電子光科学 － II

次の [II-1] から [II-7] までの７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]

図 (a)-(c) の回路において，以下の問に答えよ．ただし，虚数単位を j とする．

（配点２５点）

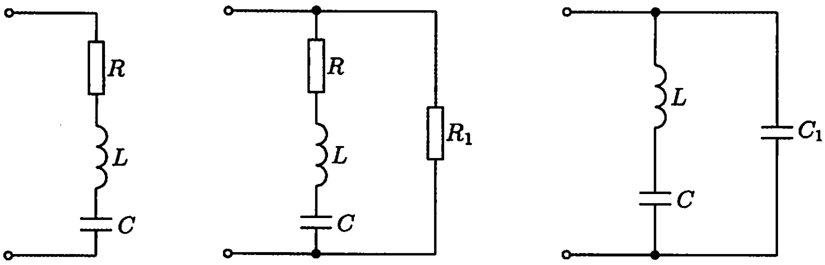


図 (a)　図 (b)　図 (c)

(1) 角周波数 ω における，図 (a) の回路の複素インピーダンスを求めよ．

(2) 図 (a) において，インピーダンスが最小となる角周波数を求めよ．

(3) 図 (b) のように抵抗 R_1 を接続した．この回路の両端に交流電圧源をとりつけ，R と R_1 それぞれに流れる交流電流の位相を比較する．流れる電流の位相差が $\pi/4$ となる場合の交流電圧源の角周波数をすべて求めよ．

(4) 図 (c) の回路において，インピーダンスおよびアドミタンスが極小値をもつ角周波数をそれぞれ求めよ．

[II-2]
特性インピーダンス Z_0，位相速度 u，長さ ℓ ($\ell>0$) の無損失線路があり，送端には起電力 E，内部抵抗 r の直流電源とスイッチを直列にしたものが，受端には負荷抵抗 R ($R\neq 0$, ∞) が，接続されている．時刻 $t<0$ でスイッチは開いており，定常状態になっていた．時刻 $t=0$ でスイッチを閉じた後の，時刻 $t>0$ における送端から受端方向に距離 $\ell/2$ の点の電圧 $v(t)$ と電流 $i(t)$ について，以下の問に答えよ．ただし，$T=\ell/u$ とする．(配点 15 点)

(1) 時刻 $t>0$ における受端での電圧反射係数 Γ と送端での電圧反射係数 γ を求めよ．(導出する必要はない.)

(2) $v(T)$ および $i(T)$ を求めよ．

(3) n を正の整数として，$v(2nT)$ および $i(2nT)$ を求めよ．解答に問 (1) の Γ, γ を用いて良いが，級数などの和は計算されている必要がある．

平成２８年度大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程（一般）入学試験

[II - 3]

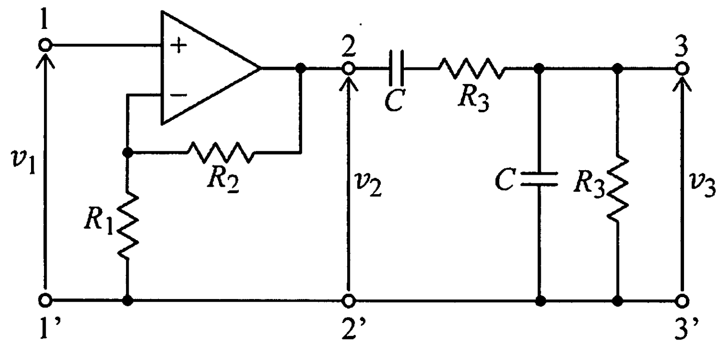
図に示す演算増幅器，抵抗，キャパシタからなる回路を考える．ただし，演算増幅器の増幅率を∞，入力インピーダンスを∞，出力インピーダンスを０とする．なお，演算増幅器の電源回路の表記は省略する．以下の問に答えよ．

（配点２０点）

(1) 図の増幅回路部分の電圧増幅率$A(=v_2/v_1)$を求めよ．

(2) 図の抵抗 R_3 とキャパシタから構成される部分の電圧比$H(=v_3/v_2)$を求めよ．ただし，v_2を角周波数ωの交流電圧とする．

(3) 図の回路において，端子 1 と端子 3 を接続して，正帰還回路を構成する．その回路が発振条件を満たし，C = 100 nF であるときの発振周波数が 1 kHz であった．そのときの抵抗 R_1, R_2, R_3 の条件を示せ．



[II - 4]

図１は２入力A, B, 出力V_O をもつCMOS回路のレイアウトである．電源電圧はV_{DD}, グランドはGNDとして記載されている．なおゲートはポリシリコンで作製されているものとする．以下の問に答えよ．（配点１５点）

(1) 図１のCMOS回路のサブストレートは，V_O, V_{DD}, GNDのいずれに接続されるべきか．あるいは，どこにも接続されるべきではないかを答えよ．

(2) 図１のCMOS回路のレイアウトに対応する回路図を描け．このとき，入力A, B, 出力V_O, 電源電圧（V_{DD}），グランド（GND）も書き示し，n-MOSFET, p-MOSFETの回路記号として，図２に記載のものを使用すること．

(3) Hレベル信号，Lレベル信号を各々1，0と対応させたとき，図１の回路の論理式を書け．

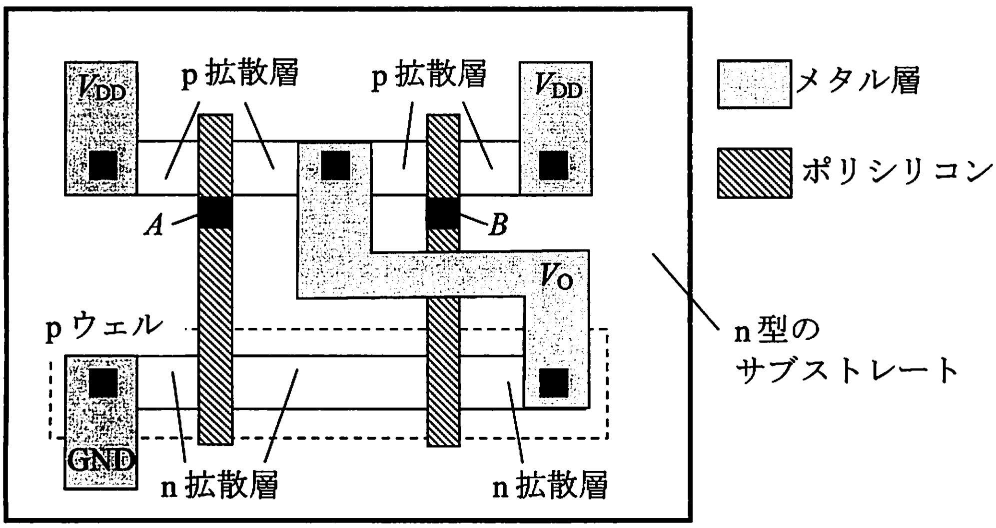


図１　CMOS 回路のレイアウト．

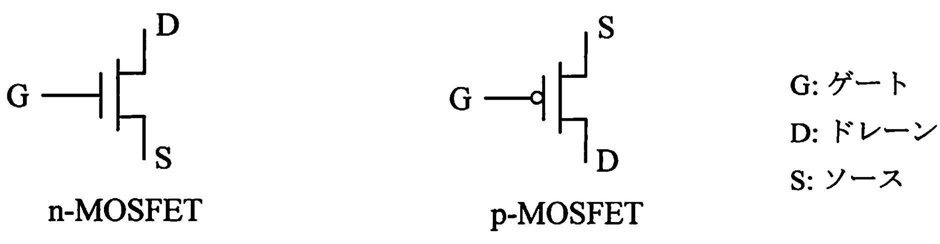


図２　n-MOSFET と p-MOSFET の回路記号．

[II-5]

基本並進ベクトル $\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$，$\boldsymbol{c}$ の単位格子をもつ結晶を考える．その結晶の(hkl)面（ただし，h，k，l はミラー指数）に対応する逆格子ベクトル $\boldsymbol{g}_{hkl}$ は，次式で表される．

$$\boldsymbol{g}_{hkl} = h\boldsymbol{a}^* + k\boldsymbol{b}^* + l\boldsymbol{c}^*$$

ただし，$\boldsymbol{a}^*$，$\boldsymbol{b}^*$，$\boldsymbol{c}^*$ は逆空間の基本並進ベクトルであり，以下の式で与えられる．

$$\boldsymbol{a}^* = \frac{\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c}}{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c}},\quad \boldsymbol{b}^* = \frac{\boldsymbol{c}\times\boldsymbol{a}}{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c}},\quad \boldsymbol{c}^* = \frac{\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c}}$$

(1) 逆格子ベクトル $\boldsymbol{g}_{hkl}$ が(hkl)面に垂直で，かつ，その大きさが(hkl)面の面間隔 d_{hkl} の逆数となることを証明せよ．

次に，単元素からなる，無限に大きな結晶に X 線を入射した場合を考える．単位格子からの散乱波の振幅 $F(\boldsymbol{K})$ は以下の式で与えられる．ただし，$\boldsymbol{K}$ は X 線の散乱ベクトル，$f(\boldsymbol{K})$ は $\boldsymbol{K}$ に依存する原子散乱因子，$\boldsymbol{r}_j$ は単位格子内の j 番目の原子の位置ベクトル，n は単位格子内の原子の総数，i は虚数単位である．

$$F(\boldsymbol{K}) = \sum_{j=1}^{n} f(\boldsymbol{K})\exp(-2\pi i\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{r}_j)$$

(2) X 線が結晶の(hkl)面に対してラウエの回折条件を満たしているとき，散乱ベクトル $\boldsymbol{K}$ と基本並進ベクトル $\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$，$\boldsymbol{c}$ の間に以下の関係式が成り立つことを示せ．

$$\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{a} = h$$
$$\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{b} = k$$
$$\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{c} = l$$

(3) この結晶の単位格子が面心立方格子であるとする．

a) 面心立方格子には単位格子内に 4 つの原子が存在する．格子定数で規格化された，それぞれの原子の座標 (x_j, y_j, z_j) を記せ．ただし，$0\le x_j<1$，$0\le y_j<1$，$0\le z_j<1$ であるとする．

b) 入射した X 線がラウエの回折条件を満たしているとき，単位格子からの散乱波の振幅がゼロとならない，h，k，l の条件を求めよ．また，原子散乱因子の散乱ベクトル依存性は小さく，$f(\boldsymbol{K})=f$ であるとして，そのときの振幅を，f を用いて表せ．

（配点 25 点）

[II-6]
z軸方向に幅 L を有しポテンシャル深さが無限大とみなせる半導体量子井戸を考える．その量子井戸中（$0 \leq z \leq L$）の伝導帯電子状態に関する以下の問に答えよ．ただし，有効質量 m^* の自由電子モデルを採用し，$h/2\pi$（h はプランク定数）を $\hbar$ と記述することとする．

（配点　２５点）

(1) 量子井戸面 (x, y) 内においては，電子は二次元自由電子として振る舞い，波動関数 $\phi_2(x, y)$ は，波数 k_x，k_y を用いて，平面進行波形式；

$$\phi_2(x, y) \propto \exp\{i(k_x x + k_y y)\}$$

で与えられる（i は虚数単位）．これに対応するエネルギー固有値 E_{xy} を波数 k_x，k_y の関数として表現せよ．ただし，$k_x = k_y = 0$ で，$E_{xy} = 0$ と設定する．

(2) 問(1)の二次元自由電子の状態密度 $D_2(E)$ のエネルギー依存性を図示し，その特徴を述べよ．ただし，$D_2(E)$ の値の定量化は不要である．

(3) z軸方向では，電子は完全に $0 \leq z \leq L$ の領域に閉じ込められ，一次元波動関数 $\phi_1(z)$ は，その両端を“節”とする定在波を形成し，波長 λ_z の離散化が生じる（ただし，$\lambda_z = 2\pi/k_z$）．この効果を反映したエネルギー固有値 E_n は，

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*}\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2, \quad n = 1, 2, 3, \cdots$$

で与えられることを説明せよ．

(4) 量子井戸中電子の全エネルギー $E(k_x, k_y, n)$ は，問(1)の E_{xy} と問(3)の E_n の和で表されることを踏まえて，量子井戸電子状態密度 $D(E)$ のエネルギー依存性を E_n のエネルギー位置を含めて図示し，その特徴を論述せよ．

[II-7]
半導体 p-n 接合に関する以下の問に答えよ．　(配点 25 点)

下図は，一様ドープ p 型半導体 (アクセプター密度 N_{A}) と一様ドープ n 型半導体 (ドナー密度 N_{D}) で構成される p-n 接合を表している．w_{p} と w_{n} は，それぞれ，p 型領域と n 型領域の空乏層幅である．すべてのドナーとアクセプタはイオン化しているとし，空乏層内には自由キャリアは存在しないとする (完全空乏近似)．また，この半導体の誘電率を ε とし，電気素量を q とする．

(1) この p-n 接合の拡散電位を V_{D} としたとき，w_{p} と w_{n} を導け．

(2) 内部電界の大きさが最大となる場所とその値を求めよ．

(3) p-n 接合に大きな逆バイアスを印加すると，降伏 (breakdown) 現象が起こることがある．降伏現象の機構を 2 つあげ，それぞれについて簡単に説明せよ．