

CHƯƠNG 4. TRUYỀN DẪN HẠT TẢI

Carrier transport

Giảng viên: Nguyễn Đức Cường

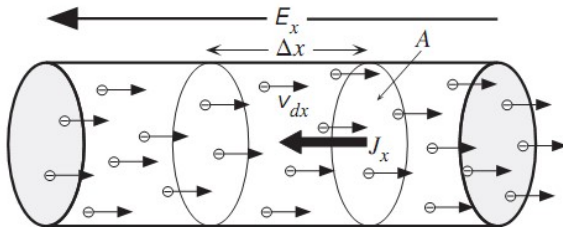
Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

Email: cuongnd@vnu.edu.vn

Ngày 21 tháng 9 năm 2021

1 CHƯƠNG 4. TRUYỀN DẪN HẠT TẢI

Sự dẫn điện - Mô hình cổ điển của Drude

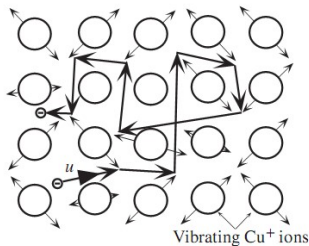


Sự trôi (drift) của điện tử trong vật dẫn dưới tác dụng của điện trường.

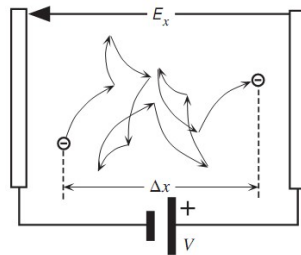
- **Sự dẫn điện bằng điện tử**: sự dịch chuyển tự do của các điện tử (trong vùng dẫn), gần giống với các hạt tự do.
- **Sự dẫn điện bằng lỗ trống**: sự dịch chuyển của các điện tích dương trong vùng hóa trị.
- Độ dẫn điện:

$$\sigma = en\mu_e + ep\mu_h$$

Sự dẫn điện - Mô hình cổ điển của Drude



(a) Một electron dẫn điện di chuyển một cách ngẫu nhiên trong kim loại (với tốc độ trung bình u), bị tán xạ thường xuyên và ngẫu nhiên bởi dao động nhiệt của các nguyên tử. Khi không có điện trường ngoài, không có sự trôi thực sự theo bất kỳ hướng nào.



(b) Khi có điện trường ngoài E_x , xuất hiện dòng trôi thực sự của điện tử dọc theo phương x . Chuyển động đó chồng chập với chuyển động ngẫu nhiên của electron. Sau nhiều lần bị tán xạ, các electron bị dịch chuyển một khoảng cách thực sự là Δx , từ vị trí ban đầu của nó về phía cực dương.

Sự dẫn điện - Mô hình cổ điển của Drude

- Vận tốc trôi:

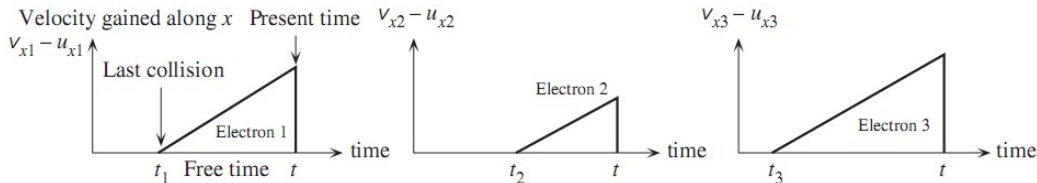
$$v_{dx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{xi}, \text{ với } N \approx 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

- Mật độ dòng điện theo phương x :

$$J_x = \frac{\Delta q}{A\Delta t} = \frac{enAv_{dx}\Delta t}{A\Delta t} = env_{dx}, \text{ với } n \text{ là mật độ điện tử trong vật dẫn}$$

- Điện trường ngoài phụ thuộc thời gian: $E = E(x) \rightarrow J_x(t) = env_{dx}(t)$.
- Trong kim loại, các điện tử hóa trị dễ dàng bứt ra khỏi liên kết và trở thành điện tử tự do, tạo thành các đám mây (hay khí) điện tử. Các điện tử đó được gọi là **điện tử dẫn**, có thể chuyển động dễ dàng dưới tác dụng của điện trường ngoài, tạo thành dòng điện J_x .

Sự trôi của hạt tải dưới tác dụng của điện trường - Độ linh động



- Cho u_{xi} là vận tốc theo phương x của điện tử thứ i ngay sau va chạm (tại thời điểm t_i). Giả sử trong khoảng thời gian từ t_i đến t , điện tử không chịu va chạm. Vận tốc của điện tử tại thời điểm t là:

$$v_{xi} = u_{xi} + \frac{eE_x}{m_e^*}(t - t_i)$$

- Từ đó:

$$v_{dx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{xi} = \frac{eE_x}{m_e^*} \overline{(t - t_i)} = \frac{eE_x}{m_e^*} \tau$$

Trong đó $\tau = \overline{(t - t_i)}$ là **thời gian tự do trung bình** của N điện tử giữa các va chạm.

Độ linh động của hạt tải

- Độ linh động trôi (drift mobility): $\mu_d = e\tau/m_e^*$, từ đó:

$$v_{dx} = \mu_d E_x \text{ và } J_x = en\mu_d E_x$$

- Độ dẫn:

$$\sigma = en\mu_d$$

- $1/\tau$ được gọi là tần suất va chạm trung bình.
- Trong chất bán dẫn, cả điện tử và lỗ trống đều tham gia vào quá trình dẫn điện:

$$\mu_{de} = \frac{e\tau_e}{m_e^*} \text{ và } \mu_{dh} = \frac{e\tau_h}{m_h^*}$$

$$\sigma = en\mu_e + ep\mu_h$$

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau_e}{m_e^*} + \frac{e^2 p \tau_h}{m_h^*}$$

Lưu ý: m_e^ và m_h^* là khối lượng hiệu dụng của điện tử và lỗ trống trong vật liệu.*

Điện trở suất của kim loại

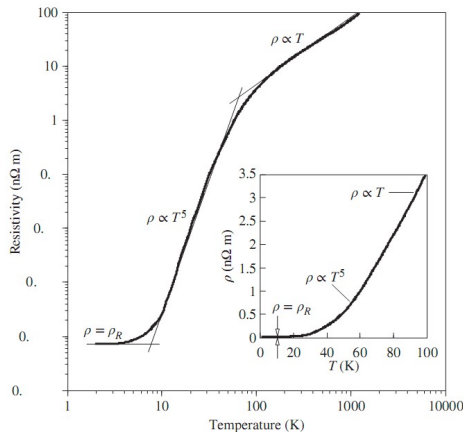
- Khi nhiệt độ tăng, các ion kim loại dao động càng mạnh, khiến điện trở kim loại tăng. Ở nhiệt độ cao (>100 K), điện trở suất của kim loại phụ thuộc nhiệt độ theo phương trình:

$$\rho \approx AT + B$$

- Ở nhiệt độ thấp (<100 K), thời gian tự do trung bình τ của điện tử dài hơn và phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ, dẫn đến điện trở suất của kim loại thấp hơn và điện trở suất của kim loại là (theo **quy tắc Matthiessen**, tức quy tắc cộng điện trở):

$$\rho = DT^5 + \rho_R$$

với ρ_R là điện trở suất dư, do sự tán xạ của các nguyên tử tạp chất, khuyết tật trong tinh thể, hoặc biên hạt tinh thể.



Độ dẫn điện của chất bán dẫn

- Độ dẫn điện:

$$\rho_n^{-1} = \sigma_n = \frac{e^2 n \tau}{m^*}$$

- Nồng độ hạt tải và độ dẫn điện phụ thuộc vào nhiệt độ theo hàm mũ. Đối với chất bán dẫn thuần:

$$\rho_n^{-1} = \sigma_n = \frac{e^2 n \tau}{m^*} = \text{constant} \times \exp \left[-\frac{E_g}{2kT} \right]$$

- Đối với chất bán dẫn pha tạp:

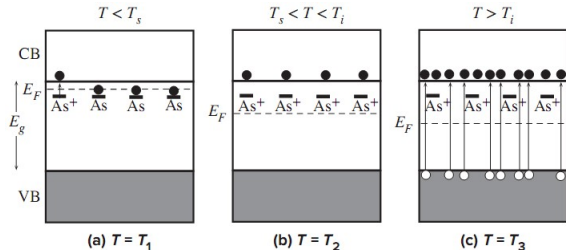
$$\rho_n^{-1} = \sigma_n = \frac{e^2 n \tau}{m^*} = \text{constant} \times \exp \left[-\frac{(E_g - E_F)}{2kT} \right]$$

Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của nồng độ hạt tải

- $T < T_s$: mật độ điện tử bị chi phối bởi sự ion hóa của donor.

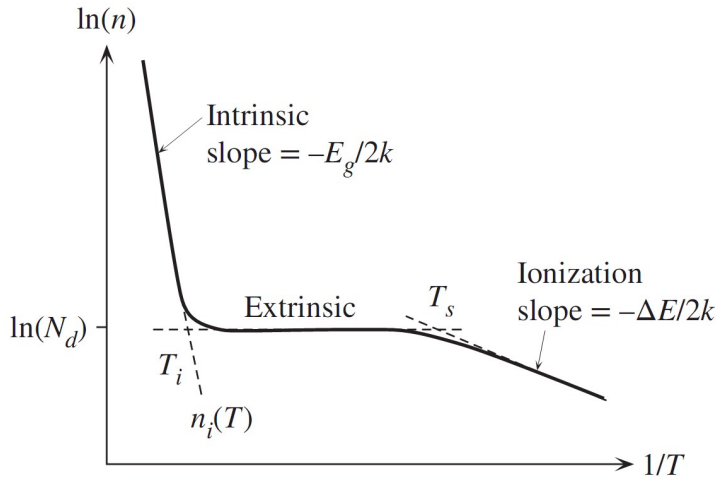
$$n = \left(\frac{1}{2} N_c N_d \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{\Delta E}{2k_B T} \right)$$

- $T_s < T < T_i$: nồng độ điện tử bằng nồng độ donor N_d do tất cả donor đã bị ion hóa.
- $T > T_i$: số điện tử sinh ra do nhiệt vượt quá số điện tử sinh ra từ quá trình ion hóa donor, bán dẫn thể hiện giống như loại thuần (*dấu \propto là dấu tỉ lệ thuận*).



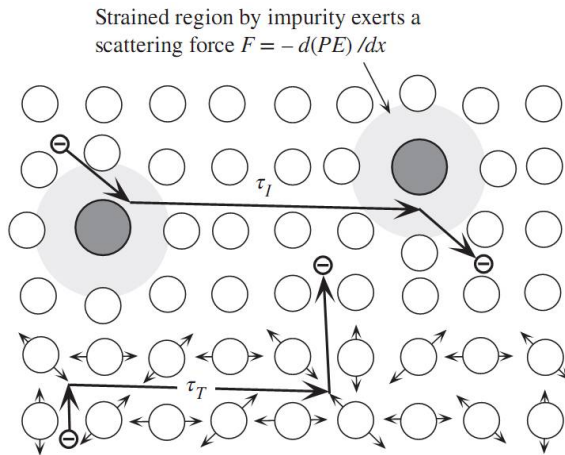
$$n \propto T^{3/2} \exp \left(- \frac{E_g}{2k_B T} \right)$$

Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của nồng độ hạt tải



Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của nồng độ điện tử bên trong bán dẫn loại n .

Các cơ chế tán xạ điện tử - Quy tắc Matthiessen



Sự tán xạ của điện tử bởi dao động nhiệt của mạng tinh thể (dưới) và tương tác Coulomb với các nguyên tử tạp chất đã ion hóa (trên).

Các cơ chế tán xạ điện tử - Quy tắc Matthiessen

- Thời gian tương ứng giữa hai lần tán xạ liên tiếp là τ_T và τ_I . Xác suất tán xạ tương ứng là $1/\tau_T$ và $1/\tau_I$. Vì vậy, với τ là thời gian tán xạ hiệu dụng, ta có hệ thức về tổng xác suất tán xạ:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_T} + \frac{1}{\tau_I}$$

- Do $\mu_d = e\tau/m_e$, $\mu_L = e\tau_T/m_e$ và $\mu_I = e\tau_I/m_e$ nên:

$$\frac{1}{\mu_d} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}$$

- Quy tắc Matthiessen:

$$\rho = \frac{1}{en\mu_d} = \frac{1}{en\mu_L} + \frac{1}{en\mu_I} \text{ hay } \rho = \rho_T + \rho_I$$

Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của độ linh động

- Độ linh động giới hạn bởi **sự tán xạ do dao động của mạng tinh thể**:

$$\mu_L \propto T^{-3/2}, \text{ dấu } \propto \text{ là dấu tỉ lệ thuận}$$

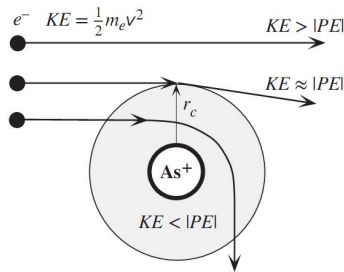
- Độ linh động giới hạn bởi **sự tán xạ trên nguyên tử tạp chất đã ion hóa** với nồng độ N_I :

$$\mu_I \propto \frac{T^{3/2}}{N_I}$$

- Theo quy tắc Matthiessen:

$$\frac{1}{\mu_e} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_L}$$

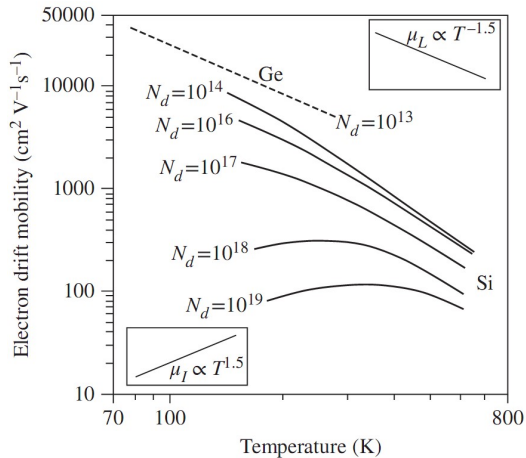
Ở nhiệt độ thấp, μ_I chiếm ưu thế, còn ở nhiệt độ cao thì μ_L chiếm ưu thế.



Tán xạ của điện tử bởi nguyên tử tạp chất đã ion hóa với thế năng Coulomb:

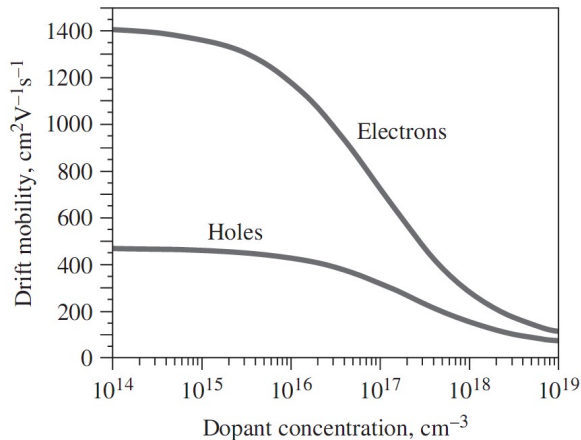
$$|PE| = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r}$$

Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của độ linh động



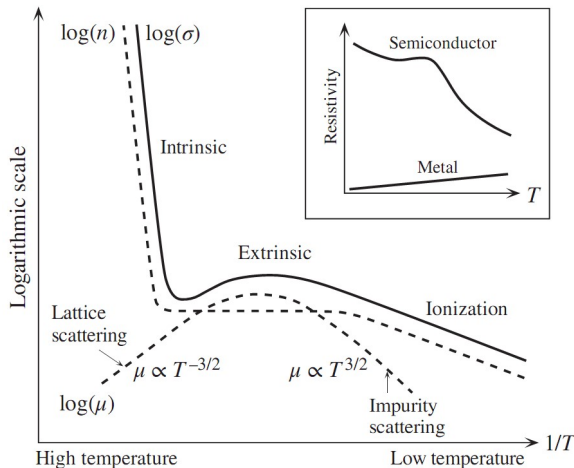
Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của độ linh động trôi bên trong bán dẫn Si và Ge loại n .

Sự phụ thuộc vào nồng độ dopant của độ linh động



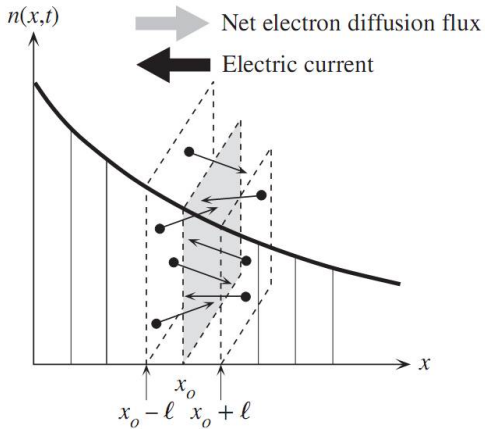
Sự phụ thuộc vào nồng độ dopant của độ linh động trôi đối với điện tử và lỗ trống bên trong bán dẫn Si ở 300 K.

Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của độ dẫn điện

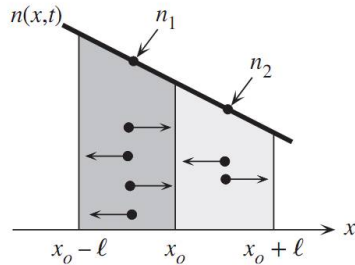


Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của độ dẫn điện bên trong bán dẫn loại n .

Sự khuếch tán của hạt tải trong chất bán dẫn



(a)



(b)

Hạt tải có xu hướng khuếch tán từ nơi có nồng độ cao sang nơi có nồng độ thấp. Ở Hình (b), tại tọa độ x_0 , số điện tử đi sang bên phải nhiều hơn số điện tử đi sang bên trái.

Sự khuếch tán của hạt tải trong chất bán dẫn

- Mật độ dòng điện do sự khuếch tán $J = Q\Gamma$ với Γ là mật độ dòng hạt và Q là điện tích của hạt tải ($-e$ đối với điện tử và $+e$ đối với lỗ trống):

$$\Gamma = \frac{\Delta N}{A\Delta t} \text{ với } \Delta N \text{ là số hạt qua tiết diện } A \text{ trong thời gian } \Delta t$$

- Đối với điện tử (ℓ và τ là quãng đường và thời gian tự do trung bình):

$$\Gamma_e = \frac{\frac{1}{2}n_1A\ell - \frac{1}{2}n_2A\ell}{A\tau} = -\frac{\ell^2}{2\tau}(n_2 - n_1) = -\frac{\ell^2}{2\tau}\left(\frac{dn}{dx}\right)$$

- Định luật Fick thứ nhất:**

$$\Gamma_e = -D_e \frac{dn}{dx} \text{ với } D_e = \ell^2/2\tau \text{ là hệ số khuếch tán}$$

- Dòng điện do sự khuếch tán của điện tử:

$$J_{D,e} = -e\Gamma_e = eD_e \frac{dn}{dx}$$

Sự khuếch tán của hạt tải trong chất bán dẫn

- Dòng điện do sự khuếch tán của lỗ trống:

$$J_{D,h} = e\Gamma_h = -eD_h \frac{dp}{dx}$$

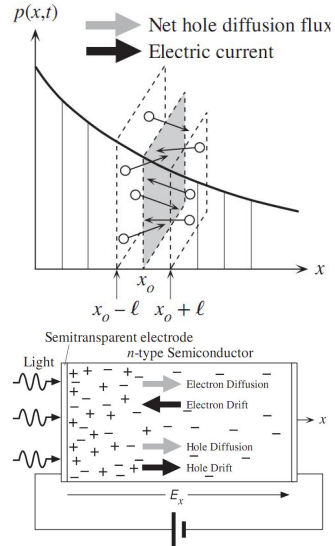
- Dòng toàn phần:

$$\text{Dòng điện tử: } J_e = en\mu_e E_x + eD_e \frac{dn}{dx}$$

$$\text{Dòng lỗ trống: } J_h = en\mu_e E_x - eD_h \frac{dp}{dx}$$

- Hệ thức Einstein:**

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{kT}{e} \text{ và } \frac{D_h}{\mu_h} = \frac{kT}{e}$$



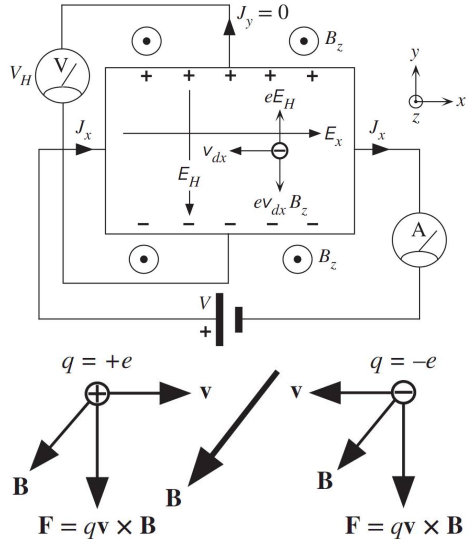
Hiệu ứng Hall trong kim loại

- Điện tử chuyển động theo chiều âm trục x và có vận tốc trôi là v_{dx} . Nó chịu tác dụng của lực Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- Lực Lorentz kéo điện tử về phía chiều âm trục y , tạo nên sự tập trung của điện tích âm ở phía đáy của mẫu và điện tích dương ở phía đỉnh của mẫu (các ion dương, ví dụ Cu^+). Sự tập trung điện tích trái dấu ở 2 phía tạo nên **Điện trường Hall E_H** và hiệu điện thế V_H giữa phía đỉnh và phía đáy của mẫu. Ở trạng thái cân bằng:

$$eE_H = ev_{dx}B_z \rightarrow E_H = \left(\frac{1}{en}\right)J_xB_z$$



Hiệu ứng Hall trong kim loại

- Hệ số Hall:

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = -\frac{1}{en}$$

- Hiệu ứng Hall dùng để đo nồng độ hạt tải n (khi B_z đã biết) hoặc đo B_z (khi n đã biết), với từ trường nhỏ nhất có thể là 10 nT.
- Thông thường khó có thể đo được một cách chính xác giá trị điện thế nhỏ (để xác định điện trường E_y), nên trong các cảm biến Hall, khi cần xác định cùng một giá trị từ trường B_z , thì cần sử dụng vật liệu có hệ số Hall R_H lớn. Vì vậy bán dẫn thường được dùng phổ biến hơn kim loại trong cảm biến Hall nhằm tăng độ nhạy.

Hiệu ứng Hall trong kim loại

Bảng: Hệ số Hall (R_H) và độ linh động Hall ($\mu_H = |\sigma R_H|$) của một số kim loại

Kim loại	Hóa trị	R_H ($\text{m}^3 \text{A}^{-1} \text{s}^{-1}$) (thực nghiệm) $\times 10^{-11}$	R_H ($\text{m}^3 \text{A}^{-1} \text{s}^{-1}$) (lý thuyết) $\times 10^{-11}$	$\mu_H = \sigma R_H $ ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
Na	1	-24.8	-24.6	50.8
K	1	-42.8	-47.0	57.9
Ag	1	-9.0	-10.7	53.9
Cu	1	-5.4	-7.4	31.6
Au	1	-7.2	-10.6	31.9
Mg	2	-8.3	-7.2	18.5
Al	3	-3.4	-3.5	12.6
Co	2	+36		
Be	2	+24		
Zn	2	3.3		

Hiệu ứng Hall trong bán dẫn

- Vận tốc trôi của điện tử:

$$v_e = \frac{\mu_e}{e} F_{th} = \frac{\mu_e}{e} eE$$

- Dòng điện tổng hợp theo trục y bằng 0:

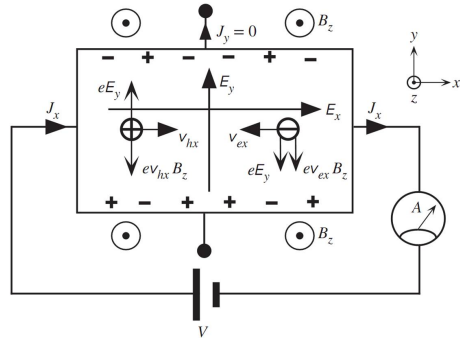
$$J_y = J_h + J_e = epv_{hy} + env_{ey} = 0$$
$$\rightarrow pv_{hy} = -nv_{ey}$$

- Lực tác dụng theo phương y lên các hạt tải:

$$F_{hy} = eE_y - ev_{hx}B_z \text{ và } -F_{ey} = eE_y - ev_{ex}B_z$$

- Sử dụng $F_{hy} = ev_{hy}/\mu_h$ và $-F_{ey} = ev_{ey}/\mu_e$

$$\frac{ev_{hy}}{\mu_h} = E_y - \mu_h E_x B_z \text{ và } \frac{ev_{ey}}{\mu_e} = E_y + \mu_e E_x B_z$$



Hiệu ứng Hall trong bán dẫn

- Thay $p v_{hy} = -n v_{ey}$:

$$p\mu_h E_y - p\mu_h^2 E_x B_z = -n\mu_e E_y - n\mu_e^2 E_x B_z$$

- Hay

$$E_y(p\mu_h + n\mu_e) = B_z E_x (p\mu_h^2 - n\mu_e^2)$$

- Dòng điện tổng hợp theo phương x:

$$J_x = e p v_{hx} + e n v_{ex} = (p\mu_h + n\mu_e) e E_x$$

- Do đó:

$$e E_y (n\mu_e + p\mu_h)^2 = B_z J_x (p\mu_h^2 - n\mu_e^2)$$

- Hệ số Hall $R_H = E_y / J_x B_z$:

$$R_H = \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{e(n\mu_e + p\mu_h)^2} = \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2}, \text{ với } b = \mu_e / \mu_h$$

- Các hạt tải được truyền dẫn trong chất bán dẫn bằng 2 cơ chế: cơ chế trôi hay cuốn (**drift**) bởi điện trường, và cơ chế khuếch tán (**diffusion**).
- Hiệu ứng Hall là hệ quả của sự tương tác giữa từ trường và các hạt tải. Hiệu ứng Hall được sử dụng để xác định loại hạt tải, nồng độ hạt tải, và trong cảm biến từ trường độ nhạy cao.

Ví dụ 1 - Hệ số Hall trong bán dẫn Si thuần

Tại nhiệt độ phòng, một tinh thể Si tinh khiết có nồng độ điện tử và lỗ trống là $n = p = n_i = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Độ linh động trôi của điện tử và lỗ trống tương ứng là $\mu_e = 1350 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ và $\mu_h = 450 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Hãy tính hệ số Hall và so sánh kết quả với một kim loại điển hình.

Lời giải

Với các số liệu đã cho, ta có:

$$b = \frac{\mu_e}{\mu_h} = \frac{1350}{450} = 3$$

Từ đó:

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{(1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}) - (1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3})(3)^2}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})[1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} + (1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3})(3)]^2} \\ &= -312 \text{ m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Giá trị này lớn hơn 1 bậc so với của kim loại, vì vậy bán dẫn được sử dụng phổ biến hơn kim loại trong các linh kiện sử dụng hiệu ứng Hall.

The End