

第二章（1）复习

- ✓ 施主杂质和受主杂质
 - 中性态、离化态、杂质电离能
 - n、p型半导体
 - 杂质的补偿作用
- ✓ 能级的深浅（深能级、浅能级）
 - 浅能级：杂质电离能远小于禁带宽度的杂质能级
 - 浅能级杂质电离能的计算：类氢模型
 - 深能级：杂质电离能近似等于禁带宽度的杂质能级

杂质的补偿作用

- 杂质的补偿作用：**半导体中同时存在着施主和受主杂质时，两种杂质之间有相互抵消的作用，称为杂质的补偿作用。

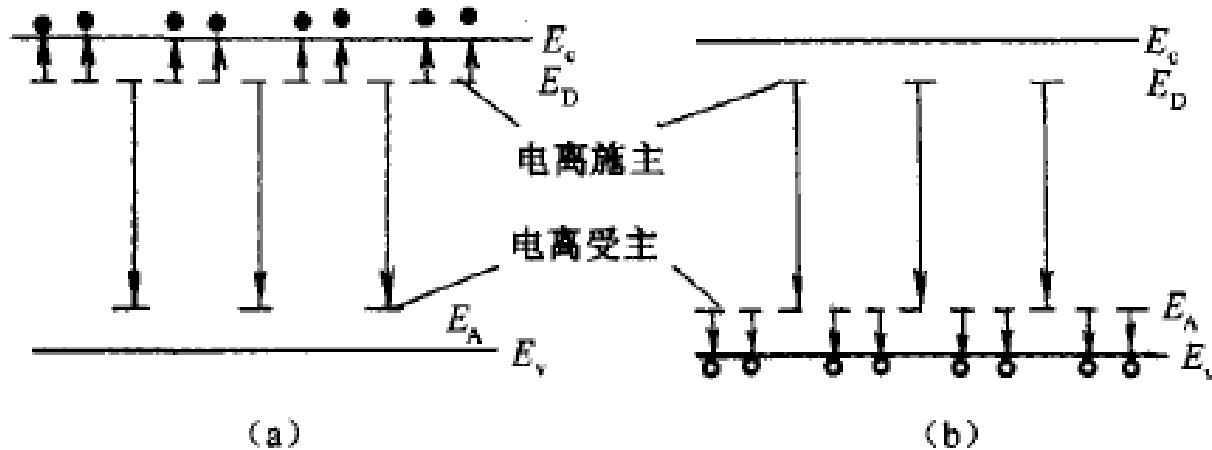


图 2-7 杂质的补偿作用

N_D : 施主杂质浓度

N_A : 受主杂质浓度

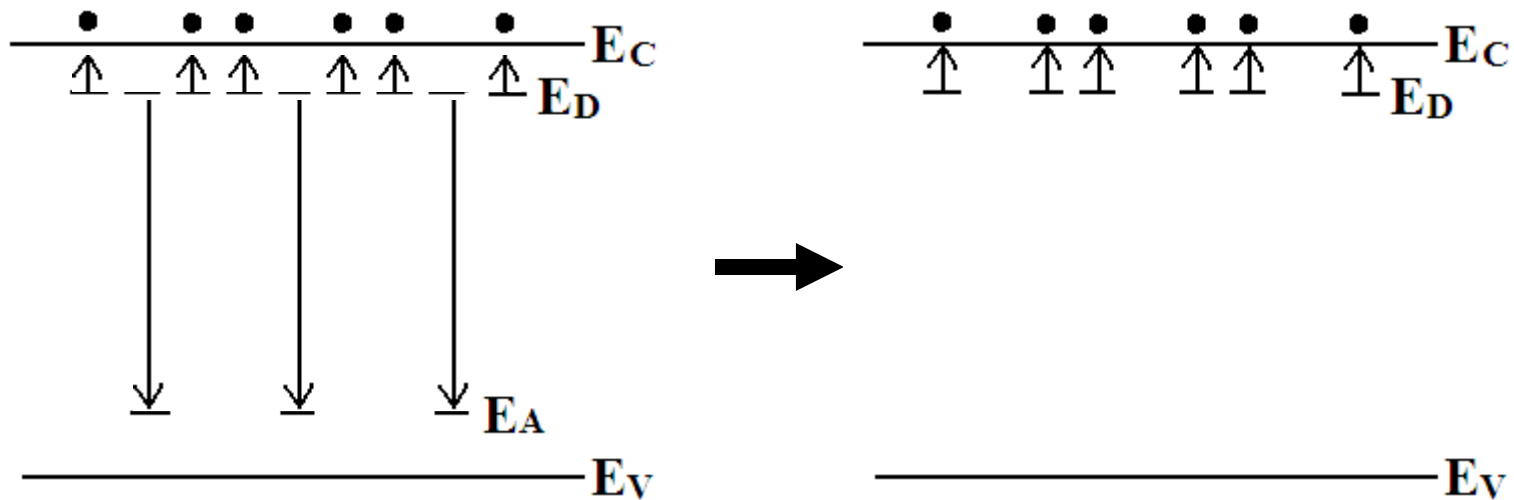
n : 导带中电子的浓度

p : 价带中空穴浓度

$$N_D \gg N_A$$

$$n = N_D - N_A$$

- 半导体中同时存在施主和受主杂质，
且 $N_D \gg N_A$ 。

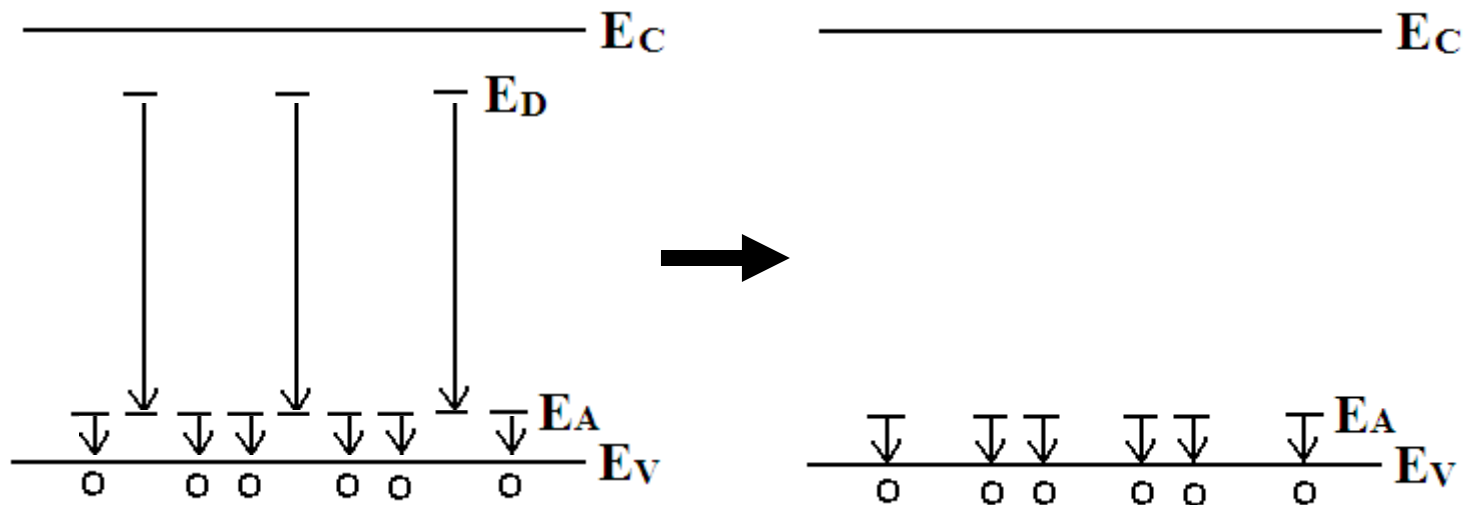


n型半导体

$$N_A \gg N_D$$

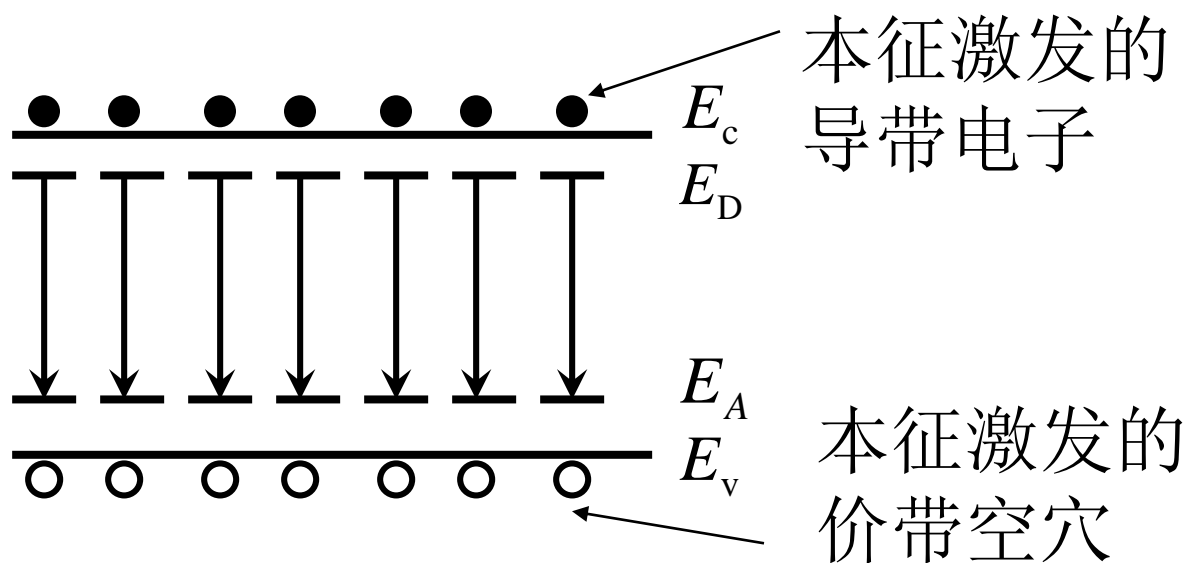
$$p = N_A - N_D$$

- 半导体中同时存在施主和受主杂质，且 $N_A \gg N_D$ 。



p型半导体

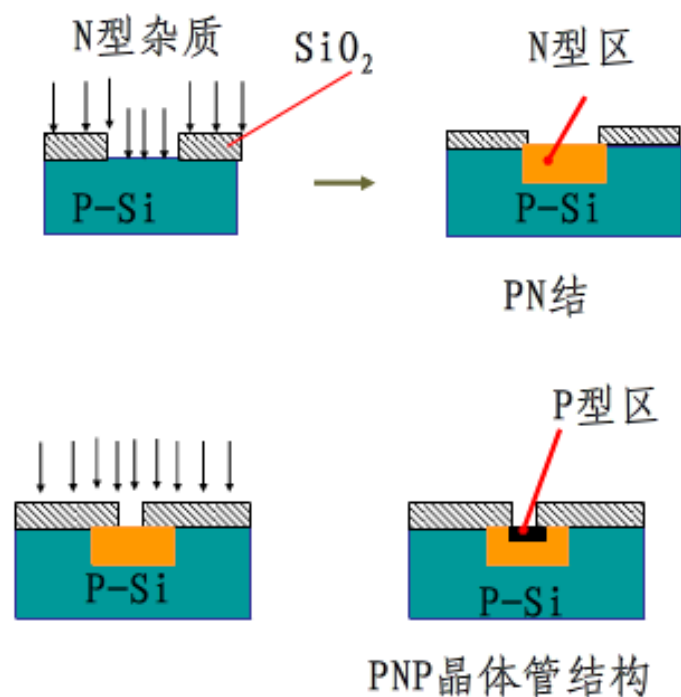
$N_A \cong N_D$ 杂质的高度补偿



杂质多、性能差，不适合做半导体器件

杂质的补偿作用

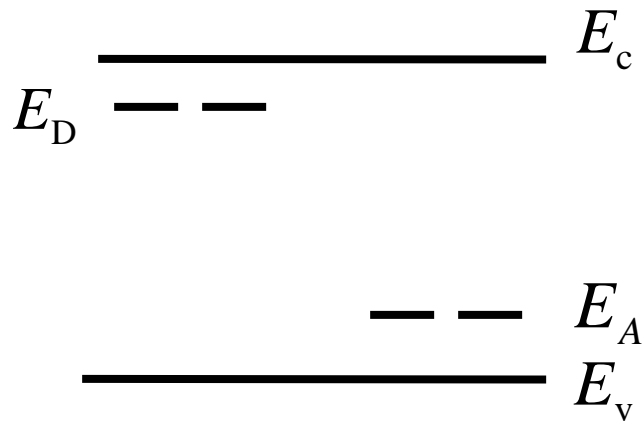
利用杂质补偿原理，通过半导体工艺，选择性改变半导体局部区域导电类型或导电能力，制作半导体器件。如PNP晶体管：



深能级杂质

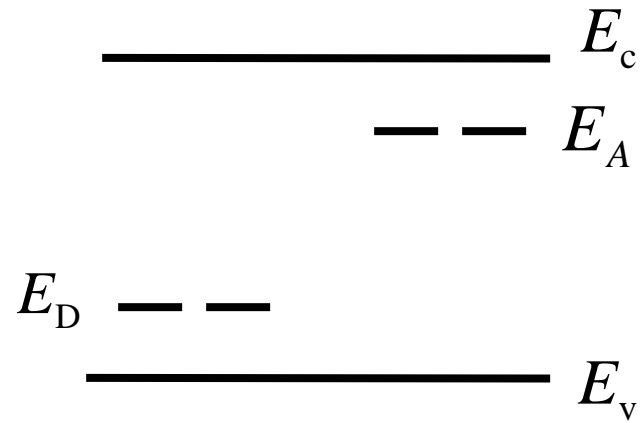
施主能级远离导带底；
受主能级远离价带顶。

(1) 浅能级



$$\Delta E_A \ll E_g \quad \Delta E_D \ll E_g$$

(2) 深能级



$$\Delta E_A \approx E_g \quad \Delta E_D \approx E_g$$

非Ⅲ、Ⅴ族杂质在硅、锗等Ⅳ半导体中产生的能级都是深能级。

深能级杂质

- 多次电离、相应多个能级
- 有的杂质既有施主能级，又有受主能级
- 例如：**Au在Ge中有五种可能的状态，4个能级**

(1) Au^+ ; (施主)

(2) Au^0 ;

(3) Au^{1-} ; (受主1)

(4) Au^{2-} ; (受主2)

(5) Au^{3-} ; (受主3)

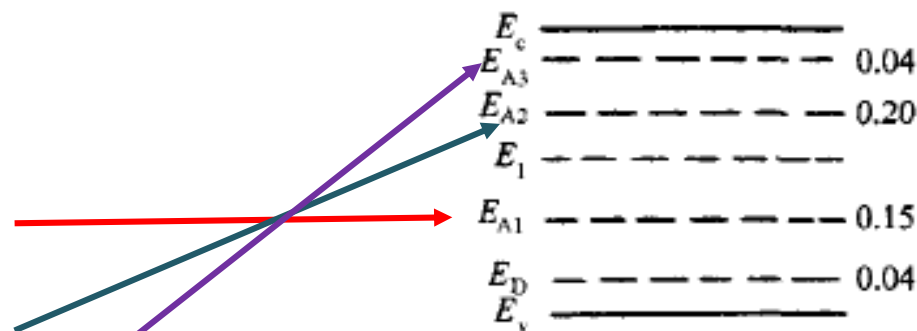


图 2-10 金在锗
中的能级

深能级杂质的特点

1. 不易电离，对载流子浓度影响不大；
2. 一般产生多重能级，甚至施主与受主能级并存；
3. 能起到复合中心的作用，降低少数载流子寿命；
4. 电离后的带电中心对载流子起散射作用，降低半导体的导电性能。

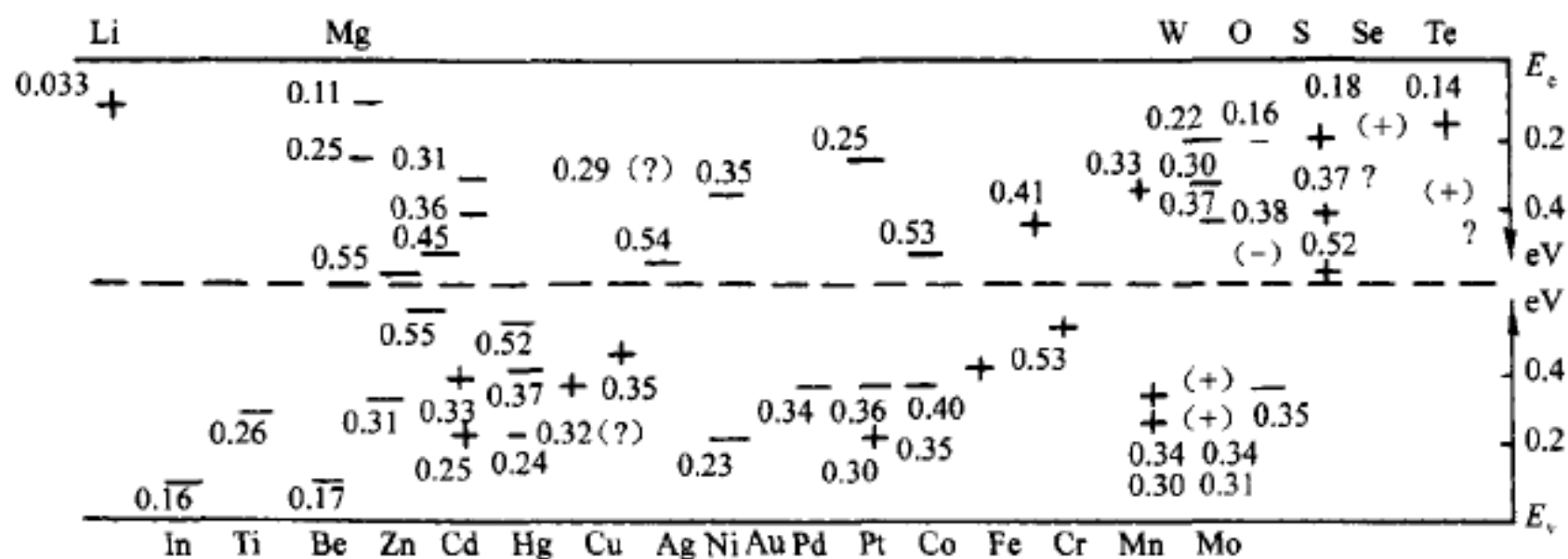


图 2-8 硅晶体中的深能级

第二章

1. Si 和 Ge晶体中的杂质能级
2. **III-V** 化合物的杂质能级
3. 缺陷、位错能级

2.2 III-V 族化合物中的杂质能级

- III A族元素：硼、铝、**镓**、铟、铊
- V A族元素：氮、磷、**砷**、锑、铋
- 砷化镓（GaAs）是III-V 化合物中最主要和最常用的半导体之一。

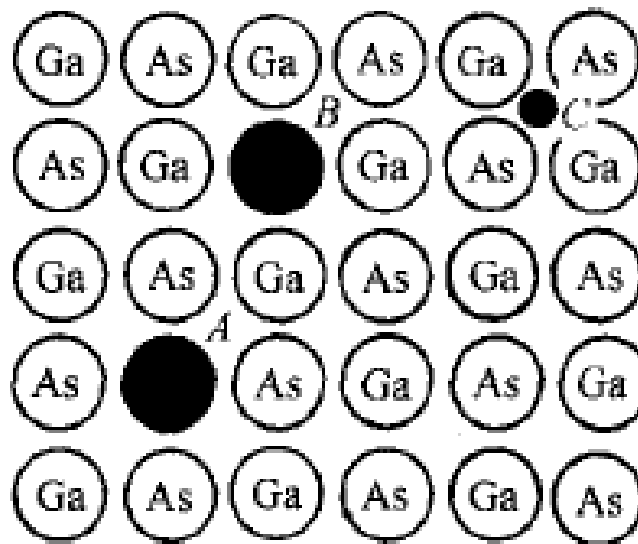


图 2-11 砷化镓中的杂质

杂质对**III-V**族化合物的影响

- **I**族元素：银、金、铜、锂
一般在砷化镓中引入受主能级。
- **II**族元素：铍、镁、锌、镉、汞
价电子比**III**族元素少一个，易获得电子，引入浅受主能级

- III、V 族元素

等电子杂质：电中性杂质（没有在禁带引入能级）

✓ 磷化镓中掺入 V 族元素氮或铋

- 等电子陷阱：取代同族元素，形成的能级
- 等电子杂质效应

- 等电子杂质

特征：a、与本征元素同族不同原子序数

b、以替位形式存在于晶体中，呈电中性

- 形成等电子陷阱的原因

由于原子序数的变化，电负性不同，形成带电中心，引入能级

形成等电子陷阱的条件

- 杂质原子与本征原子在电负性、共价半径等差别较大；
 - 同族元素，原子序数越小，电负性越大
 - 杂质电负性大于本征原子电负性时，取代后成为负电中心；反之，成为正电中心。
 - 束缚激子：等电子陷阱俘获一种载流子后，在库仑力作用下俘获相反电性载流子，形成束缚激子。

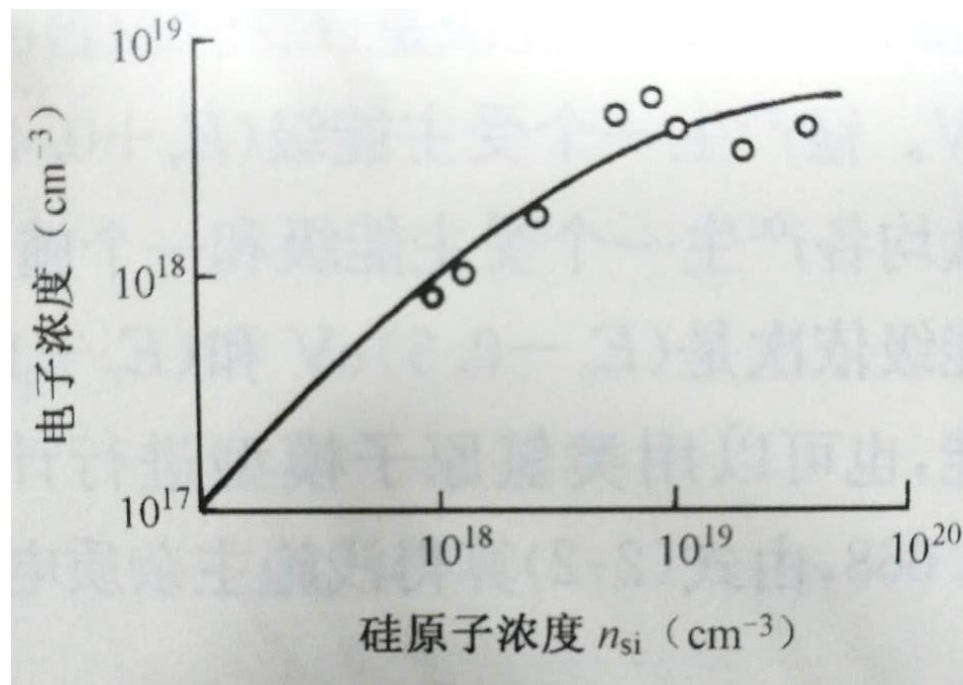
- IV族元素：碳、硅、锗、锡、铅
 - 取代III族原子，起施主杂质作用
 - 取代V族原子，起受主杂质作用

✓ 杂质的双性行为

- 既起施主杂质作用又起受主杂质作用(×)

✓ 杂质的补偿作用

- ✓ 硅、锗、锡在砷化镓中主要作为浅施主杂质。



-
- VI族元素：氧、硫、硒、碲
易失去一个价电子，表现为施主杂质；
 - 过渡元素：铁、钴、镍、锰、镉多表现为受主杂质，引入受主能级；
钒表现为施主杂质，引入施主能级。

III-V族化合物中的杂质能级

以GaAs为例，按周期表各元素讨论如下：

I族: Au, Ag, Cu	取代Ga原子	深受主能级
II族: 铍(Be), Mg, Zn, Cd, Hg	取代Ga原子	浅受主能级
III族: B, Al	III族替代Ga原子	中性杂质
V族: P, Sb	V族替代As原子	不引入能级
IV族: C, Si, Ge	替代Ga原子 替代As原子	施主杂质 受主杂质
VI族: O, S, Se, Te	取代As原子	浅施主杂质

等电子陷阱

杂质的
双性行为

第二章

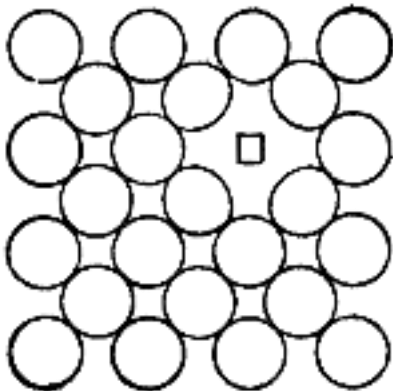
1. Si 和 Ge晶体中的杂质能级
2. III-V 化合物的杂质能级
3. 缺陷、位错能级

2.4 缺陷、位错能级

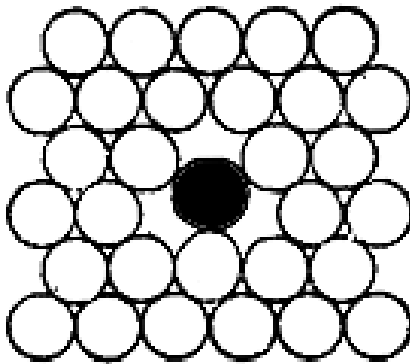
- 缺陷的种类
 - 点缺陷：空位、间隙原子等
 - 线缺陷：位错
 - 面缺陷：层错、晶粒间界

点缺陷

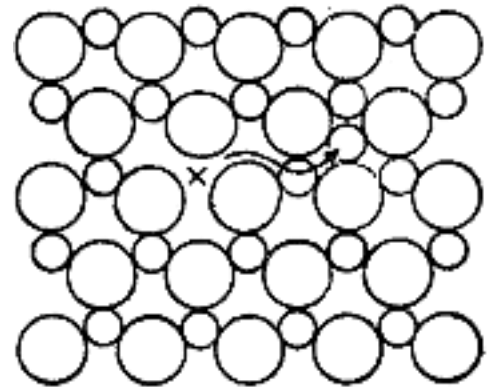
- 0D defect
- 大小:和原子的大小具有相同的数量级;
- ✓ 空位 (a)
- ✓ 杂质原子(b)
- ✓ 间隙原子 (c)



(a)



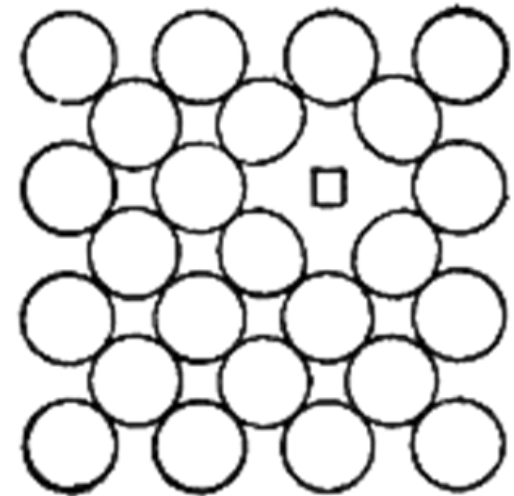
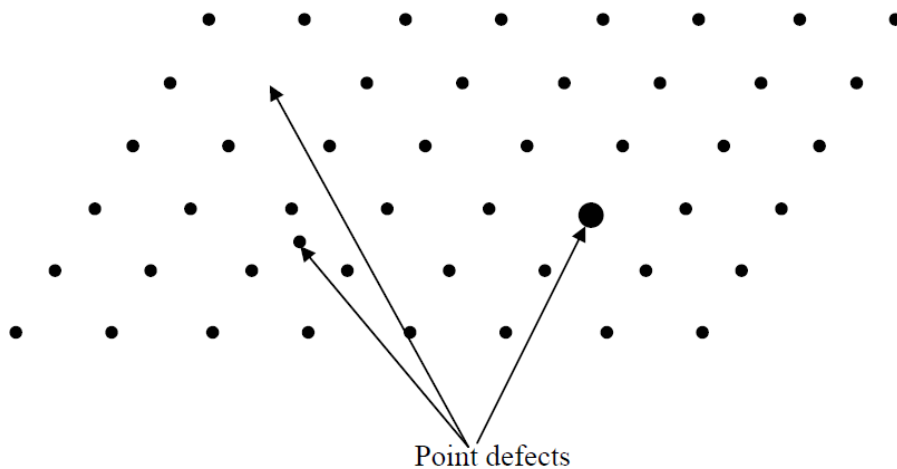
(b)



(c)

点缺陷

- 弗仑克尔缺陷：间隙原子和空位成对出现
- 肖特基缺陷：只形成空位无间隙原子出现

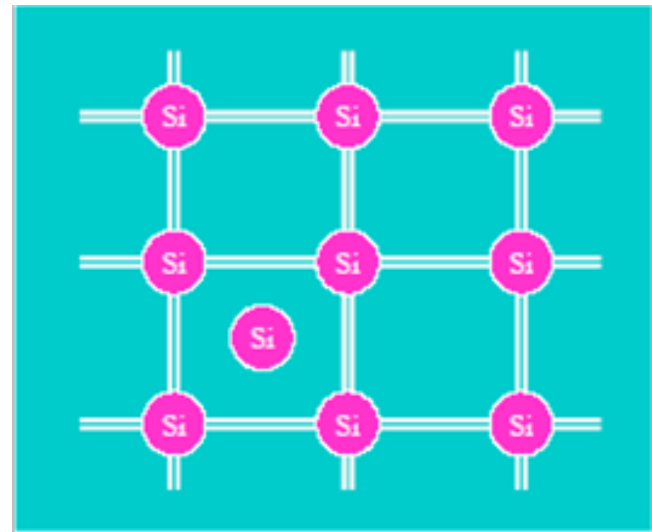
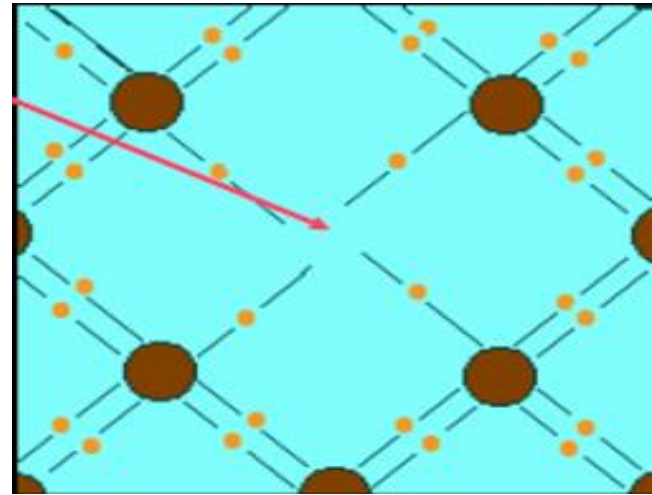


2.4 缺陷、位错能级

- 在半导体晶体中的作用
 - 受主
 - 施主
 - 深能级

Si中的点缺陷

- 空位：起受主作用
- 填隙原子：起施主作用



砷化镓中的点缺陷

- 热振动：空位、间隙原子
- 成分偏离正常化学比：
 - 砷偏多——镓空位
 - 镓偏多——砷空位
- ✓ MX化合物半导体（离子晶体）
- M电负性小
- V_M 受主， V_X 施主
- M间隙原子：施主
- X间隙原子：受主
- 利用成分偏离正常化学比来控制导电类型。
- 替位原子——反结构缺陷
 - 砷取代镓原子——施主作用
 - 镓取代砷原子——受主作用

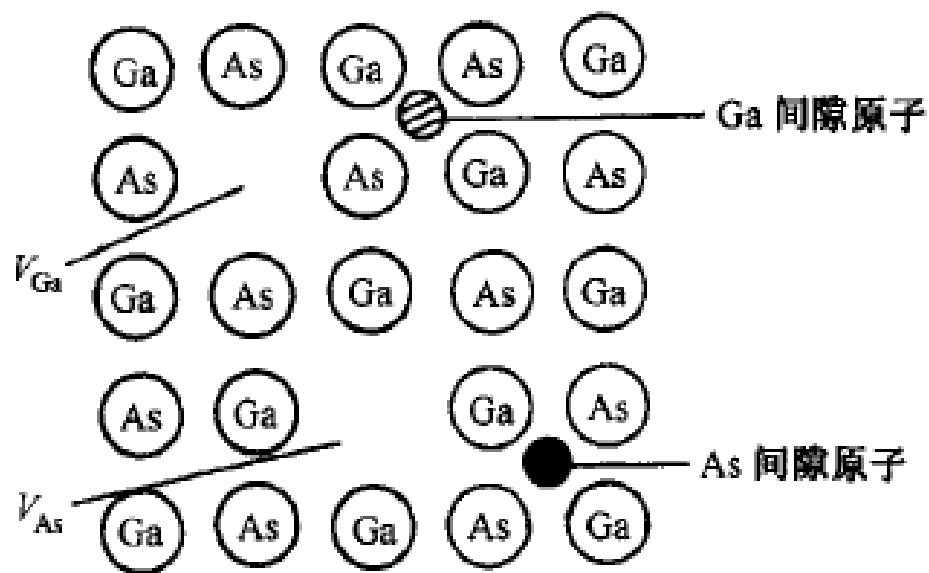
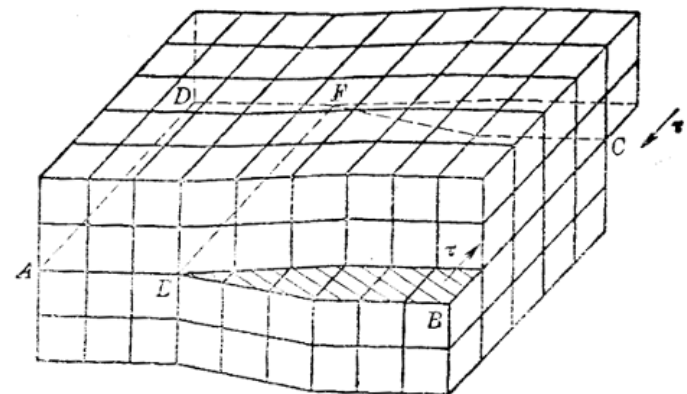
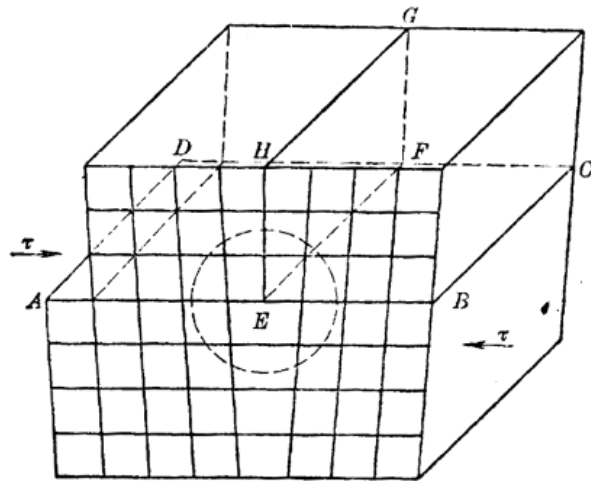


图 2-15 砷化镓中点缺陷示意图

线缺陷

- 1D 缺陷
- 在某一方向偏离原来的周期性晶格结构
- 缺陷的尺寸:在某一方向很长，其它两个方向很短。
- 位错

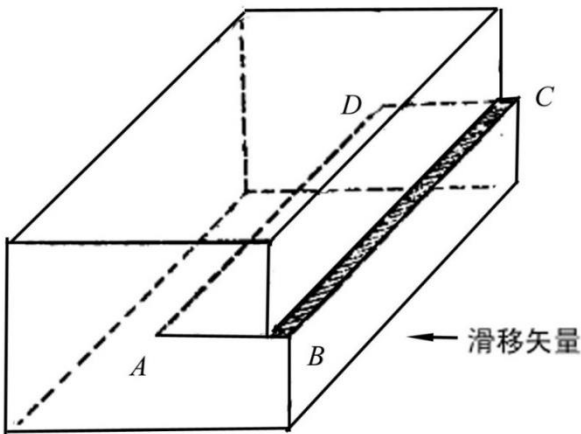
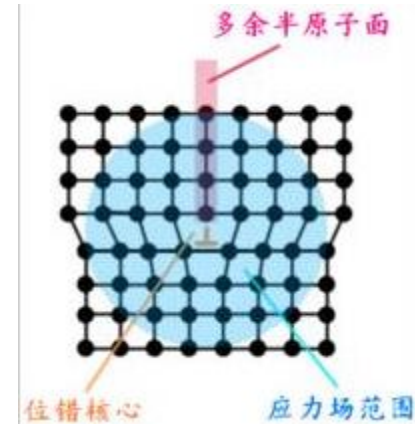


位错

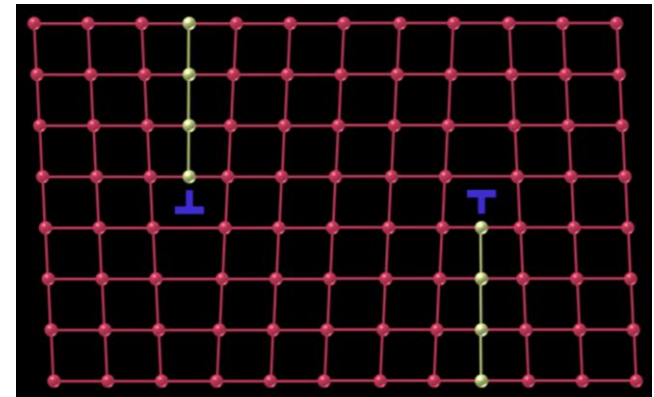
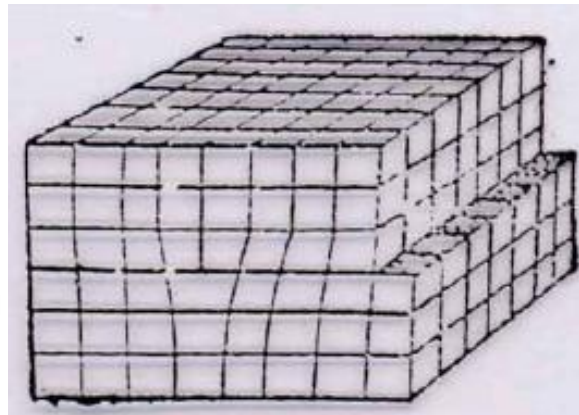
- Types of dislocation
 - ✓ edge dislocation (刃型位错)
 - ✓ screw dislocation (螺型位错)
 - ✓ mixed dislocation (混合位错)

刃型位错Edge dislocation

- 晶体局部滑移引起；
- 多余半原子面；
- 正刃型位错(\perp)：多余半原子面在滑移面之上；
- 负刃型位错(\top)：多余半原子面在滑移面之下。

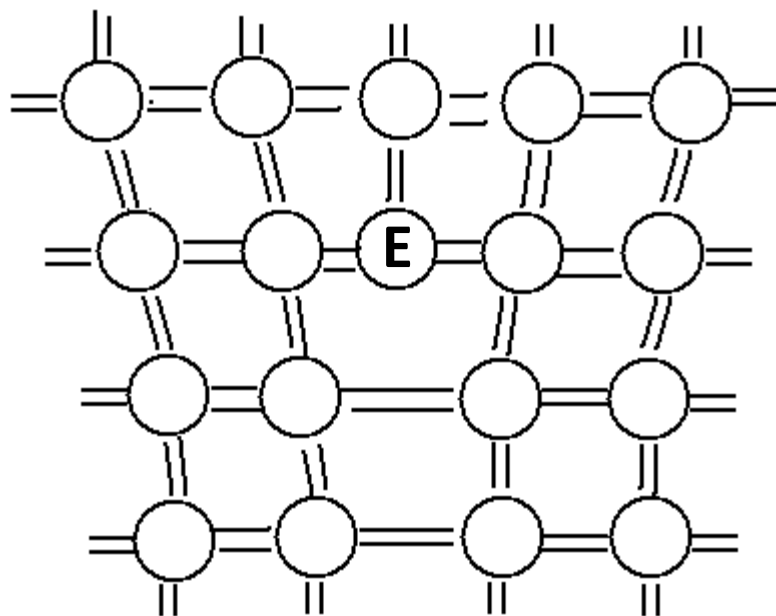


(a)位错的形成

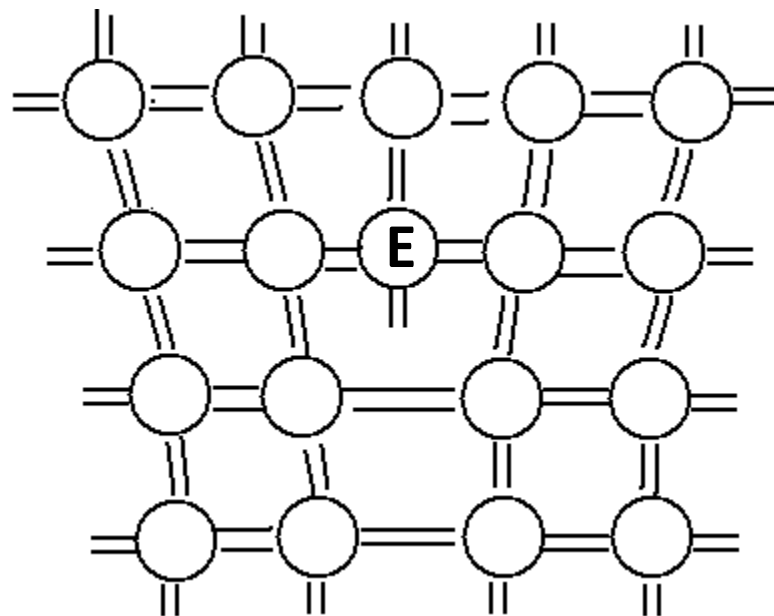


刃型位错

施主情况



受主情况



位错周围的晶格发生畸变，引起能带结构的变化。

金刚石结构中的刃型位错

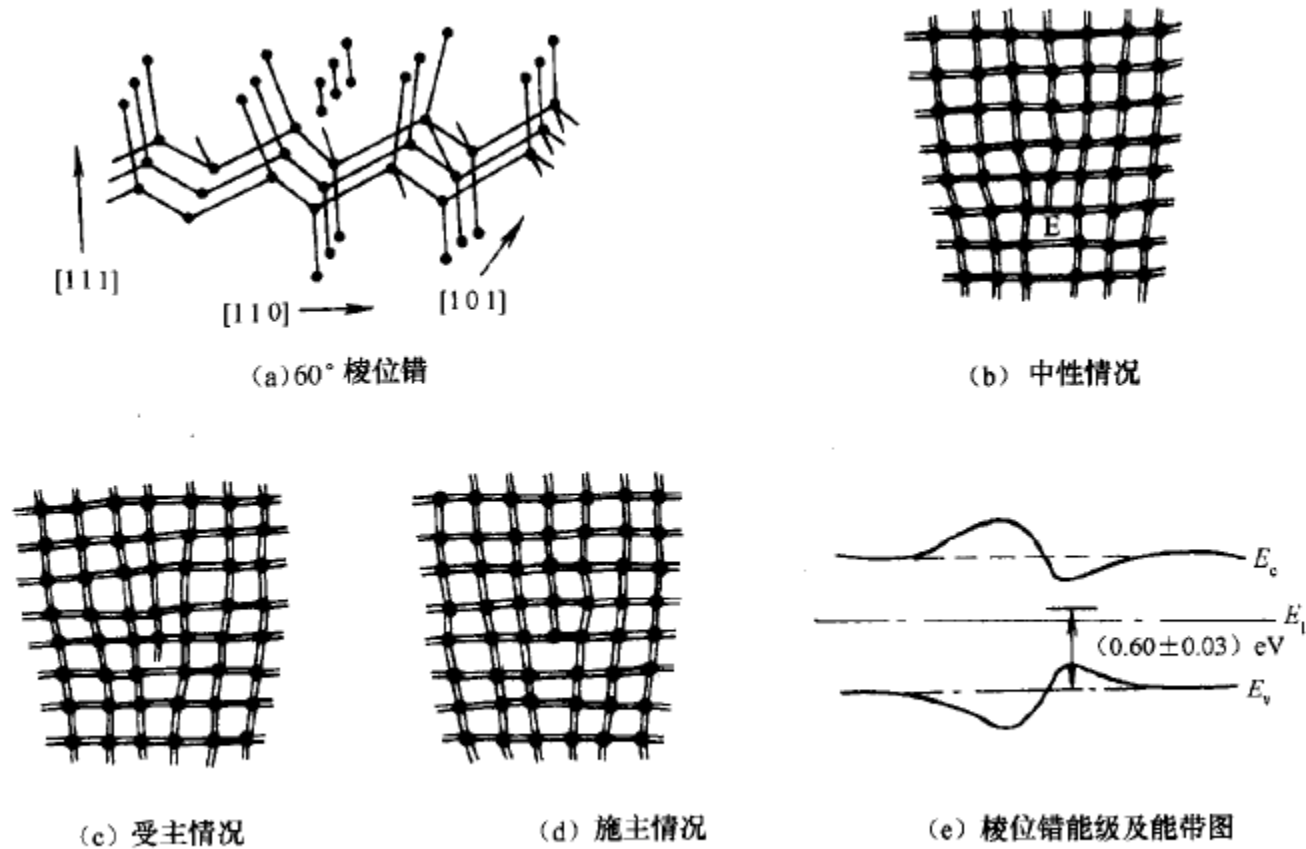
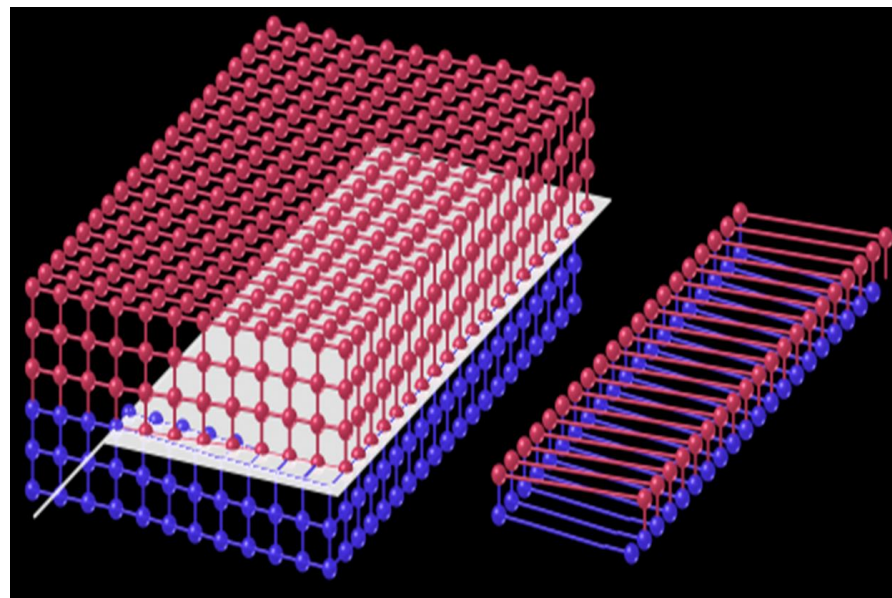
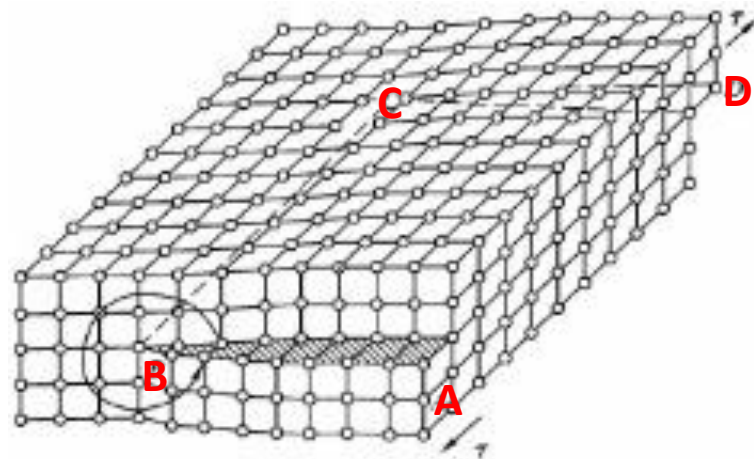


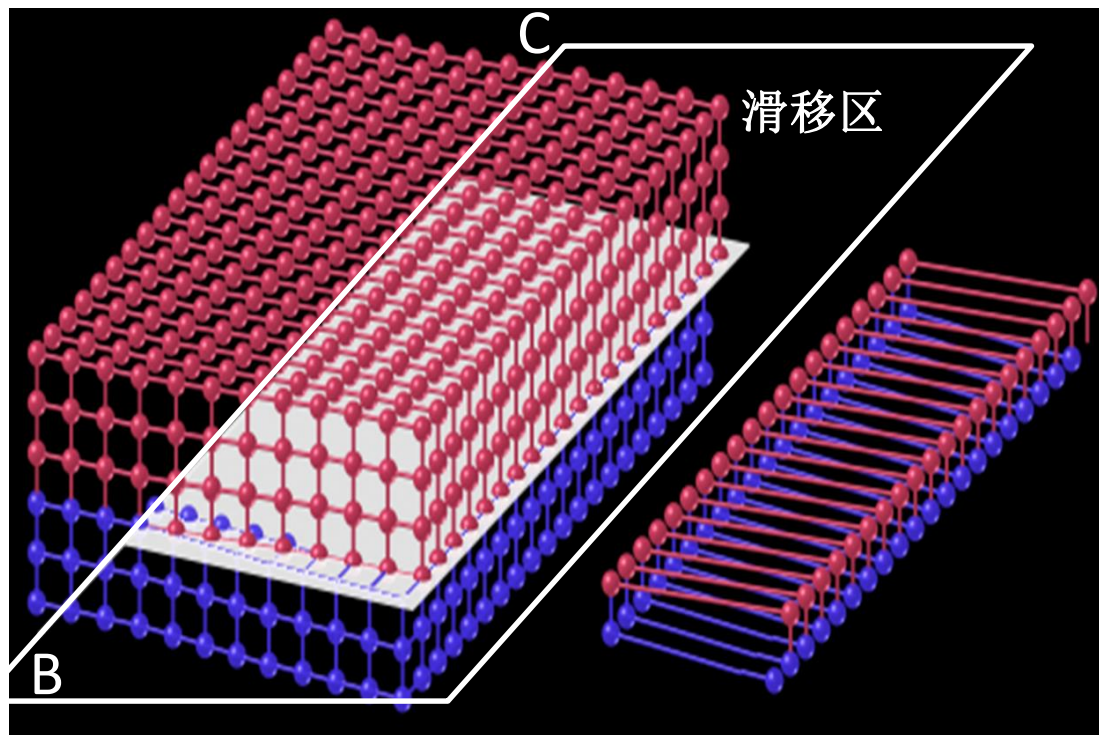
图 2-18 金刚石结构的位错

螺型位错

假定在一块简单立方晶体中

- 沿某一晶面切一刀缝，贯穿于晶体右侧至BC处
- 在晶体的右侧上部施加一切应力 τ ，使右端上下两部分晶体相对滑移一个原子间距
- BC线左边晶体未发生滑移，出现已滑移区与未滑移区的边界BC





- ❑ 右侧晶体上下两部分发生晶格扭动
- ❑ 从俯视角度看，在滑移区上下两层原子发生了错动，晶体点阵畸变最严重的区域内两层原子平面变成螺旋面
- ❑ 畸变区的尺寸与长度相比小得多，在畸变区范围内称为**螺型位错**
- ❑ 已滑移区和未滑移区的交线BC称为**螺型位错线**

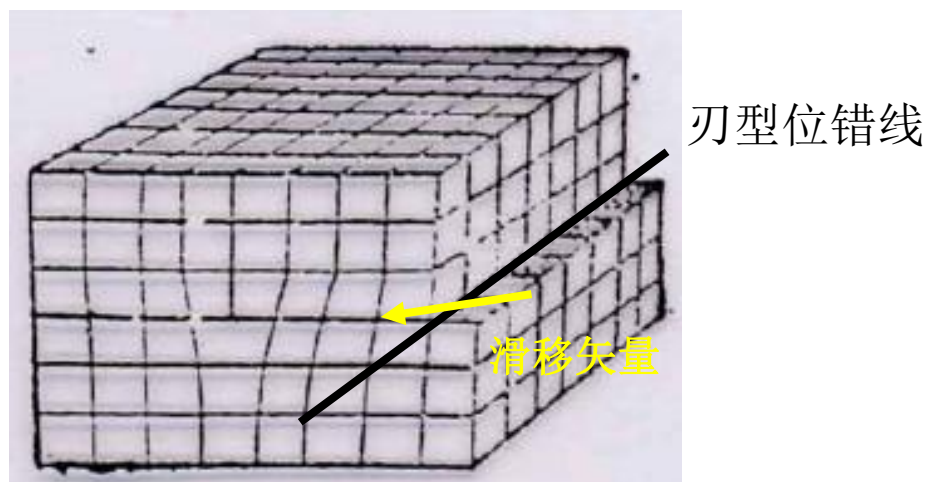
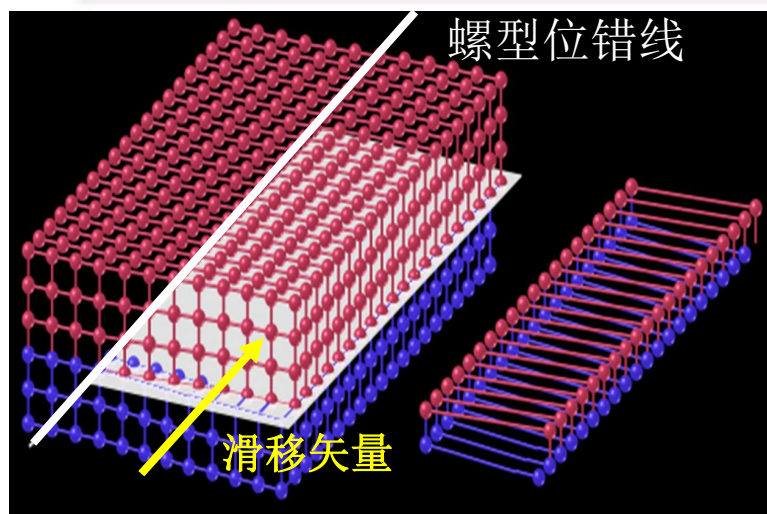
螺型位错分类

按照螺旋面前进的方向与螺旋面旋转方向的关系分

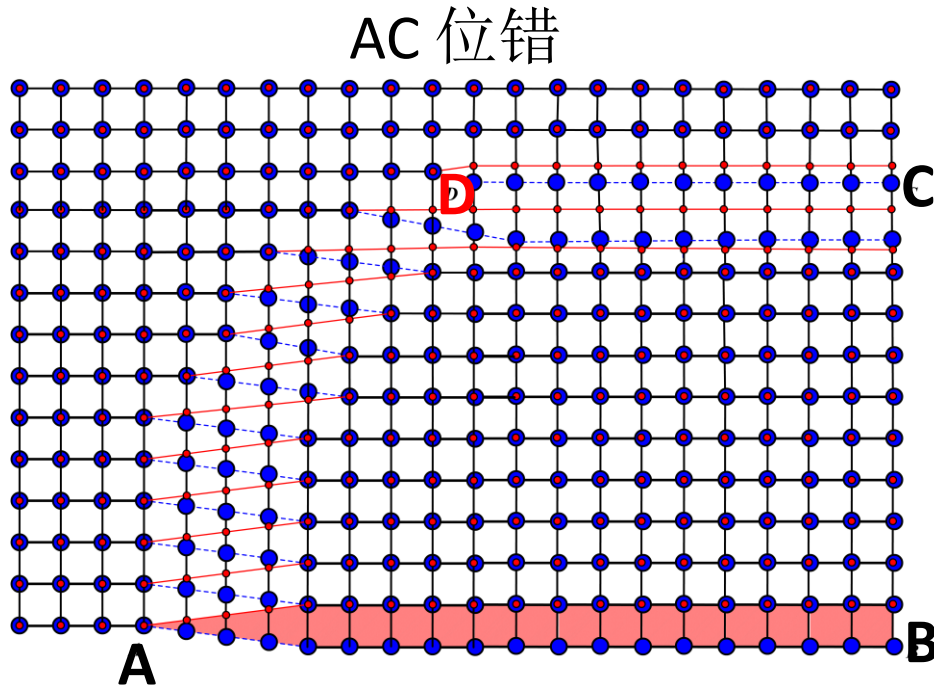
- 左螺型位错
- 右螺型位错
- 符合右手定则（右手拇指代表螺旋面前进方向，其它四指代表螺旋面旋转方向）的称为右螺型位错，符合左手定则的称为左螺型位错

螺型位错与刃型位错的主要区别

- 螺型位错线与滑移矢量平行
- 螺型位错受力时只存在平行位错线的切应力，而无正应力



混合位错



靠近C端的位错线段垂直于滑移矢量，属于纯刃型位错

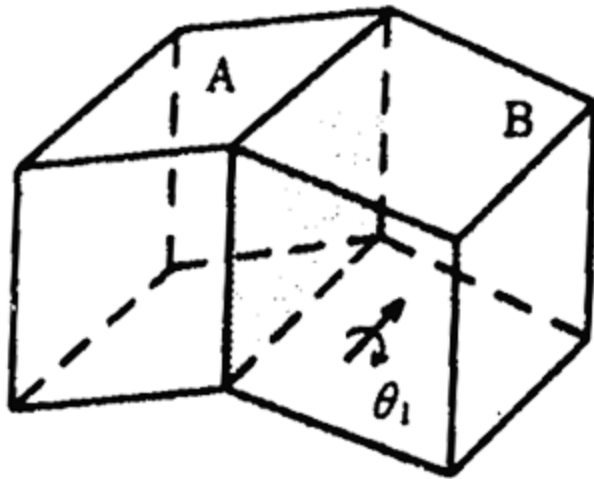
靠近A端的位错线段平行于滑移矢量，属于纯螺型位错

- 其余部分线段与滑移矢量成任意角度，属混合位错
- 每一段位错线均可分解为刃型和螺型两个分量

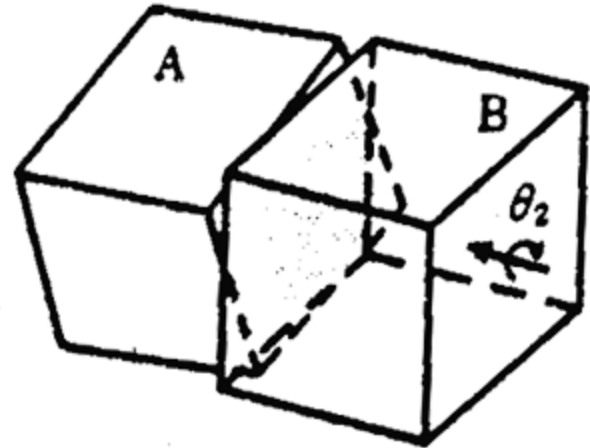
面缺陷

- **2D defects**
- 在两个方向上偏离原来的周期性排列方式
- 缺陷尺寸: 沿两个方向延展, 沿其他方向很小
- ✓ 表面
- ✓ 晶界 grain boundaries
- ✓ 堆垛层错 stacking fault
- ✓ 镶嵌结构 mosaic structure。

面缺陷-晶界

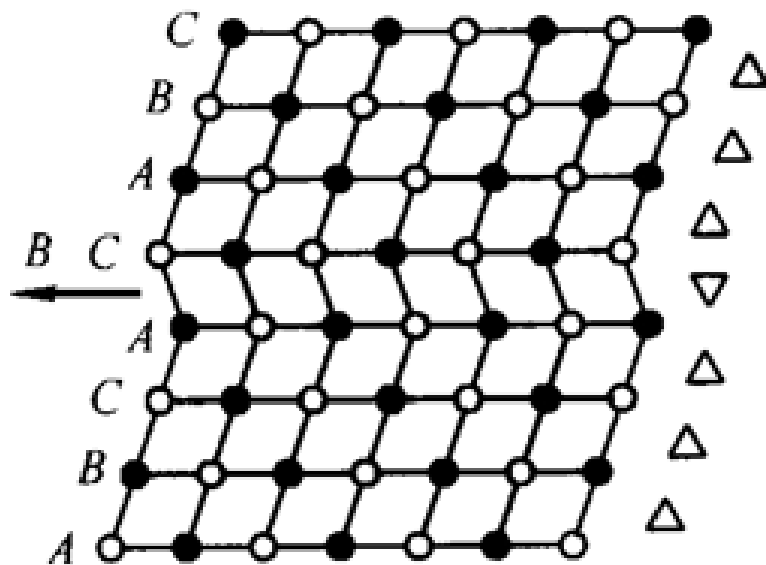


倾斜晶界

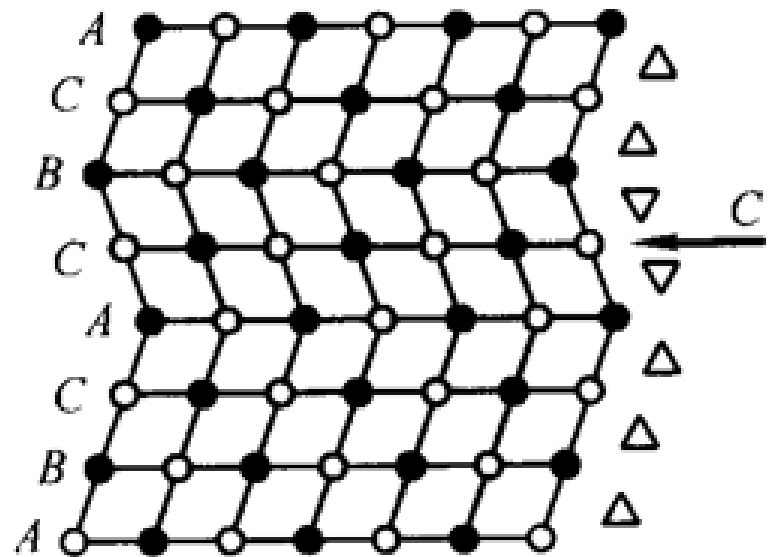


扭转晶界

面缺陷-堆垛层错



(a)



(b)

本节小结

- 等电子陷阱的定义及形成的原因
- 等电子杂质效应
- 双性杂质
- 缺陷的分类
- 点缺陷的种类
- 线缺陷的分类

本章练习

- 1、**Ⅲ、V**族杂质在**Si、Ge**晶体中为深能级杂质。
- 2、受主杂质向价带提供空穴成为正电中心。
- 3、杂质存在两种状态：（ ）和（ ）。

作业

1. 位于晶格间隙的杂质原子，通常它的体积较（），称为（）杂质。
2. 杂质原子取代晶格原子位于格点上，称为（）杂质，它的大小（）被取代原子的大小。
3. 受主杂质是（），未电离时呈（）称为（）态，电离后呈（）成为（）。施主杂质是（），未电离时呈（）称为（）态，电离后呈（）成为（）。
4. 浅施主能级位于（）；浅受主能级位于（）。杂质电离能很大的杂质能级属于（）。深施主能级位于（）；深受主能级位于（）。
5. Si中同时均匀掺杂的有P和B原子，B的掺杂浓度为 10^3 个/cm³，P的掺杂浓度为 10^4 个/cm³，则Si为（）（n或p型）半导体。

作业

6. MX型离子晶体，一般负离子空位 V_x 是（），M为间隙原子时为（）。
7. GaAs中的反结构缺陷指的是（）。
8. 深能级的特点是什么？
9. 晶体的缺陷可以分为（），（）和（）。
10. 晶体中的点缺陷包括（），（）和（）。
11. 名词解释：等电子杂质；等电子陷阱；双性杂质
12. 课后作业 第2题