固体電子工学

平成20年前期　期末試験問題

平成20年7月28日

注意

１. 本・ノートを参照しても良い。

２. 電卓を使用しても良い。

３. 試験問題を解くにあたって必要であれば次を用いよ。

電子の質量	m	9.11×10^{-31}	kg
プランク定数	$\hbar$	1.05×10^{-34}	Js
ボルツマン定数	k_B	1.38×10^{-23}	JK^{-1}
素電荷量	q	1.60×10^{-19}	C
真空の誘電率	ε_0	8.85×10^{-12}	C/Vm
アボガドロ数	N_A	6.022×10^{23}	mol^{-1}

シリコンに対して

バンドギャップ・エネルギー	E_g	1.12 eV
室温の真性キャリヤ密度	n_{ie}(300K)	1.45×10^{10} cm^{-3}
電子の有効質量	m_e	0.33 m
ホールの有効質量	m_h	0.55 m
比誘電率	ε_{Si}	11.9
電子移動度	μ_n	1500 cm^2/Vs
ホール移動度	μ_p	450 cm^2/Vs

1

図1のような N 個の原子からなる1次元格子の格子振動を考える。原子間距離を a、ばね定数を f、原子の質量を m とし、x 方向に振動している縦波のみを考える。

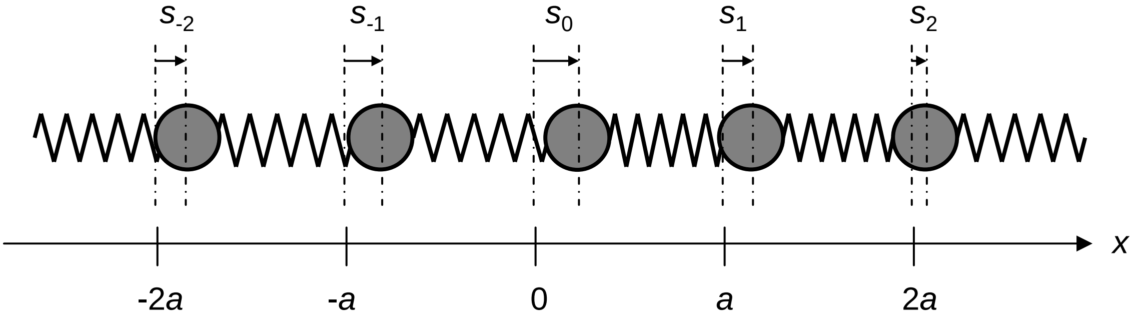

図1

(1) 運動方程式を書き下し、変位 $s_n(t)$ を $s_n(t) = u(q)\exp\left[i(qna - \omega t)\right]$ とおいてこの方程式を解き、ω と q の関係を求めよ。

(2) 周期的境界条件 $s_{n+N} = s_n$ から、q は次で与えられることを示せ。ただし、N は偶数とする。

$$q_i = \frac{2\pi}{Na} i \qquad i = -N/2, \ldots, N/2$$

(3) 領域 $\omega \sim \omega + \Delta\omega$ にある状態の数を $Z(\omega)\,\Delta\omega$ としたとき、$Z(\omega)$ を状態密度 という。この格子振動の状態密度 $Z(\omega)$ を求めよ。

2

図2は fcc 結晶の実格子、逆格子、第1ブリルアンゾーンを示したもの、図3は fcc 結晶のバンド構造を空格子近似で計算したもので、規格化された電子のエネルギー E は $\left(\frac{a}{2\pi}\right)^2 \sum_{h_1,h_2,h_3} \left(\vec{k}-\vec{g}_{h_1h_2h_3}\right)^2$ をすべての h_1, h_2, h_3 に対し重ね合わせたもので与えられる。 ここに $\vec{g}_{h_1h_2h_3} = h_1\vec{g_1} + h_2\vec{g_2} + h_3\vec{g_3}$ は逆格子点で

$$\vec{g_1} = \begin{pmatrix} \frac{2\pi}{a} & -\frac{2\pi}{a} & \frac{2\pi}{a} \end{pmatrix} \qquad \vec{g_2} = \begin{pmatrix} \frac{2\pi}{a} & \frac{2\pi}{a} & -\frac{2\pi}{a} \end{pmatrix} \qquad \vec{g_3} = \begin{pmatrix} -\frac{2\pi}{a} & \frac{2\pi}{a} & \frac{2\pi}{a} \end{pmatrix}$$

(1) ①、②、③、④、⑤、⑥の曲線に対応する h_1, h_2, h_3 は何か。

(2) 図3の L, W 点でのエネルギーから、Γ-L, Γ-W の長さを推測せよ。

(3) 原子の価電子数が1のとき、①において、基底状態で伝導電子が占めている k_x の範囲を求めよ。

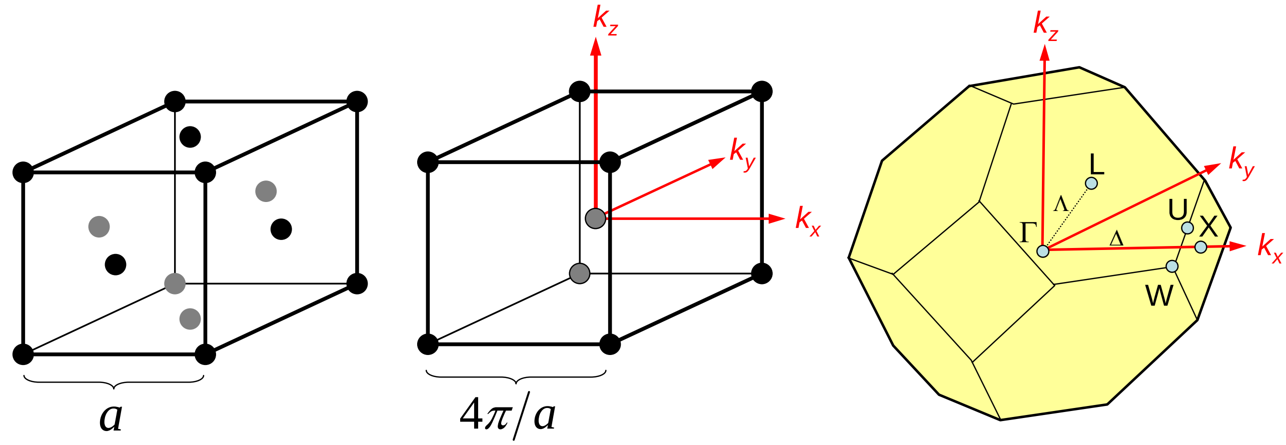

図2　(a) 実格子　(b) 逆格子　(c) 第1ブリルアンゾーン

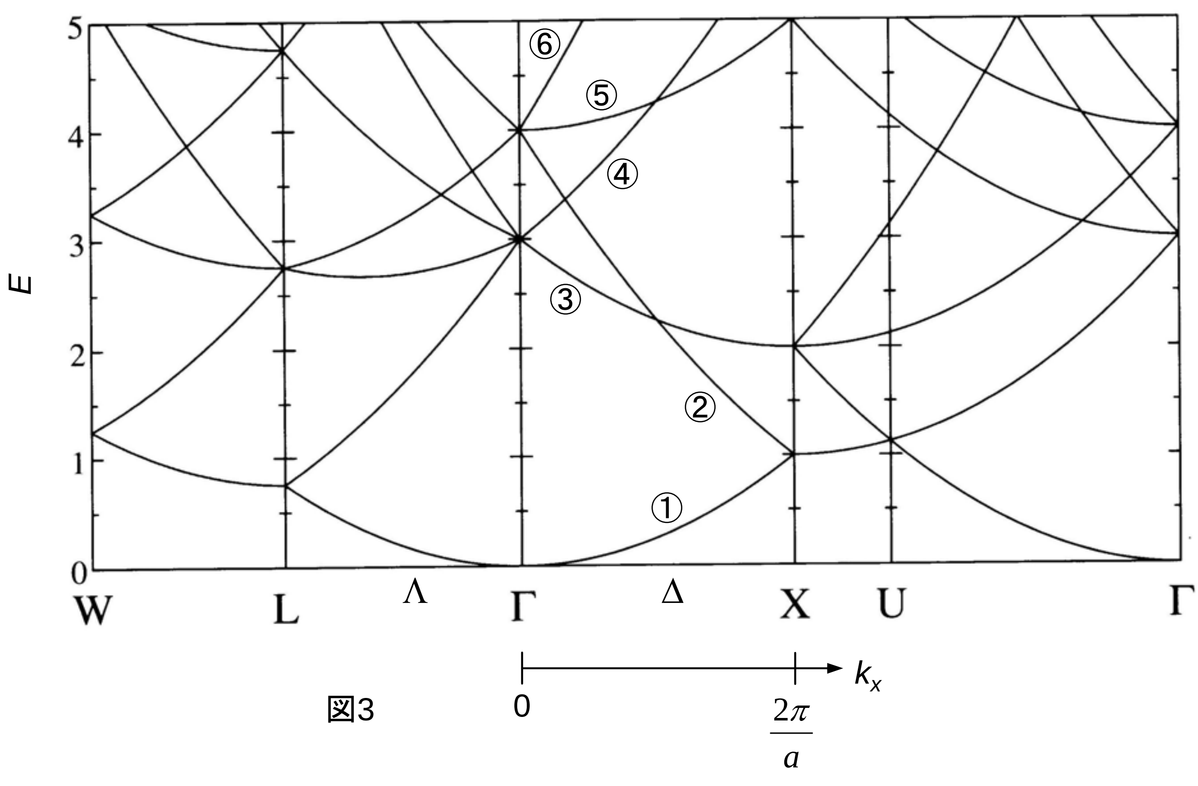

図3

3

半導体中の伝導電子密度を n 、ホール密度を p とし、次式の近似が成り立つものとする。

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - \mu}{k_B T}\right) \qquad p = N_V \exp\left(\frac{E_V - \mu}{k_B T}\right)$$

ここに E_C は伝導帯端のエネルギー、E_V は価電子帯端のエネルギー、μ はフェルミ準位、k_B はボルツマン定数、T は絶対温度である。N_C , N_V を伝導帯、価電子帯の実効状態密度と呼ぶ。

(1) n , p を次のように書いたとき、

$$n = n_{ie} \exp\left(-\frac{\mu_i - \mu}{k_B T}\right) \qquad p = n_{ie} \exp\left(\frac{\mu_i - \mu}{k_B T}\right)$$

n_{ie} を真性キャリヤ密度, μ_i を真性フェルミ準位という。n_{ie}, μ_i をN_C , N_V , E_C , E_V , k_B , T を用いて表せ。

以下では、密度 N_D のドナーが一様に含まれている N 型半導体を考える。ただし、ドナーはすべてイオン化しており、かつ $N_D >> n_{ie}$ とする。

(2) フェルミ準位 μ を N_D , N_C , N_V , E_C , E_V , k_B , T を用いて表せ。

(3) フェルミ準位 μ が伝導帯端のエネルギー E_C に等しくなるときのドナー密度 N_D を求めよ。

(4) Si の場合について(3)のドナー密度を有効数字2桁で求めよ。ただし、温度は室温 (300K) とする。

(5) 前問 (4) において、伝導電子密度 n 、ホール密度 p を有効数字2桁で求めよ。

(6) ドナー密度が (3)の密度より大きい場合と小さい場合について、低温における半導体の電気抵抗がどのように振舞うか、定性的に述べよ。ただし、N_C , N_V , E_C , E_V の温度依存性は無視するものとする。