

## Chương 7

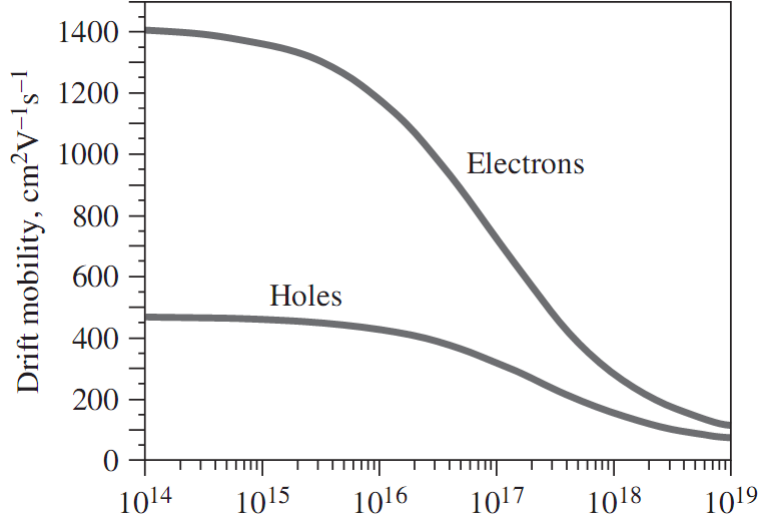
### Ví dụ bổ sung 1

Một chuyển tiếp đột ngột  $p^+n$  với diện tích cắt ngang là  $1 \text{ mm}^2$ , nồng độ acceptor (B) là  $5 \times 10^{18}$  nguyên tử/cm<sup>3</sup> ở phía  $p$ , nồng độ donor (As) là  $10^{16}$  nguyên tử/cm<sup>3</sup> ở phía  $n$ . Thời gian sống của lỗ trống trong vùng  $n$  là 420 ns, của điện tử trong vùng  $p$  là 5 ns do vùng này có nồng độ của tạp chất (tâm tái hợp) lớn hơn. Thời gian nhiệt sinh trung bình ( $\tau_g$ ) là 1  $\mu\text{s}$ . Độ dài của vùng  $p$  và  $n$  tương ứng là 5 và 100  $\mu\text{m}$ .

- Tính độ dài khuếch tán của hạt tải thiểu số và xác định đó là đi-ốt loại gì?
- Giá trị của điện trường trong dọc theo tiếp xúc là bao nhiêu?
- Tính giá trị của dòng điện tại thế áp thuận 0.6 V ở nhiệt độ 27 °C. Giả sử dòng điện chủ yếu do sự khuếch tán của hạt tải thiểu số.
- Tính dòng thuận tại nhiệt độ 100 °C khi điện thế dọc theo đi-ốt là 0.6 V. Giả sử sự phụ thuộc vào nhiệt độ của  $n_i$  là trội hơn so với của  $D$ ,  $L$ , và  $\mu$ .
- Giá trị của dòng ngược tại thế ngược  $V_r = 5 \text{ V}$ .

Lời giải:

- Công thức tổng quát của độ dài khuếch tán là  $L = \sqrt{D\tau}$  với  $D$  là hệ số khuếch tán và  $\tau$  là thời gian sống của hạt tải.  $D$  liên hệ với độ linh động của hạt tải  $\mu$  theo hệ thức  $D/\mu = k_B T/e$ . Dựa theo đồ thị sau:



Với  $N_a = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , có  $\mu_e \approx 150 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$

Với  $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , có  $\mu_h \approx 430 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$

Sử dụng  $k_B T/e = 0.02585 \text{ V}$  ở 300 K thu được:

$$D_e = \frac{k_B T \mu_e}{e} \approx 3.88 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1} \text{ và } D_h = \frac{k_B T \mu_h}{h} \approx 11.12 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1}$$

Độ dài khuếch tán là:

$$L_e = 1.39 \times 10^{-4} \text{ cm, hay } 1.39 \text{ } \mu\text{m} < 5 \text{ } \mu\text{m}.$$

$$L_h = 21.6 \times 10^{-4} \text{ cm, hay } 21.6 \text{ } \mu\text{m} < 100 \text{ } \mu\text{m}.$$

Vậy đi-ốt là loại dài.

b) Điện thế trong là:

$$V_0 = \left( \frac{k_B T}{e} \right) \ln \left( \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) = 0.875 \text{ V}$$

c) Để tính giá trị dòng điện tại thế thuận 0.6 V, chúng ta cần tính cả thành phần khuếch tán và thành phần tái hợp của dòng điện. Dường như tại giá trị thế thuận này, thành phần khuếch tán sẽ trội hơn thành phần tái hợp:

$$I = I_{so} \left[ \exp \left( \frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right] \approx I_{so} \exp \left( \frac{eV}{k_B T} \right) \text{ với } V \gg \frac{k_B T}{e}$$

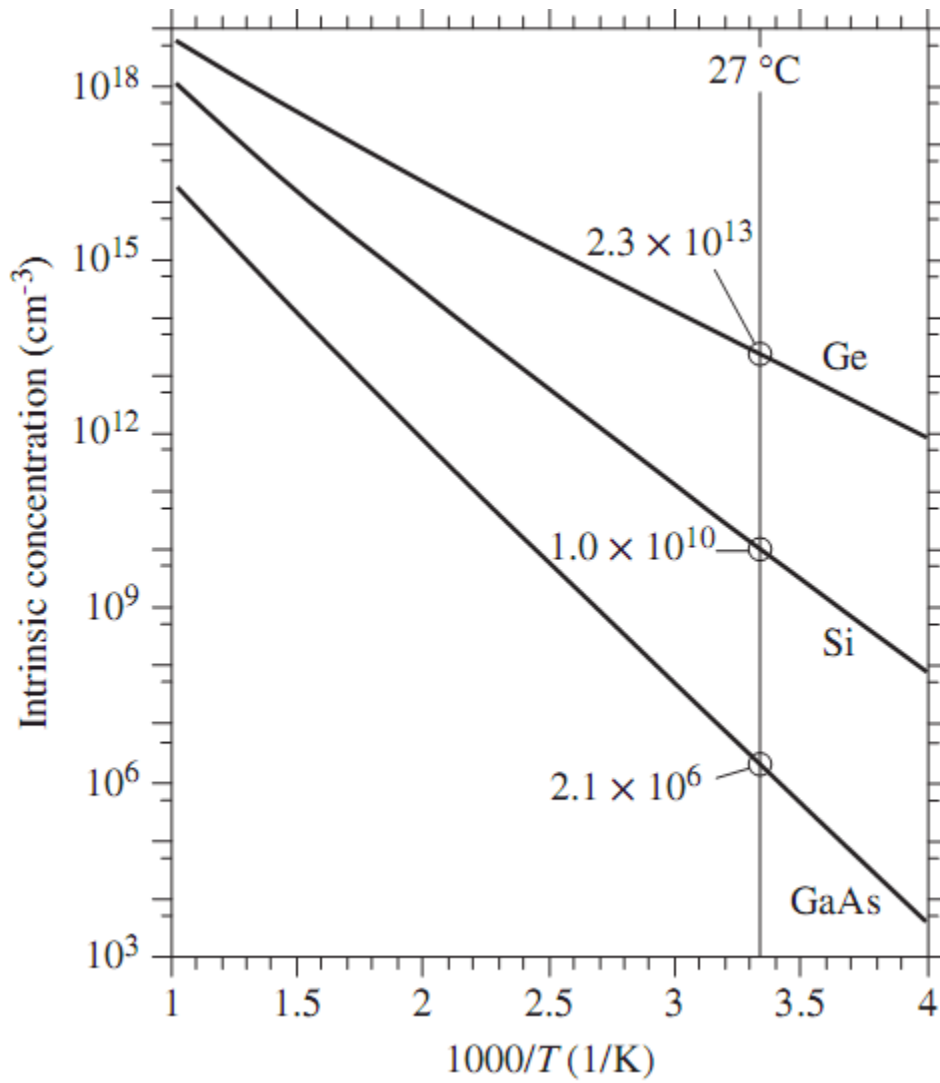
Trong đó:  $I_{so} = A J_{so} = A e n_i^2 \left[ \left( \frac{D_h}{L_h N_d} \right) + \left( \frac{D_e}{L_e N_a} \right) \right] \approx \frac{A e n_i^2}{L_h N_d}$  khi  $N_a \gg N_d$ . Nói một cách khác, dòng điện chủ yếu do sự khuếch tán của lỗ trống trong vùng  $n$ . Vì vậy:

$$I_{so} = 8.24 \times 10^{-14} \text{ A, hay } 0.082 \text{ pA}$$

Vậy dòng điện tại thế thuận 0.6 V là  $I = 0.99 \times 10^{-3} \text{ A}$ , hay 1 mA.

Khi áp thế thuận 0.6 V, điện thế trong giảm từ 0.875 V xuống còn 0.275 V và thúc đẩy sự tiêm hạt tải thiểu số, tức là sự khuếch tán của lỗ trống từ phía  $p$  sang phía  $n$  và điện tử từ phía  $n$  sang phía  $p$ . Giả sử  $I_{so} \propto n_i^2$ . Tại  $T = 373 \text{ K}$ ,  $n_i \approx 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , vì vậy:

$$I_{so}(373 \text{ K}) \approx I_{so}(300 \text{ K}) \left[ \frac{n_i(373 \text{ K})}{n_i(300 \text{ K})} \right]^2 \approx 8.24 \times 10^{-10} \text{ A hay } 0.824 \text{ nA}$$



d) Tại 100 °C và thế áp thuận 0.6 V, dòng điện là:

$$I = I_{so} \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) = 0.1 \text{ A}$$

e) Khi áp thế ngược, hiệu điện thế dọc theo vùng nghèo trở thành  $V_0 + V_r$ , và độ rộng vùng nghèo là:

$$W = \left[ \frac{2\epsilon(V_0 + V_r)}{eN_d} \right]^{1/2} = 0.88 \times 10^{-6} \text{ m, hay } 0.88 \text{ } \mu\text{m}$$

Dòng điện nhiệt sinh tại thế ngược  $V_r = 5 \text{ V}$  là:

$$I_{\text{gen}} = \frac{eAWn_i}{\tau_g} = 1.41 \times 10^{-9} \text{ A hay } 1.4 \text{ nA}$$

Giá trị này của dòng điện nhiệt sinh lớn hơn nhiều so với dòng ngược bão hòa  $I_{so}$  (0.082 pA). Vì vậy  $I_{\text{gen}}$  chiếm ưu thế trong dòng ngược.

## Ví dụ bổ sung 2

### Xác định điện thế trong từ giản đồ năng lượng

Xây dựng công thức của điện thế trong  $V_0$  theo các tham số của vật liệu ( $n_i$ ) và nồng độ pha tạp  $N_d$ ,  $N_a$ .

Lời giải:

Sự dịch chuyển của  $E_{Fp}$  và  $E_{Fn}$  để đảm bảo sự cân bằng là sự khác biệt về công thoát  $\Phi_p - \Phi_n$ . Vì vậy hàng rào thế  $eV_0$  là  $\Phi_p - \Phi_n$ , hay:

$$eV_0 = \Phi_p - \Phi_n = (E_c - E_{Fp}) - (E_c - E_{Fn})$$

Ở phía  $p$  và  $n$ , nồng độ điện tử ở trạng thái cân bằng nhiệt là:

$$n_{p0} = N_c \exp \left[ -\frac{(E_c - E_{Fp})}{k_B T} \right]$$

$$n_{n0} = N_c \exp \left[ -\frac{(E_c - E_{Fn})}{k_B T} \right]$$

Từ đó:

$$eV_0 = k_B T \ln \left( \frac{n_{n0}}{n_{p0}} \right)$$

Do  $n_{p0} = n_i^2 / N_a$  và  $n_{n0} = N_d$ , ta thu được biểu thức của điện thế trong  $V_0$ :

$$V_0 = \left( \frac{k_B T}{e} \right) \ln \left[ \frac{(N_d N_a)}{n_i^2} \right]$$

## Ví dụ bổ sung 3

### Điện dung vùng nghèo

Bảng 6.2 cung cấp số liệu của điện dung giữa các cực của một đi-ốt Si được áp thế ngược với các giá trị khác nhau của thế ngược  $V_r$ . Đi-ốt là loại chuyển tiếp một phía  $p^+n$  (chế tạo bằng phương pháp cấy ion) với điện cực hình tròn có đường kính khoảng 500  $\mu\text{m}$ . Điện dung ký sinh hoặc điện dung của lớp vỏ linh kiện hình thành giữa các điện cực là 0.5–0.7 pF. Tìm điện thế trong  $V_0$  và nồng độ donor  $N_d$ . Kết luận của bạn là gì?

**Table 6.2** Capacitance of a reverse-biased Si  $pn$  junction diode at 23 °C

$V_r$ (V)	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	10	15
$C$ (pF)	42.6	36.4	29.2	22.4	16.6	15.3	12.6
$1/C_{dep}^2 \times 10^{-4}$ (pF $^{-2}$ )	5.67	7.80	12.2	21.04	39.1	46.3	69.4

Đáp án:

Do đây là đi-ốt Si một phía  $p^+n$  với  $N_a \gg N_d$  nên điện dung vùng nghèo có dạng rút gọn sau:

$$C_{dep} = A \left[ \frac{e\epsilon_0\epsilon_r N_d}{2(V_0 - V)} \right]^{1/2}$$

Thay  $V = -V_r$  ta có:

$$\frac{1}{C_{dep}^2} = \frac{2}{A^2 e \epsilon_0 \epsilon_r N_d} (V_0 + V_r)$$

Chú ý: giá trị  $C$  đo được bao gồm  $C_{dep}$  và điện dung ký sinh  $C_s$  ( $0.6 \pm 0.1$  pF).

Kết quả khớp tuyến tính thu được:  $V_0 = 0.791$  V.

$\frac{2}{A^2 e \epsilon_0 \epsilon_r N_d} = 4.37743 \times 10^{-4}$  (pF $^{-2}$ ) hay  $A^2 e \epsilon_0 \epsilon_r N_d = 0.45689 \times 10^4$  pF $^2 = 0.45689 \times 10^{-20}$  F $^2$ .  
Với  $A = \pi(250 \times 10^{-6})^2$  m $^2$ , thu được  $N_d = 7.02 \times 10^{21}$  (m $^{-3}$ ) =  $7.02 \times 10^{15}$  (cm $^{-3}$ ).

Chúng ta cũng có thể tính được  $N_a$  từ hệ thức:  $V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$ , với  $n_i = 1 \times 10^{10}$  (cm $^{-3}$ ). Từ đó tính được  $N_a = 2.766 \times 10^{17}$  (cm $^{-3}$ ).

#### Ví dụ bổ sung 4

##### Điện trở động và điện dung

Một đi-ốt sử dụng tiếp xúc đột ngột  $p^+n$  với diện tích mặt cắt ngang  $A = 1$  mm $^2$ , nồng độ acceptor (B) là  $N_a = 5 \times 10^{18}$  nguyên tử/cm $^3$  ở phía  $p$  và nồng độ donor (As) là  $N_d = 10^{16}$  nguyên tử/cm $^3$  ở phía  $n$ . Đi-ốt được áp thế thuận và có dòng điện 5 mA chạy qua. Thời gian sống của lỗ trống trong vùng  $n$  là 417 ns, của điện tử trong vùng  $p$  là 5 ns. Tìm giá trị của điện trở động, điện dung khuếch tán (tích trữ), và điện dung vùng nghèo của đi-ốt?

Lời giải:

Tương tự như Ví dụ 1 thu được:

$$I = I_{so} \exp \left( \frac{eV}{k_B T} \right) \text{ hay } V = \left( \frac{k_B T}{e} \right) \ln \left( \frac{I}{I_{so}} \right) = 0.643 \text{ V}$$

Điện trở động (tại 300 K) là:

$$r_d = \frac{dV}{dI} = \frac{k_B T}{eI} = \frac{25.85 \text{ (mV)}}{I \text{ (mA)}} = \frac{25.85}{5} = 5.17 \Omega$$

Điện dung vùng nghèo khi  $N_a \gg N_d$ :

$$C_{\text{dep}} = A \left[ \frac{e \epsilon_0 \epsilon_r (N_a N_d)}{2(N_a + N_d)(V_0 - V)} \right]^{1/2} \approx A \left[ \frac{e \epsilon_0 \epsilon_r N_d}{2(V_0 - V)} \right]^{1/2}$$

Tại  $V = 0.643 \text{ V}$ , với  $V_0 = 0.877 \text{ V}$ ,  $N_d = 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ,  $\epsilon_r = 11.9$ , và  $A = 10^{-6} \text{ m}^2$ , tìm được  $C_{\text{dep}} = 6 \times 10^{-10} \text{ (F)}$ .

Điện dung khuếch tán (tại 300 K):

$$C_{\text{diff}} = \frac{\tau_h e I \text{ (mA)}}{k_B T} = \frac{\tau_h I \text{ (mA)}}{25.85 \text{ (mV)}} = 8.066 \times 10^{-8} \text{ F} = 80.66 \text{ nF}$$

Chú ý rằng  $C_{\text{diff}} \gg C_{\text{dep}}$ .

### Ví dụ bổ sung 5

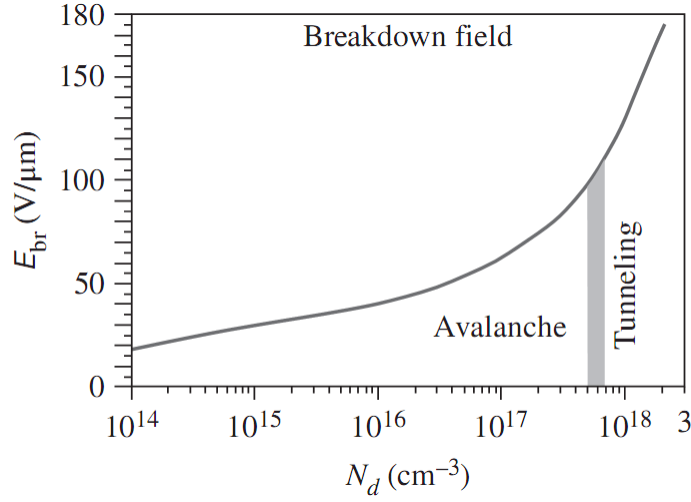
#### Đánh thủng kiểu tuyết lở (Avalanche)

Xem xét một chuyển tiếp đột ngột  $p^+n$  ( $N_a \gg N_d$ ), được áp thế ngược  $V = -V_r$ .

- Tìm mối quan hệ giữa độ rộng vùng nghèo  $W$  và hiệu thế  $V_0 + V_r$  dọc theo  $W$ .
- Nếu sự đánh thủng kiểu tuyết lở xảy ra khi điện trường cực đại trong vùng nghèo  $E_0$  đạt giá trị ngưỡng đánh thủng  $E_{\text{br}}$ , chứng minh rằng điện thế đánh thủng  $V_{\text{br}}$  ( $\gg V_0$ ) được cho bởi:

$$V_{\text{br}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E_{\text{br}}^2}{2eN_d}$$

- Một chuyển tiếp Si đột ngột  $p^+n$  có nồng độ pha tạp Bo là  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ở phía  $p$  và Phốt-pho là  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ở phía  $n$ . Sự phụ thuộc của điện trường đánh thủng vào nồng độ pha tạp được cho trong đồ thị.
  - Hãy tính điện thế đánh thủng (ngược) của đi-ốt Si này.
  - Tính điện thế đánh thủng (ngược) khi nồng độ Phốt-pho tăng lên đến  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .



Lời giải:

Giả sử rằng tất cả thế áp ngược đều rơi vào vùng nghèo, vì vậy điện thế dọc theo  $W$  là  $V_0 + V_r$ . Tất cả các phương trình liên quan đến  $W$ ,  $E_0$ ,  $V_0$ ,  $N_a$ ,  $N_d$  đều giữ nguyên, với  $V_0$  được thay bởi  $V_0 + V_r$ :

$$W^2 = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_0+V_r)(N_a^{-1}+N_d^{-1})}{e} \approx \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_0+V_r)}{eN_d}, \text{ do } N_a \gg N_d$$

Điện trường cực đại tương ứng với điện trường đánh thủng:

$$E_0 = -\frac{2(V_0 + V_r)}{W}$$

Từ đó:

$$V_{br} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r E_{br}^2}{2eN_d}$$

Do  $N_a \gg N_d$  nên vùng nghèo nằm chủ yếu ở phía  $n$  và điện trường cực đại thực tế nằm ở phía  $n$ . Ở đây điện trường đánh thủng phụ thuộc vào nồng độ pha tạp như cho trong đồ thị. Lấy giá trị  $E_{br} \approx 40 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}}$  hay  $4.0 \times 10^5 \text{ V cm}^{-1}$  tại  $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , và sử dụng công thức trên, thu được  $V_{br} = 53 \text{ V}$ .

Khi  $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , giá trị của  $E_{br}$  thu được từ đồ thị là  $6.0 \times 10^5 \text{ V cm}^{-1}$ , từ đó  $V_{br} = 11.8 \text{ V}$ .