

Semiconductor Materials

2024/06/12

材料工学科 Department of Materials Science

弓野健太郎 Kentaro Kyuno

半導体における電気伝導

Electrical transport in semiconductors

・ドリフト電流 (電場)

Drift current (electric field)

・拡散電流 (濃度差)

Diffusion current (concentration gradient)

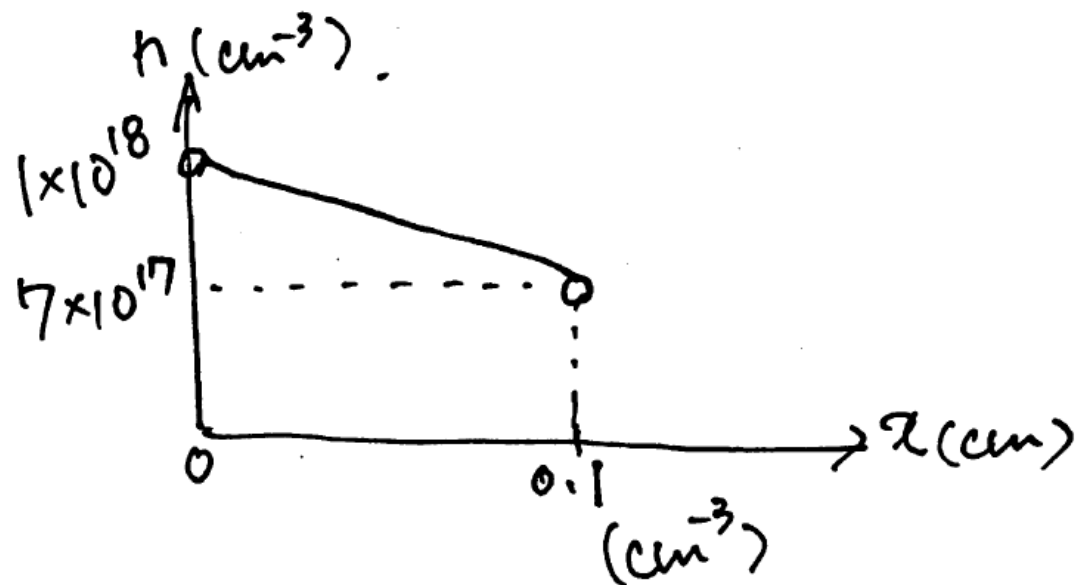
演習 1

n型半導体において、0.1cmの間で電子密度が 1×10^{18} から $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ へと直線的に変化している。
このときの拡散電流を計算せよ。
ただし、拡散係数を $22.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ とする。

Exercise 1

Assume that, in an n-type semiconductor, the electron concentration varies linearly from 1×10^{18} to $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ over a distance of 0.1cm. Calculate the diffusion current assuming that the electron diffusivity is $22.5 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Exercise 1
(solution).



$$J = q \cdot D \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$= 1.6 \times 10^{-19} \text{ (C)} \times 22.5 \text{ cm}^2/\text{s} \times \left(\frac{7 \times 10^{17} - 1 \times 10^{18}}{0.1 \text{ (cm)}} \right)$$

$$= -10.8 \left(\frac{\text{C}}{\text{s}} \right) \frac{1}{\text{cm}^2}$$

$$= -10.8 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \quad \left(\begin{array}{l} \text{電流密度} \\ \text{current density} \end{array} \right)$$

演習 2

少数キャリア（ホール）が均一なn型半導体の一点に注入されているとする。この試料に50V/cmの電界をかけたところ、この電界によって少数キャリアが100 μ sの間に1cm移動したとする。

このとき、少数キャリアのドリフト速度、移動度、拡散係数を求めよ。ただし、 $T=300\text{K}$ とする。

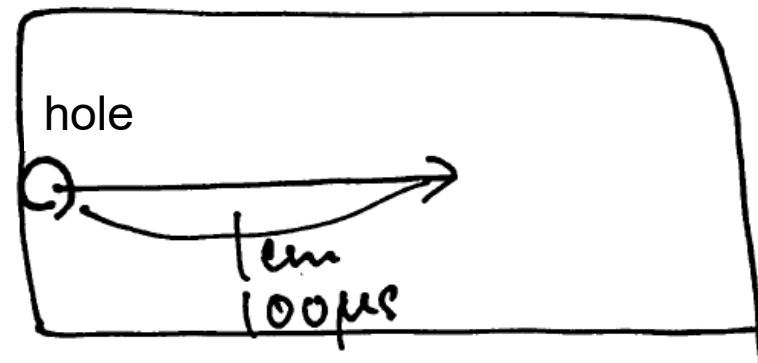
Exercise 2

Minority carriers (holes) are injected into a homogeneous n-type semiconductor sample at one point. An electric field of 50V/cm is applied across the sample. As a result, the field moves these carriers a distance of 1cm in 100 μ s. Find the drift velocity, mobility and diffusivity of these carriers.

Exercise 2 (solution)

電場
electric field $\Rightarrow E = 50 \text{ V/cm}$

drift velocity $v = \frac{1 \text{ (cm)}}{100 \times 10^{-6} \text{ (s)}} = 10^4 \text{ cm/s}$

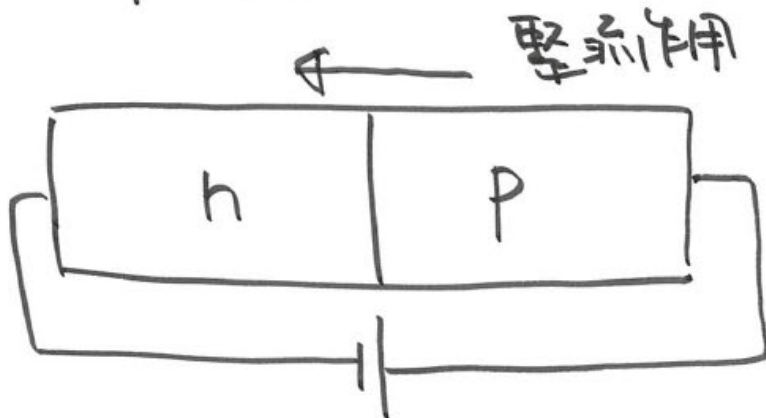


$v = \mu \cdot E \rightarrow$ mobility
 $\mu = \frac{v}{E} = \frac{10^4 \text{ (cm/s)}}{50 \text{ (V/cm)}} = 200 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$

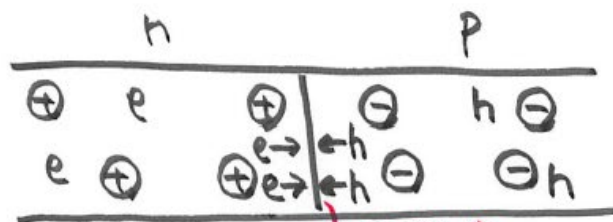
diffusivity $D = \frac{kT}{q} \mu = \frac{1.38 \times 10^{-23} \text{ (m}^2\text{kg/s}^2\text{K)} \times 300 \text{ (K)}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ (C)}} \times 200 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$
Einstein relation
 $= 5.2 \text{ cm}^2/\text{s}$

pn接合 pn junction

整流作用 Rectifying effect



ダイオード、LED (Light Emitting Diode)

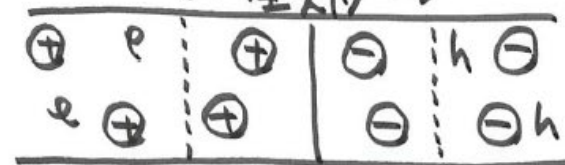


拡散 diffusion

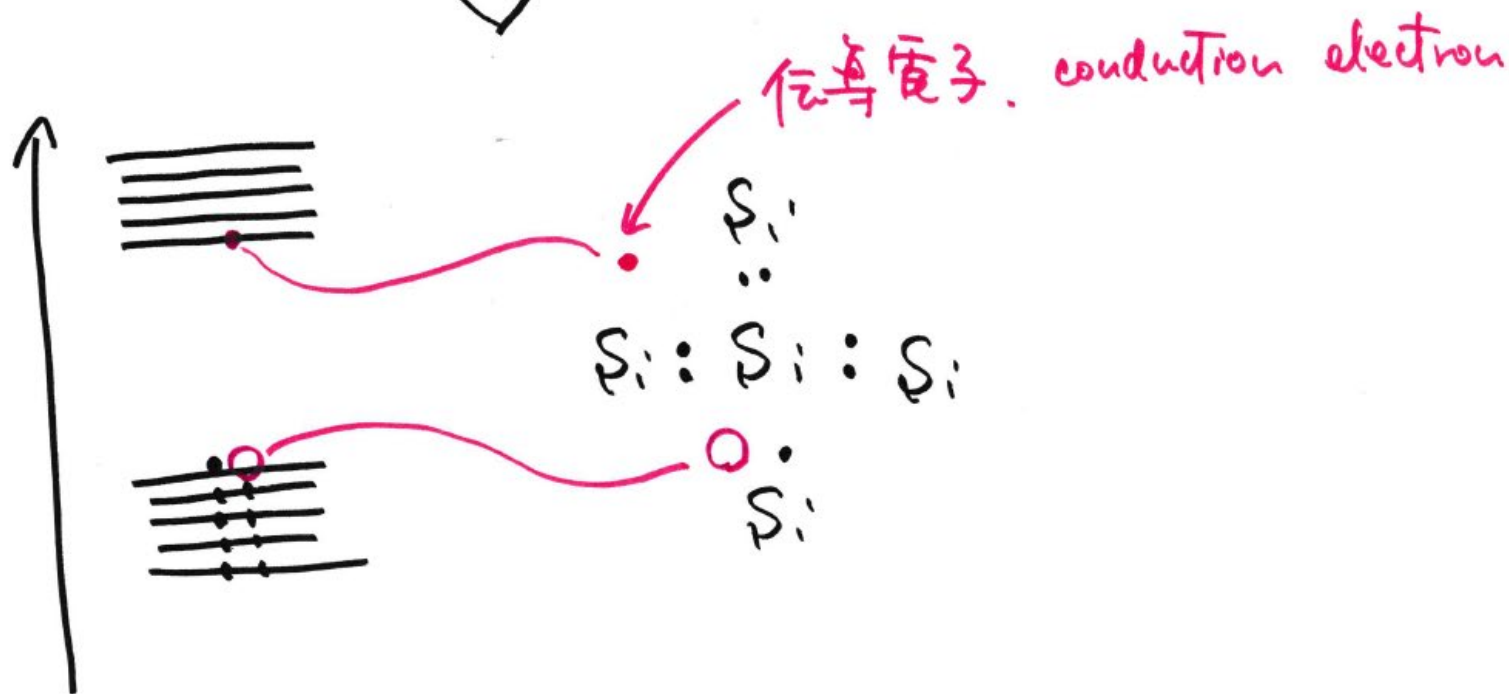
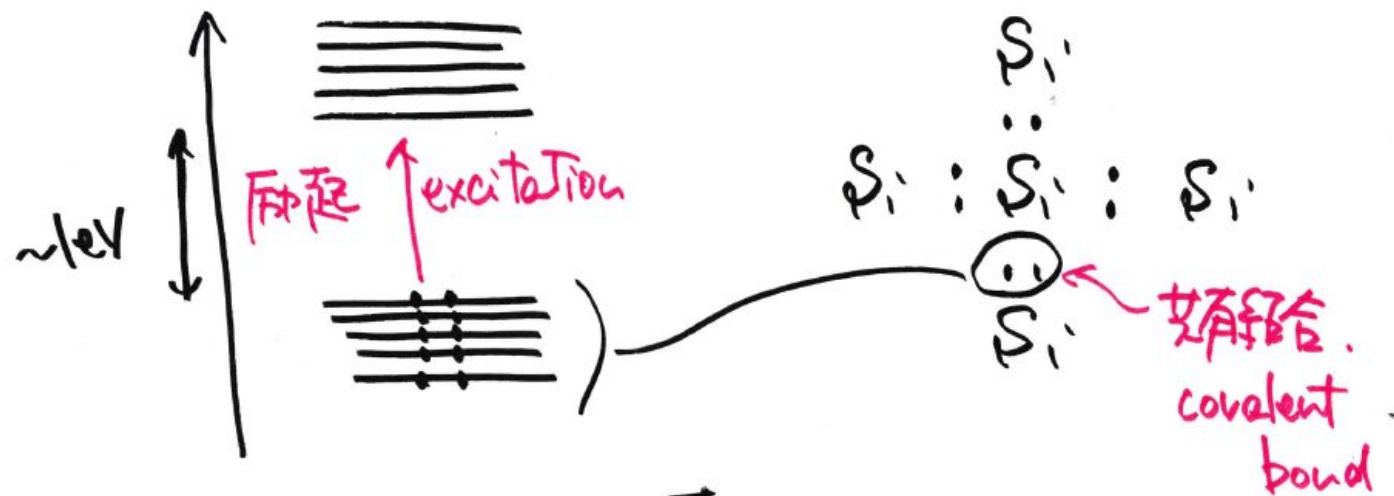
Electric field

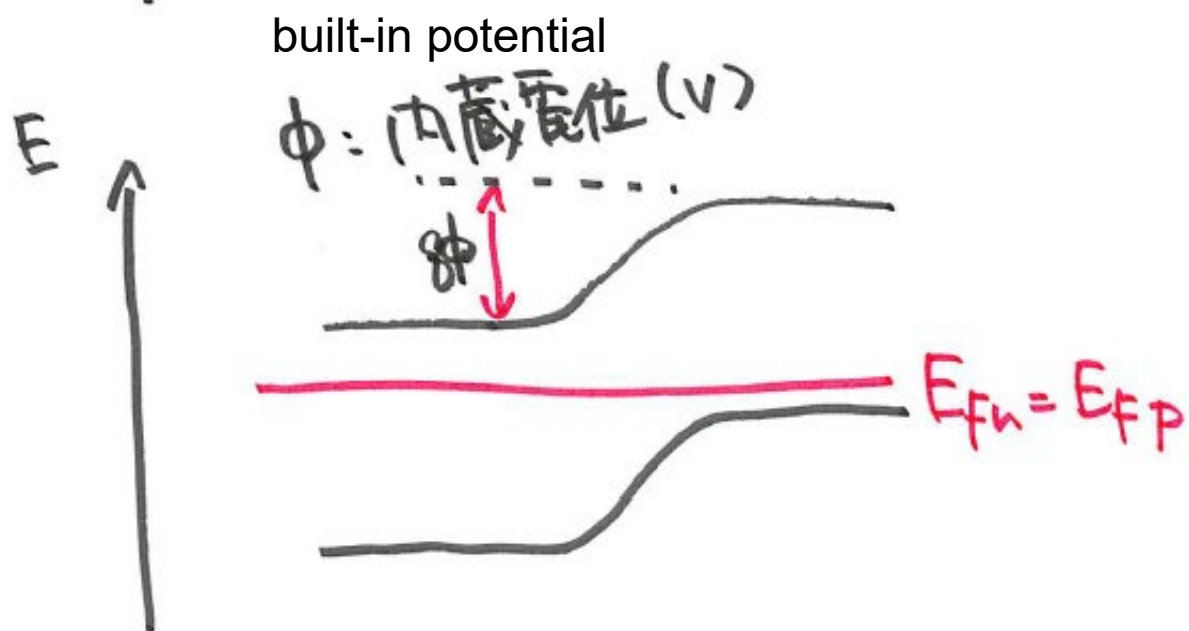
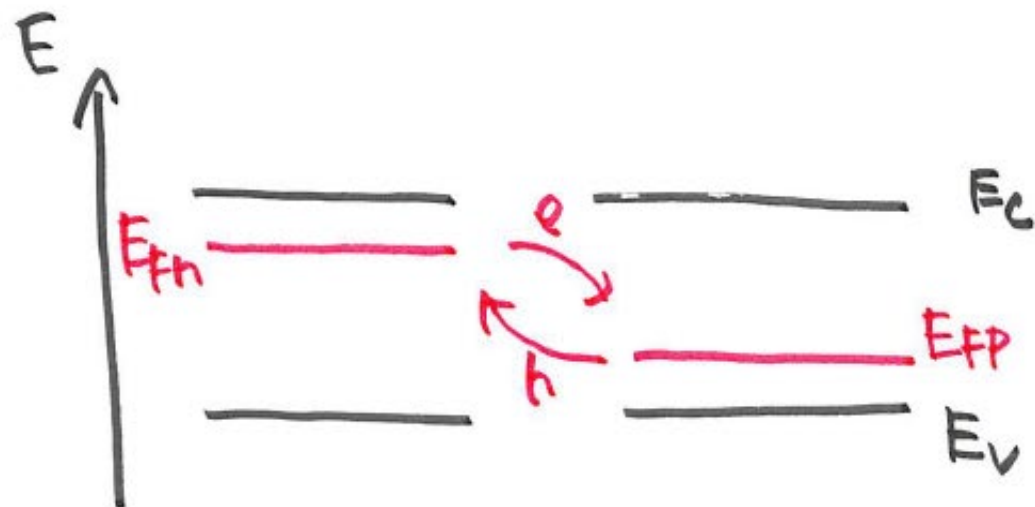
電場

Depletion layer



hole drift diffusion
electron drift diffusion



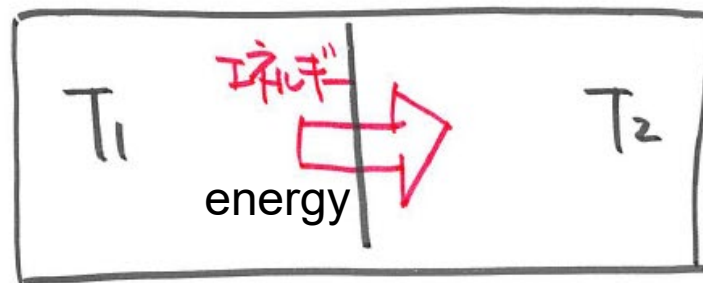


電場
Electric field

temperature

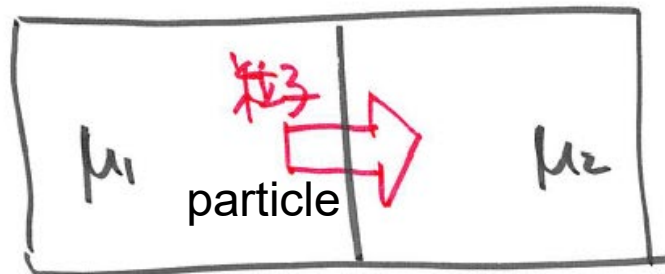
$$T_1 > T_2$$

温度差



$$\mu_1 > \mu_2$$

化学ポテンシャル差, chemical potential



pn 接合に流れるホールの電流は、
Current across the pn junction

$$J_p = J_{p, \text{drift}} + J_{p, \text{diffusion}}$$

$$= q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - q D_p \frac{dp}{dx} = 0$$

Elementary
charge

電荷
素量

Hole
mobility

ホールの
移動度

Hole density

ホールの
濃度

Electric field

$$E = \frac{1}{q} \frac{dE_v(x)}{dx}$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v(x)}{kT}\right)$$

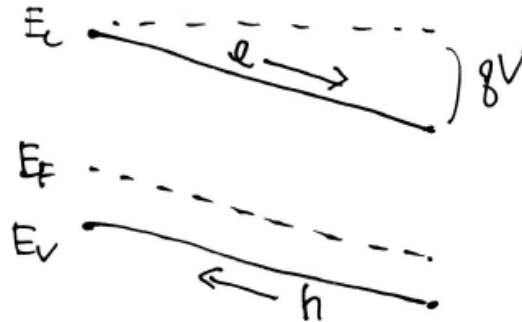
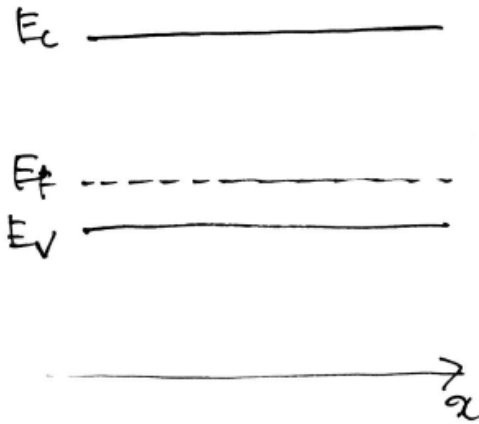
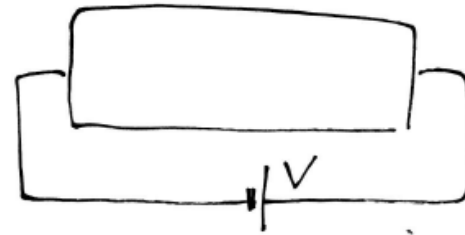
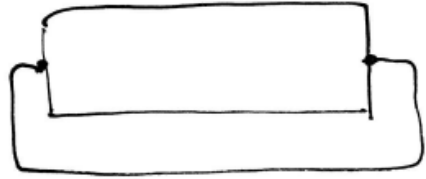
$$J_p = q N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v(x)}{kT}\right) \frac{dE_v(x)}{dx} \left(\frac{\mu_p}{q} - \frac{D_p}{kT}\right) = 0$$

$$\therefore D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad \text{Einstein の関係式}$$

Einstein relation

Electric field

電場
 $\mathcal{E} \rightarrow$



力のつりあいに $g\mathcal{E} = \frac{dE_v}{dx}$
Force on the hole

$$\therefore \mathcal{E} = \frac{1}{g} \frac{dE_v}{dx}$$

力のつりあいに $(-g) \cdot \mathcal{E} = -\frac{dE_v}{dx}$
Force on the electron

$$\therefore \mathcal{E} = \frac{1}{g} \frac{dE_v}{dx}$$

演習1

Exercise 1

アセプター濃度 $N_A = 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の p-Si と

ドナー濃度 $N_D = 1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ の n-Si

の pn 接合における内蔵電位を求めよ。
(300K).

$$E_g = E_c - E_v = 1.1 \text{ eV}$$

$$N_c = 2.86 \times 10^{19} / \text{cm}^3$$

$$N_v = 2.86 \times 10^{19} / \text{cm}^3$$

$$kT = 0.026 \text{ eV}$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Evaluate the built-in potential for the pn junction where the acceptor density and donor density in Si are $N_A = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $N_D = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, respectively.

$$N_D \rightarrow n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{F_n}}{kT}\right)$$

$$N_A \rightarrow p = N_V \exp\left(-\frac{E_{F_p} - E_V}{kT}\right)$$