

第 11 回 物理の勉強会

半導体: 現代文明を支える石器*

小又 志郎

2012 年 9 月 15 日

概要

半導体の電子状態, デバイス (ダイオード, トランジスタ), 量子ホール効果

1 半導体の電子状態

1.1 真性半導体

	電気伝導率 ($/\Omega\text{m}$)
金属	$\sim 10^8$
半導体	
絶縁体	$\lesssim 10^{-8}$

電気伝導率 (=電気伝導度, 導電率) の単位: $/\Omega\text{m} = \text{S}/\text{m}$, S: ジーメンズ

半導体

- 真性半導体: Si, Ge
- 不純物半導体: n 型, p 型

4 族 (14 族) 元素 (C, Si, Ge, ...) の結晶の電子状態

- 伝導帯 (conduction band) ← 反結合軌道
- E_g : エネルギーギャップ (バンドギャップ)
- 価電子帯 (valence band) ← 結合軌道

	E_g (eV) at 0 K	
C(ダイヤモンド)	5.4	(絶縁体)
Si	1.17	
Ge	0.744	
GaAs	1.519	(化合物半導体)

* 文献 [1], 第 8 章

cf. 間接ギャップ半導体 (Si, Ge, GaP), 直接ギャップ半導体 (GaAs, InP)

1.2 電子と正孔

エネルギーバンドの有効質量近似

$$E_c(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + \frac{1}{2}E_g$$
$$E_v(\mathbf{k}) = -\left(\frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + \frac{1}{2}E_g\right)$$

(伝導) 電子密度 n , 正孔密度 p を見積もる (統計力学を用いて)

$$n = p = \frac{2}{(2\pi)^3} \int d^3\mathbf{k} e^{-\beta E_c(\mathbf{k})} \quad \left(\beta = \frac{1}{k_B T}\right)$$
$$= 2 \left(\frac{m^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

数値

$$E_g = 1 \text{ eV} (= 1.16 \times 10^4 \text{ K} \cdot k_B)$$
$$m^* = m_e (= 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}) = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$
$$T = 300 \text{ K} (= 38.7 \text{ meV}/k_B)$$
$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$
$$\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

を代入すると,

$$n = p = 1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \ll N = 4.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \quad (\text{Ge 結晶の原子数密度})$$

$E_g = 0.7 \text{ eV}$ のときは

$$n = p = 3.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \quad (\text{問題 1})$$

1.3 ドーピング

n 型半導体 (ドナー: P, As, ...)

ドナー準位: 伝導帯の底の下, 約 20 meV (Si の場合)

これは, 水素原子の場合の束縛エネルギー ($E_B = 13.6 \text{ eV}$) より小さい (問題 2)

束縛エネルギー (E_B) の見積もり

$$E_B(\text{H}) = \frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2} = \frac{1}{2}mc^2 \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}\right)^2$$
$$= \frac{1}{2}mc^2\alpha^2 = \frac{1}{2} \cdot 0.511 \left(\frac{1}{137}\right)^2 \text{ MeV} = 13.6 \text{ eV}$$

$$\begin{aligned}
E_B(\text{Si}) &= \frac{1}{2} m^* c^2 \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon\hbar c} \right)^2 \\
&= \frac{m^*}{m} \frac{1}{\epsilon^2} E_B(\text{H}) \quad \left(\frac{m^*}{m} = 0.2, \epsilon = 11.7 \right) \\
&= 0.2 \times \frac{1}{11.7^2} \times 13.6 \text{ eV} \\
&= 20 \text{ meV}
\end{aligned}$$

2 ダイオードとトランジスタ

2.1 pn 接合

電気化学ポテンシャル $\tilde{\mu} = \mu + e\phi$ のつり合い
整流作用

2.2 発光ダイオード, 半導体レーザー, 太陽電池

電子・正孔再結合 $\rightarrow E_g$ 放出 (photon, phonon)
逆過程: 太陽電池
放出 (吸収) 光子の波長

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}$$

Si ($E_g = 1.17 \text{ eV}$) の場合 (問題 3)

$$\begin{aligned}
\lambda &= \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J s} \times 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.17 \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} \\
&= 1.06 \times 10^{-6} \text{ m} = 1.06 \mu\text{m} \quad (\text{赤外})
\end{aligned}$$

GaN ($E_g = 3.4 \text{ eV}$) の場合

$$\lambda = 365 \text{ nm} \quad (\text{紫外})$$

2.3 MOSFET

トランジスタ

- バイポーラ (pnp, npn)
- ユニポーラ (MOSFET, etc.)

3 進化を続ける半導体

3.1 量子ホール効果

ホール効果

$$\text{ホール抵抗率 } \rho_H = \frac{B}{ne} \quad (1879, \text{E. H. Hall})$$

量子ホール効果

低温・強磁場で、電場方向の抵抗率 = 0

$$\text{ホールコンダクタンス } \sigma_H = \nu \frac{e^2}{h}$$

- 整数量子ホール効果 (ν : 整数) ← ランダウ量子化, アンダーソン局在
- 分数量子ホール効果 (ν : 分数) ← + 電子間のクーロン相互作用

フォン・クリッツィング定数 (抵抗標準)

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.807 \, \Omega$$

参考文献

- [1] 生井澤寛・吉岡大二郎『現代物理』, 放送大学教育振興会, 2008