電子光科学 II

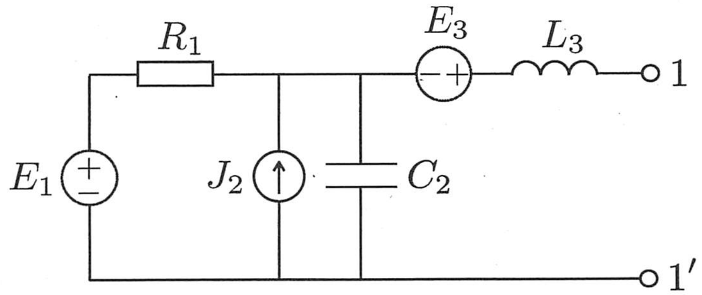
次の [II-1] から [II-8] までの８問についてそれぞれ別の答案用紙に答えよ．なお，各問題に２枚以上の答案用紙を用いる場合は，「[II-1]（２枚目）」などのように明記せよ．

[II-1]

(1) テブナンの定理を説明せよ．

(2) 下図の回路のテブナン等価回路を求めよ．回路はフェーザ表示で交流定常状態にあり，角周波数を ω とする．E_1 および E_3 は独立電圧源，J_2 は独立電流源，R_1 は抵抗，C_2 はキャパシタ，L_3 はインダクタである．

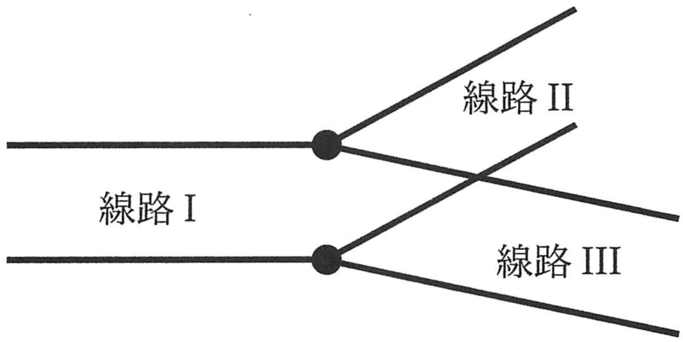
（配点 20 点）



[II - 2]

図のように線路 I の終端に無限長の線路 II，線路 III が並列接続されている．接続点における線路 I から線路 II，線路 III への電流透過係数をそれぞれ求めよ．ただし，線路 I, II, III の特性インピーダンスをそれぞれ Z_{01}，Z_{02}，Z_{03} とする．

（配点 20 点）



[II - 3]

図に示す理想的な演算増幅器と抵抗，キャパシタからなるフィルタ回路を考える．v_1，v_2，v_3，v_4はそれぞれ，入力信号，出力信号，演算増幅器の非反転入力端子および反転入力端子の電圧である．なお，演算増幅器の電源回路の表記は省略する．以下の問に答えよ．

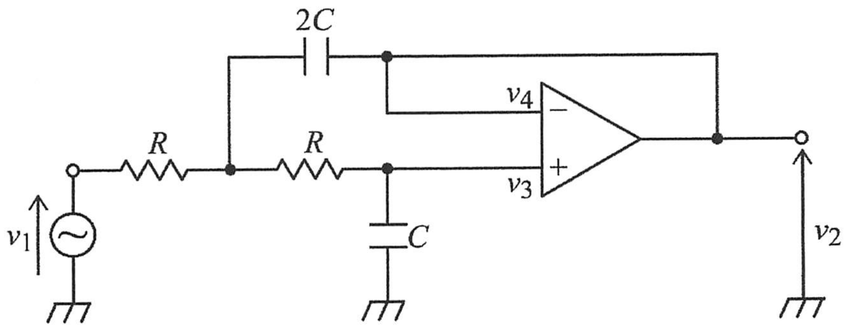
（配点 20 点）

(1) v_3とv_4の関係を示せ．

(2) 角周波数を ω として，伝達関数 $G(\omega)$を求めよ．

(3) 遮断角周波数 ω_0 を求めよ．

(4) 縦軸を $G(\omega)$の大きさの dB（デシベル）表示，横軸を ω の対数表示としたグラフを描け．ただし，ω は $0.01\omega_0$ から $100\omega_0$ の範囲とせよ．



[II-4]

ハイレベル状態（H），ローレベル状態（L），ハイインピーダンス状態（Hi-Z）の３つの状態を出力としてとることのできる３ステートゲートを作製したい．以下の問に答えよ．

（配点15点）

(1) 図１に示される入力X_1，X_2，出力Y_1, Y_2をもつディジタル回路Ａの動作を考える．表1を参考にして回路Ａの動作表を書け．

(2) ２入力，１出力 Y_Oをもつディジタル回路Ｂの入力に，問(1)の回路Ａの２出力 Y_1, Y_2を接続することで，２入力 X_1，X_2，１出力 Y_Oをもつディジタル回路Ｃを作製した．このとき，回路Ｃが３ステートゲートとなるように，回路Ｂを１つの n-MOSFET と１つの p-MOSFET で構成した．回路Ｂの回路図を描け．ただし，Y_1，Y_2，Y_O，電源電圧 V_{DD}, グランド GND を回路図中に明記し，n-MOSFET と p-MOSFET の回路図として図２のものを用いること．

(3) 問 (2)の２入力X_1，X_2，１出力Y_Oをもつ回路Ｃの動作表を書け．

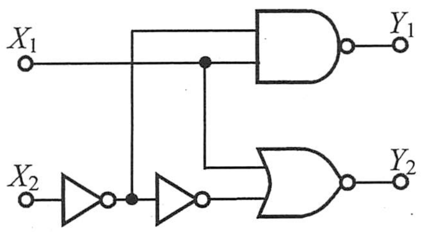


図１　ディジタル回路Ａ

表１　　動作表

X_1	X_2	Y_1	Y_2
L	L		
L	H		
H	L		
H	H		

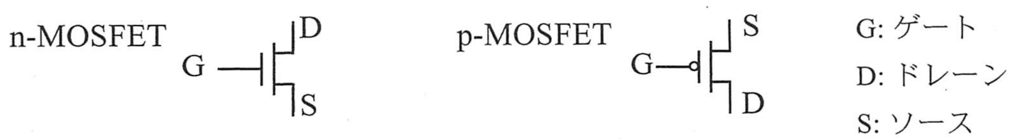


図２　MOSFET の回路記号

[II-5]

以下の問に答えよ．i は虚数単位，$\hbar$ は換算プランク定数（$\hbar = \frac{h}{2\pi}$，h はプランク定数）とする．

（配点 25 点）

(1) 微分演算子 ∇ は $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$，運動量演算子は $\boldsymbol{p} = -i\hbar\nabla$，交換関係は $[A, B] \equiv AB - BA$（A, B は演算子）として，以下の問に答えよ．

a) 以下の文中の $\boxed{\text{ア}}$ から $\boxed{\text{コ}}$ にあてはまる適切な式，値または演算子を示せ．

「自由に運動している粒子のハミルトニアン H は，粒子の質量 m と粒子の運動量演算子 $\boldsymbol{p}$ の各成分 p_x, p_y, p_z を用いると，

$$H = \frac{1}{\boxed{\text{ア}}}\left(\boxed{\text{イ}} + \boxed{\text{ウ}} + \boxed{\text{エ}}\right)$$

と書ける．また，p_x, p_y, p_z は，

$$p_x = -i\hbar\boxed{\text{オ}},\quad p_y = -i\hbar\boxed{\text{カ}},\quad p_z = -i\hbar\boxed{\text{キ}}$$

であるので，ポテンシャル $U(x, y, z)$ 中における一つの粒子に対する，時間に依存しない（定常状態）三次元シュレディンガー方程式は，波動関数を Ψ，エネルギー固有値を E とすると，

$$\left\{\frac{\boxed{\text{ク}}}{\boxed{\text{ア}}}\boxed{\text{ケ}} + \boxed{\text{コ}}\right\}\Psi = E\Psi$$

と表される．」

b) 運動量演算子の各成分と座標演算子の各成分 x, y, z との交換関係が

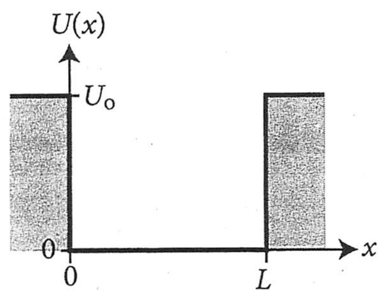
$$[p_x, x] = [p_y, y] = [p_z, z] = -i\hbar$$

となることを示せ．

(2) 図のような一次元井戸型ポテンシャル（高さ U_0，幅 L）の中に閉じ込められた，$0 < x < L$ の領域における質量 m の電子の運動を考える．ただし，電子間の相互作用は無視する．

a) $U_0 \to \infty$ のとき，$x \leq 0$ および $x \geq L$ で電子の存在確率が 0 となる．このとき，電子が満たすべき一次元のシュレディンガー方程式を示し，エネルギー固有値を求めよ．波動関数は $\psi(x)$ とする．

b) $2N$ 個の電子が問 a) に示される一次元井戸型ポテンシャル中に閉じ込められたときの，絶対零度の熱平衡状態における最高被占有エネルギー準位（電子が入っている準位の中で最もエネルギーが高い準位）を求めよ．



[II-6]

下図は禁制帯幅 E_{g} を有する n 形半導体の伝導電子密度 n の温度依存性を表したものである（T は絶対温度）．図の下の記述 (A)(B) を参考にして，伝導電子密度の温度依存性に関する以下の問に答えよ．（配点 20 点）

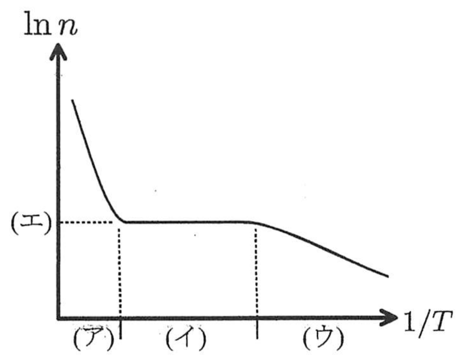
(1) 図中の（ア）,（イ）,（ウ）の温度領域の名称をそれぞれ答えよ．

(2) 図中の（ア）と（ウ）の温度領域のグラフの直線の傾きを，記述 (A)(B) 中の記号を用いて，それぞれ答えよ．

(3) n は E_{F} や N_{C} を用いると，

$$n = N_{\mathrm{C}} \exp\left(\frac{E_{\mathrm{F}} - E_{\mathrm{C}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

と書ける．このことを利用して，図中の（エ）の伝導電子密度がドナー密度 N_{D} であることを示せ．



[参考]

(A) 真性半導体中の伝導電子密度 n_{i} は，

$$n_{\mathrm{i}} = \sqrt{N_{\mathrm{C}} N_{\mathrm{V}}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{g}}}{2k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

で与えられる．ここで，N_{C} と N_{V} は，それぞれ，伝導帯と価電子帯の有効状態密度であり，k_{B} はボルツマン定数である．

(B) n 形半導体中のすべての伝導電子（密度 n）がドナー準位から励起されたものであるとき，

$$\frac{n^2}{N_{\mathrm{D}} - n} = \frac{1}{2} N_{\mathrm{C}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{C}} - E_{\mathrm{D}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

が成立する．ここで，N_{D}，E_{C}，E_{D} は，それぞれ，ドナー密度，伝導帯下端のエネルギー，ドナー準位である．さらに，$k_{\mathrm{B}}T \gg E_{\mathrm{C}} - E_{\mathrm{D}}$ のときには，フェルミ準位は，

$$E_{\mathrm{F}} = E_{\mathrm{D}} + k_{\mathrm{B}}T \ln\left[\frac{N_{\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{C}}} \exp\left(\frac{E_{\mathrm{C}} - E_{\mathrm{D}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)\right]$$

で与えられる．

[II-7]

接合面積 $1.0\times10^{-6}\ \mathrm{m}^2$ の金属／絶縁体／半導体からなる理想的なMIS構造を考える．絶縁体の比誘電率は 3.9 で，その厚さは 50 nm とする．また，半導体の比誘電率は 12 とする．以下の問に答えよ．必要であれば，真空の誘電率 8.9×10^{-12} F/m を用いてよい．

(1) 絶縁体部分の静電容量 C_{i} を求めよ．
(2) あるバイアス電圧を印加して半導体を空乏状態にしたとき，MIS構造の静電容量は $0.4C_{\mathrm{i}}$ となった．空乏層の静電容量を求めよ．
(3) 問(2)のときの空乏層幅を求めよ．

（配点 10 点）

[II-8]

図のように，実格子の基本並進ベクトル $\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$，$\boldsymbol{c}$ との切片が，整数 h，k，l を用いて，$|\boldsymbol{a}|/h$，$|\boldsymbol{b}|/k$，$|\boldsymbol{c}|/l$ であるような格子面を (hkl) 面とよぶ．$\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$，$\boldsymbol{c}$ に対応する逆格子の基本並進ベクトルを $\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$ としたとき，次式のような逆格子ベクトル $\boldsymbol{G}$ を定義する．

$$\boldsymbol{G} = n(h\boldsymbol{A} + k\boldsymbol{B} + l\boldsymbol{C})$$

ただし，n は正の整数である．以下の問に答えよ．

(1) 逆格子ベクトル $\boldsymbol{G}$ が (hkl) 面に垂直であることを証明せよ．
(2) (hkl) 面の面間隔 d を，$\boldsymbol{G}$ と n を用いて表せ．

(hkl) 面およびそれと平行な高次の格子面によるX線のブラッグ反射を考える．入射X線の波数ベクトルを $\boldsymbol{k}$，回折X線のそれを $\boldsymbol{k}'$とする．

(3) $\boldsymbol{k}$，$\boldsymbol{k}'$，$\boldsymbol{G}$ の間に成り立つ式を記せ．
(4) 問(2)および(3)の結果にもとづき，ブラッグの条件を表す式を導け．ただし，ブラッグ角を θ とし，X線の波長を λ としたとき $|\boldsymbol{k}| = |\boldsymbol{k}'| = 2\pi/\lambda$ であるとする．

（配点 20 点）