

СТАТИСТИКА НА ТОКОВИ НОСИТЕЛИ

1. Електронеутралност в полупроводниците и диелектриците

$$n_d = N_d - N_d^+ = N_d - p_d,$$

$$p_a = N_a - N_a^- = N_a - n_a,$$

$$p_0 + p_d - n_0 - n_a = 0. \quad (1)$$

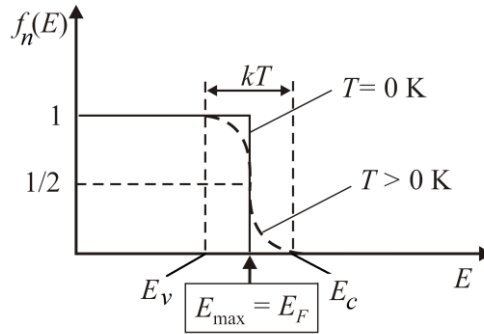
- за електроните $n = n_0 + \Delta n$,

- за дупките $p = p_0 + \Delta p$.

$$p + p_d - n - n_a = 0. \quad (2)$$

2. Разпределение на електроните и дупките по енергетични състояния в зоните и на дискретните нива

$$f_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}, \quad (3)$$



Фигура 1. Функция на разпределение за електрони в зонната схема.

$$f_p(E) = 1 - f_n(E)$$

$$f_p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E_F-E}{kT}} + 1}. \quad (4)$$

• донорните нива:
$$f_{nd}(E) = \frac{1}{\frac{1}{2} e^{\frac{E_d-E_F}{kT}} + 1}, \quad (5)$$

• акцепторните нива:
$$f_{na}(E) = \frac{1}{2e^{\frac{E_a-E_F}{kT}} + 1}. \quad (6)$$

• донорните нива:
$$f_{pd}(E) = \frac{1}{2e^{\frac{E_F-E_d}{kT}} + 1}, \quad (7)$$

• акцепторните нива:
$$f_{pa}(E) = \frac{1}{\frac{1}{2} e^{\frac{E_F-E_a}{kT}} + 1}. \quad (8)$$

3. Плътност на състоянията и равновесна концентрация на носителите на заряд в кристални полупроводници

$$N_n(E) = \frac{2\pi(2m_n)^{3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2}, \quad (9)$$

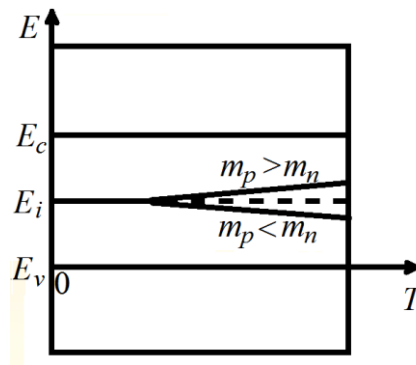
$$N_p(E) = \frac{2\pi(2m_p)^{3/2}}{h^3} (E_v - E)^{1/2}. \quad (10)$$

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad (11)$$

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right), \quad (12)$$

4. Ниво на Ферми и равновесна концентрация на носителите на заряд в неизродени собствени полупроводници

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + kT \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)^{1/2}. \quad (13)$$

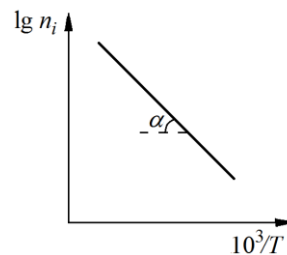


Фигура 2. Зависимост на нивото на Ферми от температурата за собствени полупроводници.

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2kT}\right) = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right).$$

$$\lg n_i = \lg \sqrt{N_c N_v} - \frac{0,43\Delta E_0}{2k10^3} \frac{10^3}{T}.$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\lg n_i}{10^3 / T} = \frac{0,43\Delta E_0}{2k10^3}, \quad \Delta E_0 = 0,4 \operatorname{tg} \alpha.$$



Фигура 3. Температурна зависимост на собствената концентрация на електроните за собствени полупроводници.

5. Закон на действащите маси

$$n_0(T)p_0(T) = n_i^2(T).$$

$$n_0 \gg p_0.$$

$$p_0 \gg n_0.$$

6. Ниво на Ферми и равновесна концентрация на носителите на заряд в неизродени полупроводници, съдържащи донори

$$N_d \neq 0, N_a = 0.$$

➤ А. НИСКИ ТЕМПЕРАТУРИ

$$n_0 = p_d. \quad (14)$$

- първа част – най-ниските температури близки до 0 К:

$$E_F = \frac{E_c + E_d}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_d}{2N_c}\right) \quad (15)$$

- втора част – горния интервал на ниските температури:

$$E_F = E_c + kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right). \quad (16)$$

$$p_d = N_d = N_d^+$$

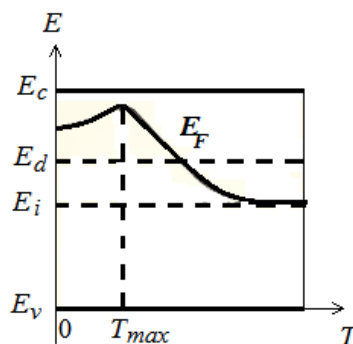
$$n_0 = \sqrt{\frac{N_c N_d}{2}} \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2kT}\right). \quad (17)$$

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right). \quad (18)$$

➤ Б. ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ

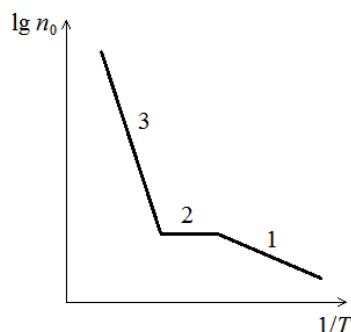
$$n_0 = p_d + p_0. \quad (19)$$

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right). \quad (20)$$



Фигура 4. Зависимост на нивото на Ферми от температурата за примесни полупроводници, съдържащи донори.

$$E_{F \max} = \frac{E_c + E_d}{2} + \frac{3}{4} kT_{\max}.$$



Фигура 5. Зависимост $\lg n_0 = f(1/T)$ за примесни полупроводници, съдържащи донори.

7. Ниво на Ферми и равновесна концентрация на носителите на заряд в неизродени полупроводници, съдържащи акцептори

$$N_a \neq 0, N_d = 0.$$

➤ А. НИСКИ ТЕМПЕРАТУРИ $p_0 = n_a$. (21)

- първа част – най-ниските температури близки до 0 К:

$$E_F = \frac{E_a + E_v}{2} - \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_a}{2N_v} \right), \quad (22)$$

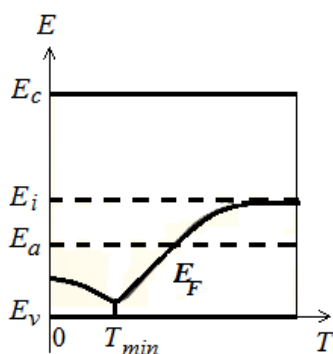
- втора част – горния интервал на ниските температури:

$$E_F = E_v - kT \ln \left(\frac{N_a}{N_v} \right). \quad (23)$$

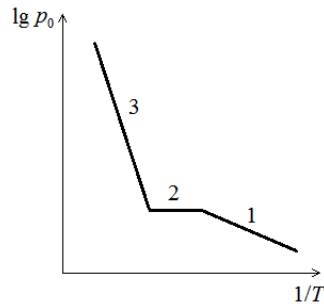
$$p_0 = \sqrt{\frac{N_v N_a}{2}} \exp \left(-\frac{\Delta E_a}{2kT} \right). \quad (24)$$

➤ Б. ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ $p_0 = N_a + n_0$. (25)

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right). \quad (26)$$



Фигура 6. Зависимост на нивото на Ферми от температурата за примесни полупроводници, съдържащи акцептори.



Фигура 7. Зависимост $\lg p_0 = f(1/T)$ за примесни полупроводници, съдържащи акцептори.

8. Ниво на Ферми и равновесна концентрация на носителите на заряд в неизродени полупроводници, съдържащи донори и акцептори

$$N'_d = N_d - N_a > 0.$$

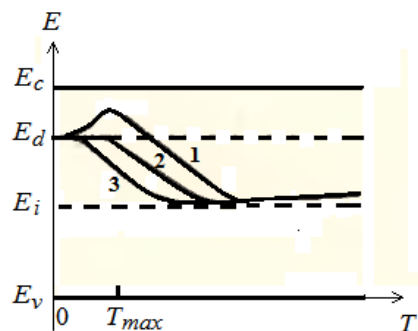
$$E_F = E_d + kT \ln \left(\frac{N'_d}{2N_a} \right). \quad (27)$$

$$n_0 = N_c \frac{N'_d}{2N_a} \exp \left(- \frac{\Delta E_d}{kT} \right). \quad (28)$$

$$N'_a = N_a - N_d > 0.$$

$$E_F = E_a - kT \ln \left(\frac{N'_a}{2N_d} \right). \quad (29)$$

$$p_0 = N_v \frac{N'_a}{2N_d} \exp \left(- \frac{\Delta E_a}{kT} \right). \quad (30)$$



Фигура 8. Зависимост на нивото на Ферми от температурата за компенсирани полупроводници с три различни ефективни концентрации на донорите $N'_d = N_d - N_a$:

$$1 - N_d > 3N_a, N'_d > 3,$$

$$2 - N_d = 3N_a, N'_d = 3,$$

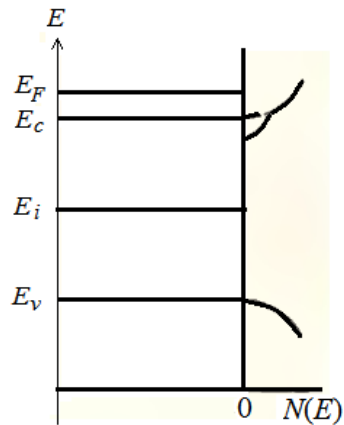
$$3 - 3N_a > N_d > N_a, 0 < N'_d < 3.$$

9. Изродени полупроводници

$$N_d^{cr} = B(m_n \Delta E_d)^{3/2}.$$

$$E_F - E_c > 5kT.$$

$$n_0 = \frac{8\pi(2m_n)^{3/2}}{3h^3} (E_F - E_c)^{3/2}.$$



Фигура 9. Зонната схема и плътността на състоянията за изроден n-тип полупроводник.

$$E_v - E_F > 5kT.$$