

# 半导体物理

主讲人：蒋玉龙

微电子学楼312室，65643768

Email: [yljiang@fudan.edu.cn](mailto:yljiang@fudan.edu.cn)

<http://10.14.3.121>

# 第四章 半导体中杂质和缺陷能级

4.1 硅、锗晶体中的杂质能级

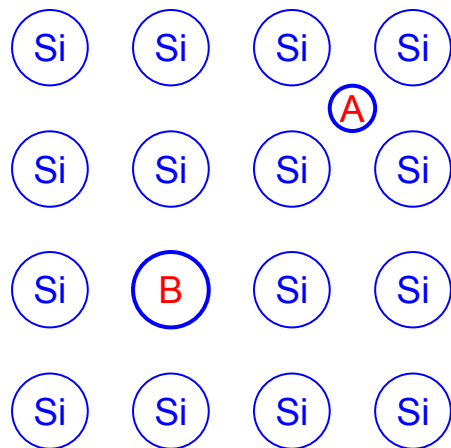
4.2 III—V族化合物中的杂质能级

4.3 缺陷、位错能级

# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sup>1</sup>

## 4.1.1 替位式杂质和间隙式杂质

—按照球形原子堆积模型，金刚石晶体的一个原胞中的8个原子只占该晶胞体积的34%，还有66%是空隙！



A—间隙式杂质原子：原子半径比较小

B—替位式杂质原子：原子的大小与被取代的晶体原子大小比较相近

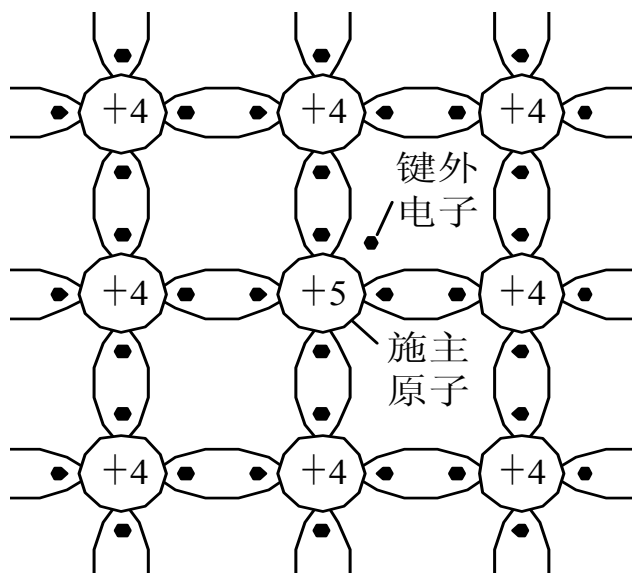
杂质浓度：单位体积中的杂质原子数

# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sub>2</sub>

## 4.1.2 施主杂质 施主能级 受主杂质 受主能级

— 当V族元素P在Si中成为替位式杂质且电离时，能够释放电子而产生导电电子并形成正电中心，称它们为施主杂质或n型杂质

成键后，P 原子多  
余 1 个价电子



问题：该电子的运动状态和能量？

1. 比成键电子自由得多， $E_D \gg E_V$
2. 与导带电子也有差别（受到  $P^+$  库仑吸引作用）

$$\therefore E_D = E_C - E_{\text{库仑}} \text{ (落在禁带中)}$$

# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sup>3</sup>

## 4.1.2 施主杂质 施主能级 受主杂质 受主能级

一施主电离

注意点：

1. 杂质能级用短线表示  
(分立能级，局域，未形成能带)

2.  $\Delta E_D \ll E_g$

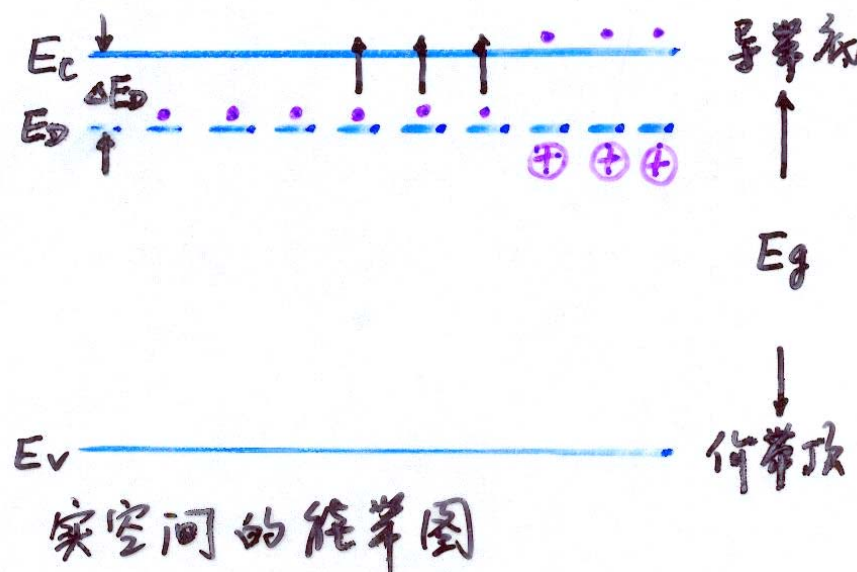
$T = 0 \text{ K}$ ，束缚态

$T \neq 0 \text{ K}$ ，能带角度：电子从  $E_D$  跃迁到  $E_C$ ，成为导带电子

空间角度：电子脱离  $P^+$  离子的库仑束缚，运动到无穷远

离化态

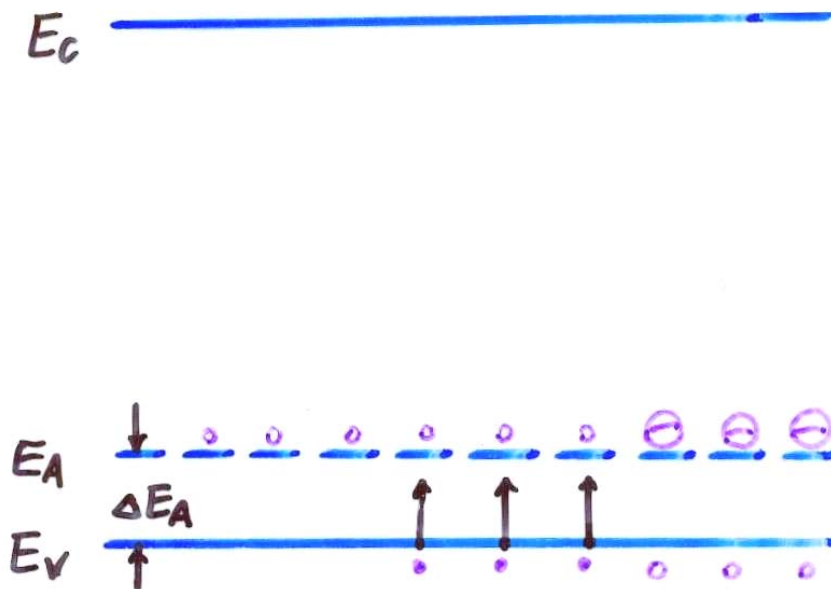
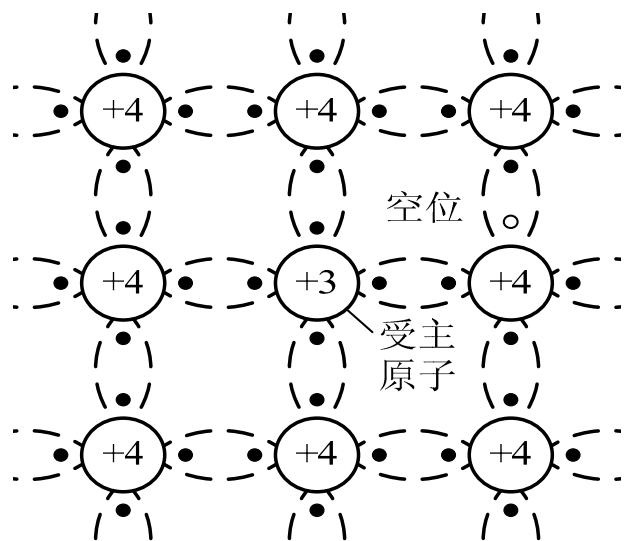
电离的原因：热激发，远红外光的照射



# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sup>4</sup>

## 4.1.2 施主杂质 施主能级 受主杂质 受主能级

— 当III族元素B在Si中成为替位式杂质且电离时，能够接受电子而产生导电空穴并形成负电中心，称它们为受主杂质或p型杂质



按杂质向半导体提供载流子的类型分类

n 型半导体

p 型半导体

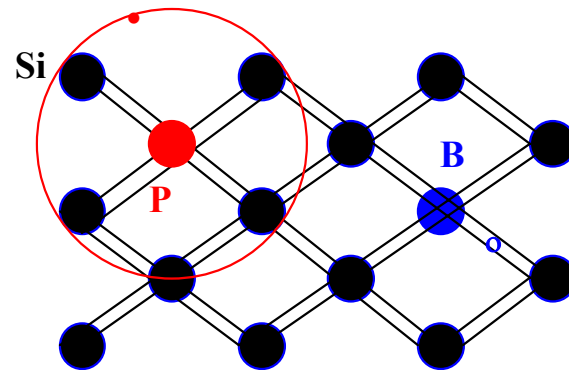
本征半导体

# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sup>5</sup>

## 4.1.3 杂质浅能级电离能的简单计算

### 一类氢原子模型的计算

氢原子: 
$$E_n = -\frac{m_0 e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ (eV)}$$



修正: 1°  $\varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon_0 \varepsilon_r$      $\varepsilon_r(\text{Si})=12$      $\varepsilon_r(\text{Ge})=16$ .

2°  $m_0 \rightarrow m^*$  注意 Si, Ge 多能谷效应,

作各向同性处理后,  $\frac{1}{m^*} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{m_l} + \frac{2}{m_t} \right)$  电导有效质量

类氢模型: 
$$E_n = -\frac{m^* e^4}{8\varepsilon_0^2 \varepsilon_r^2 h^2 n^2} = -\frac{(m^*/m_0) 13.6}{\varepsilon_r^2 n^2} \text{ (eV)}$$

$\therefore \Delta E_{D(A)} \sim \text{几十 meV}$

# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sub>6</sub>

## 4.1.3 杂质浅能级电离能的简单计算

### 一类氢原子模型的计算

氢原子基态电子的玻尔半径

施主杂质电子的玻尔半径:

$$a_B = \frac{h^2 \varepsilon_0}{\pi e^2 m_0} = 0.53 (\text{\AA}) \quad \begin{matrix} \varepsilon_0 \Rightarrow \varepsilon_0 \varepsilon_r \\ m_0 \Rightarrow m_e^* \end{matrix} \quad a^* = \frac{h^2 \varepsilon_r \varepsilon_0}{\pi e^2 m_e^*} = 0.53 \frac{m_0}{m_e^*} \varepsilon_r (\text{\AA})$$

Si:  $m^* = 0.26 m_0$

$\varepsilon_r(\text{Si}) = 12$

$$a^* = \frac{h^2 \varepsilon_r \varepsilon_0}{\pi e^2 m_e^*} = 0.53 \frac{m_0}{m_e^*} \varepsilon_r$$

$$0.53 \times \frac{1}{0.26} \times 12 = 24.5 (\text{\AA})$$

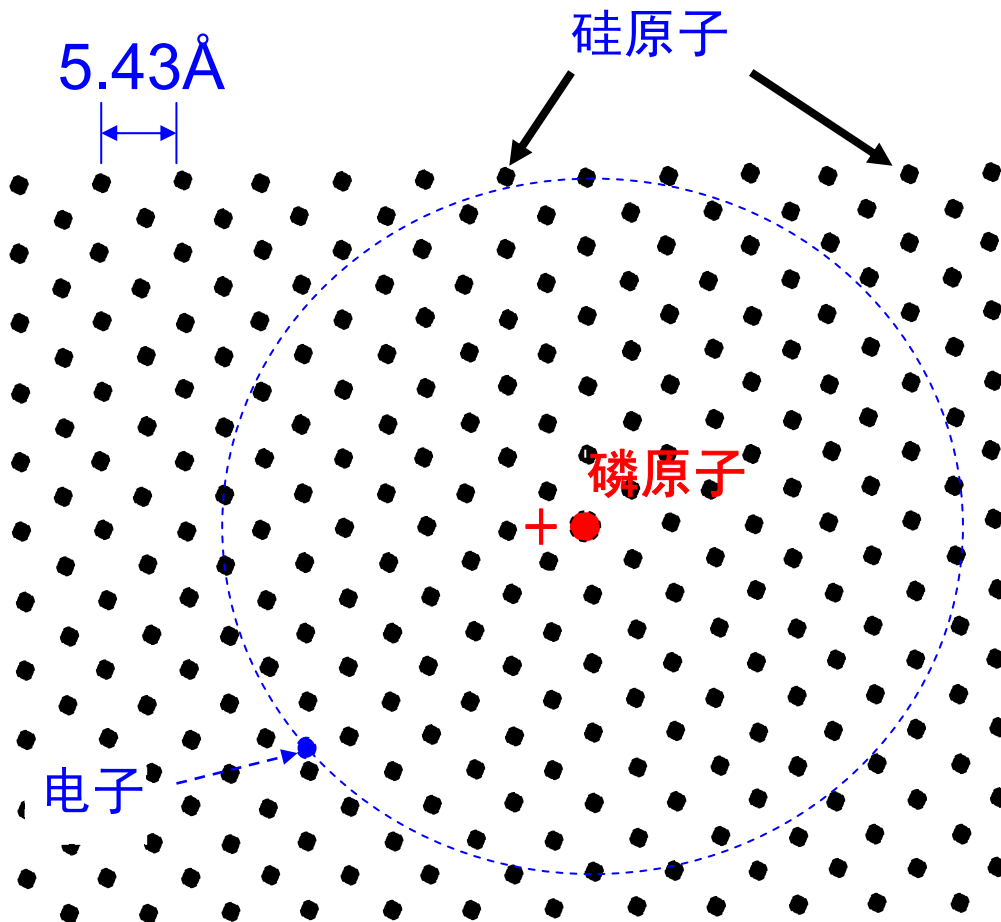


# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sub>7</sub>

## 4.1.3 杂质浅能级电离能的简单计算

一类氢原子模型的计算

$$a^* = 24.5(\text{\AA})$$



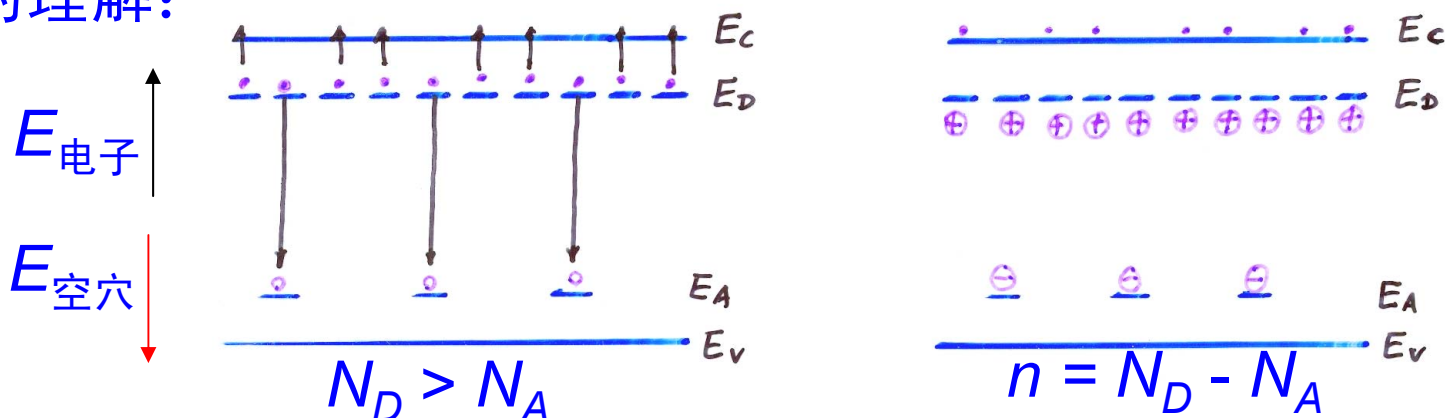
# 4.1 硅、锗晶体中的杂质能级<sup>8</sup>

## 4.1.4 杂质的补偿作用

— 当半导体中同时存在施主和受主时，考虑杂质补偿作用

空间角度的理解：施主周围有多余的价电子，受主周围缺少价电子，施主多余的价电子正好填充受主周围空缺的价键电子，使价键饱和，使系统能量降低  
—— 稳定状态

能带角度的理解：



有效施主浓度（有效掺杂浓度）  $N_{D(\text{eff})} = N_D - N_A$

杂质补偿度  $\gamma = 1 - \frac{N_D - N_A}{N_D + N_A}$

注意：  $N_D \approx N_A$  并非高纯半导体