

# 第五章半导体载流子的平衡态统计分布

5.1 状态密度

5.2 费米能级和载流子的统计分布

5.3 本征半导体中的载流子统计

5.4 杂质半导体中的载流子统计

5.5 简并半导体

# 5.3 本征半导体中的载流子统计<sub>1</sub>

## 5.3.1 本征载流子浓度 $n_i$

— 热激发所产生的载流子

— 没有杂质和缺陷的半导体

$T = 0 \text{ K}$ , 价带全满, 导带全空

$T \neq 0 \text{ K}$ , 热激发, 电子从价带激发到导带 (本征激发)

$T > 0 \text{ K}$ ,  $n = p = n_i$ ,  $n \cdot p = n_i^2$  — 电中性条件

$$n_i = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right) \cdot N_v \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{kT}\right)} = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2kT}\right)$$

$$n_i = 4.82 \times 10^{15} \left( \frac{m_{dn} m_{dp}}{m_0^2} \right)^{3/4} T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

# 5.3 本征半导体中的载流子统计<sub>2</sub>

## 5.3.1 本征载流子浓度 $n_i$

$$n_i = 4.82 \times 10^{15} \left( \frac{m_{dn} m_{dp}}{m_0^2} \right)^{3/4} T^{3/2} \exp \left( - \frac{E_g}{2kT} \right)$$

本征载流子浓度 $n_i$ 与禁带宽度 $E_g$

T=300K Ge:  $E_g=0.67eV$ ,  $n_i=2.4 \times 10^{13} cm^{-3}$

Si:  $E_g=1.12eV$ ,  $n_i=1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$

GaAs  $E_g=1.43eV$ ,  $n_i=1.1 \times 10^7 cm^{-3}$

测量值

本征载流子浓度 $n_i$ 与温度T

$$\ln(n_i T^{-3/2}) = - \frac{E_g}{2k} \frac{1}{T} + B$$

# 5.3 本征半导体中的载流子统计<sub>3</sub>

## 5.3.1 本征载流子浓度 $n_i$

$$n_i = 4.82 \times 10^{15} \left( \frac{m_{dn} m_{dp}}{m_0^2} \right)^{3/4} T^{3/2} \exp \left( - \frac{E_g}{2kT} \right)$$

注意点:

1° 对于某种半导体材料,  $T$  确定,  $n_i$  也确定

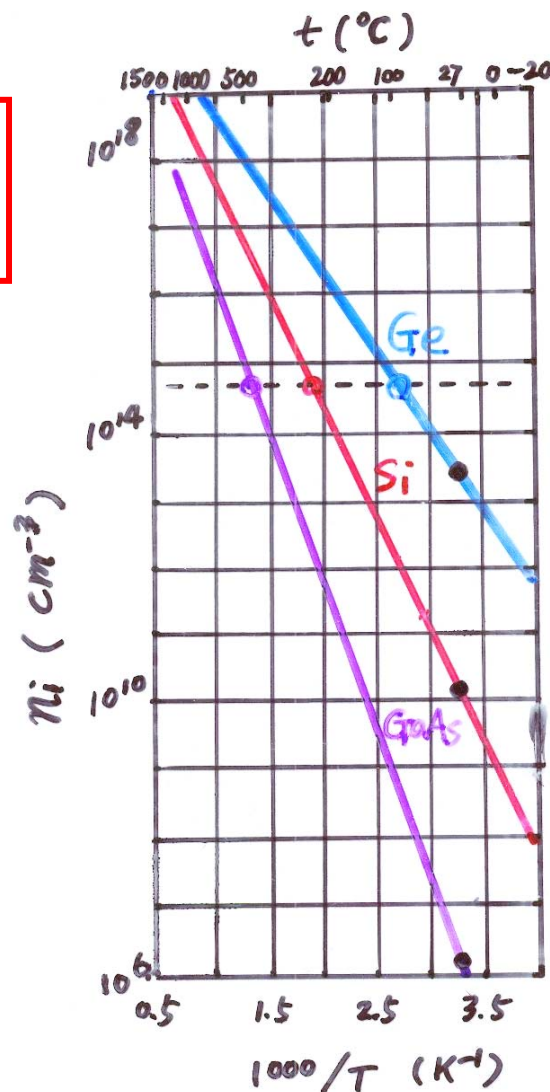
室温下    Si     $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$   
             Ge     $2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

2° 斜率     $= -\frac{E_g}{2k} \propto E_g$

3° 极限工作温度    Si ~ 520 K

$n_i < 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$     Ge ~ 370 K

GaAs ~ 720 K —— “高温”半导体



# 5.3 本征半导体中的载流子统计<sub>4</sub>

## 5.3.2 本征半导体的费米能级位置

$$n = p$$

本征费米能级

$$E_f = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_V}{N_C} \right)$$

$$E_i = E_f = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln \left( \frac{m_{dp}}{m_{dn}} \right)$$

(禁带中线)

$m_{dp}$  和  $m_{dn}$  同数量级

本征费米能级 $E_i$ 基本上在禁带中线处

$$n = N_C \exp \left( -\frac{E_C - E_f}{kT} \right) \quad p = N_V \exp \left( -\frac{E_f - E_V}{kT} \right)$$

$$N_C = \frac{2(2\pi m_{dn} kT)^{3/2}}{h^3} \quad N_V = \frac{2(2\pi m_{dp} kT)^{3/2}}{h^3}$$

—————  $E_C$

-----  $E_i$

—————  $E_V$

$$\frac{E_C + E_V}{2} \gg \frac{3kT}{4} \ln \left( \frac{m_{dp}}{m_{dn}} \right)$$

Si(300K)

$$E_f = \frac{E_C + E_V}{2} - 0.013 \text{ eV}$$

# 第五章半导体载流子的平衡态统计分布

5.1 状态密度

5.2 费米能级和载流子的统计分布

5.3 本征半导体中的载流子统计

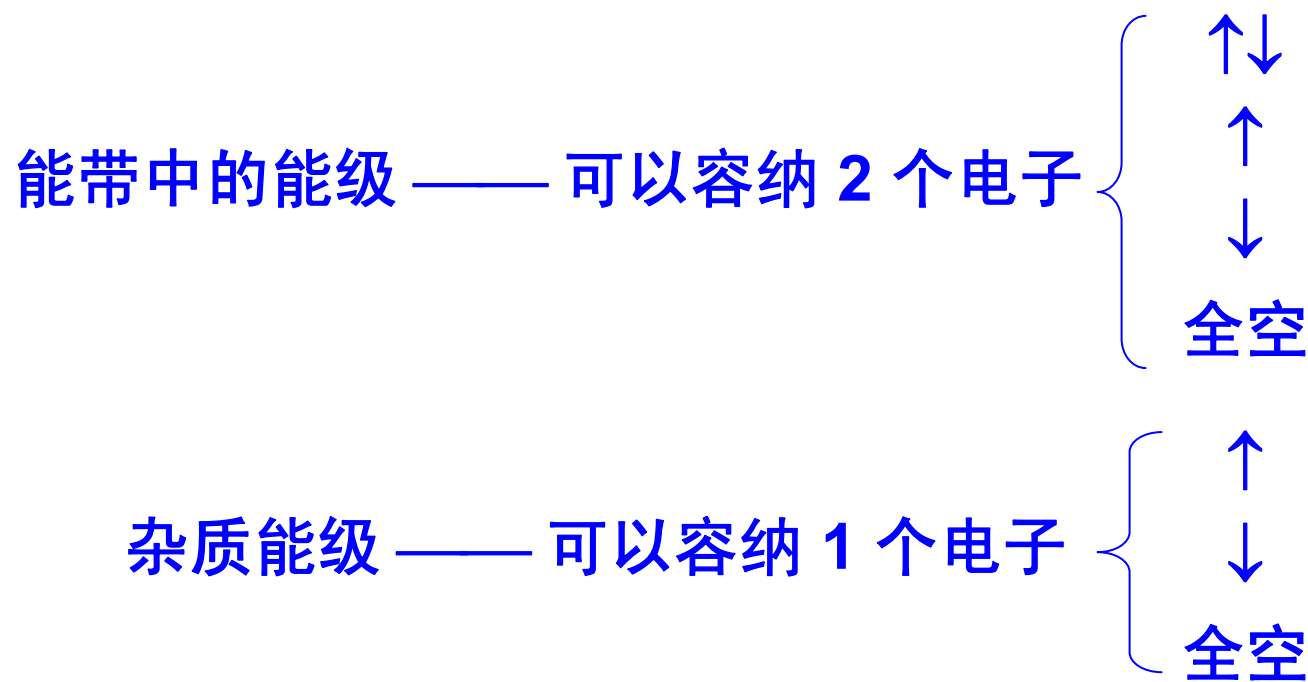
5.4 杂质半导体中的载流子统计

5.5 简并半导体

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sub>1</sub>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一杂质能级的分布函数：电子（或空穴）占据杂质能级的几率



# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sub>2</sub>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一杂质能级的分布函数

可以证明：

(1) 电子占据施主能级的几率

(2) 空穴占据受主能级的几率

$$f_D(E) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_f}{kT}\right)}$$

$$f_A(E) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_f - E_A}{kT}\right)}$$

讨论  $f_D(E)$ : 1° 当  $E_D - E_f \gg kT$  时  $f_D(E) \rightarrow 0$

2° 当  $E_f - E_D \gg kT$  时  $f_D(E) \rightarrow 1$

3° 一般情况下  $0 < f_D(E) < 1$

当  $E_D = E_f$  时  $f_D(E) = 2/3$



# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sub>3</sub>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一杂质能级的分布函数：术语定义

施主能级上的电子浓度  
(未电离的施主浓度)

$$n_D = N_D f_D(E) \\ = \frac{N_D}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_f}{kT}\right)}$$

受主能级上的空穴浓度  
(未电离的受主浓度)

$$p_A = N_A f_A(E) \\ = \frac{N_A}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_f - E_A}{kT}\right)}$$

电离施主浓度  
(向导带激发电子的浓度)

$$n_D^+ = N_D - n_D = N_D [1 - f_D(E)] \\ = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_D - E_f}{kT}\right)}$$

电离受主浓度  
(向价带激发空穴的浓度)

$$p_A^- = N_A - n_A = N_A [1 - f_A(E)] \\ = \frac{N_A}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_f - E_A}{kT}\right)}$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sub>4</sub>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一例子：n型半导体中的载流子浓度（电中性条件和  $E_f$ ）

假定只有一种施主杂质， $E_D$ ， $N_D$ ，则电中性条件

$$n_0 = n_D^+ + p_0$$

导带电子浓度

电离施主浓度

价带空穴浓度

总的负电荷浓度

总的正电荷浓度

即

$$N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_f}{kT}\right) = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_D - E_f}{kT}\right)} + N_V \exp\left(-\frac{E_f - E_V}{kT}\right)$$

思路：只要  $T$  确定， $E_f$  也随着确定， $n_0$  和  $p_0$  也确定。

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>5</sup>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一例子：n型半导体中的载流子浓度（不同温区的讨论）

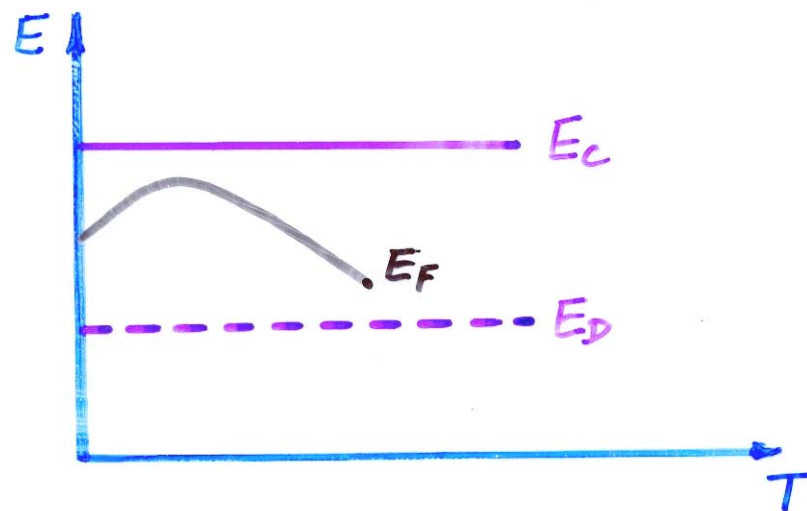
(1) 低温弱电离区 ( $p_0 \approx 0$   $n_0 = n_D^+ \ll N_D$ )  $n_0 = n_D^+ + p_0$

$$N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_f}{kT}\right) = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_D - E_f}{kT}\right)} \approx \frac{N_D}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_f}{kT}\right)$$

( $n_D^+ \ll N_D$ , 分母  $\gg 1$ )

$$\therefore E_f = \frac{E_C + E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_D}{2N_C}\right)$$

$$\begin{aligned} n_0 &= \left(\frac{N_D N_C}{2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{2kT}\right) \\ &= \left(\frac{N_D N_C}{2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right) \end{aligned}$$



# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sub>5</sub>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一例子：n型半导体中的载流子浓度（不同温区的讨论）

(2) 中等电离区 → 强电离区

$$n_0 = n_D^+ + p_0$$

$$N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_f}{kT}\right) = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_D - E_f}{kT}\right)}$$

$$\frac{N_C}{2N_D} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \cdot 2 \exp\left(-\frac{E_D - E_f}{kT}\right) = \frac{1}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_D - E_f}{kT}\right)}$$

$= \chi^2$

$$E_f = E_D + kT \ln\left(\frac{\sqrt{\chi^2 + 4} - \chi}{4\chi}\right)$$

$$n_0 = N_D \left[ \frac{2\chi}{\sqrt{\chi^2 + 4} + \chi} \right]$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sub>6</sub>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一例子：n型半导体中的载流子浓度（不同温区的讨论）

一个极限  $\chi \rightarrow 0$  （低温弱电离区）

$$\frac{N_C}{2N_D} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right) = \chi^2$$

另一个极限  $\chi \gg 1$  （强电离区）

$$\left\{ \begin{array}{l} E_f = E_C + kT \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right) \\ n_0 = N_D \end{array} \right. \xleftarrow{\chi \gg 1} \left\{ \begin{array}{l} E_f = E_D + kT \ln\left(\frac{\sqrt{\chi^2 + 4} - \chi}{4\chi}\right) \\ n_0 = N_D \left[ \frac{2\chi}{\sqrt{\chi^2 + 4} + \chi} \right] \end{array} \right.$$

(3) 过渡区（强电离区  $\rightarrow$  本征激发） 需要考虑本征激发部分

$$\left\{ \begin{array}{l} n_0 = p_0 + N_D \\ n_0 p_0 = n_i^2 \end{array} \right. \quad \text{—— 电中性条件}$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计7

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一例子：n型半导体中的载流子浓度（不同温区的讨论）

$$\begin{cases} n_0 = p_0 + N_D \\ n_0 p_0 = n_i^2 \end{cases} \longrightarrow n_0 = \frac{\sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} + N_D}{2} \quad p_0 = \frac{\sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} - N_D}{2}$$

$n_0, p_0$  的另一种表示方法

$$\begin{cases} n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right) \\ p_0 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_f}{kT}\right) \end{cases} \begin{cases} \leftarrow n_i = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i}{kT}\right) \\ \leftarrow p_i = N_v \exp\left(-\frac{E_i - E_v}{kT}\right) \end{cases}$$

$$N_D = n_0 - p_0 = 2n_i \sinh\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right)$$

双曲正弦函数

$$E_f = E_i + kT \sinh^{-1}\left(\frac{N_D}{2n_i}\right)$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>8</sup>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一例子：n型半导体中的载流子浓度（不同温区的讨论）

### (4) 本征激发区

高温下  $n_i \gg N_D$

$$\left\{ \begin{array}{l} n_0 = n_i \\ p_0 = n_i \\ E_f = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_V}{N_C} \right) \end{array} \right.$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

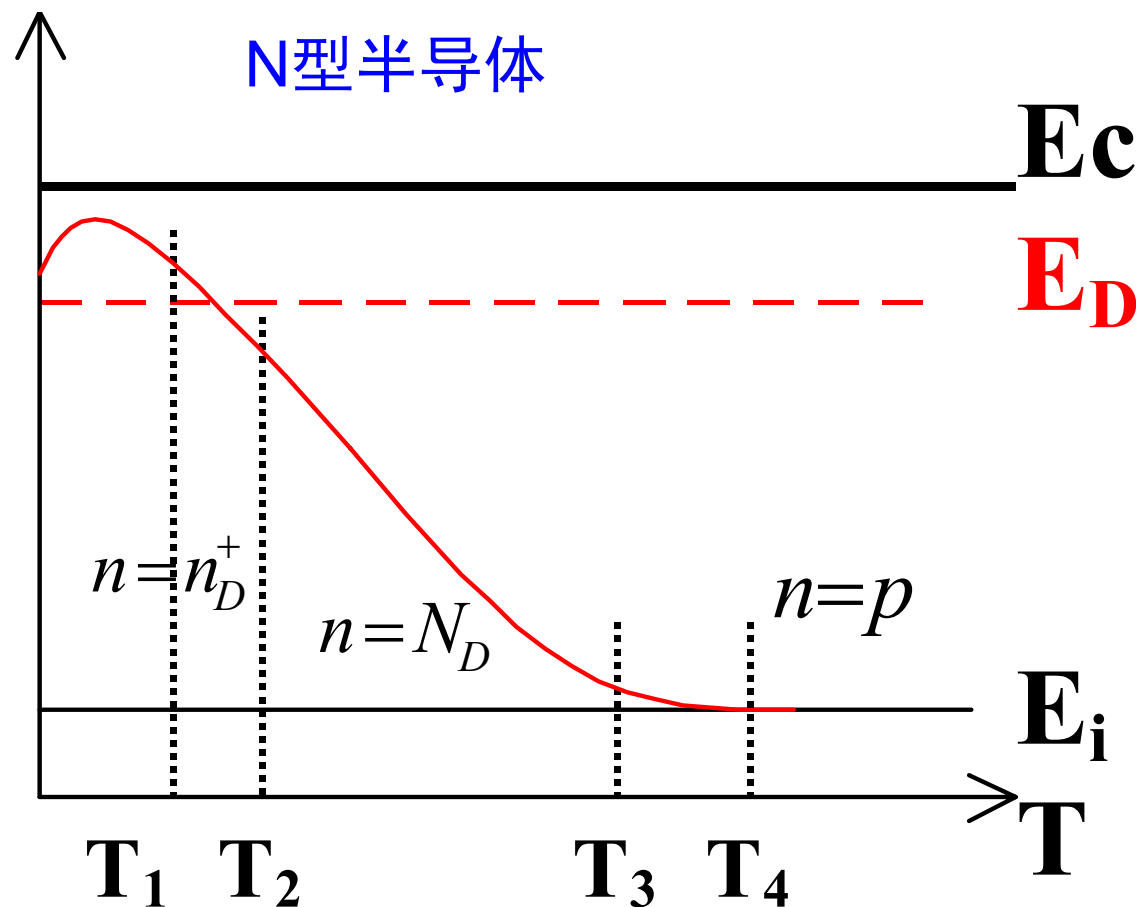
一小结

$$E_f = \frac{E_C + E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_D}{2N_C} \right)$$

$$E_f = E_C + kT \ln \left( \frac{N_D}{N_C} \right)$$

$$E_f = E_i + kT \sinh^{-1} \left( \frac{N_D}{2n_i} \right)$$

$$E_f = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_V}{N_C} \right)$$



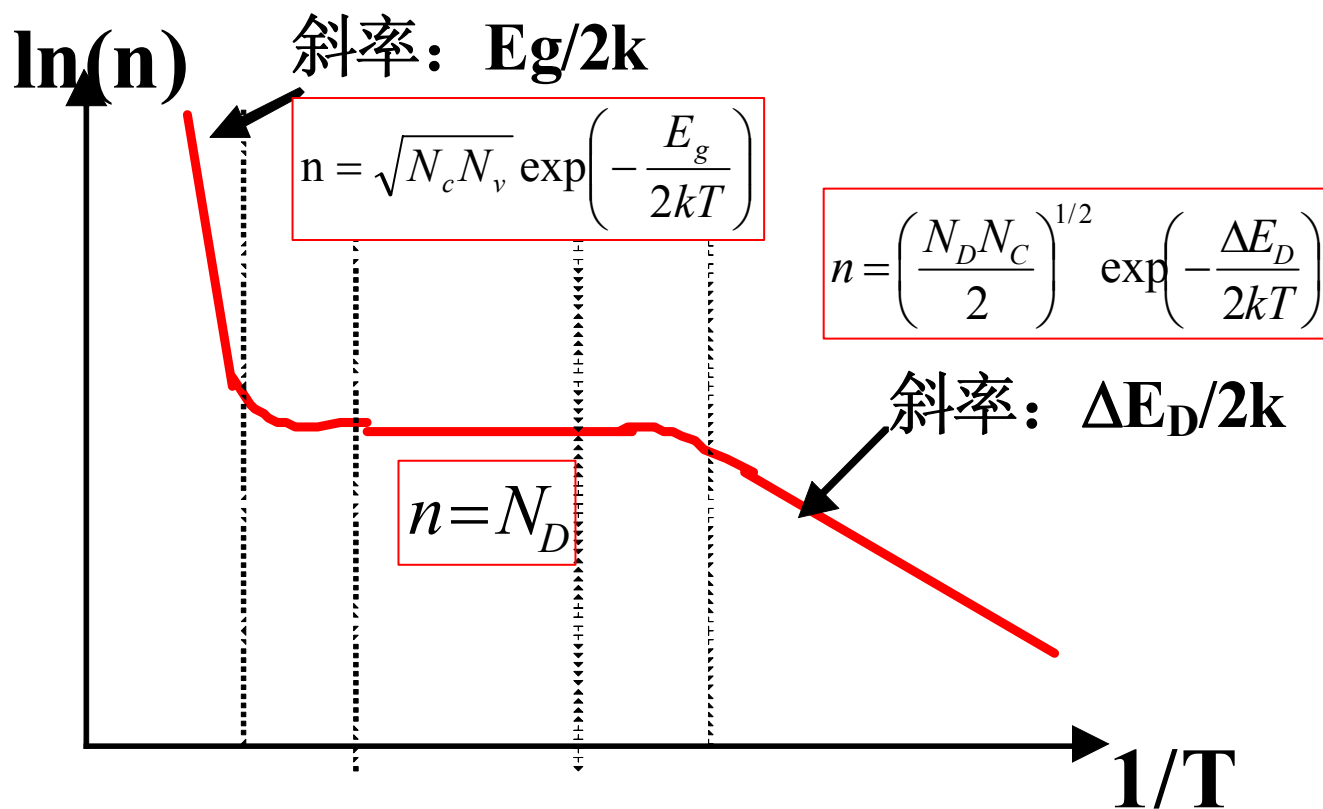


# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>10</sup>

## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一小结

N型半导体中的电子浓度随温度的变化关系



# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>11</sup>

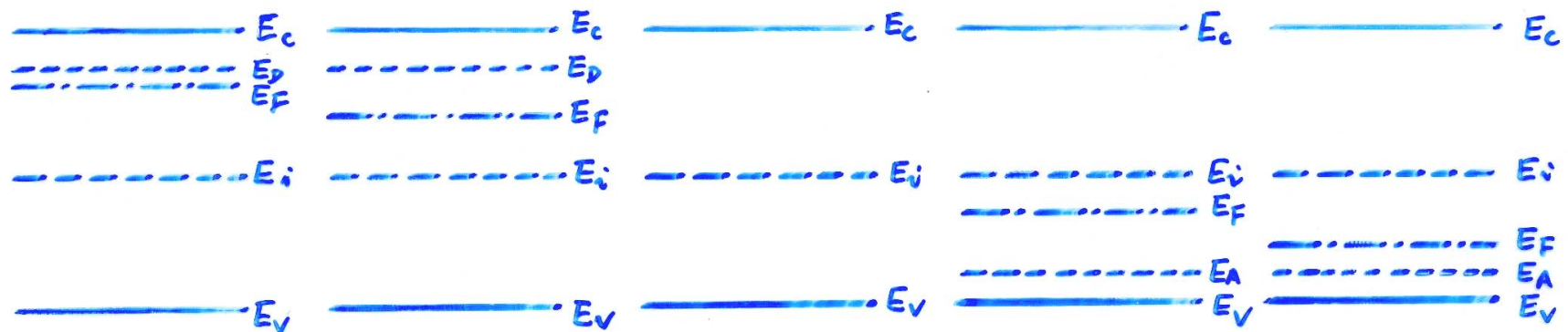
## 5.4.1 非补偿情形（单一杂质）

一小结  $E_f \sim N_D$ （强电离，室温）

$$E_f = E_C + kT \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)$$

$$np = n_i^2$$

—费米能级：反应半导体导电类型和掺杂水平



$N_D$  高  
强 n 型

$N_D$  低  
弱 n 型

$N_D \approx N_A$   
本征

$N_A$  低  
弱 p 型

$N_A$  高  
强 p 型

多数载流子（多子）

少数载流子（少子）

n 型半导体

电子

空穴

p 型半导体

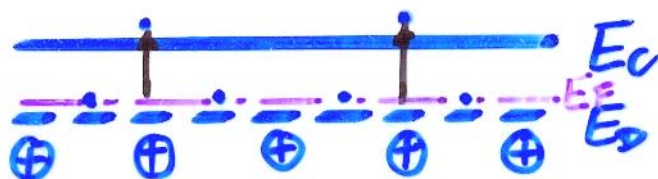
空穴

电子

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>12</sup>

## 5.4.2 补偿情形

—少量受主杂质情况:  $N_D > N_A$



电中性条件

$$p_0 + n_D^+ = n_0 + p_A^-$$



或  $p_0 + N_D - n_D = n_0 + N_A - p_A$

$$N_D > N_A$$

$$N_V \exp\left(-\frac{E_f - E_V}{kT}\right) + \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_f - E_D}{kT}\right)} = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_f}{kT}\right) + \frac{N_A}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_A - E_f}{kT}\right)}$$

仅  $E_f$  和  $T$  未知

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>13</sup>

## 5.4.2 补偿情形

—化简方程，多温度区讨论

### 1. 低温弱电离区

$$p_0 + N_D - n_D = n_0 + N_A - p_A$$

$N_D > N_A$ ,  $E_f$  钉扎在  $E_D$  附近, 则远在  $E_A$  之上,  $E_A$  完全被电子填充

$p_0 \approx 0$      $p_A \approx 0$  , 而  $n_0$ ,  $n_D$  则不确定.

$$n_0 + N_A = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_f - E_D}{kT}\right)}$$

(1)  $N_A \gg n_0$  极低温度情形

$$N_A = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_f - E_D}{kT}\right)} \longrightarrow \begin{cases} E_f = E_D + kT \ln\left(\frac{N_D - N_A}{2N_A}\right) \\ n_0 = \frac{N_C(N_D - N_A)}{2N_A} \exp(-\Delta E_D/kT) \end{cases}$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>13</sup>

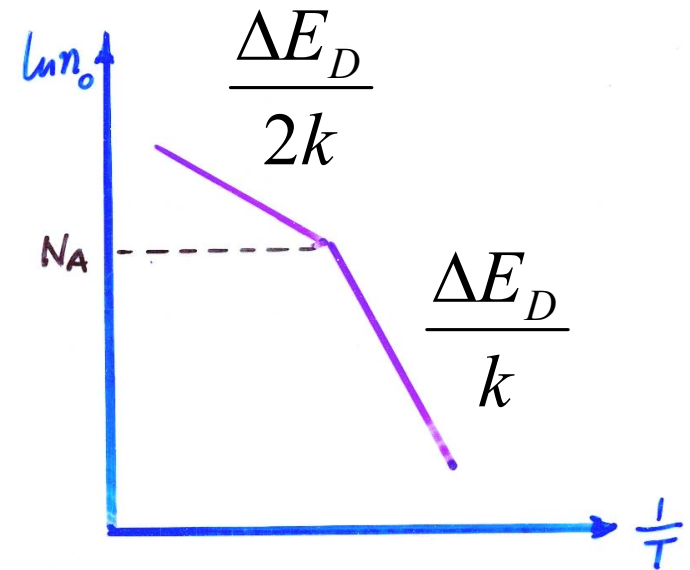
## 5.4.2 补偿情形

—化简方程，多温度区讨论

(2)  $n_0 \gg N_A$  单一杂质情形

$$n_0 = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_f - E_D}{kT}\right)}$$

$$\begin{cases} E_f = \frac{E_C + E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_D}{2N_C}\right) \\ n_0 = \left(\frac{N_D N_C}{2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right) \end{cases}$$



# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>14</sup>

## 5.4.2 补偿情形

—化简方程，多温度区讨论

$$n_0 + N_A = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_f - E_D}{kT}\right)}$$

(3) 一般情形

$$\frac{n_0(N_A + n_0)}{N_D - (N_A + n_0)} = \frac{N_C}{2} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \equiv N_C'$$

$$\therefore \begin{cases} n_0 = -\frac{N_C' + N_A}{2} + \frac{1}{2} \left[ (N_C' + N_A)^2 + 4N_C'(N_D - N_A) \right]^{1/2} \\ E_F = \dots\dots \end{cases}$$

2. 强电离区  $N_D - N_A \gg n_i$

$$n_0 = N_D - N_A \qquad E_f = E_C + kT \ln\left(\frac{N_D - N_A}{N_C}\right)$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>15</sup>

## 5.4.2 补偿情形

—化简方程，多温度区讨论

### 3. 过渡区（考虑本征激发作用）

$$\begin{cases} n_0 + N_A = p_0 + N_D \\ n_0 p_0 = n_i^2 \end{cases} \begin{cases} n_0 = \frac{N_D - N_A}{2} + \frac{1}{2} \left[ (N_D - N_A)^2 + 4n_i^2 \right]^{1/2} \\ p_0 = -\frac{N_D - N_A}{2} + \frac{1}{2} \left[ (N_D - N_A)^2 + 4n_i^2 \right]^{1/2} \\ E_f = E_i + kT \sinh^{-1} \left( \frac{N_D - N_A}{2n_i} \right) \end{cases}$$

### 4. 本征激发区

$$\begin{cases} n_0 = p_0 = n_i \\ E_f = E_i \end{cases}$$

# 5.4 杂质半导体中的载流子统计<sup>16</sup>

## 5.4.2 补偿情形

—多种施主、多种受主并存

$$p_0 + \sum_j n_{D_i}^+ = n_0 + \sum_j p_{A_i}^- \quad \text{—— 电中性条件}$$



# 第五章半导体载流子的平衡态统计分布

5.1 状态密度

5.2 费米能级和载流子的统计分布

5.3 本征半导体中的载流子统计

5.4 杂质半导体中的载流子统计

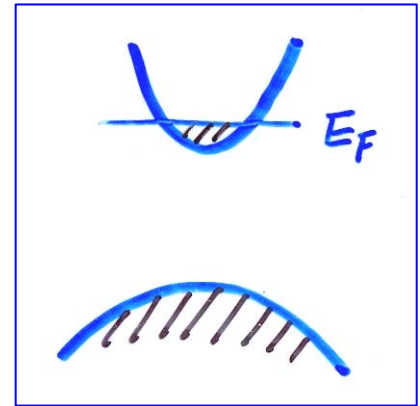
5.5 简并半导体

# 5.5 简并半导体<sub>1</sub>

## 5.5.1 简并的出现

— 单一杂质，n 型半导体，处于强电离区（饱和区）

$$E_f = E_C + kT \ln \left( \frac{N_D}{N_C} \right)$$



当  $N_D \geq N_C$  时， $E_f \geq E_C$ ，玻耳兹曼统计不适用

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)} \sim 1$$

必须用费米统计，必须考虑泡里不相容原理

—— 载流子简并化  
简并半导体

# 5.5 简并半导体<sub>2</sub>

## 5.5.2 简并半导体的载流子浓度

— 单一杂质，n 型半导体，处于强电离区（饱和区）

$$n_0 = \int_{E_C}^{E_{C\max}} \frac{1}{V} f_F(E) g_c(E) dE$$
$$= 4\pi \frac{(2m_{dn})^{3/2}}{h^3} \int_{E_C}^{\infty} \frac{(E - E_C)^{1/2}}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)} dE$$

令

$$x = \frac{E - E_C}{kT}$$

$$\xi = \frac{E_f - E_C}{kT}$$

$$= N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2}}{1 + \exp(x - \xi)} dx$$

费米积分  $\equiv F_{1/2}(\xi) = F_{1/2}\left(\frac{E_f - E_C}{kT}\right)$

$$p_0 \equiv N_v \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right)$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

简并半导体不适用！

# 5.5 简并半导体<sub>3</sub>

## 5.5.3 简并化条件

—非简并与简并情况下的相对误差

$$n_B = n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right) \quad n \equiv N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right)$$

相对误差

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n - n_B}{n} = 1 - \frac{\sqrt{\pi} \exp(\eta)}{2F_{1/2}(\eta)}$$

$$\eta = \frac{E_f - E_c}{kT}$$

$\eta$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
$F_{1/2}(\eta)$	.016	.043	.115	.291	.678	1.396	2.502	3.977	5.771
$ \Delta n/n $	.014	.026	.043	.12	.307	.726	1.617	3.476	7.384

**$E_c - E_f > 2kT$**   
非简并

弱简并

简并

# 5.5 简并半导体<sub>4</sub>

## 5.5.3 简并化条件 一简并判据

$$\begin{cases} E_C - E_f > 2kT & \text{非简并} \\ 0 < E_C - E_f \leq 2kT & \text{弱简并} \\ E_C - E_f \leq 0 & \text{(强)简并} \end{cases}$$

临界浓度 $N_D^C$ 的估算

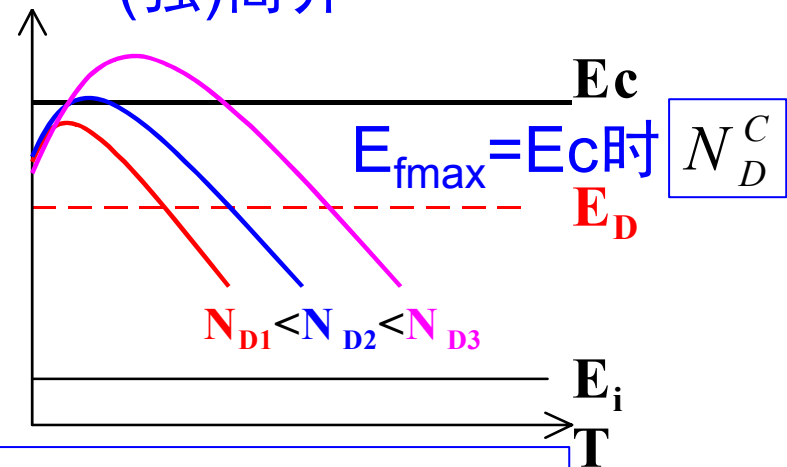
$$E_f = \frac{E_C + E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_D}{2N_C} \right) \quad \frac{dE_f}{dT} = 0 \Rightarrow \ln \left( \frac{N_D}{2N_C} \right) = \frac{3}{2}$$

$$E_{f \max} = \frac{E_C + E_D}{2} + \frac{3}{4} kT_{\max} \quad N_C = 0.11 N_D$$

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left( \frac{m_{dn}}{m_0} \right)^{3/2} = 0.11 N_D \quad T_{\max} = 8.12 \times 10^{-12} \left( \frac{m_0}{m_{dn}} \right) N_D^{2/3}$$

$$E_{f \max} = E_C, N_D \Rightarrow N_D^C \quad Si : \Delta E_D = 0.044 eV, m_{ed}^* = 1.08 m_0, N_D^C = 3 \times 10^{20} cm^{-3}$$

$$N_D^C = 2.9 \times 10^{22} \left( \frac{m_{ed}^*}{m_0} \right)^{3/2} \Delta E_D^{3/2} \quad Ge : \Delta E_D = 0.012 eV, m_{ed}^* = 0.56 m_0, N_D^C = 1.6 \times 10^{19} cm^{-3}$$



# 5.5 简并半导体<sub>5</sub>

## 5.5.3 简并化条件

一简并判据 简并浓度的正式计算

$$n_0 = n_D^+ \quad \text{—— 电中性条件}$$

强简并条件

$$E_f = E_C$$

$$N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2} \left( \frac{E_f - E_C}{kT} \right) = \frac{N_D}{1 + 2 \exp \left( \frac{E_f - E_D}{kT} \right)}$$

则

$$N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} 0.6 = \frac{N_D}{1 + 2 \exp \left( \frac{E_C - E_D}{kT} \right)}$$

$$N_D = 0.68 N_C [1 + 2 \exp(\Delta E_D / kT)]$$

结论:

1° 发生简并时,  $N_D \geq \sim N_C \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  重掺杂

2°  $N_D$  之值与  $\Delta E_D$ ,  $m_e^*$  有关

3°  $N_D$  之值与  $T$  有关

# 5.5 简并半导体<sub>6</sub>

## 5.5.4 简并时杂质的电离

—简并时杂质不能充分电离

$$n_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_f - E_D}{kT}\right)}$$

非简并时，室温下通常  $E_f \leq E_D$ ， $n_D^+ \approx N_D$ （强电离区饱和区）

简并时， $E_f \geq E_C$ ，则  $n_D^+ < N_D$  简并时杂质不能充分电离