

CHƯƠNG 7. TIẾP XÚC BÁN DẪN $P-N$

$p-n$ junction

Giảng viên: Nguyễn Đức Cường

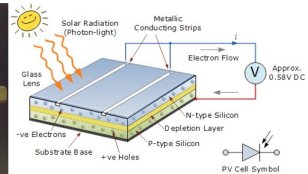
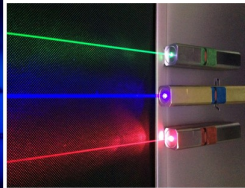
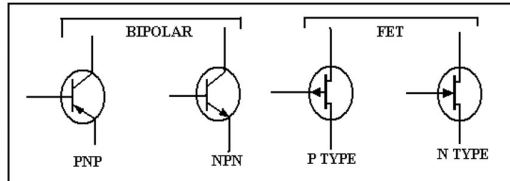
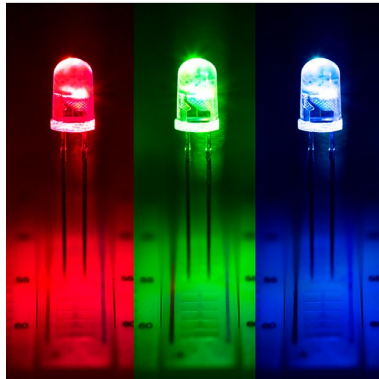
Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

Email: cuongnd@vnu.edu.vn

Ngày 22 tháng 10 năm 2021

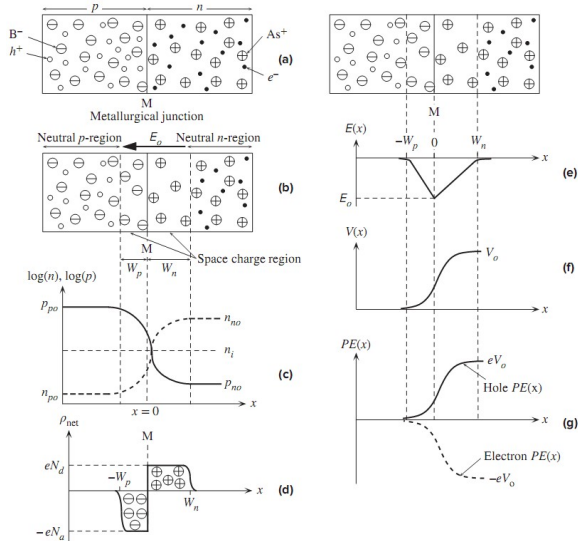
1 CHƯƠNG 8. TIẾP XÚC BÁN DẪN $P-N$

Giới thiệu về tiếp xúc bán dẫn $p-n$



- Hầu hết các linh kiện điện tử và quang điện tử đều dựa trên tiếp xúc bán dẫn $p-n$: đi-ốt thường, đi-ốt phát quang (light-emitting diodes, LEDs), laser bán dẫn (semiconductor lasers), thiết bị nhạy quang (photodetectors), pin mặt trời (solar cells), transistor lưỡng cực (bipolar junction transistors, BJTs) và transistor hiệu ứng trường (field-effect transistors, FETs).

Tiếp xúc bán dẫn p - n lý tưởng



Tiếp xúc bán dẫn p - n lý tưởng

- Xét trường hợp khi bán dẫn loại p (Si pha tạp B) tiếp xúc với bán dẫn loại n (Si pha tạp As). Mặt tiếp xúc M được gọi là **chuyển tiếp luyện kim (metallurgical junction)**.
- Do có sự chênh lệch về nồng độ lỗ trống (p_{p0} ở phía p và p_{n0} ở phía n), lỗ trống khuếch tán từ vùng p sang vùng n . Ngược lại, sự chênh lệch về nồng độ điện tử (n_{n0} ở phía n và n_{p0} ở phía p), gây ra sự khuếch tán của điện tử từ vùng n sang vùng p . Ở điều kiện cân bằng (không áp thế và không có kích thích quang): $np = n_i^2$.
- Lỗ trống di chuyển đi để lại một vùng tích điện âm gồm các ion B^- với nồng độ N_a . Điện tử di chuyển đi để lại một vùng tích điện dương gồm các ion As^+ với nồng độ N_d . Hai vùng này tạo thành **lớp điện tích không gian (space charge layer)** hay còn gọi là **vùng nghèo (depletion region)**.
- Điện trường E_0 hướng từ phía ion dương sang ion âm được gọi là **điện trường trong (built-in electric field)** và chống lại sự khuếch tán tiếp tục của các hạt tải.

Tiếp xúc bán dẫn p - n lý tưởng

- Định luật bảo toàn điện tích: $N_a W_p = N_d W_n$.
- Nếu $N_a \gg N_d$ thì $W_n \gg W_p$ và vùng nghèo nằm gần như hoàn toàn trong vùng n . Vật liệu loại p hay n được pha tạp mạnh được ký hiệu là p^+ hay n^+ .
- Điện trường $E(x)$ và nồng độ tổng điện tích $\rho_{\text{tổng}}(x)$:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho_{\text{tổng}}(x)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \text{ hay } E(x) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \int_{-W_p}^x \rho_{\text{tổng}}(x) dx$$

- Điện trường trong tại M:

$$E_0 = -\frac{e N_d W_n}{\epsilon_0 \epsilon_r} = -\frac{e N_a W_p}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

- **Điện thế trong (built-in potential):**

$$V(x) = -\int E(x) dx \text{ và } V_0 = -\frac{1}{2} E_0 W_0 = \frac{e N_a N_d W_0^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_r (N_a + N_d)}$$

với $W_0 = W_n + W_p$ là tổng độ rộng của vùng nghèo với thế áp = 0.

Tiếp xúc bán dẫn p - n lý tưởng

- Theo phân bố Boltzmann:

$$\frac{n_{p0}}{n_{n0}} = \exp\left(\frac{-eV_0}{k_B T}\right) \text{ và } \frac{p_{n0}}{p_{p0}} = \exp\left(\frac{-eV_0}{k_B T}\right)$$

từ đó:

$$V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}}\right) = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}}\right)$$

- Giả sử $p_{p0} = N_a$:

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{n_i^2}{N_d} \rightarrow V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

Điện thế trong V_0 là điện thế dọc theo chuyển tiếp p - n , đi từ bán dẫn loại p sang bán dẫn loại n , ở điều kiện **hở mạch (open-circuit)**. V_0 không phải là điện thế dọc theo toàn bộ đi-ốt, do chưa tính đến điện thế tiếp xúc giữa các điện cực kim loại và bán dẫn.

Tiếp xúc bán dẫn p - n lý tưởng

- Độ rộng vùng nghèo:

$$W_0 = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_r(N_a + N_d)V_0}{eN_aN_d} \right]^{1/2} \rightarrow W_0 \propto V_0^{1/2}$$

Ví dụ 1

Một đi-ốt sử dụng chuyển tiếp pn có mật độ acceptor là 10^{16} nguyên tử/cm³ ở phía p và mật độ donor là 10^{17} nguyên tử/cm³ ở phía n . Hãy tính điện thế trong đối với các vật liệu bán dẫn Ge, Si, InP, và GaAs.

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

Bảng: Các giá trị điện thế trong điển hình.

Chất bán dẫn	E_g (eV)	n_i (cm ⁻³)	V_0 (V)
Ge	0.66	2.4×10^{13}	0.37
Si	1.10	1.0×10^{10}	0.78
InP	1.34	1.3×10^7	1.12
GaAs	1.42	2.1×10^6	1.21

Lời giải

Sử dụng:

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

cho Si với $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ và $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $kT/e = 0.0259 \text{ V}$ ở 300 K, và $n_i = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, ta thu được:

$$V_0 = (0.0259 \text{ V}) \ln \left[\frac{(10^{17})(10^{16})}{(1.0 \times 10^{10})^2} \right] = 0.775 \text{ V}$$

Kết quả của cả 4 bán dẫn được cho ở trong bảng.

Ví dụ 2

Chuyển tiếp p^+n : Một chuyển tiếp p^+n có phía p được pha tạp mạnh hơn phía n , nghĩa là $N_a \gg N_d$. Vì điện tích Q ở cả hai phía của tiếp xúc luyện kim phải giống nhau (toàn bộ chuyển tiếp là trung hòa về điện) nên:

$$Q = eN_a W_p = eN_d W_n$$

rõ ràng là vùng nghèo được mở rộng chủ yếu về phía n . Theo công thức trước đây, khi $N_d \ll N_a$, độ rộng vùng nghèo là:

$$W_a = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_r V_0}{eN_d} \right]^{1/2}$$

Tính độ rộng vùng nghèo với một di-ốt Si sử dụng chuyển tiếp p^+n với nồng độ acceptor là 10^{18} nguyên tử/cm³ ở phía p và mật độ donor là 10^{16} nguyên tử/cm³ ở phía n .

Lời giải

Trước hết ta tính điện thế trong:

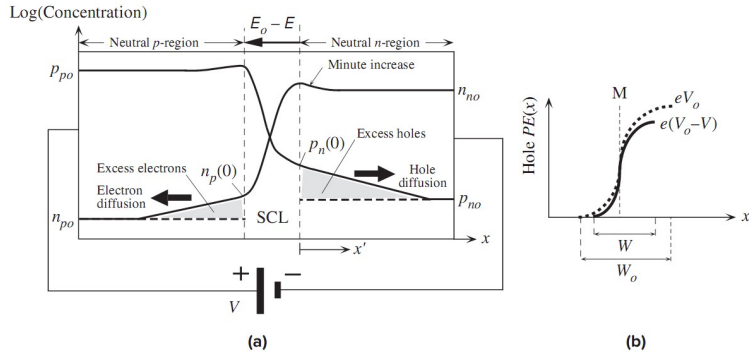
$$V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = (0.0259 \text{ V}) \ln \left[\frac{(10^{16})(10^{18})}{(1.0 \times 10^{10})^2} \right] = 0.835 \text{ V}$$

với $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, nghĩa là 10^{22} m^{-3} , $V_0 = 0.835 \text{ V}$, và $\epsilon_r = 11.9$, ta thu được:

$$\begin{aligned} W_a &= \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_r V_0}{eN_d} \right]^{1/2} = \left[\frac{2(8.85 \times 10^{-12})(11.9)(0.835)}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{22})} \right]^{1/2} \\ &= 3.32 \times 10^{-7} \text{ m hay } 0.33 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Như vậy, gần như toàn bộ vùng nghèo (99%) nằm ở phía n .

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán



- Điện thế ngoài làm giảm điện thế trong và điện trường trong và làm giảm khả năng chặn khuếch tán của điện thế trong. Lỗ trống có thể khuếch tán dễ hơn qua vùng nghèo và đi vào phía n . Điều này dẫn đến **sự tiêm của hạt tải thiểu số dư (injection of excess minority carriers)**, tức là lỗ trống vào vùng n (điện tử vào vùng p).

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán

- Nồng độ lỗ trống là:

$$p_n(0) = p_n(x' = 0) = p_{p0} \exp\left[-\frac{e(V_0 - V)}{k_B T}\right]$$

- **Định luật về chuyển tiếp (law of the junction)** về hiệu ứng của điện thế ngoài lên nồng độ của hạt tải thiểu số được tiêm vào tại khu vực ngay bên ngoài vùng nghèo:

$$p_n(0) = p_{n0} \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right), \text{ khi } V = 0, p_n(0) = p_{n0}$$

- Lỗ trống tiêm vào vùng n được tái hợp với điện tử tại vùng đó. Điện tử liên tục được cung cấp từ cực âm của pin (nguồn ngoài), trong khi đó lỗ trống mất đi ở vùng p được bù lại từ cực dương của pin. Dòng điện gây ra bởi quá trình đó được gọi là **dòng khuếch tán (diffusion current)**.

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán

- Nếu độ dài của vùng p và vùng n lớn hơn độ dài khuếch tán của hạt tải thiểu số thì phân bố của hạt tải thiểu số dư là:

$$p_n(x') - p_{n0} = \Delta p_n(x') = \Delta p_n(0) \exp\left(-\frac{x'}{L_h}\right)$$

trong đó L_h là **độ dài khuếch tán (diffusion length)**, được định nghĩa $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$, với τ_h là thời gian tái hợp lỗ trống trung bình (thời gian sống trung bình của hạt tải thiểu số).

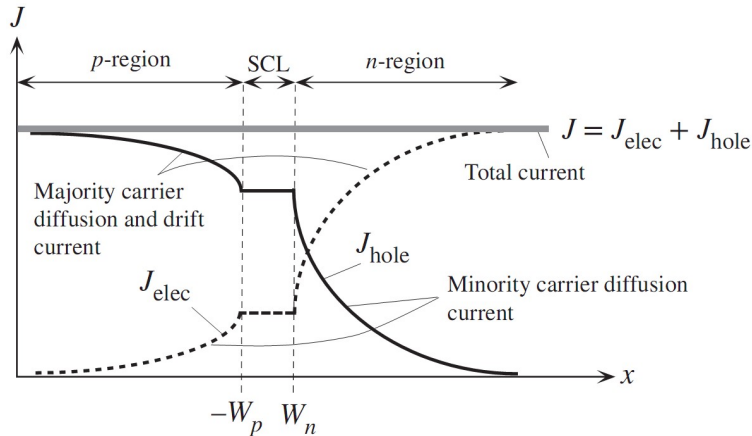
- Mật độ dòng khuếch tán của lỗ trống $J_{D,\text{hole}}$ là:

$$J_{D,\text{hole}} = -eD_h \frac{dp_n(x')}{dx'} = -eD_h \frac{d\Delta p_n(x')}{dx'}$$

nghĩa là:

$$J_{D,\text{hole}} = \left(\frac{eD_h}{L_h}\right) \Delta p_n(0) \exp\left(-\frac{x'}{L_h}\right)$$

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán



Dòng toàn phần là không đổi trên toàn bộ linh kiện. Ở ngay ngoài vùng nghèo, nó phụ thuộc vào sự khuếch tán của hạt tải thiểu số

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán

- Tại x' , ở ngay ngoài vùng nghèo, mật độ dòng khuếch tán của lỗ trống là:

$$J_{D,\text{hole}} = \left(\frac{eD_h}{L_h} \right) \Delta p_n(0)$$

- Sử dụng định luật về chuyển tiếp:

$$\Delta p_n(0) = p_n(0) - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

từ đó:

$$J_{D,\text{hole}} = \left(\frac{eD_h p_{n0}}{L_h} \right) \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

- Nồng độ lỗ trống khi cân bằng nhiệt:

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{n_i^2}{N_d}$$

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán

- Vì vậy:

$$J_{D,\text{hole}} = \left(\frac{eD_h n_i^2}{L_h N_d} \right) \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

- Một cách tương tự, mật độ dòng khuếch tán của điện tử tại vùng p là:

$$J_{D,\text{electron}} = \left(\frac{eD_e n_i^2}{L_e N_a} \right) \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

- Giả sử dòng điện tử và lỗ trống không thay đổi dọc theo vùng nghèo:

$J_e(x = -W_p) = J_e(x = W_n)$. Dòng khuếch tán toàn phần là:

$$J_{\text{diff}} = J_{D,\text{hole}} + J_{D,\text{electron}} = \left(\frac{eD_h n_i^2}{L_h N_d} + \frac{eD_e n_i^2}{L_e N_a} \right) \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

- **Phương trình Shockley (Shockley equation):**

$$J_{\text{diff}} = J_{so} \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán

- Với J_{so} là **mật độ dòng ngược bão hòa (reverse saturation current density)**:

$$J_{so} = \left(\frac{eD_h}{L_h N_d} + \frac{eD_e}{L_e N_a} \right) n_i^2$$

- Sử dụng hệ thức:

$$n_i^2 = (N_C N_V) \exp\left(-\frac{eV_g}{k_B T}\right), \text{ trong đó } V_g = E_g/e$$

ta có:

$$J_{\text{diff}} = \left(\frac{eD_h}{L_h N_d} + \frac{eD_e}{L_e N_a} \right) \left[(N_C N_V) \exp\left(-\frac{eV_g}{k_B T}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

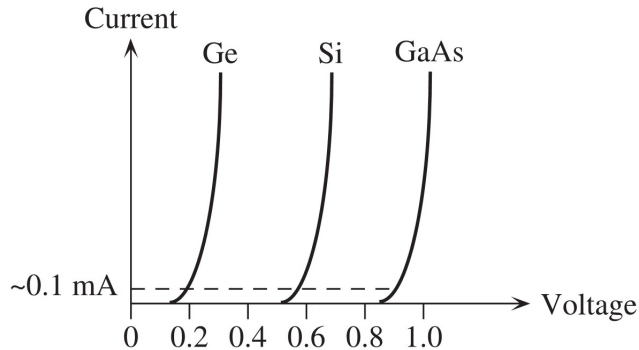
hay:

$$J_{\text{diff}} = J_1 \exp\left(-\frac{eV_g}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán

- Khi $eV/k_B T \gg 1$:

$$J_{\text{diff}} = J_1 \exp \left[\frac{e(V - V_g)}{k_B T} \right], \text{ trong đó } J_1 = \left(\frac{eD_h}{L_h N_d} + \frac{eD_e}{L_e N_a} \right) (N_C N_V)$$



Đặc trưng dòng-thế (I - V) của tiếp xúc bán dẫn p - n .

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng khuếch tán

- Nếu độ dài của vùng p và vùng n (tương ứng là ℓ_p và ℓ_n , không tính vùng nghèo) nhỏ hơn độ dài khuếch tán của hạt tải thiểu số thì phân bố của hạt tải thiểu số dư là:

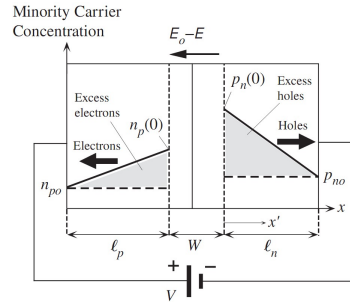
$$\frac{d\Delta p_n(x')}{dx'} = -\frac{[p_n(0) - p_{n0}]}{\ell_n}$$

- Mật độ dòng do sự tiêm và khuếch tán lỗ trống tại vùng n là:

$$J_{D,\text{hole}} = -eD_h \frac{d\Delta p_n(x')}{dx'} = -eD_h \frac{[p_n(0) - p_{n0}]}{\ell_n}$$

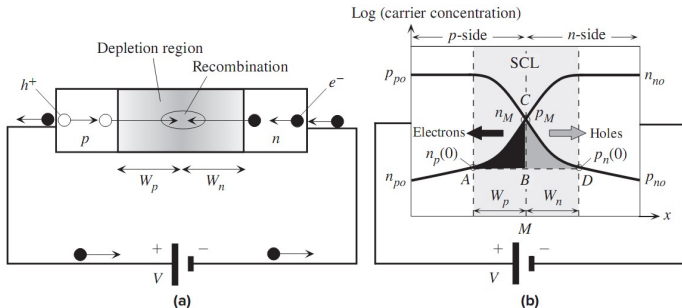
- Sử dụng định luật về chuyển tiếp thu được:

$$J_{\text{diff}} = \left(\frac{eD_h}{\ell_n N_d} + \frac{eD_e}{\ell_p N_a} \right) n_i^2 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$



Sự tiêm và khuếch tán của hạt tải thiểu số trong một **đi-ốt ngắn (short diode)**.

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng tái hợp và dòng toàn phần



- Các hạt tải thiểu số có khả năng tái hợp trong vùng nghèo với **thời gian tái hợp trung bình của lỗ trống (mean hole recombination time)** trong vùng W_n là τ_h và **thời gian tái hợp trung bình của điện tử (mean electron recombination time)** trong vùng W_p là τ_e .
- Quá trình tái hợp này là **không trực tiếp**, thường thông qua các khuyết tật và tạp chất trong mạng tinh thể, và được gọi là **tái hợp Shockley-Read-Hall** hay **tái hợp đơn nguyên tử (monomolecular)**.

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng tái hợp và dòng toàn phần

- Dòng tái hợp:

$$J_{\text{recom}} = \frac{eABC}{\tau_e} + \frac{eBCD}{\tau_h} \approx \frac{e\frac{1}{2}W_p n_M}{\tau_e} + \frac{e\frac{1}{2}W_n p_M}{\tau_h}$$

- Ở điều kiện ổn định và cân bằng, đối với bán dẫn không suy biến, chúng ta có thể sử dụng phân bố Boltzmann. Tại A, điện thế = 0 và tại M, điện thế là $\frac{1}{2}e(V_0 - V)$, vì vậy:

$$\frac{p_M}{p_{p0}} = \exp\left[-\frac{e(V_0 - V)}{2k_B T}\right], \text{ tương tự với } n_M/n_{n0}$$

- Do tính đối xứng nên $p_M = n_M$. Sử dụng $p_{p0} = N_a$ và $n_{n0} = N_d$, ta có:

$$p_M = n_i \exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right)$$

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng tái hợp và dòng toàn phần

- Dòng tái hợp với $V > k_B T/e$:

$$J_{\text{recom}} = \frac{en_i}{2} \left(\frac{W_p}{\tau_e} + \frac{W_n}{\tau_h} \right) \exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right)$$

- Dòng toàn phần:

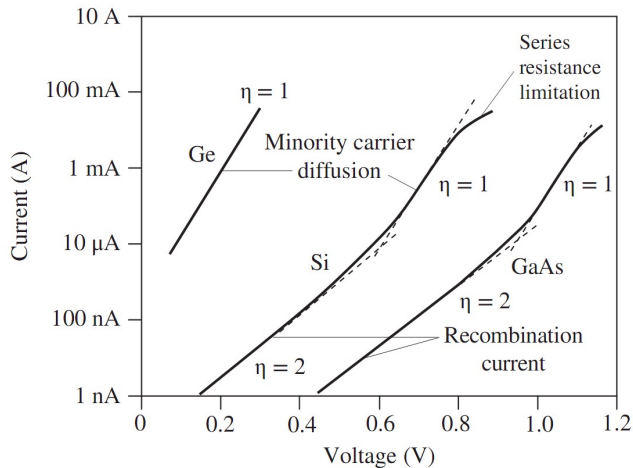
$$J_{\text{total}} = J_{\text{diff}} + J_{\text{recom}} = J_{so} \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) + J_{ro} \exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right)$$

- Dạng tổng quát của dòng toàn phần:

$$J_{\text{total}} = J_0 \exp\left(\frac{eV}{\eta k_B T}\right)$$

với η là **hệ số lý tưởng (ideality factor)**, bằng 1 nếu dòng điện do sự khuếch tán của hạt tải thiểu số trong vùng trung hòa điện, và bằng 2 nếu dòng điện do sự tái hợp trong vùng điện tích không gian (tức vùng nghèo).

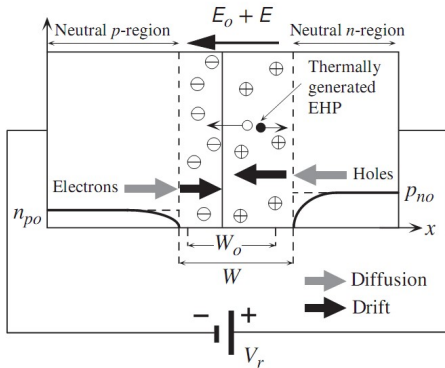
Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế thuận. Dòng tái hợp và dòng toàn phần



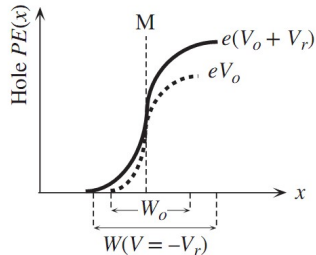
Đặc trưng I - V ở dạng $\log(I)$ - V của các chuyển tiếp p - n từ Ge, Si, và GaAs. Độ dốc của đồ thị biểu thị $e/\eta k_B T$.

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế ngược

Minority carrier concentration



(a)



(b)

Chuyển tiếp p - n khi áp thế ngược. (a) Mô tả của hạt tải thiểu số và nguồn gốc của dòng ngược. (b) Thế năng của lỗ trống ngang qua chuyển tiếp dưới tác dụng của thế ngược.

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế ngược

- Khi áp thế ngược, cực âm sẽ kéo lỗ trống của vùng p , còn cực dương sẽ kéo điện tử của vùng n ra xa khỏi vùng điện tích không gian, khiến cho vùng này được mở rộng.
- Tuy nhiên, vẫn tồn tại dòng ngược nhỏ với 2 nguyên nhân:
 - 1) Sự khuếch tán của lỗ trống trong vùng n từ nơi có nồng độ p_{n0} đến nơi có nồng độ ≈ 0 (biên của vùng n và vùng điện tích không gian) và sự khuếch tán của điện tử trong vùng p từ nơi có nồng độ n_{p0} đến nơi có nồng độ ≈ 0 (biên của vùng p và vùng điện tích không gian). Ở trong vùng điện tích không gian, các điện tích này trôi đi dưới tác dụng của điện trường. Cường độ dòng điện là $-J_{so}$ với:

$$J_{so} = \left(\frac{eD_h}{L_h N_d} + \frac{eD_e}{L_e N_a} \right) n_i^2$$

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế ngược

- 2) Sự trôi của các hạt tải nhiệt sinh ở vùng điện tích không gian dưới tác dụng của điện trường trong. τ_g là **thời gian nhiệt sinh trung bình (mean thermal generation time)** của một cặp điện tử-lỗ trống. Tốc độ sinh trong một đơn vị diện tích là n_i/τ_g . Dòng điện do nhiệt sinh là

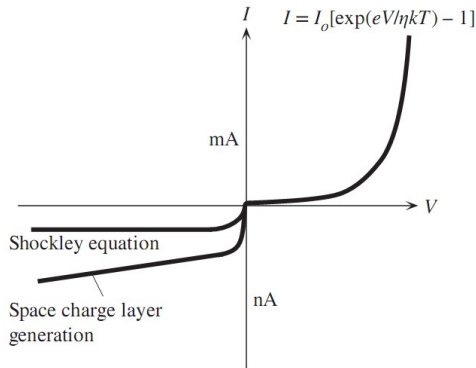
$$J_{\text{gen}} = \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

- Dòng ngược toàn phần là:

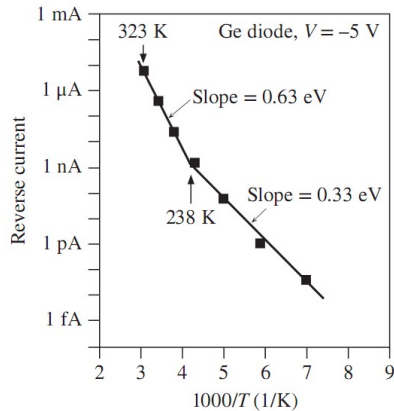
$$J_{\text{rev}} = J_{\text{so}} + J_{\text{gen}} = \left(\frac{eD_h}{L_h N_d} + \frac{eD_e}{L_e N_a} \right) n_i^2 + \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

- Ở nhiệt độ cao, J_{rev} phụ thuộc chủ yếu vào n_i^2 . Ở nhiệt độ thấp, J_{rev} phụ thuộc chủ yếu vào n_i , trong đó $n_i \propto \exp(-E_g/2k_B T)$.

Tiếp xúc bán dẫn p - n khi áp thế ngược



(a)

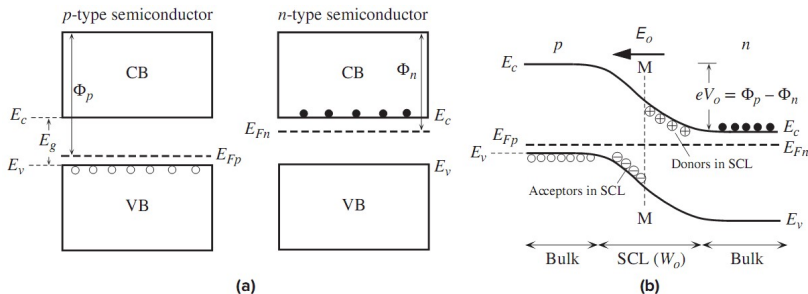


(b)

(a) Đặc trưng I - V của một chuyển tiếp p - n .

(b) Sự phụ thuộc của dòng ngược của chuyển tiếp p - n dùng vật liệu Ge vào nghịch đảo của nhiệt độ $1/T$.

Giải đồ vùng năng lượng của tiếp xúc bán dẫn $p-n$ - Trạng thái hở mạch (Open Circuit)



- Khi 2 chất bán dẫn tiếp xúc với nhau, mức Fermi cần phải đồng nhất trong toàn bộ 2 vật liệu và tại điểm tiếp xúc M (chuyển tiếp luyện kim). Ở xa điểm tiếp xúc, $E_C - E_{Fn}$ và $E_{Fp} - E_V$ vẫn như cũ.
- Vùng năng lượng bị uốn cong tại khu vực tiếp xúc, phù hợp với sự 'loãng' của hạt tải tại vùng nghèo (vùng điện tích không gian).

Giải đồ vùng năng lượng của tiếp xúc bán dẫn $p-n$ - Trạng thái áp thế thuận và ngược

Giải đồ năng lượng của một tiếp xúc $p-n$:

(a) Trạng thái mở mạch.

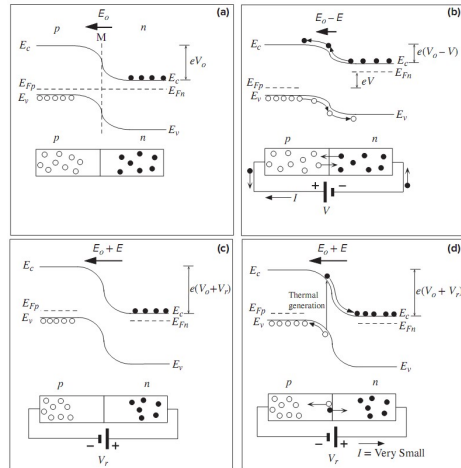
(b) Khi áp thế thuận.

(c) Khi áp thế ngược.

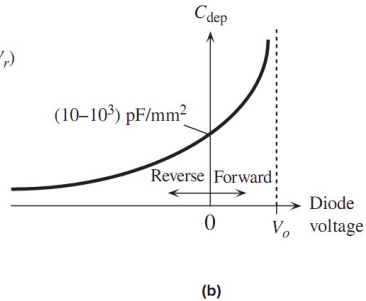
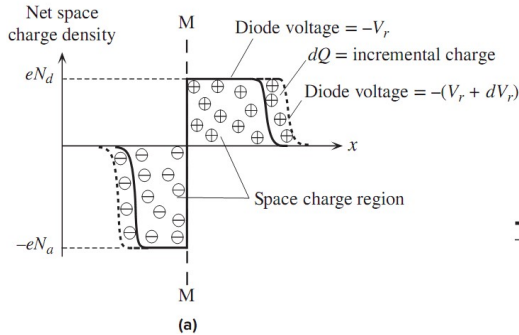
(d) Sự nhiệt sinh của các cặp điện tử-lỗ trống trong vùng nghèo gây ra dòng ngược giá trị nhỏ (xem thêm ▶ Trang 28).

Chú thích:

Quang sinh: sinh ra vì ánh sáng. Nhiệt sinh: sinh ra vì nhiệt.



Điện dung lớp nghèo của tiếp xúc p - n



Vùng nghèo thể hiện giống như một tụ điện

(a) Điện tích trong vùng nghèo phụ thuộc vào điện thế ngoài giống như tụ điện. Ở đây là ví dụ về thế áp ngược.

(b) Sự tăng của điện dung của vùng nghèo cùng thế áp thuận và giảm cùng thế áp ngược. Giá trị điển hình ở trong khoảng pF/mm^2 .

Điện dung lớp nghèo của tiếp xúc $p-n$

- Độ rộng vùng nghèo:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(N_a + N_d)(V_0 - V)}{eN_aN_d} \right]^{1/2}$$

- **Điện dung lớp nghèo (depletion layer capacitance):**

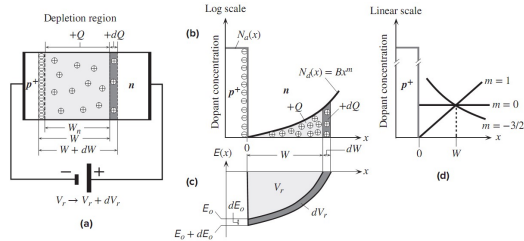
$$C_{\text{dep}} = \left| \frac{dQ}{dV} \right|$$

trong đó điện lượng (ở từng phía của lớp nghèo) là: $|Q| = eN_d W_n A = eN_a W_p A$ và $W = W_n + W_p$.

- Suy ra:

$$C_{\text{dep}} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r A}{W} = \frac{A}{(V_0 - V)^{1/2}} \left[\frac{e\varepsilon_0\varepsilon_r(N_a N_d)}{2(N_a + N_d)} \right]^{1/2}$$

Điện dung lớp nghèo của tiếp xúc p^+-n



- (a) Tiếp xúc một phía p^+-n khi thế áp ngược thay đổi từ V_r đến $V_r + dV_r$, trong đó $W_n \gg W_p$ và $W \approx W_n$.
- (b) Nồng độ donor $N_d(x)$ ở phía n và các vùng của $+Q$ và $+dQ$ tương ứng với V_r và dV_r .
- (c) Điện trường nằm hoàn toàn ở phía n , đạt cực đại tại tiếp xúc luyện kim với $x = 0$, và giảm rất nhanh khi vào vùng p^+ . Diện tích bên dưới đường $|E(x)|$ là điện thế ngang qua vùng nghèo.
- (d) Phân bố theo tọa độ x của nồng độ donor $N_d(x) = Bx^m$ với $m = 0$ (abrupt, thay đổi đột ngột), 1 (tuyến tính), và $-3/2$ (hyperabrupt).

Điện dung lớp nghèo của tiếp xúc p^+-n

- Giả sử nồng độ vùng nghèo là $N_d(x) = Bx^m$, khi đó điện dung lớp nghèo là:

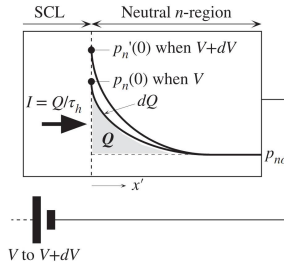
$$C_{\text{dep}} = A \left[\frac{e(\epsilon_0 \epsilon_r)^{m+1}}{(m+2)(V_0 - V)} \right]^{1/(m+2)}$$

- Với điện áp ngược $V = -V_r$ phù hợp với $V_r > V_0$, ta có $C_{\text{dep}} \propto V_r^{-1/(m+2)}$. Chúng ta có thể thiết kế linh kiện sao cho hàm phụ thuộc của C_{dep} vào V_r phù hợp với từng trường hợp ứng dụng cụ thể (**varactor diodes** hay **varicaps**). Khi sử dụng trong mạch dao động LC, tần số cộng hưởng là:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{\text{dep}}}} \propto (V_0 - V)^{1/(2(m+2))}$$

Khi $m = -3/2$ thì f_0 phụ thuộc tuyến tính vào V_r , khi đó tiếp xúc $p-n$ được gọi là **tiếp xúc hyperabrupt (hyperabrupt junction)** và có thể dễ dàng điều chỉnh f_0 thông qua V_r .

Điện dung khuếch tán và điện trở động



- **Điện dung khuếch tán (tích trữ) (diffusion (storage) capacitance)** $C_{\text{diff}} = dQ/dV$ xuất hiện do sự tiêm và tích trữ của hạt tải thiểu số và chỉ xuất hiện ở thể áp thuận. Xem xét sự tiêm của lỗ trống vào phía n khi áp thể thuận V . Tốc độ tiêm điện lượng dương Q vào phía n là: Q/τ_h , với τ_h là thời gian sống của hạt tải thiểu số.

$$Q = \tau_h I = \tau_h I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

Điện dung khuếch tán và điện trở động

- Vì vậy:

$$C_{\text{diff}} = \frac{dQ}{dV} = \frac{\tau_h e I}{k_B T} = \frac{\tau_h I}{k_B T / e}$$

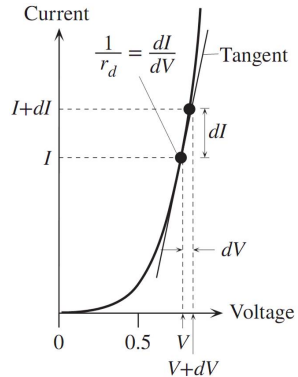
Giá trị của C_{diff} thường nằm trong khoảng nF và lớn hơn nhiều so với điện dung vùng nghèo C_{dep} .

- **Điện trở động (dynamic resistance) r_d :**

$$r_d = \frac{dV}{dI} = \frac{k_B T}{eI}$$

- r_d phụ thuộc vào I và đặc trưng cho sự thay đổi của dòng đi-ốt (dòng khuếch tán của hạt tải thiểu số) theo điện thế. Điện dẫn động:

$$g_d = \frac{dI}{dV} = \frac{1}{r_d}$$



Điện dung khuếch tán và điện trở động

- Hệ thức giữa C_{diff} và r_d (chỉ đúng cho đi-ốt dài).

$$r_d C_{\text{diff}} = \tau_h$$

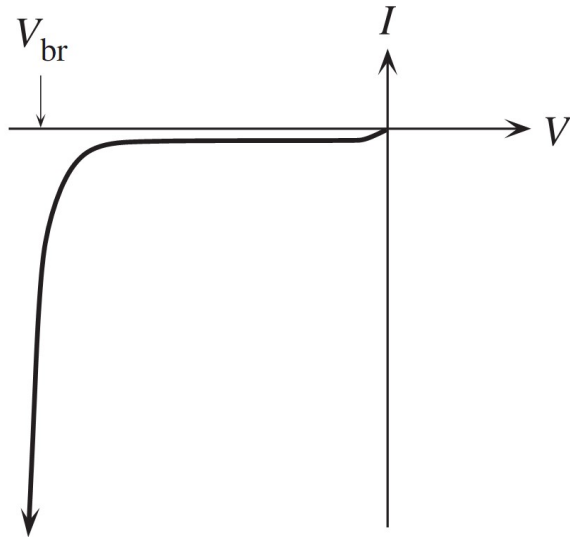
- Điện trở động r_d và điện dung khuếch tán C_{diff} đặc trưng cho sự phản hồi của đi-ốt đối với tín hiệu xoay chiều nhỏ ($< 25 \text{ mV}$) (đồng thời với áp thế thuận 1 chiều). Đối với tín hiệu xoay chiều nhỏ, đi-ốt khi áp thế thuận có thể biểu diễn dưới dạng r_d mắc song song với C_{diff} .
- Trong đi-ốt ngắn, hạt tải thiểu số được tiêm vào chỉ khuếch tán đơn thuần và đi đến các điện cực gom. τ_t là thời gian khuếch tán của lỗ trống dọc theo độ dài của vùng n , $\ell_n = (2D_h\tau_t)^{1/2}$ (xem thêm ▶ Trang 21). Nếu Q là tổng điện lượng tiêm vào vùng trung hòa của phía n thì lượng điện tích này cần thời gian τ_t để khuếch tán dọc theo ℓ_n và dòng điện là $I = Q/\tau_t$. Ta có hệ thức:

$$r_d C_{\text{diff}} = \tau_t$$

Điện dung khuếch tán trong đi-ốt ngắn luôn nhỏ hơn trong đi-ốt dài.

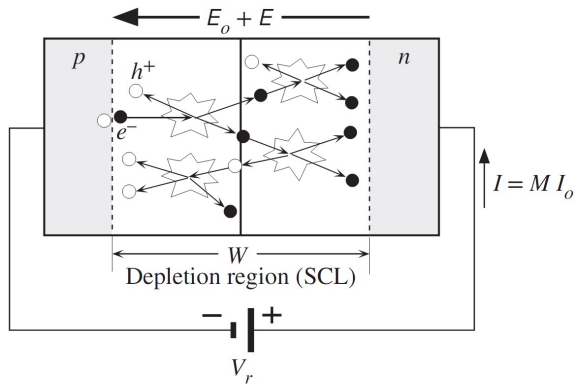
Sự đánh thủng của tiếp xúc $p-n$

- Khi áp thế ngược đến một giá trị nhất định (V_{br}), tiếp xúc $p-n$ sẽ bị đánh thủng bằng một trong 2 cơ chế: Tuyết lở (Avalanche) hoặc Zener.
- Ở giá trị $V < V_{br}$, dòng điện sẽ tăng đột biến, kèm với sự tỏa nhiệt lớn. Nếu nhiệt tỏa ra đủ lớn để làm nóng chảy các điện cực, đi-ốt sẽ bị hỏng hoàn toàn (không hồi phục được chức năng).

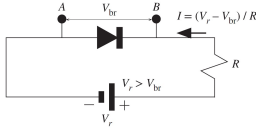


Sự đánh thủng kiểu tuyết lở của tiếp xúc $p-n$

Khi thế ngược đủ lớn, điện tử có đủ động năng để làm ion hóa các nguyên tử trong mạng tinh thể khi va chạm với chúng. Hiện tượng bắn phá nguyên tử bằng điện tử năng lượng cao đó được gọi là **sự ion hóa do va chạm (impact ionization)**. Kết quả là các liên kết Si-Si bị bẻ gãy và sinh ra thêm các cặp điện tử-lỗ trống. Các điện tử mới sinh ra tiếp tục được gia tốc bởi điện trường và tiếp tục gây ra sự ion hóa do va chạm, tạo thành **hiệu ứng tuyết lở (avalanche effect)**.



Sự đánh thủng kiểu tuyết lở của tiếp xúc p - n



- Khi không có sự ion hóa do va chạm, dòng ngược là I_0 . Khi có hiện tượng ion hóa do va chạm, dòng ngược là MI_0 , trong đó:

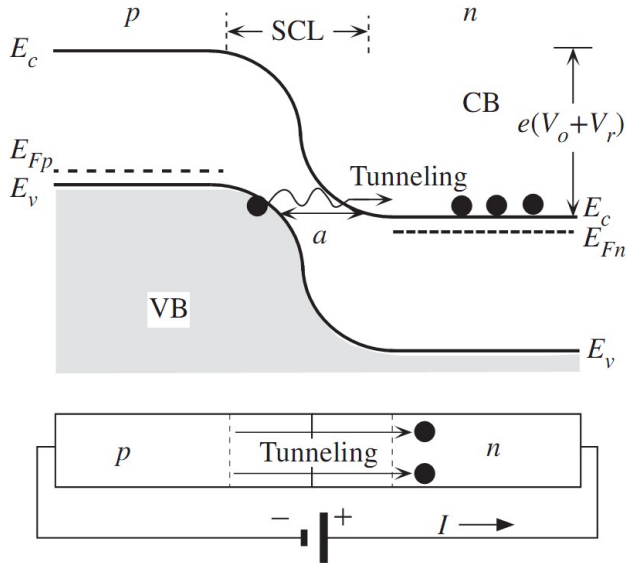
$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r}{V_{br}}\right)^n}$$

trong đó V_r là thế ngược, V_{br} là hiệu điện thế đánh thủng và n nằm trong khoảng từ 3 tới 5.

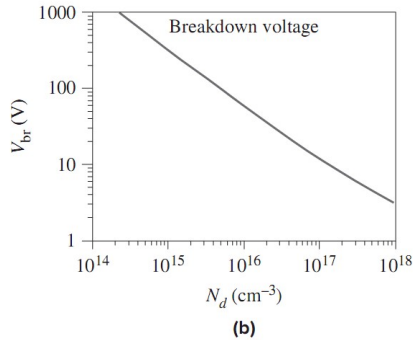
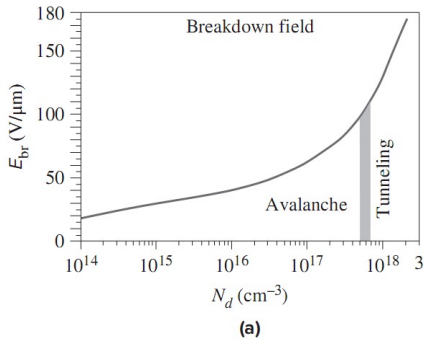
- Khi mắc nối tiếp với điện trở R đủ lớn, ở $V_r > V_{br}$, dòng điện bị giới hạn ở giá trị $I = (V_r - V_{br})/R$ và hiệu điện thế trên đi-ốt được giữ ở giá trị V_{br} .
- V_{br} phụ thuộc vào nồng độ pha tạp (độ rộng của vùng nghèo) và năng lượng vùng cấm (càng lớn nếu E_g càng lớn).

Sự đánh thủng kiểu Zener của tiếp xúc p - n

- Với thế ngược đủ lớn (≈ 10 V), E_C ở phía n có thể thấp hơn E_V ở phía p , điện tử có thể dễ dàng xuyên hầm từ vùng hóa trị của phía p sang vùng dẫn của phía n , tạo thành dòng điện. Quá trình này được gọi là **hiệu ứng Zener (Zener effect)**.



Sự đánh thủng kiểu Zener của tiếp xúc p - n



(a) Sự phụ thuộc của điện trường đánh thủng E_{br} trong vùng nghèo tại ngưỡng của sự đánh thủng ngược, vào nồng độ pha tạp N_d của vùng pha tạp nhẹ của các chuyển tiếp đột ngột p^+n hoặc pn^+ .

(b) Sự phụ thuộc của hiệu điện thế đánh thủng V_{br} vào N_d .

Với điện trường lớn, cơ chế xuyên hầm trở nên trội hơn so với cơ chế tuyết lở.

Bài 1

Xem xét chuyển tiếp pn^+ trên Si với nồng độ 10^{15} acceptor/cm³ ở phía p và 10^{19} donor/cm³ ở phía n . Thời gian tái hợp của hạt tải thiểu số là $\tau_e = 500$ ns đối với điện tử ở phía p và $\tau_h = 2.5$ ns đối với lỗ trống ở phía n . Diện tích cắt ngang của tiếp xúc là 1 mm². Giả sử đây là một đi-ốt dài, hãy tính dòng điện I chạy qua đi-ốt ở nhiệt độ phòng khi điện thế dọc theo nó là $V = 0.6$ V. Xác định giá trị của V/I và điện trở r_d của đi-ốt và giải thích tại sao chúng lại khác nhau.

The End