坐标;  
求截距;  
取倒数。

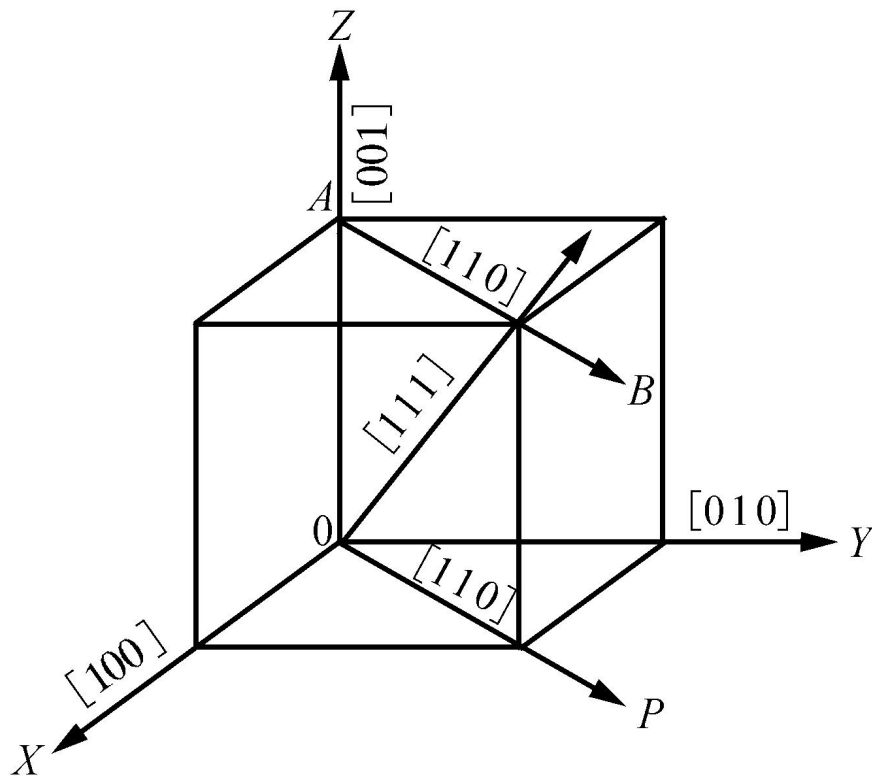


7.晶向(crystal direction): 在晶格中,任意两原子之间的连线所指的方向。



**8.晶向指数:** 用密勒(Miller)指数对晶格中某一原子排列在空间的位向进行标定。

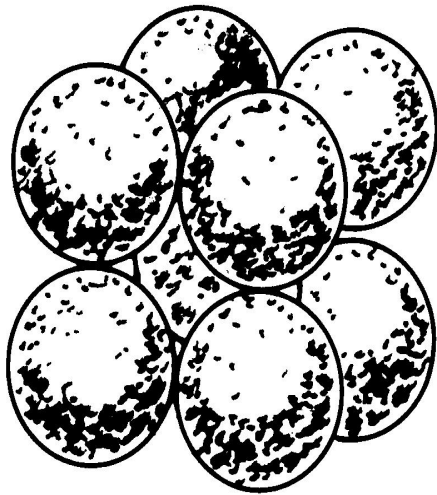
使用方法:  
设置坐标;  
求截距;  
取最小整数。



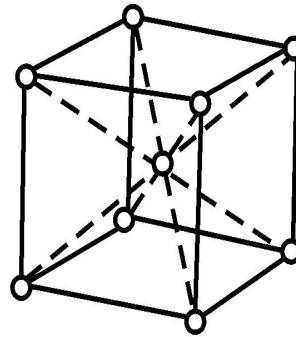
# 三. 常见的三种晶体结构

## 1. 体心立方晶格

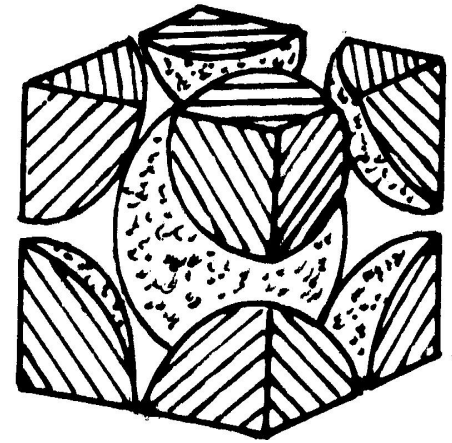
( body-center cubic lattice )



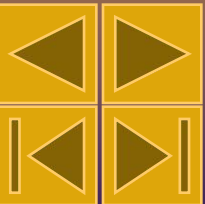
(a)




(b)



(c)





\*晶胞的特征参数:  $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ;

\*晶胞中的原子数:  $n = 8 \times 1 / 8 + 1 = 2$  个

\*原子的半径:  $R = \sqrt{3} \times a / 4$

\*原子的体积:  $v = 4\pi R^3 / 3$

\*致密度:  $K = nV_{\text{原子}} / V_{\text{晶体}} = 0.68 = 68\%$

\*配位数 (N) 是指晶格中与任一原子处于相等距离并相距最近的原子数目。

$N = 8$  (原子间的最近距离  $d = \sqrt{3} \times a / 2$ )





属于体心立方晶格的金属有：

钠 (Na) ; 钾 (K) ; 铬 (Cr) ;

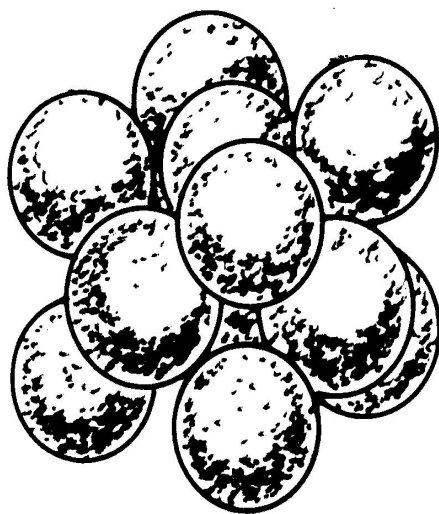
钼 (Mo) ; 钨 (W) ; 钒 (V) ;

钽 (Ta) ; 铌 (Nb) ;  $\alpha$ -铁 ( $\alpha$ -Fe) 等。

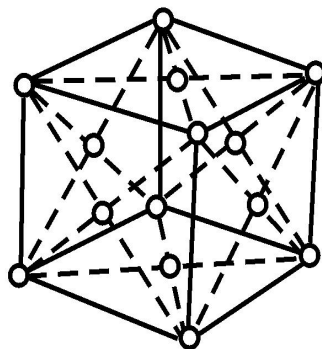


## 2.面心立方晶格

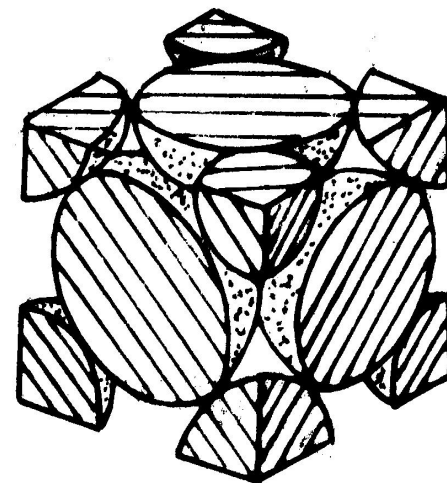
( face-center cubic lattice )



(a)




(b)



(c)





\*晶胞的特征参数:  $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ;

\*晶胞中的原子数:  $n = 8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$  个

\*原子的半径:  $R = \sqrt{2} \times a / 4$

\*原子的体积:  $v = 4\pi R^3 / 3$

\*致密度:  $K = nV_{\text{原子}} / V_{\text{晶体}} = 0.74 = 74\%$

\*配位数 (N) 是指晶格中与任一原子处于相等距离并相距最近的原子数目。

$N = 12$  (原子间的最近距离  $d = \sqrt{2} \times a / 2$ )





属于面心立方晶格的金属有：

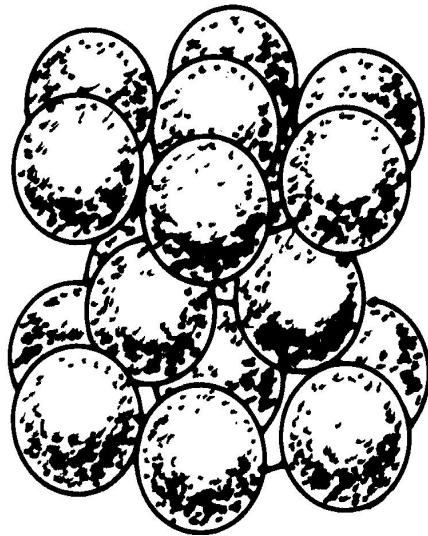
金 (Au) ; 银 (Ag) ; 铜 (Cu) ;

铝 (Al) ; 镍 (Ni) ; 铂 (Pt) ;

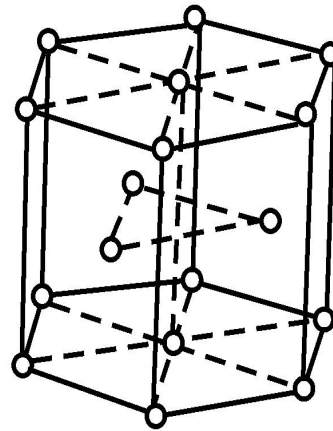
铅 (Pb) ;  $\gamma$ -铁 ( $\gamma$ -Fe) 等。



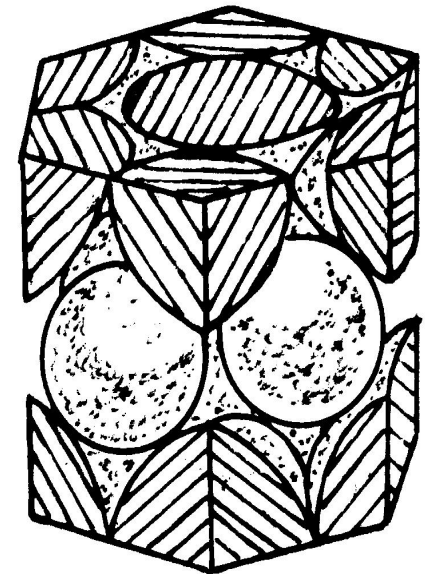
### 3.密排六方晶格 ( $c/a = 1.633$ ) ( close-packed hexagonal lattice )



(a)




(b)



(c)





\*晶胞的特征参数:  $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

\*晶胞中的原子数:  $n = 12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3 = 6$ 个

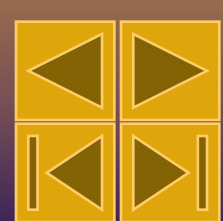
\*原子的半径:  $R = a / 2$

\*原子的体积:  $v = 4\pi R^3 / 3$

\*致密度:  $K = nV_{\text{原子}} / V_{\text{晶体}} = 0.74 = 74\%$

\*配位数 (N) 是指晶格中与任一原子处于相等距离并相距最近的原子数目。

$N = 12$  (原子间的最近距离  $d = a$ )



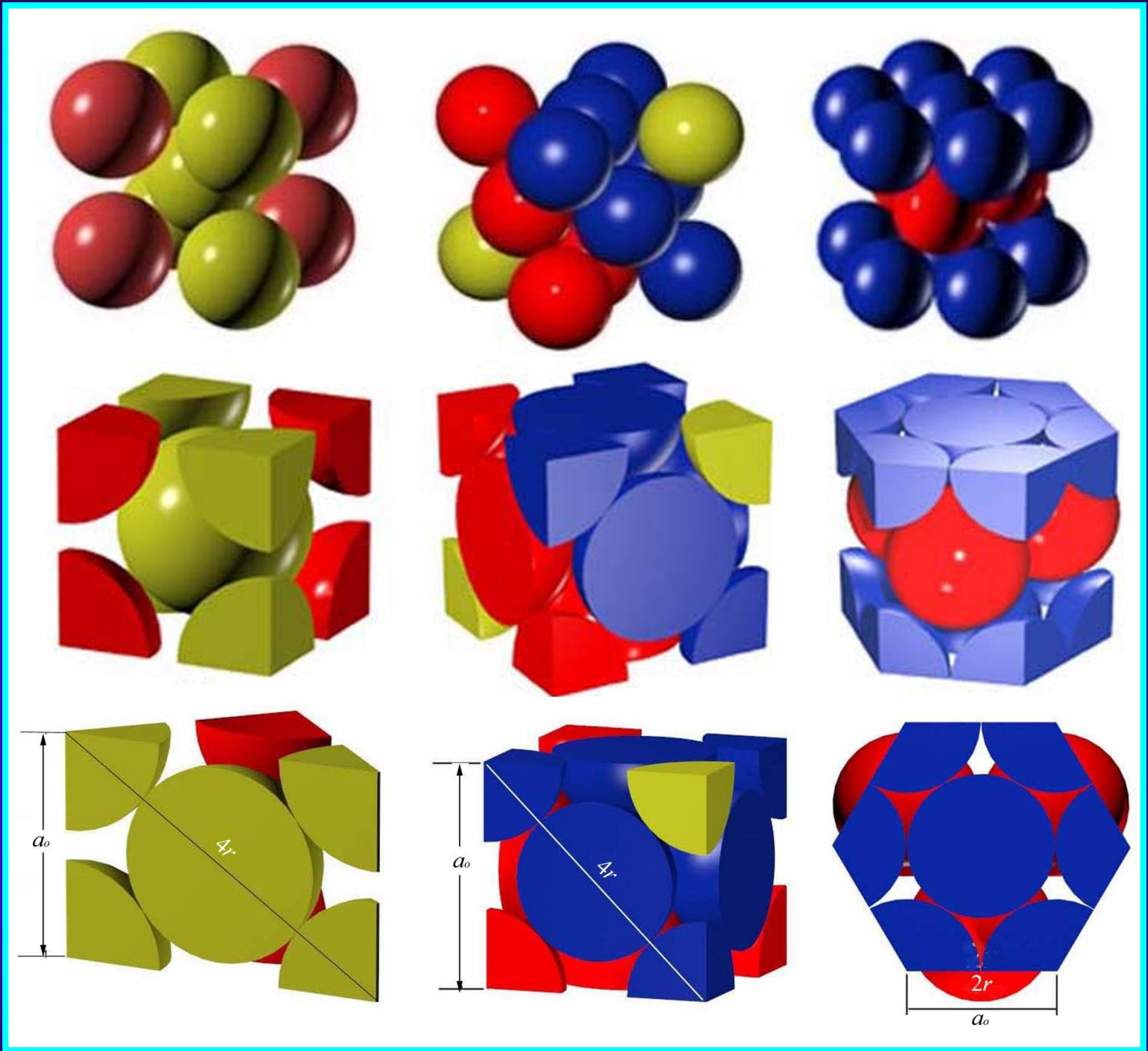


属于密排六方晶格的金属有：

镁 (Mg) ; 锌 (Zn) ; 镉 (Cd) ;

$\alpha$ -钛 ( $\alpha$ -Ti) ; 铍 (Be) 等。







## 四. 纯金属的晶体结构与特性

1. **金属键**——金属原子间的结合键。
2. **金属键的基本特点是电子公有化。**
3. **电子气**——当金属原子结合成晶体时, 价电子不再被束缚在各个原子上, 而是在整个晶体内运动, 从而形成电子气。
4. **金属晶体**——失去价电子的金属正离子与组成电子气的自由电子之间产生的静电引力使金属原子结合在一起, 从而形成了金属晶体。

## 第二节 实际金属的晶体结构与晶体缺陷

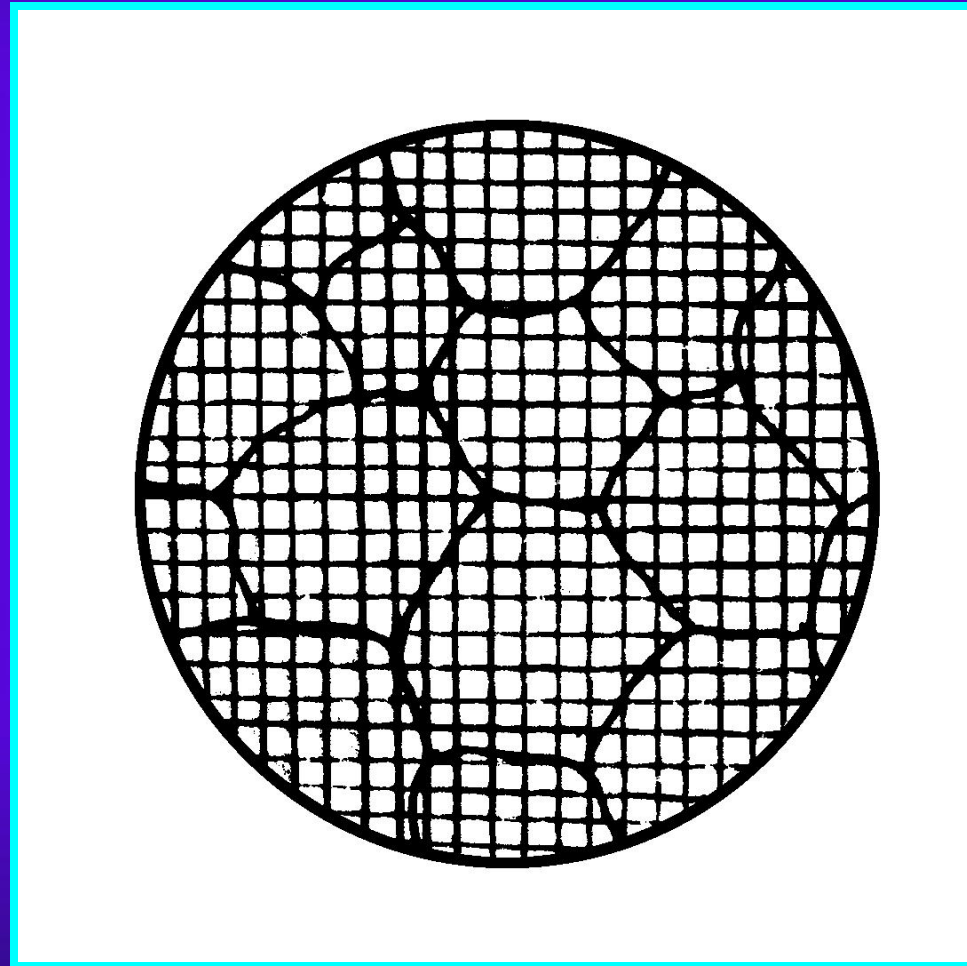
### 一. 单晶体与多晶体的基本概念

#### 1. 单晶体( **single crystal** )的特征:

- \* 晶体由一个晶格排列方位完全一致的晶粒组成。
- \* 晶体具有各向异性( **aeolotropy** )。  
例如: 单晶硅、单晶锗等。



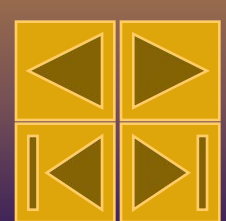
# 单晶体结构示意图



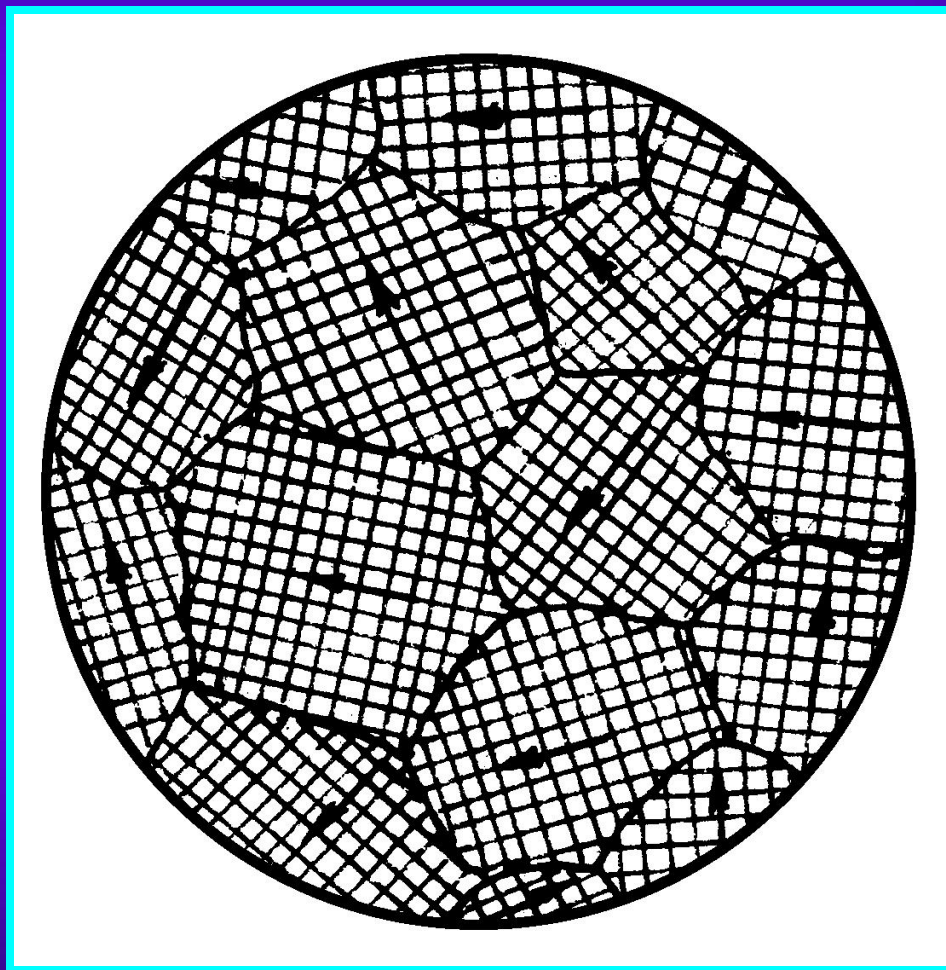


## 2.多晶体( polycrystal )的特征

- \*晶体是由许多颗晶格排列方位不相同的晶粒组成。
- \*晶体具有各向同性( isotropy )。  
例如：常用的金属等。



# 多晶体结构示意图



## 二. 晶体缺陷( crystal defect )

线缺陷

点缺陷

面缺陷





# 1.点缺陷( point defect )

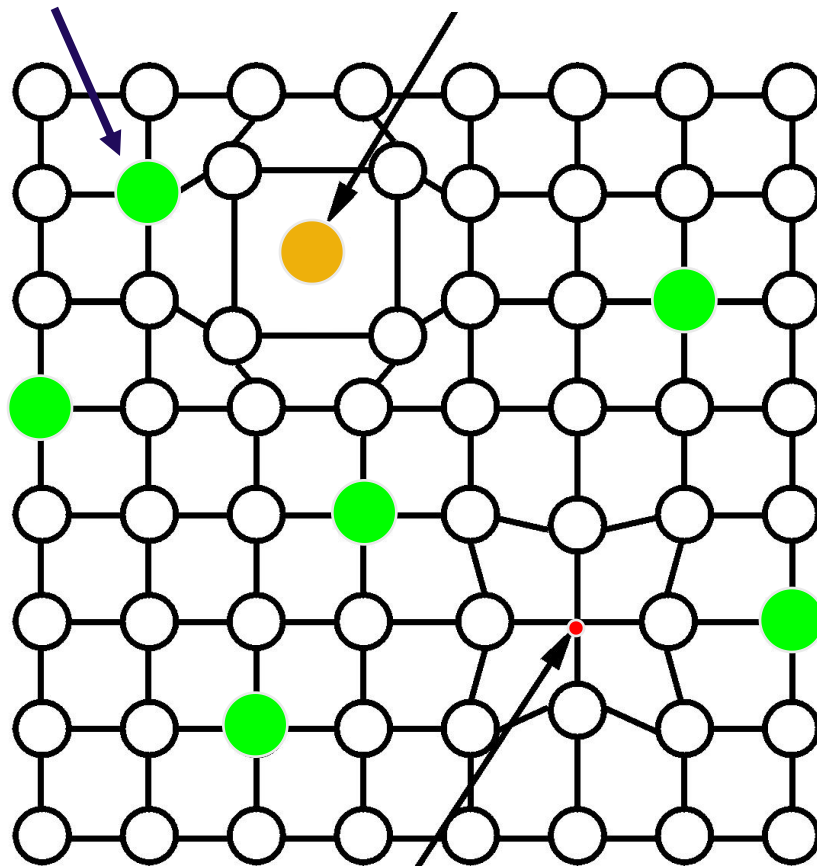
- ◆ 空位( vacancy )
- ◆ 间隙原子( gap atom )
- ◆ 置换原子( substitutional atom )



# 点缺陷示意图

置换原子

间隙原子



晶格空位



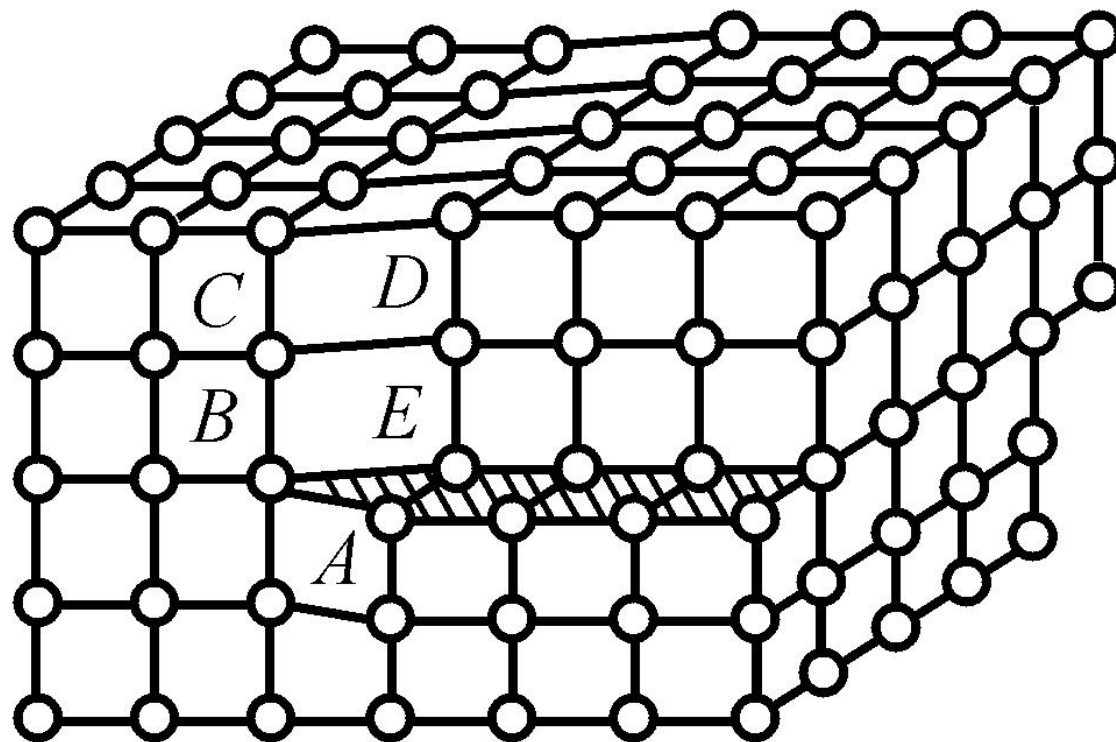
## 2. 线缺陷( line defect )

----位错( dislocation )

- ◆ 螺旋型位错( screw dislocation )
- ◆ 刃型位错( blade dislocation )



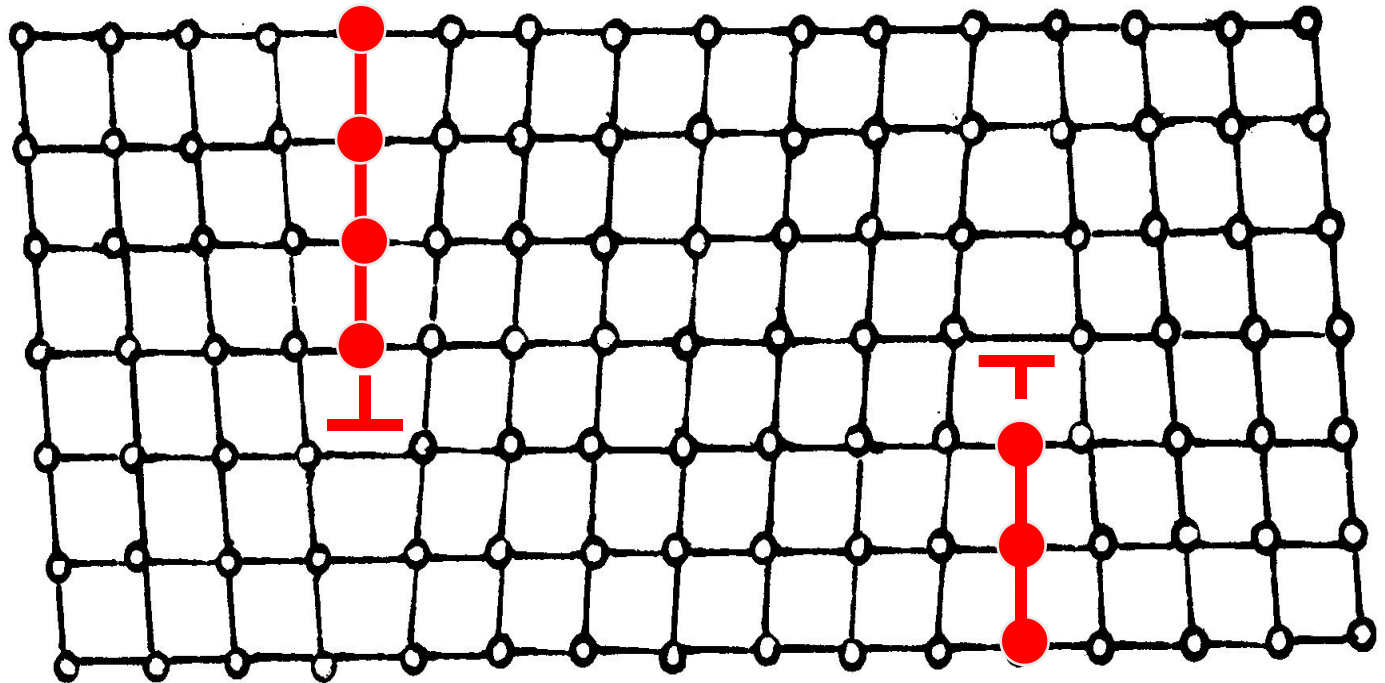
# 螺旋型位错示意图





# 刃型位错示意图

正刃型位错



负刃型位错





### 3.面缺陷( surface-defect )

◆ **晶界( grain boundary ) :**

晶粒与晶粒之间的界面。

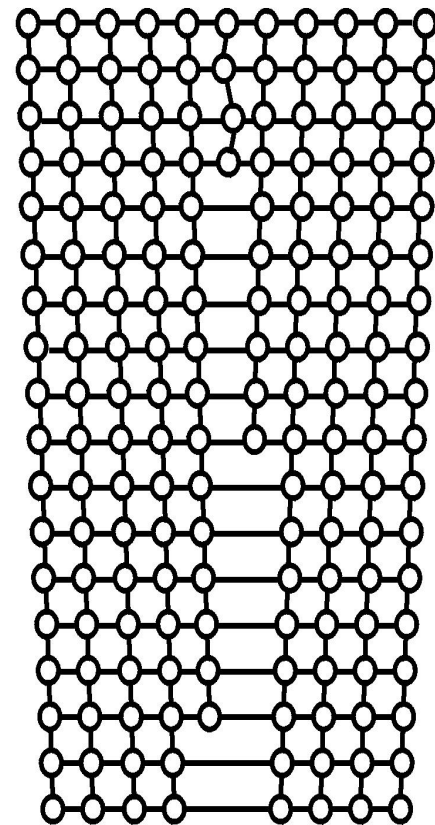
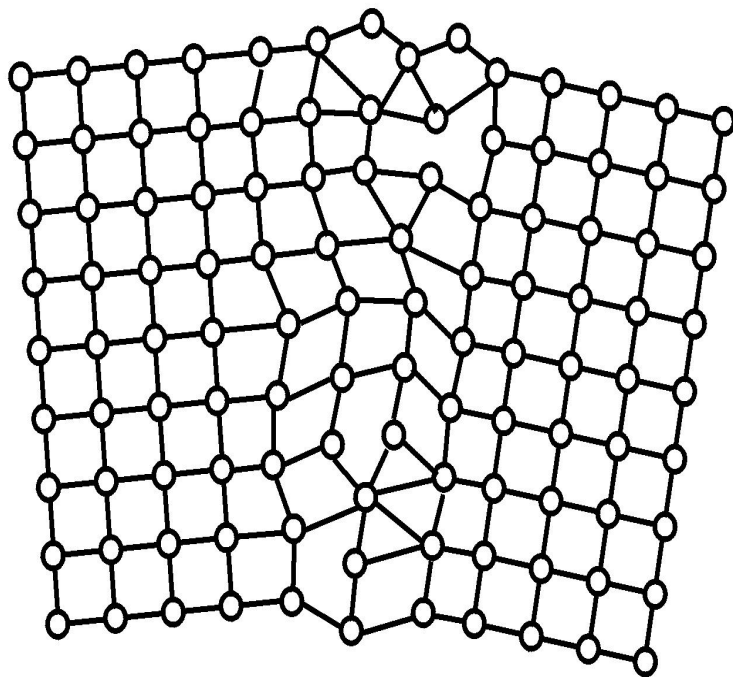
◆ **亚晶界( sub-boundary ) :**

相邻晶粒位向很小(一般 $1\sim 2^\circ$ )  
的小角度晶界。



# 晶界与亚晶界结构示意图

大角度晶界---晶界

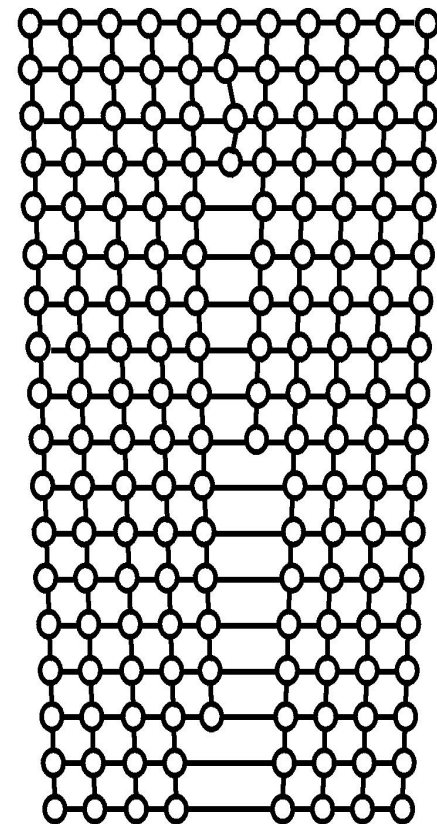
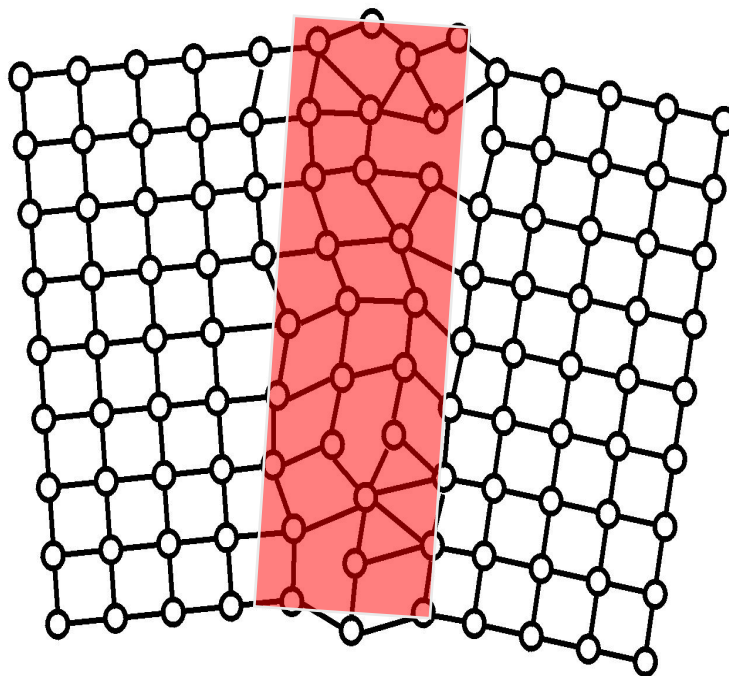


小角度晶界---亚晶界



# 晶界与亚晶界结构示意图

大角度晶界---晶界

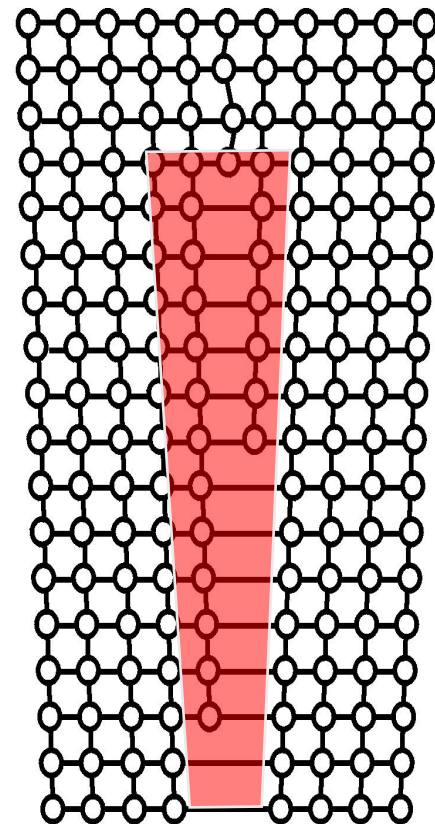
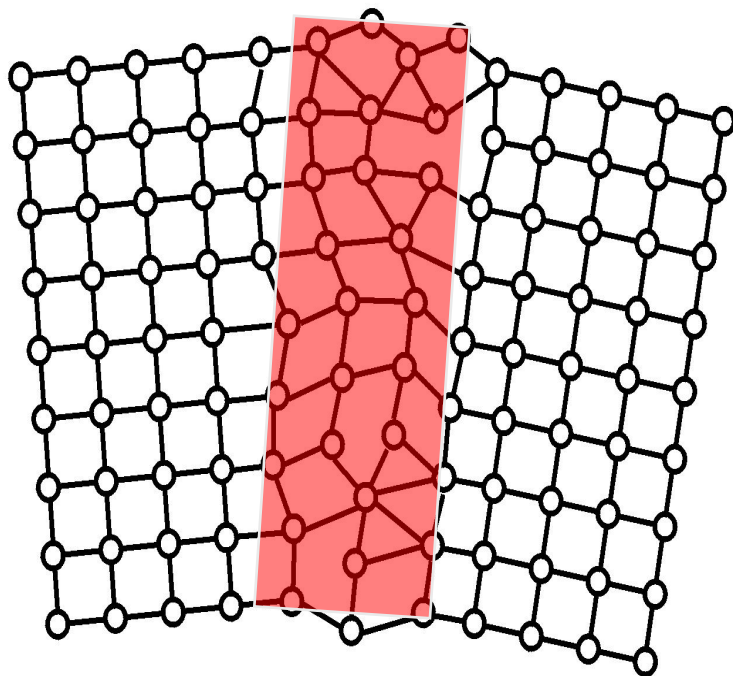


小角度晶界---亚晶界



# 晶界与亚晶界结构示意图

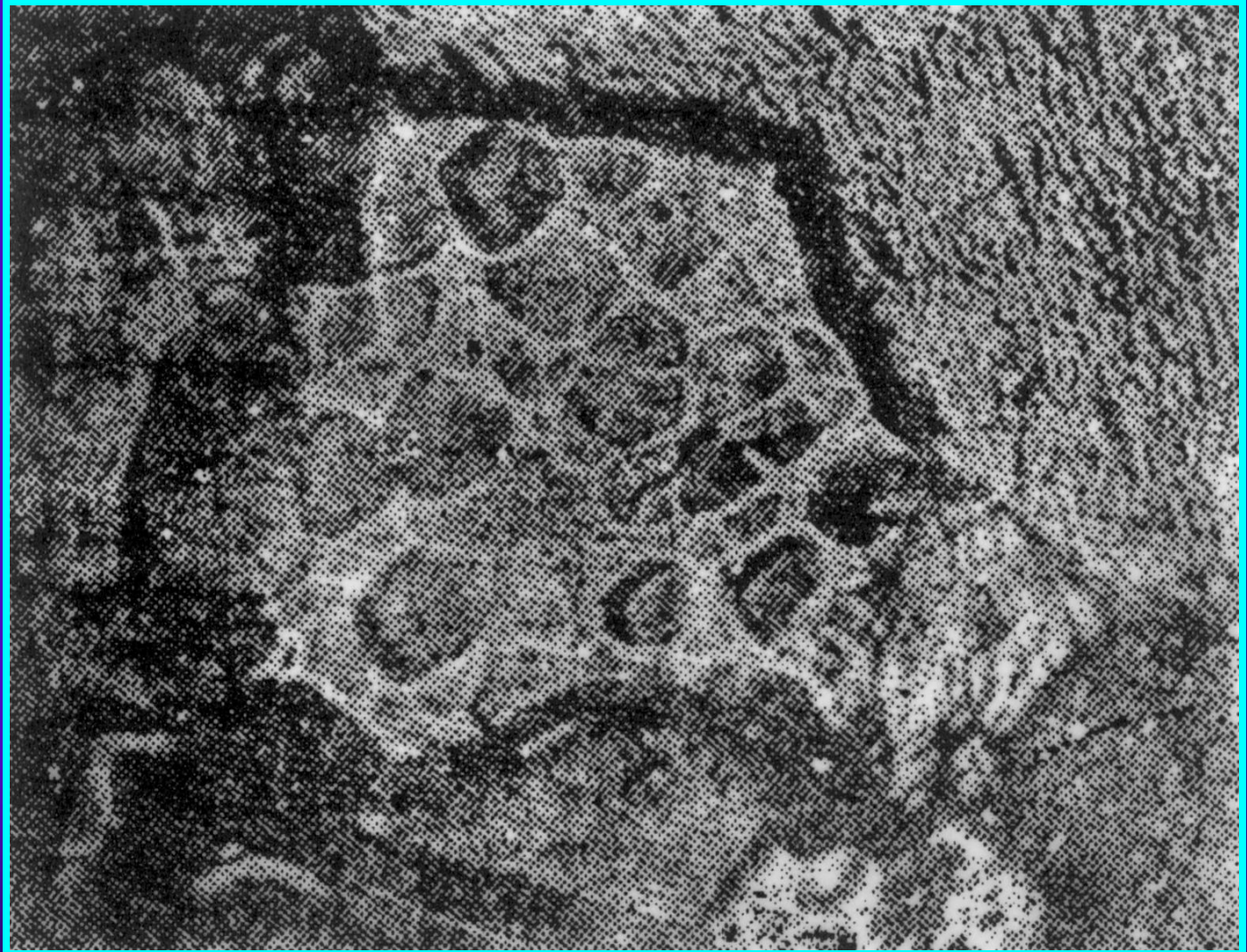
大角度晶界---晶界



小角度晶界---亚晶界



# Cu-Ni 合金中的亚结构



### 三.晶体缺陷对金属性能的影响

- ◆ 强度
- ◆ 硬度
- ◆ 韧性





# 本讲总结

- ◆ 晶体与非晶体
- ◆ 晶体学的基本知识：晶苞
- ◆ 三种常用的晶体结构：体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格
- ◆ 纯金属的晶体结构与特性
- ◆ 实际金属的晶体结构
- ◆ 晶体缺陷：点线面