

第1回 電気物理学と電子物理学

1.1 電気物理学 (1EE)

シュレディンガー方程式

- 波動方程式 $\psi(x, t)$
- エネルギー固有値 E

半導体設計のための道具：

- 価電子帯 E_v
- 伝導帯 E_c
- バンドギャップ $E_g = E_c - E_v$
- キャリア密度 $n = p = n_i$
- 状態密度 $Z(E)$
- 有効質量 m^*
- 電子 e^- と正孔 h^+

#電気物理学 , #波動方程式 , #エネルギー固有値 , #価電子帯 , #伝導帯 , #バンドギャップ , #キャリア密度 , #状態密度 , #有効質量 , #電子 , #正孔

1.2 電子物理学 (2EE)

電子物理学 - 概要

1. 「半導体とエネルギー」の理解
2. 結晶工学
3. 半導体デバイス（素子）の基礎

半導体: 電気を都合よく流すことができる材料:

1. 電気抵抗をコントロール → 電気回路に利用
2. 電子の流れをコントロール → スイッチング素子に利用
3. 外部作用に反応 → センサー・カメラなどに利用
4. エネルギーのやりとり → LED・太陽電池などに利用

#電子物理学

第2回 キャリア伝導

2.1 キャリア

キャリア

荷電粒子・半導体の場合は電子と正孔

Point →半導体デバイスの設計→キャリアをどのようにコントロールするか

- キャリア密度:
状態密度関数とフェルミ・ディラック分布関数の積分

$$n = \int_{E_c}^{\infty} Z(E) f(E) dE \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

単位体積当たりのキャリアの数

- 有効質量: m^*
古典的な自由電子の質量との比
- 移動度: $\mu \text{ [cm}^2\text{/Vs]}$
キャリアが移動するときの速度のような考え方
- 伝導率: $\sigma \text{ [S][}\Omega^{-1}\text{]}$
電気の流れやすさ

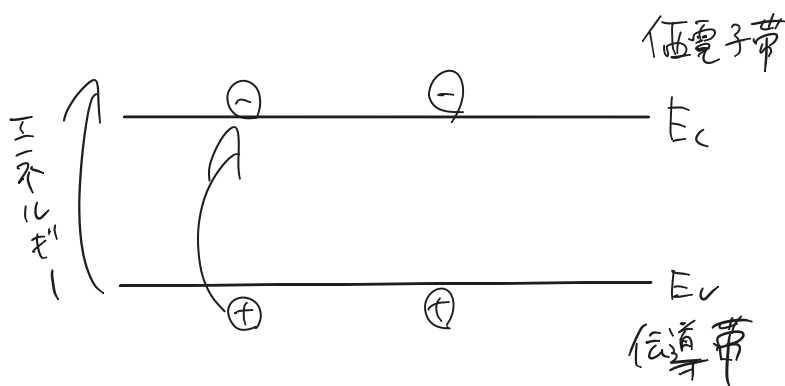
Point →低抵抗にしたければ、キャリア密度を増やすか、移動度を増やすか。ただし、同時には満たせない。

#キャリア , #キャリア密度 , #有効質量 , #移動度 , #伝導率

2.2 真性半導体と不純物半導体

真性半導体

不純物を含まず、欠陥などもない理想的な半導体



- キャリアの電子は価電子帯から伝導帯へ励起
- 励起された部分には成功が生じる
- 電子密度と正孔密度は $n = p = n_i$ となる (n_i :真性キャリア密度)

不純物半導体

ドナーやアクセプタなどの不純物や欠陥を含む現実的な半導体

- キャリアの電子
 1. $E_v \rightarrow E_c$
 2. ドナー順位 $\rightarrow E_c$
- キャリアの正孔
 1. $E_c \rightarrow E_v$
 2. アクセプタ順位 $\rightarrow E_v$
- キャリア密度はドーピングによって自由にコントロール

#真性半導体 , #不純物半導体 , #ドナー , #アクセプタ , #真性キャリア密度

2.3 バンドギャップ

バンドギャップ

$$E_g = E_c - E_v$$

- 電子・成功共に基本的に存在できない領域
- E_g は半導体材料ごとに固有の値を持つ

#バンドギャップ

第3回 ドナーとアクセプタ

3.1 ドナーとアクセプタ

ドナーとアクセプタ

ドナー

- 熱励起などでイオン化すると、電子を放出する不純物
- バンドギャップ中の価電子帯付近にドナー順位を形成

アクセプタ

- 熱励起などでイオン化すると、正孔を放出する不純物
- バンドギャップ中の伝導帯付近にアクセプタ順位を形成

Point →イオン化しないと電子・正孔は生じない

ドーピング

- 半導体中に不純物を入れること

Point →通常は室温(300K)でイオン化する不純物をドーピングする

#ドナー , #アクセプタ , #ドーピング , #イオン化

3.2 キャリア（復習）

キャリア密度

- ドナーの場合(電子のキャリア密度)

$$n = \int_{\infty}^{E_c} Z(E) f(E) dE \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

- $\int_{\infty}^{E_c} dE$
 - 伝導帯より高いエネルギーを積分
- $Z(E)$
 - 状態密度関数（電子が存在可能な最大値）
- $f(E)$
 - フェルミ・ディラック分布関数（電子が存在する確率）

Point →この式は計算が大変なので、近似して用いる。

1. 状態密度の近似

- 電子の状態密度

$$Z(E) = 4\pi \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$$

有効状態密度

- 状態密度をエネルギー一定としたときに伝導帯の底に電子がすべて存在すると考えたときの状態密度

$$Z(E) \rightarrow N_c, N_v$$

- 伝導帯における電子

$$\begin{aligned} N_c &= \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{\hbar^3} \\ &= 4.84 \times 10^{15} \left(\frac{m_n}{m} \right)^{3/2} T^{3/2} \text{ [cm}^{-3}\text{]} \end{aligned}$$

- 価電子帯における正孔

$$N_v = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{\hbar^3}$$

$$= 4.84 \times 10^{15} \left(\frac{m_p}{m} \right)^{3/2} T^{3/2} [\text{cm}^{-3}]$$

2. フェルミ・ディラック分布関数の近似

- フェルミ・ディラック分布関数