

半導体工学 期末試験

羽路伸夫
2015/07/31

以下の問いに答えなさい。

必要に応じて以下の数値等を用いてもよい。

単位電荷	q	1.602×10^{-19}	C
ボルツマン定数	k_B	1.381×10^{-23}	J/K
プランク定数	h	6.626×10^{-34}	J·s
光速	c	2.998×10^8	m/s
Si の真性キャリア密度 (室温)	n_i	1.5×10^{16}	/m ³
Si の電子移動度	μ_n	0.15	m ² /V·s
Si のホール移動度	μ_p	0.060	m ² /V·s

$$\text{フェルミ・ディラック分布関数: } f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right)}$$

$$\int_0^\infty x^{1/2} e^{-ax} dx = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad e^{-3} = 0.0498, \quad e^{-5} = 0.0067$$

問1. 半導体のキャリア密度について、答えなさい。

- 1) 温度 $T=0\text{ K}$ のときの f_n を図示しなさい。また、温度が上昇した時の様子も図中で示しなさい。
- 2) $f_n(E_F)$ を求めなさい。また、これが何を意味するのか答えなさい。
- 3) フェルミ・ディラック分布がボルツマン近似のできるための条件を答えなさい。また、その時の分布関数を数式で示しなさい。
- 4) 上記のボルツマン分布が適用できるとき、半導体の伝導帯中の電子密度 n が次式で与えられることを示しなさい。

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{k_B}\right), \quad \text{伝導帯の実効状態密度 } N_c = 2\left(2\pi m_n k_B T / h^2\right)^{3/2}$$

ただし、伝導帯中での状態密度は、 $g_n(E) = 4\pi(2m_n/h^2)^{3/2} \sqrt{E - E_c}$ で与えられる。

- 5) 価電子帯のホール密度 p を求めなさい。
- 6) 真性キャリア密度 n_i を求めなさい。
- 7) 真性フェルミエネルギーが、 $E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_p}{m_n}$ で表されることを示しなさい。
- 8) 電子密度とホール密度を、真性キャリア密度やフェルミエネルギーなどを用いて答えなさい。

問2. Si に不純物として P(15 族) を $2.00 \times 10^{22} / \text{m}^3$ 、B(13 族) を $1.90 \times 10^{22} / \text{m}^3$ だけ添加した。

- 1) この Si の導電型は n 型、p 型のいずれか？理由も示せ。
- 2) 室温における多数キャリア密度と少数キャリア密度を求めなさい。
- 3) このときの抵抗率を求めなさい。

問3. pn 接合（ドナー密度 N_D 、アクセプタ密度 N_A の階段接合）について以下の問いに答えなさい。

- 1) 印加電圧 $V < 0$ の時のバンド図を示しなさい。
- 2) 拡散電位 ϕ_0 を N_D や N_A などを用いて表しなさい。
- 3) 完全空乏近似を用いるとき、空間電荷密度 ρ を図示しなさい。
- 4) ポアソン方程式を解いて、電界 E とポテンシャル ϕ を求め、図示しなさい。必要な説明をつけること。印加電圧 $V < 0$ とする。
- 5) $x=0$ で電界が連続になることより導かれる条件を示しなさい。
- 6) 空乏層の長さ l_n, l_p, l を求めなさい。
- 7) $l = l_n + l_p$ を求めなさい。

問4. 前問の pn 接合の電流－電圧特性について、以下の問いに答えなさい。

ただし、空乏層中でのキャリアの発生・再結合は無視でき、低水準注入とする。また、記号や x 座標、 x' 座標などは講義中に使用したものと同一である。

- 1) n_{p0} 、 p_{n0} を n_{n0} や ϕ_0 などを用いて表しなさい。
- 2) p 型の中性領域 ($x \geq 0$) において、以下の文章の (1) などに入る適切な語句や数式を答えなさい。

順バイアス V が加わると障壁高さは (1) となるので、n 領域より p 領域へ (2) が (3) される。p 型中性領域の端 $x=0$ での過剰少数キャリア密度 $\Delta n_p(x)$ は (4) である。この過剰少数キャリアは (5) により移動しながら (6) と (7) して消滅する。消費された (6) は内部より (5) により供給される。

- 3) p 型の中性領域 ($x \geq 0$) において、過剰少数キャリア $\Delta n_p(x)$ は以下の拡散方程式に従う。 $\Delta n_p(x)$ を求めなさい。

$$D_n \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} = \frac{\Delta n_p}{\tau_n}$$

- 4) 電子電流も密度は、 $j_n = qn\mu_n E_x + qD_n \frac{\partial n}{\partial x}$ で与えられる。p 型の中性領域 ($x \geq 0$) における電子電

流密度 $j_n(x)$ を求めなさい。

- 5) n 型の中性領域 ($x' \geq 0$) において、過剰少数キャリア $\Delta p_n(x')$ とホール電流密度 $j_p(x')$ を求めなさい。
- 6) pn 接合の断面積を S とする。電流－電圧特性を表す式を、理由とともに答えなさい。
- 7) 電流比 γ を求めなさい。