

# Semiconductor Materials

2024/05/29

材料工学科 Department of Materials Science

弓野健太郎 Kentaro Kyuno

Fermi level

$E_F$  (フェルミレベル位置).

真性半導体  $n=p$

Intrinsic semiconductor

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

↓

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \log \frac{N_v}{N_c} \quad \text{--- ①}$$

演習 1. 式①が成り立つことを示せ.

Exercise 1

Prove equation ①.

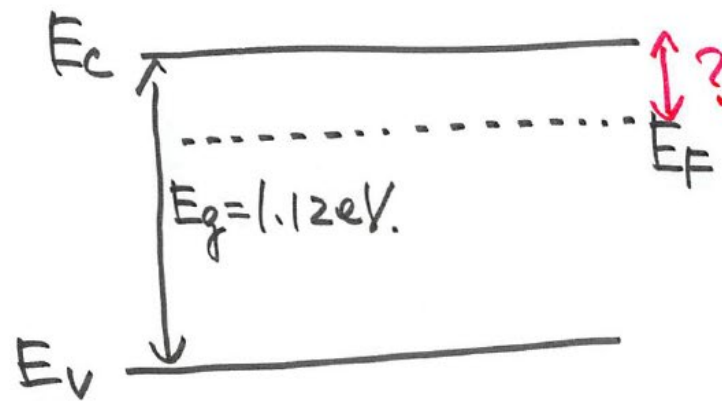
## Exercise 2

演習 2

Si の結晶に  $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$  の As をドープした。

室温 (300K) における  $n$ 、 $p$  の濃度、  
伝導電子濃度、 $E_F$  の位置を求めよ。

(  $kT = 0.026 \text{ eV}$  at  $T = 300 \text{ K}$  )



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

$$N_v = 2.66 \times 10^{19} / \text{cm}^3$$

Si is doped with  $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$  of As.

Derive the hole density, conduction electron density and  $E_F$  (Fermi level) at  $T = 300 \text{ (K)}$ .

$$n = 1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$$

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right) \rightarrow E_c - E_f$$

$$n \times p = \{1 \times 10^{10}\}^2$$

const.

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

# 半導体における電気伝導

Electrical transport in semiconductors

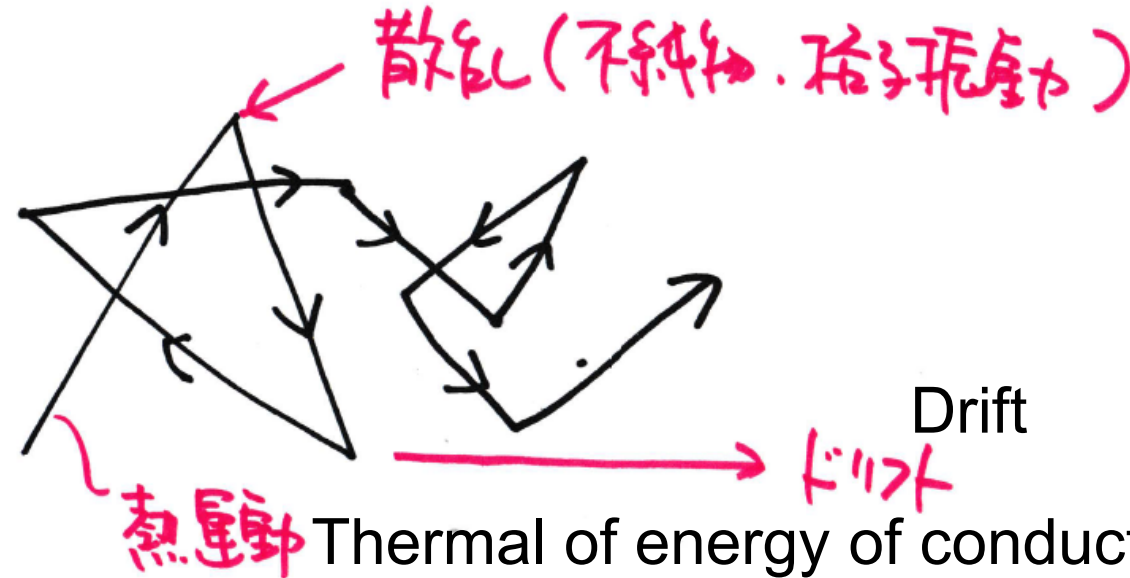
- ・ドリフト電流 (電場)
- ・拡散電流 (濃度差)

Diffusion current (concentration gradient)

Drift current

ドリフト電流

Scattering (impurity, lattice vibration)

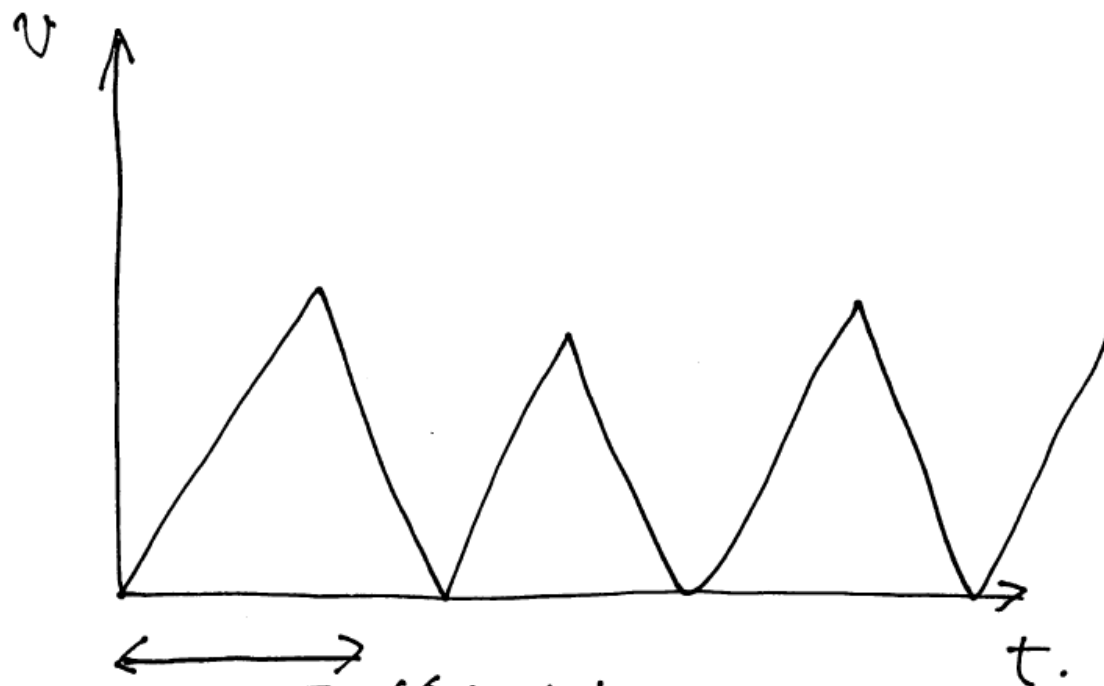


Thermal of energy of conduction electron

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

m:electron mass, v:electron velocity, k:Boltzmann constant  
T:absolute temperature

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{9.11 \times 10^{-31}}} = 1.2 \times 10^5 \text{ m/s}$$



$\tau_c$  平均緩和時間 Mean free time  
 $\sim 1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$

$\tau_c \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{熱速度}}}{v_{th}} = l$  平均自由行程 Mean free path  
 $\sim 10^{-5}\text{cm.}$

Thermal velocity

hole

$\tau = 10^{-14}$

Force

$$qE(\tau)$$



$E$  (電場)

Electric field

Mean free time

$$\tau = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{\nu} \approx 10^{-14} \text{ s}$$

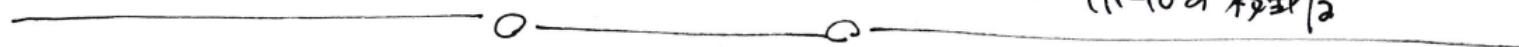
Hole velocity

$$qE \cdot \tau = m_p \cdot v_p \quad \leftarrow \tau = 10^{-14} \text{ s}$$

Impulse

$$v_p = \frac{q\tau}{m_p} \cdot E$$

$\mu_p$  hole mobility  
 $\tau = 10^{-14}$  の移動度



電子 electron

$$-q \cdot E$$



$E$

$$-qE \cdot \tau = m_n \cdot v_n$$

$$\therefore v_n = -\frac{q\tau}{m_n} \cdot E$$

$\mu_n$  electron mobility  
 電子の移動度



Electron mobility in Si at 300K

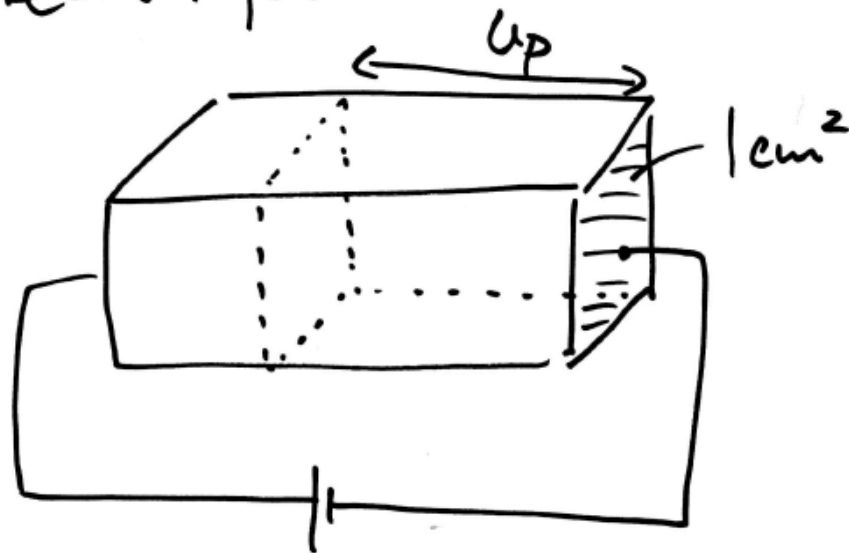
300K 1=2.1+3 Si 中 電 子 の 移動度  $1450 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

$$\tau = \frac{m_n \cdot \mu_n}{q} = \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1450 \times 10^{-4}}{1.6 \times 10^{-19}} = 8.3 \times 10^{-13} \text{ (sec)}.$$

平均自由行程 Mean free path

$$v\tau = 1.2 \times 10^5 \times 8.3 \times 10^{-13} \doteq 1 \times 10^{-7} \text{ m} = 100 \text{ nm}$$

電流密度. Current density



$$J_p = q \times p \times u_p \quad \leftarrow \mu_p E \quad \text{ホールの電流. Hole current}$$

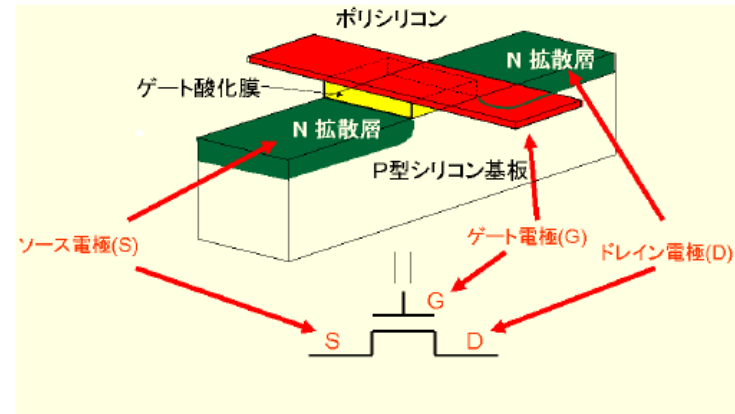
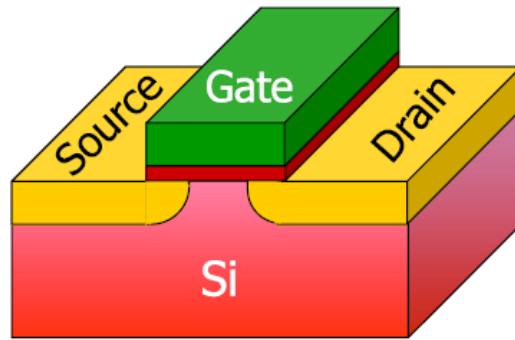
$$J_n = (-q) \times n \times u_n \quad \leftarrow -\mu_n E \quad \text{電子の電流. Electron current}$$

$$J = J_p + J_n = (q p \mu_p + q n \mu_n) \cdot E \propto \frac{\text{電流}}{\text{電場}} \quad \sigma: \text{conductivity}$$

resistivity  
抵抗率.  
 $\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\Omega \cdot \text{cm})$

resistance  
抵抗  
 $R = \rho \cdot \frac{l}{S} (\Omega)$

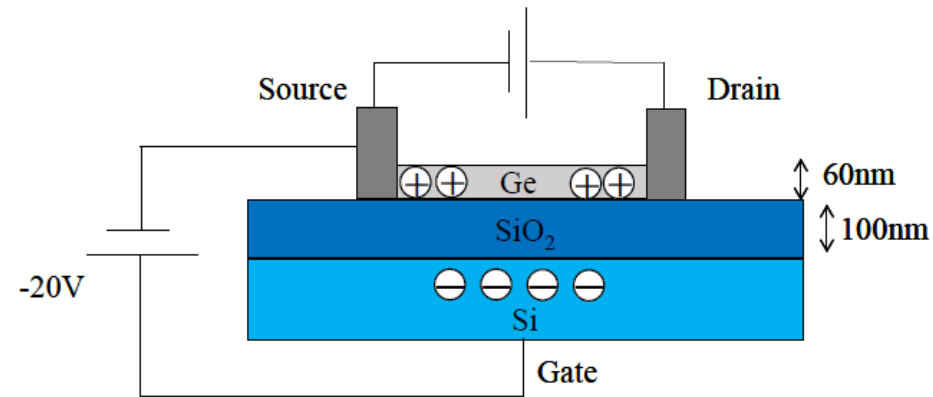
# トランジスタ(スイッチ) Transistor (Switch)



●トランジスタ  
Transistor



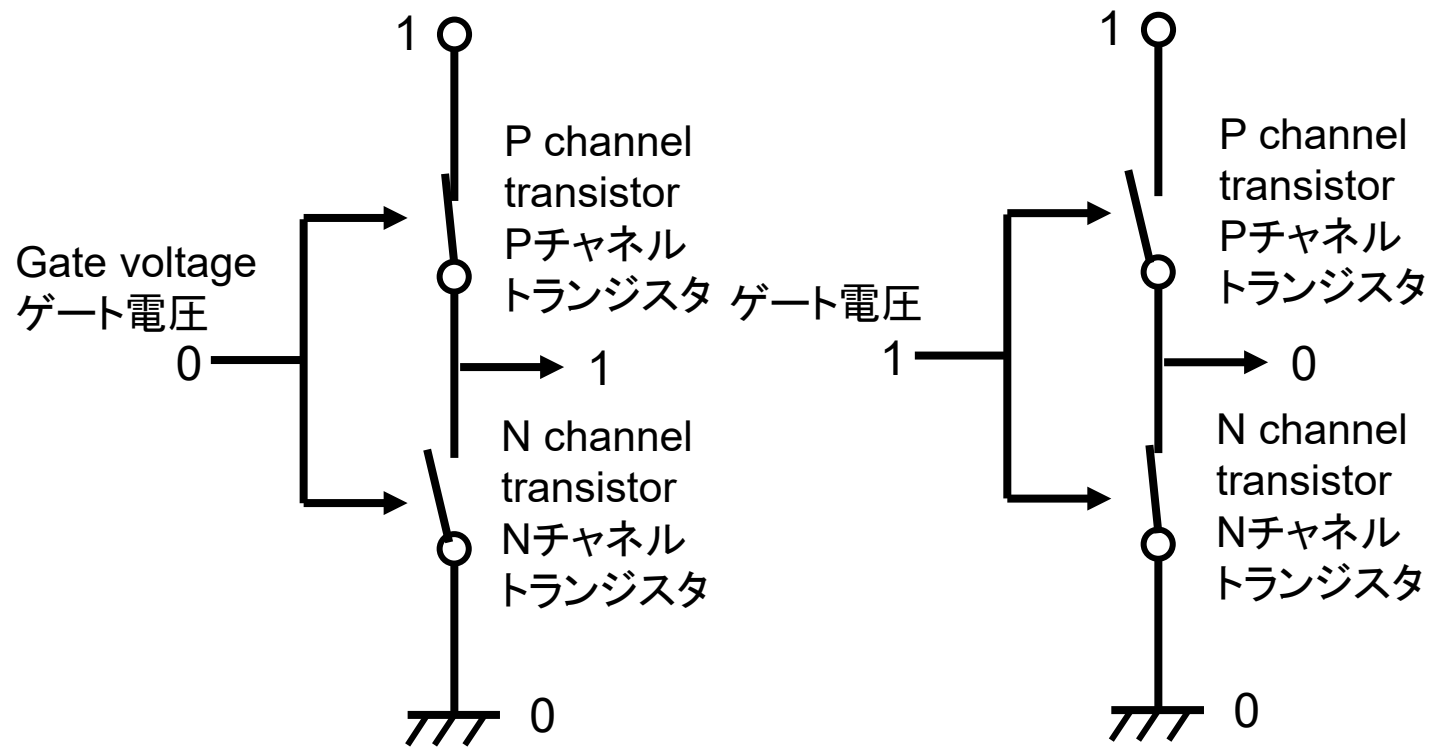
●IC(半導体集積回路)



●電界効果トランジスタ  
Field Effect Transistor

# スイッチ（トランジスタ）によるNOTの 作製

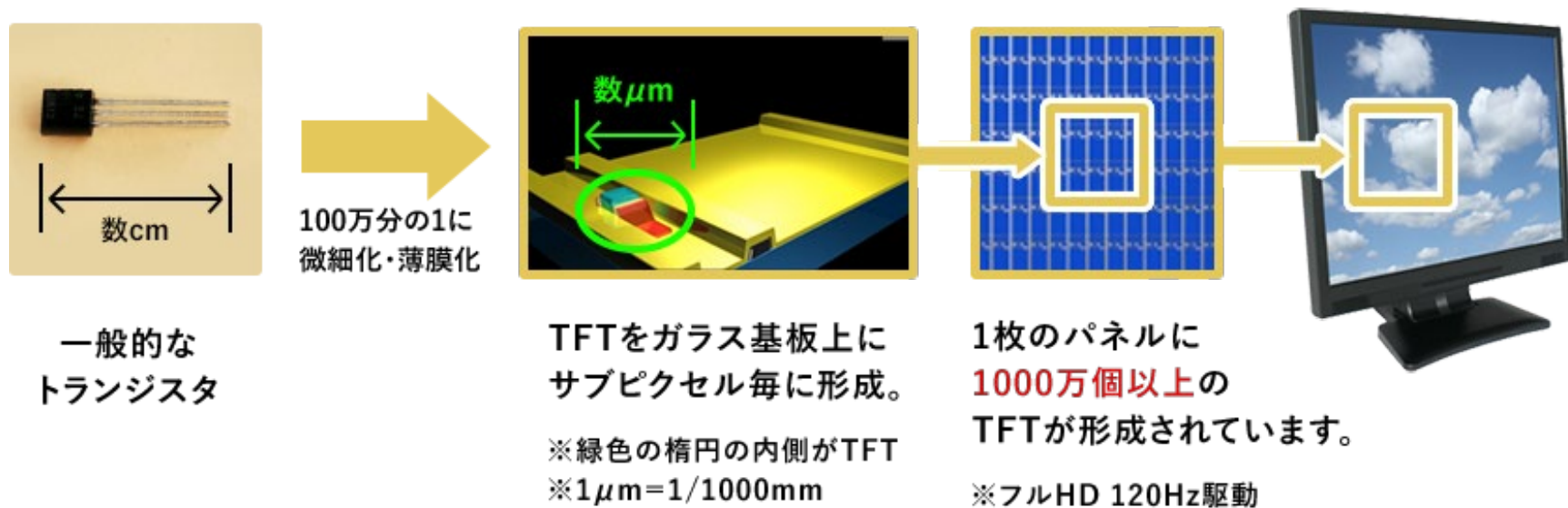
## Transistor NOT gate



AND, OR回路も作製可能 → 論理回路、メモリ

# TFT（薄膜トランジスタ）による ピクセルの制御

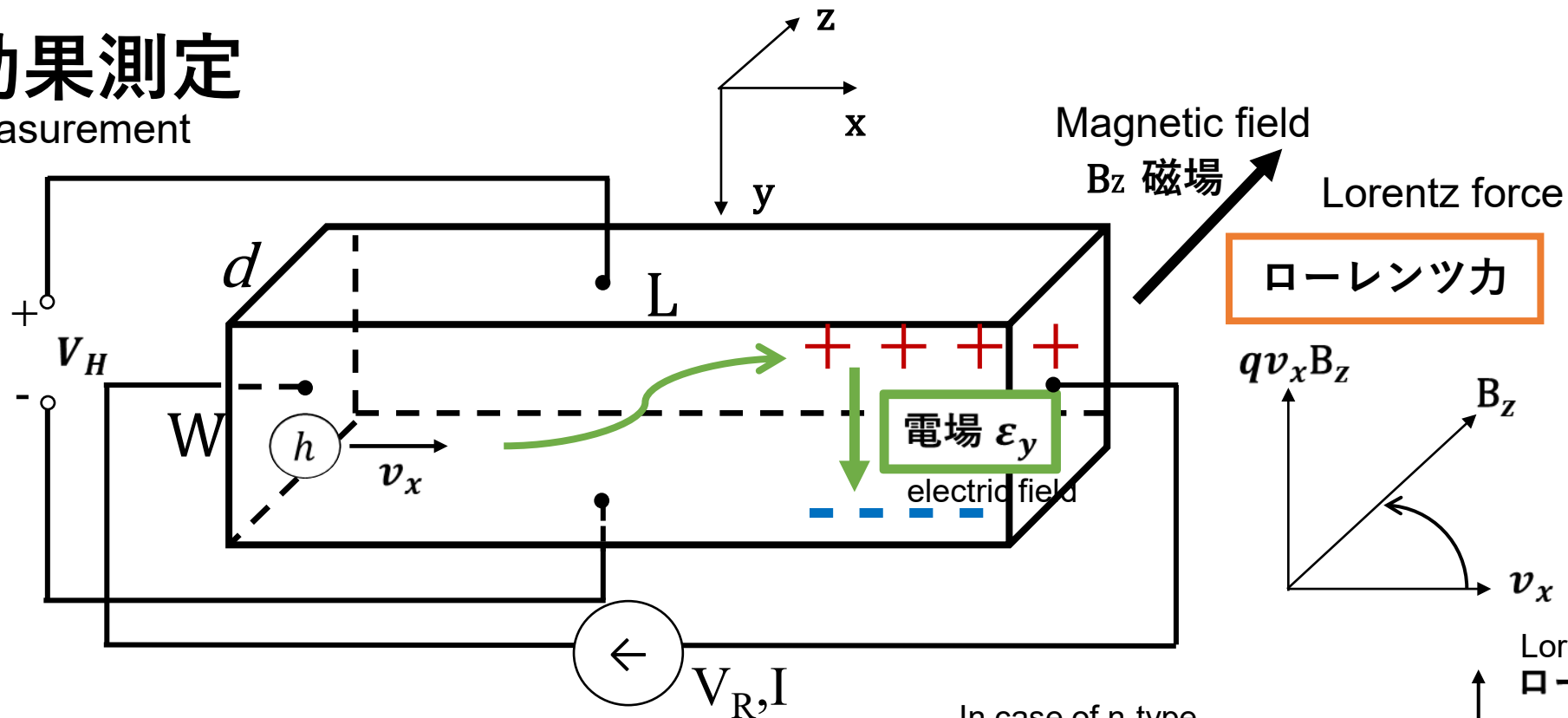
## Thin-film transistor (TFT) pixel



[https://www.vtec.co.jp/ja/tech/process/process\\_tft.html](https://www.vtec.co.jp/ja/tech/process/process_tft.html)

# ホール効果測定

Hall effect measurement



In case of n-type  
 $q\varepsilon_y = qv_x B_z \longrightarrow V_H > 0$  (n型の場合  $V_H < 0$ )

$$\varepsilon_y = v_x B_z$$

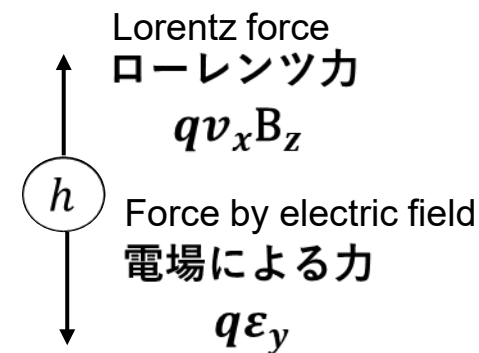
ホール電圧  $V_H = W\varepsilon_y = Wv_x B_z$

Hall voltage

$$I = Av_x \cdot pq \rightarrow v_x = \frac{I}{Apq} \quad (A = Wd)$$

$$\therefore p = \frac{WIB_z}{AqV_H} = \frac{IB_z}{dqV_H}$$

$p$  can be derived from  $V_H$   
 $V_H$  から  $p$  が求まる



# 移動度の算出

Derivation of mobility

Resistivity measurement

抵抗測定

Hall effect measurement

ホール効果測定

$$\rho = \frac{V_R W d}{I L}$$

$$p = \frac{I B_z}{q d |V_H|}$$

$$\mu = \frac{1}{q p \rho}$$

- p or n
- キャリア密度
- 抵抗率
- 移動度

carrier density

resistivity

mobility

## Exercise 1

### 課題 1

Show that the mobility  $\mu$  can be evaluated by the following expression.

移動度  $\mu$  が以下の式で求められることを示せ。

$$\mu = \frac{1}{qp\rho}$$