30点 25点 CI1303

令和５年度 電子回路学Ｉ 前期定期試験（07/28/23）

ＣＩ３番号＿＿＿＿氏名＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿ 得点＿＿＿＿点 Ｎｏ．１

１．下の説明文が正しい場合は○，間違っている場合は×を回答欄に記せ． 各１点

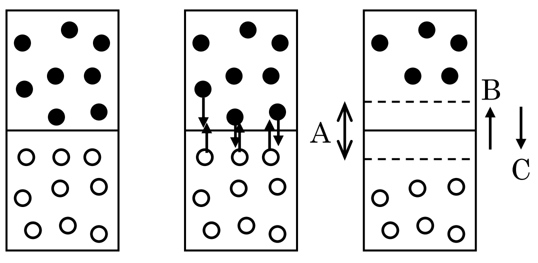
No.	説明文	回答
(1)	電界が加わることにより流れる電流を拡散電流と呼ぶ．	×
(2)	導電率は抵抗率の逆数である．	○
(3)	pn 接合に順バイアス電圧を加えると電子が p 形から n 形半導体に移動する．	×
(4)	空乏層には自由なキャリアが大量に存在する．	×
(5)	半導体に電界を加えると，電子と正孔はそれぞれ同じ方向に加速される．	×
(6)	pn 接合に逆バイアス電圧を加えると空乏層幅が減少する．	×
(7)	半導体中の全電流密度は，電子の電流密度と正孔の電流密度の差である．	×
(8)	pn 接合ダイオードの電流はアノードからカソードへ向かって流れる．	○
(9)	ダイオードは整流作用を持つ．	○
(10)	半導体中の電流密度は導電率と電界に比例する．	○

２．下の説明に当てはまる語句を回答欄に答えよ． 各２点

No.	説明文	回答
(1)	電界が加わることにより発生する電流	ドリフト電流
(2)	pn 接合で生じる n 形半導体と p 形半導体のエネルギーの差	拡散電位
(3)	半導体において電子または正孔の存在確率が 1/2 となる準位	フェルミ準位
(4)	拡散係数と移動度の関係を表すもの	ｱｲﾝｼｭﾀｲﾝの関係
(5)	エネルギーの大きい電子が原子に衝突することで価電子が伝導帯に励起される現象	励起状態
(6)	ダイオードで電流が流れないように外部電圧を加えること	逆方向バイアス
(7)	ダイオードにみられる，ある方向には電流が流れやすいが，逆方向には電流が流れにくいという特性	整流作用
(8)	キャリア密度の差が原因で発生する電流	拡散電流
(9)	ダイオードで電流が流れるように外部から電圧を加えること	順方向バイアス
(10)	pn 接合面付近に生じるキャリアの少なくなった領域	空乏層

３．図１は pn 接合を示した模式図で，図中の○は正孔，●は電子を表している．下の説明文の [1]～[10] に入る語句を回答欄に記載せよ．

図 1(a)のような pn 接合を作ると同図(b)のように，電子が[1]により[2]から[3]へ，正孔が[3]から[2]へ移動する．電子と正孔は接合面付近で[4]する．その結果，同図(c)のように A の部分にキャリアが無い[5]ができる．A の部分のうち[2]中にはイオン化した[6]が，[3]中にはイオン化した[7]が存在する．このことにより，[8]方向の[9]が発生する．これにより[10]の移動が停止する．



(a) 接合前 (b) 接合中 (c) 接合後

図１ pn 接合の図

回答： 10点

[1]	拡散	[2]	n 形半導体	[3]	p 形半導体	[4]	再結合	[5]	空乏層
[6]	ドナー	[7]	アクセプタ	[8]	C または下	[9]	電界	[10]	キャリア

４．27℃のシリコン真性半導体に電界 200 [V/m] を加えた．以下の問いに答えよ．
但し，真性半導体キャリア密度を 1.50×10^{16} [cm^{-3}] とし，電子と正孔の移動度をそれぞれ 1,600 [cm^2/V・s]， 400 [cm^2/V・s] とする．

(1) このときの半導体中に流れる電流密度を求めよ． 5点

まず，$\sigma = q\,(n\mu_n + p\mu_p)$より，導電率を求める．

ここで，真性半導体のキャリア密度は電子と正孔で等しく，$n_i = n = p$ となるので，

$\sigma = q\,(n\mu_n + p\mu_p) = = q\,n_i\,(\mu_n + \mu_p) = 1.60\times10^{-19}\times1.50\times10^{16}\ \times(1{,}600+400) = 4.80$ [S/cm]

となる．次に，電界を V/cm の単位で表し，電流密度 $J = \sigma E$ の式に代入すると

$J = 4.80\times10^{-6}\times2 = 9.60$ [A/cm^2]

従って，電流密度は 9.6 A/cm^2 となる．

(2) この半導体の抵抗率を求めよ． 5点

抵抗率 ρ は導電率 σ の逆数なので

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{4.80} = \ 0.208\ [\Omega\cdot\mathrm{cm}]$$

従って，導電率は 0.208 Ω･cm となる．

(3) この半導体の電子と正孔の拡散係数をそれぞれ求めよ． 5点

拡散係数は $D_n = \frac{k_B T}{q}\mu_n$， $D_p = \frac{k_B T}{q}\mu_p$ より，

$$D_n = \frac{k_B T}{q}\mu_n = \frac{1.38\times10^{-23}\times300}{1.60\times10^{-19}}\times1{,}600 = 0.0259\times1{,}600 = 41.4\ [\mathrm{cm^2/s}]$$

$$D_p = \frac{k_B T}{q}\mu_p = 0.0259\times400 = 10.4\ [\mathrm{cm^2/s}]$$

となる．

５．300 K の温度状態において，フェルミ準位より 0.1 eV 高いエネルギー状態を電子が占める確率を求めよ．

15 点

まず，[eV]を[J]の単位に変換すると 0.1[eV]=0.16×10^{-19}[J]となる．これをフェルミ分布関数に代入すると

$$f(E)=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{E-E_F}{k_BT}\right)}=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{0.16\times10^{-19}}{1.38\times10^{-23}\times300}\right)}=\frac{1}{1+\exp(3.86)}=0.021$$

となる．従って，題意の確率は 2.1%となる．

６．17 ℃ おける Si の価電子帯と伝導帯の有効状態密度をそれぞれ求めよ．但し，正孔の有効質量は 0.5m_0，電子の有効質量は 0.3m_0 とする（m_0 は電子の静止質量）．

荷電子帯の有効状態密度 N_V は $N_V=2\left(\frac{2\pi m_p^* k_BT}{h^2}\right)^{3/2}$ に各値を代入して計算する．　8 点

ここで，17℃は 273 を加えて，290K に単位換算して代入すると，

$$N_V=2\left(\frac{2\times3.14\times0.5\times9.11\times10^{-31}\times290\times1.38\times10^{-23}}{(6.6\times10^{-34})^2}\right)^{3/2}$$

$$=2\left(2.63\times10^{16}\right)^{3/2}$$

$$\cong8.53\times10^{24}\left[\mathrm{m^{-3}}\right]$$

となる．

また，伝導帯の有効状態密度 N_C は $N_C=2\left(\frac{2\pi m_n^* k_BT}{h^2}\right)^{3/2}$ に，各値を入力すると，　7 点

$$N_C=2\left(\frac{2\times3.14\times0.3\times9.11\times10^{-31}\times290\times1.38\times10^{-23}}{(6.6\times10^{-34})^2}\right)^{3/2}$$

$$=2\left(1.58\times10^{16}\right)^{3/2}$$

$$\cong3.96\times10^{24}\left[\mathrm{m^{-3}}\right]$$

となる．

７．300K における真性 Si のキャリア濃度を求めよ．但し，Si のバンドギャップは 1 eV とする．但し，電子の有効質量は 0.3m_0，正孔の有効質量は 0.5m_0 とする．

15 点

キャリア濃度は，$n_i(T)=2\left(\frac{2\pi k_BT}{h^2}\right)^{3/2}\left(m_n^* m_p^*\right)^{3/4}\exp\left(-\frac{Eg}{2k_BT}\right)$ で表される．

ここで，バンドギャップ E_g は [eV] 単位で与えられているため，これを q 倍して[J]に変換して代入する．従って，

$$n_i(T)=2\left(\frac{2\pi k_BT}{h^2}\right)^{3/2}\left(m_n^* m_p^*\right)^{3/4}\exp\left(-\frac{E_g\times q}{2k_BT}\right)$$

$$n_i(T)=2\left(\frac{2\times3.14\times1.38\times10^{-23}\times300}{(6.6\times10^{-34})^2}\right)^{3/2}\times$$

$$\left(0.3\times9.11\times10^{-31}\times0.5\times9.11\times10^{-31}\right)^{3/4}\exp\left(\frac{-1\times1.6\times10^{-19}}{2\times1.38\times10^{-23}\times300}\right)$$

$$=2\times\left(5.97\times10^{46}\right)^{3/2}\times\left(1.24\times10^{-61}\right)^{3/4}\exp(-19.3)$$

$$\cong2.48\times10^{16}\left[\mathrm{m^{-3}}\right]$$

となる．

【参考】必要に応じて下の定数や式を使用せよ．
電子の電荷 = 1.60×10^{-19} [C]，電子の静止質量 = 9.11×10^{-31} [kg]，真空中の誘電率= 8.85×10^{-12} [F/m]，プランク定数 = 6.60×10^{-34} [m^2 kg / s]，ボルツマン定数= 1.38×10^{-23} [J/K]，

$$f(E)=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{E-E_F}{k_BT}\right)},\quad g_c(E)=4\pi\left(\frac{2m_n^*}{h^2}\right)^{3/2}(E-E_C)^{1/2},\quad g_v(E)=4\pi\left(\frac{2m_p^*}{h^2}\right)^{3/2}(E_v-E)^{1/2},$$

$$N_C=2\left(\frac{2\pi m_n^* k_BT}{h^2}\right)^{3/2},\quad N_V=2\left(\frac{2\pi m_p^* k_BT}{h^2}\right)^{3/2},\quad E_F=\frac{E_C+E_V}{2}+\frac{3k_BT}{4}\ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right),$$

$$n_i(T)=2\left(\frac{2\pi k_BT}{h^2}\right)^{3/2}\left(m_n^* m_p^*\right)^{3/4}\exp\left(-\frac{E_g}{2k_BT}\right),\quad n_o=N_C\exp\left(-\frac{E_C-E_F}{k_BT}\right),\quad p_o=\frac{n_i^2}{n_0}\cong\frac{n_i^2}{N_d},$$

$$E_F=E_C-k_BT\ln\left(\frac{N_C}{N_d}\right),\quad E_F=E_v+k_BT\ln\left(\frac{N_V}{N_a}\right)$$

$$J_n=qD_n\frac{dn}{dx},\quad D_p=\frac{k_BT}{q}\mu_p,\quad J=J_n+J_p=q(n\mu_n+p\mu_p)E=\sigma E,\quad \sigma=q(n\mu_n+p\mu_p)$$

５年度 CI-3 電子回路学Ｉ 前期定期試験は以下のような問題である．

（試験範囲　pp.1－34，ppt ファイルの配布資料，レポート，およびノート）出題者：大田

１．半導体に関する下の語句の説明や文章の穴埋め等ができること．

n 形半導体，ドナー，電子，p 形半導体，アクセプタ，正孔，イオン化，接合面，励起状態，
価電子帯，禁制帯，伝導帯，キャリア，励起，再結合，エネルギーバンド，バンドギャップ，
フェルミ順位 E_f，状態密度，キャリア密度，ドープ，ドナー準位，アクセプタ準位，有効状態密度，
拡散電流，ドリフト電流，拡散電位，アインシュタインの関係，電子の電流密度，正孔の電流密度，
全電流密度，導電率，抵抗率，電界，
pn 接合，ダイオード，アノード，カソード，整流作用，順方向バイアス，逆方向バイアス，空乏層，
拡散電位

２．半導体に関する定理が計算できること．
但し，試験では下の定数と式のみ与える．

電子の電荷 $q = 1.60\times10^{-19}$ [C]，
電子の質量 $m = 9.11\times10^{-31}$ [kg]
真空中の誘電率 $\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}$ [F/m]，
プランク定数 $h = 6.60\times10^{-34}$ [m² kg / s]，
ボルツマン定数 $k = 1.38\times10^{-23}$ [J/K]

フェルミ・ディラックの分布関数

$$f(E) = \frac{1}{1+\exp\left(\dfrac{E-E_F}{k_BT}\right)}$$

T[K] において E[J] の準位がどの程度の確率で電子に占有されているかを表す関数

※ 試験では式のみを与え，説明や単位は非表示です．

伝導帯・価電子帯の有効状態密度 $N_C = 2\left(\dfrac{2\pi m_n{}^* k_BT}{h^2}\right)^{3/2}$ [m⁻³]，$N_V = 2\left(\dfrac{2\pi m_p{}^* k_BT}{h^2}\right)^{3/2}$ [m⁻³]

真性半導体のフェルミ準位 $E_F = \dfrac{E_C+E_V}{2} + \dfrac{3k_BT}{4}\ln\left(\dfrac{m_p{}^*}{m_n{}^*}\right)$ [J]

真性半導体のキャリア濃度 $n_i(T) = 2\left(\dfrac{2\pi k_BT}{h^2}\right)^{3/2}\left(m_n^* m_p^*\right)^{3/4}\exp\left(-\dfrac{E_g}{2k_BT}\right)$ [m⁻³]，注意：E_g は[J]単位

n 形半導体の正孔濃度 $p_o = \dfrac{n_i^2}{n_0} \cong \dfrac{n_i^2}{N_d}$ [m⁻³]，p 形半導体の電子濃度 $n_o = N_C\exp\left(-\dfrac{E_C-E_F}{k_BT}\right)$ [m⁻³]，

n 形半導体のフェルミ準位 $E_F = E_C - k_BT\ln\left(\dfrac{N_C}{N_d}\right)$ [J]，

p 形半導体のフェルミ準位 $E_F = E_v + k_BT\ln\left(\dfrac{N_V}{N_a}\right)$ [J]，

※各式の記号が何を意味しているかを理解しておく．

ドナー(donor)の d ⇔ アクセプタ(acceptor)の a
伝導帯(conduction band)の c ⇔ 価電子帯(valence band)の v

電子の拡散電流密度 $J_n = qD_n\dfrac{dn}{dx}$ [A/cm²]，正孔の拡散電流密度 $J_p = -q\,D_p\dfrac{dp}{dx}$ [A/cm²]，

電子の拡散係数 $D_n = \dfrac{k_BT}{q}\mu_n$ [m²/s]，正孔の拡散係数 $D_p = \dfrac{k_BT}{q}\mu_p$ [m²/s]，

電子と正孔のドリフト電流 $J = J_n + J_p = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$[A/cm²]，

伝導率 $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$[S/cm]，抵抗率 $\rho = 1$／伝導率 σ

例えば，下のような問題は解けること．

(1) 27℃の Si の価電子帯と伝導帯の有効状態密度を求める．但し，電子と正孔の有効質量は与える．
(2) 真性半導体の価電子帯と伝導帯の有効状態密度の関係を与え，正孔と電子の有効質量の比を求める．次に指定温度でのフェルミ準位のずれを求める．
(3) 指定温度における真性 Si のキャリア濃度を求める．但し，Si のバンドギャップは 1.1eV とする．
(4) あるドナー濃度の n 形 Si の正孔濃度を求める．但し，熱平衡状態の真性半導体のキャリア濃度は与える．また，この Si のフェルミ準位を求める．但し，伝導体の有効状態密度は与える．

(5) 指定温度におけるシリコン真性半導体に電界 E [V/m]を加えたときの電流密度 J [A/cm²] を求める．また，このときの導電率 σ [Ω・cm]と抵抗率 ρ [Ω・cm]を求めよ．但し，真性キャリア密度 n_i [cm⁻³] と，電子と正孔の移動度 μ_n [cm²/V・s]，μ_p [cm²/V・s] は与える．
(6) 指定温度におけるシリコン中の拡散係数 D_n [cm²/s]および D_p [cm²/s]を求めよ．但し，真性キャリア密度 n_i [cm⁻³] と，電子と正孔の移動度 μ_n [cm²/V・s]，μ_p [cm²/V・s] は与える．

★★各自，配布資料の穴埋め，演習問題，レポートをもう一度，何も見ずに解いてみること．★★

以上を何も見ずに全て解けるようになれば，９０点以上は取れる問題を出す．
普段できないことは，試験でもできません！　必ず，各自解いてみること！