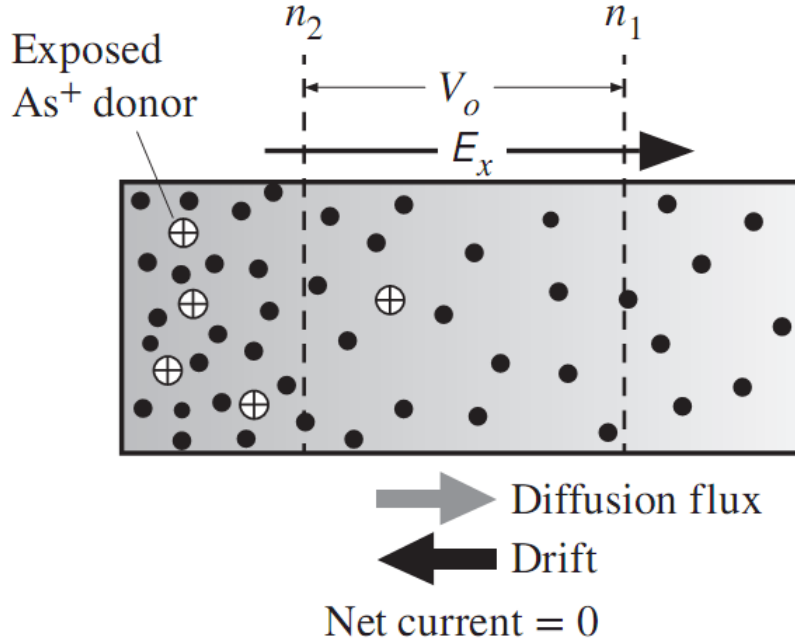


Chương 4 và 5

Bài 1

Thế bên trong do sự thay đổi về nồng độ pha tạp

Giả sử trong một chất bán dẫn, do có sự thay đổi về nồng độ donor, mật độ điện tử là không đều dọc theo chất bán dẫn đó với $n = n(x)$. Tính hiệu điện thế giữa hai điểm trên chất bán dẫn tại nơi có mật độ điện tử là n_1 và n_2 . Nếu sự phụ thuộc của nồng độ donor theo tọa độ là $N_d(x) = N_{d0} \exp(-x/b)$ thì điện trường bên trong E_x có dạng thế nào? Kết luận của bạn là gì?



Lời giải:

Xét một bán dẫn loại n được pha tạp không đều, trong đó ngay sau khi pha tạp, nồng độ donor (và nồng độ điện tử) giảm khi tiến về bên phải. Ban đầu, toàn bộ mẫu là trung hòa về điện. Điện tử sẽ ngay lập tức khuếch tán từ nơi có nồng độ cao sang nơi có nồng độ thấp. Nhưng sự khuếch tán đó gây ra sự tăng điện tử dư thừa tại vùng bên phải và để lại các donor mang điện tích dương ở vùng bên trái (Hình vẽ). Điện trường hình thành giữa các điện tích âm và các donor mang điện dương cản trở sự tăng đó.

Cân bằng đạt được khi dòng khuếch tán sang bên phải cân bằng với dòng trôi của điện tử sang trái. Mật độ dòng điện toàn phần phải bằng 0 (tại điều kiện hở mạch):

$$J_e = en\mu_e E_x + eD_e \frac{dn}{dx} = 0$$

Mặt khác, điện trường liên hệ với hiệu điện thế theo công thức: $E_x = -(dV/dx)$, do đó:

$$-en\mu_e \frac{dV}{dx} + eD_e \frac{dn}{dx} = 0$$

Sử dụng hệ thức Einstein $D_e/\mu_e = kT/e$ để khử D_e và μ_e , rồi tích phân 2 vế thu được:

$$\int_{V_1}^{V_2} dV = \frac{kT}{e} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{n}$$

Từ đó:

$$V_2 - V_1 = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Để tìm điện trường trong, giả sử rằng sự khuếch tán của điện tử sang bên phải không làm thay đổi mạnh sự biến thiên nồng độ ban đầu theo tọa độ $n(x) = N_d(x)$ do điện trường tích tụ nhanh để thiết lập trạng thái cân bằng. Do đó:

$$n(x) \approx N_d(x) = N_0 \exp \left(-\frac{x}{b} \right)$$

Thay vào phương trình đối với $J_e = 0$ và một lần nữa sử dụng hệ thức Einstein, thu được:

$$E_x = \frac{kT}{be}$$

Bài 2

Hiệu ứng Hall trong bán dẫn

Các sensor độ nhạy cao dựa trên hiệu ứng Hall thường sử dụng các bán dẫn loại III-V, ví dụ như GaAs, InAs, InSb. Mặt khác, các mạch tích hợp sử dụng hiệu ứng Hall với khuếch đại tích hợp thì sử dụng Si. Xem xét các mẫu bán dẫn gần thuần khiết với $n \approx p \approx n_i$ và tính hệ số Hall R_H của chúng với số liệu trong Bảng 5.5. Kết luận của bạn là gì? Sensor nào sẽ cho độ nhạy lớn nhất?

Table 5.5 Hall effect in selected semiconductors

	$E_g(\text{eV})$	$n_i(\text{cm}^{-3})$	$\mu_e(\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1})$	$\mu_h(\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1})$	b	$R_H(\text{m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1})$
Si	1.10	1×10^{10}	1,400	450	3.1	-320
GaAs	1.42	2×10^6	8,500	400	?	?
InAs	0.36	1×10^{15}	33,000	460	?	?
InSb	0.17	2×10^{16}	78,000	850	?	?

Bài 3

Chiết suất phức

Các phép đo phổ phân cực elip trên tinh thể Si tại bước sóng 826.6 nm chỉ ra rằng phần thực và phần ảo của hằng số điện môi phức tương ứng là 13.488 và 0.038. Hãy tìm chiết suất phức, hệ số phản xạ R và hệ số hấp thụ α tại bước sóng đó, cũng như vận tốc pha.

Bài 4

Chiết suất phức

Tinh thể InP có chiết suất (phần thực) $n = 3.549$ tại bước sóng 620 nm (năng lượng photon 2 eV). Hệ số phản xạ R tại mặt tiếp xúc không khí-InP tại bước sóng đó là 0.317. Hãy tính hệ số dập tắt κ và hệ số hấp thụ α của InP tại bước sóng đó.

Chương 6

Ví dụ bổ sung 1

Mật độ dòng ngược bão hòa J_0 của chuyển tiếp Schottky cũng chính là mật độ dòng điện trong phương trình Richardson–Dushman, mô tả sự phát xạ nhiệt điện tử qua một hàng rào thế $\Phi (= \Phi_B)$:

$$J_0 = B_e T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right)$$

Trong đó B_e là hằng số Richardson hiệu dụng phụ thuộc vào tiếp xúc kim loại-bán dẫn. Đối với tiếp xúc kim loại-bán dẫn, B_e phụ thuộc vào khối lượng hiệu dụng liên quan đến mật độ trạng thái của các hạt tải phát ra từ bán dẫn. Ví dụ, đối với tiếp xúc giữa kim loại và bán dẫn Si loại n , B_e vào khoảng $110 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$, còn đối với tiếp xúc giữa kim loại và bán dẫn Si loại p , B_e vào khoảng $30 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$.

- Xem xét một đi-ốt Schottky giữa W và Si loại n , được pha tạp nồng độ donor là 10^{16} cm^{-3} . Diện tích cắt ngang của tiếp xúc là 1 mm^2 . Cho ái lực điện tử χ của Si là 4.01 eV và công thoát của W là 4.55 eV . Tính độ cao hàng rào thế lý thuyết Φ_B từ kim loại sang bán dẫn.
- Điện thế trong V_0 khi không có điện thế ngoài?
- Cho độ cao hàng rào thế thực nghiệm Φ_B là 0.66 eV . Tìm dòng ngược bão hòa và dòng điện khi áp thế thuận 0.2 V dọc theo đi-ốt.

Lời giải:

- Hàng rào thế Φ_B là:

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi = 4.55 \text{ eV} - 4.01 \text{ eV} = 0.54 \text{ eV}$$

Giá trị thực nghiệm vào khoảng 0.66 eV và lớn hơn giá trị lý thuyết do một số hiệu ứng tại mặt tiếp xúc giữa kim loại và bán dẫn bắt nguồn từ các liên kết treo, các khuyết tật, v.v. Ví dụ, các liên kết treo tạo ra các trạng thái bề mặt bên trong vùng cấm của bán dẫn và chúng có thể bắt điện tử và làm thay đổi giản đồ năng lượng Schottky. Ngoài ra, trong một số trường hợp, ví dụ như Pb trên Si loại n , giá trị thực nghiệm có thể nhỏ hơn giá trị lý thuyết.

- Chúng ta có thể tìm $E_C - E_{Fn}$ bằng công thức sau:

$$n = N_d = N_c \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fn}}{kT}\right)$$

$$10^{16} \text{ cm}^{-3} = (2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}) \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fn}}{0.026 \text{ eV}}\right)$$

Từ đó thu được $\Delta E = E_C - E_{Fn} = 0.206 \text{ eV}$. Vậy điện thế trong là:

$$V_0 = \frac{\Phi_B}{e} - \frac{E_C - E_{Fn}}{e} = 0.54 \text{ V} - 0.206 \text{ V} = 0.33 \text{ V}$$

- c) Sử dụng tiết diện của tiếp xúc $A = 0.01 \text{ cm}^2$, $B_e = 110 \text{ A K}^{-2} \text{ cm}^{-2}$, và giá trị thực nghiệm của Φ_B , ta thu được dòng ngược bão hòa là:

$$I_0 = AB_e T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) = (0.01)(110)(300^2) \exp\left(-\frac{0.66 \text{ eV}}{0.026 \text{ eV}}\right) = 9.36 \times 10^{-7} \text{ A hay } 0.94 \mu\text{A}$$

Mật độ dòng điện ngược bão hòa J_0 vào khoảng $1 \mu\text{A mm}^{-2}$, là giá trị đặc trưng cho đi-ốt Schottky dựa trên Si. Khi áp thế thuận $V = 0.2 \text{ V}$, dòng điện là:

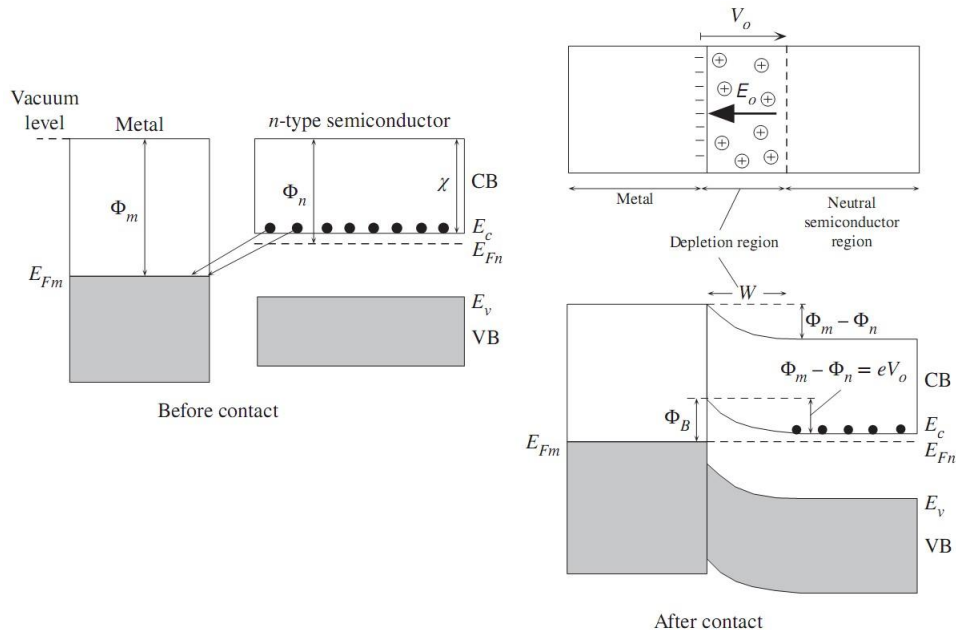
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] = (0.94 \mu\text{A}) \left[\exp\left(\frac{0.2}{0.026}\right) - 1 \right] = 2.0 \text{ mA}$$

Ví dụ bổ sung 2

Độ rộng vùng nghèo của chuyển tiếp Schottky

Xem xét một chuyển tiếp giữa kim loại và một bán dẫn loại n . Giả sử nồng độ donor trong bán dẫn là $N_d = \text{const}$. Mật độ điện tích khối của vùng điện tích không gian dương là $\rho_{\text{net}} = eN_d$. Theo tĩnh điện học $dE/dx = \rho_{\text{net}}/\epsilon$ với $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, $\epsilon_r = 11.9$ đối với Si. Điện trường E hướng theo chiều âm của trục x và độ lớn của nó giảm khi càng đi sâu vào bán dẫn, biến mất tại biên giữa vùng nghèo và vùng trung hòa. Giá trị điện trường lớn nhất ở ngay tại mặt tiếp xúc kim loại-bán dẫn với tất cả điện tích dương đều nằm bên phải và tất cả điện tích âm (điện tử) đều nằm trên bề mặt kim loại ở bên trái. Ngoài ra, đạo hàm của điện thế V' tại bất kì điểm nào của vùng nghèo đều cho giá trị của điện trường E . Ở đây là V' là điện thế tại điểm bất kỳ trong vùng nghèo, còn V là điện thế mạch ngoài. Tại vị trí $x = W$, điện trường $E = 0$ và điện thế là $V' = V_0 - V$. Vì vậy, độ rộng vùng nghèo của chuyển tiếp Schottky là:

$$W = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r (V_0 - V)}{eN_d} \right]^{1/2}$$



Và điện trường cực đại:

$$E_{\max} = -\frac{eN_d W}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Cho chuyển tiếp Schottky như trong ví dụ trước với $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ và điện thế trong $V_0 = 0.33 \text{ V}$. Tính độ rộng vùng nghèo khi hở mạch, khi áp thế thuận 0.2 V và khi áp thế ngược -5 V . Tìm giá trị cực đại của điện trường trong mỗi trường hợp. Kết luận của bạn là gì?

Lời giải (gợi ý):

Sử dụng những số liệu đã cho, ta tính được $W_0 = 0.21 \mu\text{m}$ với $V = 0$. Nếu $V = 0.2 \text{ V}$, W là $0.13 \mu\text{m}$ (hẹp hơn), và với $V = -5 \text{ V}$, W là $0.84 \mu\text{m}$ (rộng hơn nhiều). Điện trường cực đại khi hở mạch là $E_{\max} = 2.0 \times 10^6 \text{ V m}^{-1}$. Tính toán tương tự với $W = 0.84 \mu\text{m}$. Chú ý là trong tất cả các trường hợp $|E_{\max}| = 2(V_0 - V)/W$.

Bài 6 (p. 534)

- Xem xét một đi-ốt Schottky giữa Au và Si loại n , được pha tạp với nồng độ donor là 10^{16} cm^{-3} . Diện tích cắt ngang của tiếp xúc là 1 mm^2 . Cho công thoát của Au là 5.1 eV , hãy tính độ cao hàng rào thế lý thuyết Φ_B từ kim loại sang bán dẫn.
- Cho độ cao hàng rào thế thực nghiệm Φ_B là 0.8 eV . Hãy tính dòng ngược bão hòa và dòng điện tại thế thuận là 0.3 V .

Bài 7

- Cho một đi-ốt Schottky giữa Al và Si loại n , được pha tạp với nồng độ donor là $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Diện tích cắt ngang của tiếp xúc là 1 mm^2 . Cho ái lực điện tử χ của Si là 4.01 eV và công thoát của Al là 4.28 eV . Hãy tính độ cao hàng rào thế lý thuyết Φ_B từ kim loại sang bán dẫn. Giá trị điện thế trong là bao nhiêu? Nếu độ cao hàng rào thế thực nghiệm Φ_B là khoảng 0.6 eV thì dòng ngược bão hòa và dòng điện tại thế thuận là 0.2 V là bao nhiêu? Cho $B_e = 110 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$.

Bài 8

Cho một mẫu bán dẫn Si loại n , được pha tạp với nồng độ donor là $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, và các kim loại với công thoát được cho trong bảng sau:

Kim loại	Mg	Ti	Cr	Ni	W	Mo	Pd	Au	Pt
Φ_m	3.7	4.3	4.5	4.7	4.6	4.6	5.1	5.1	5.7

Hãy xác định trong những kim loại trên, kim loại nào có thể:

- Tạo tiếp xúc Schottky với mẫu Si nói trên.
- Tạo tiếp xúc Ohmic với mẫu Si nói trên.