

電子光科学 II

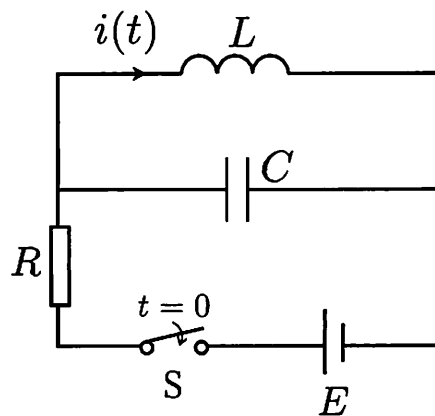
次の [II-1] から [II-8] までの 8 問についてそれぞれ別の答案用紙に答えよ。なお、各問題に 2 枚以上の答案用紙を用いる場合は、「[II-1] (2 枚目)」などのように明記せよ。

[II-1]

図の回路において時刻 $t = 0$ でスイッチ S を閉じた。以下の問に答えよ。ただし $t < 0$ では、キャパシタ C の素子電圧はゼロであり、インダクタ L に流れる電流 $i(t)$ もゼロであったとする。また、 R を抵抗、 E を直流電圧源とする。

- (1) $i(t)$ ($t > 0$) に関する微分方程式を導出せよ。
- (2) 問 (1) で求めた微分方程式から $i(t)$ ($t > 0$) を求めよ。
- (3) $i(t)$ ($t > 0$) が振動的になるための R の範囲を求めよ。
- (4) 問 (3) の場合における振動の固有角周波数を求めよ。

(配点 20 点)



[II-2]

損失のある伝送線路上の位置 x における角周波数 ω の正弦波の電圧と電流の複素振幅をそれぞれ $V(x)$, $I(x)$ とする。以下の問に答えよ。

(1) この伝送線路の微小区間 $[x, x + \Delta x]$ の集中定数等価回路を描け。ただし、用いた定数は全て定義すること。

以下の問では問(1)で定義した定数を必要に応じて用いてよい。

(2) 問(1)で描いた回路から、 $V(x)$ と $I(x)$ が満たすべき連立微分方程式を導出せよ。

(3) 問(2)の連立微分方程式を解いて、 $V(x)$ と $I(x)$ を求めよ。

(配点 20 点)

[II - 3]

図1に示す理想的な演算増幅器，抵抗 R とキャパシタ C からなる回路を考える．時刻 t における $v_1(t)$ ， $v_2(t)$ はそれぞれ，入力信号，出力信号の電圧である．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．

(1) $v_1(t)$ と $v_2(t)$ の関係を求めよ．

(2) $R = 1 \text{ k}\Omega$ ， $C = 100 \text{ nF}$ のとき， $v_1(t)$ に図2に示す正弦波 $v(t)$ を入力し，図1の回路は交流定常状態にある． $v_2(t)$ を求めよ．

(配点 15 点)

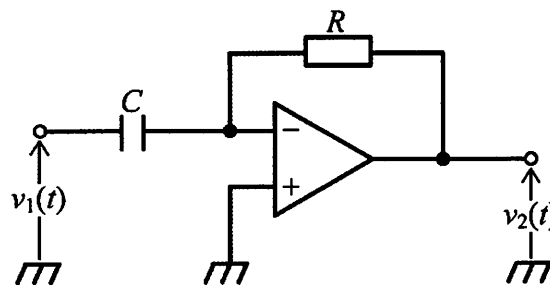


図1

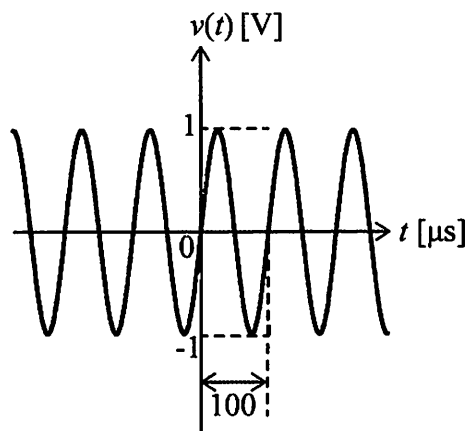


図2

[II-4]

以下の間に答えよ。なお、ハイレベル信号をH、ローレベル信号をLと表記し、論理回路記号としてはMIL記号またはJIS記号を用いる。MOSFETはエンハンスメント型とする。

- (1) 図1は、p-MOSFET(Tr_1, Tr_2) および n-MOSFET(Tr_3, Tr_4) から構成される2入力A, B, 1出力CをもつCMOS論理回路である。この回路を論理回路記号を用いて作図せよ。
- (2) 図2に示す、p-MOSFET ($Tr_5, Tr_6, Tr_9, Tr_{10}$) と n-MOSFET ($Tr_7, Tr_8, Tr_{11}, Tr_{12}$) から構成され、2入力D, Eと2出力Q, \bar{Q} をもつCMOSラッチ回路を考える。(D, E)が(a) (L,L), (b) (L,H), (c) (H,L), (d) (H,H)のときの状態は、それぞれ「セット状態、(Q, \bar{Q}) = (H,L)」、「リセット状態、(Q, \bar{Q}) = (L,H)」、「前の状態(情報保持)」、「前の状態と逆(トグルモード)」、「禁止状態」のいずれに対応するか示せ。
- (3) 図3に示される論理回路の出力D'を図2の入力Dに、さらに出力E'を入力Eに、それぞれ接続することで、2入力F, G, 2出力Q, \bar{Q} をもつ、ラッチ回路を構成した。この論理回路のFとGに、図4に示すような入力を与えた。このときの入力FおよびG, 出力Qおよび \bar{Q} の時間変化を、相互の関係が分かるようにグラフで表せ。

(配点 20 点)

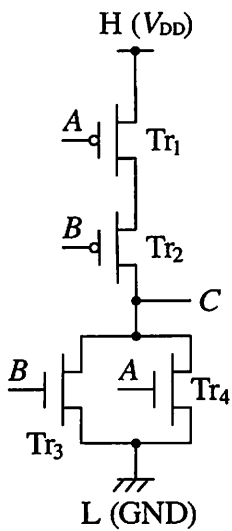


図1

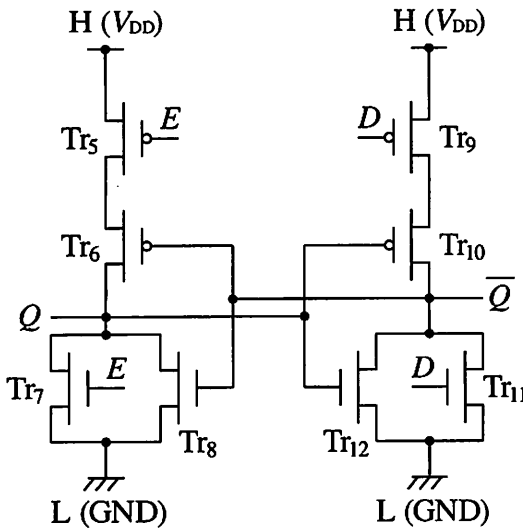


図2

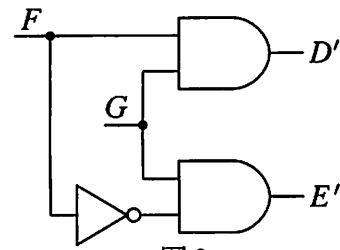


図3

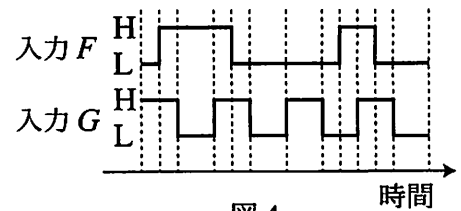


図4

[II-5]

ハミルトニアン \mathcal{H} が時間 t を含まない場合の1次元(座標 x)の1電子(質量 m)の運動を考える。シュレディンガー方程式は、

$$\mathcal{H}\Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$$

である。ここで、 $\Psi(x,t)$ は波動関数、 i は虚数単位、 \hbar は換算プランク定数である。以下の問に答えよ。

- (1) $\Psi(x,t) = \psi(x)T(t)$ とおいて変数分離したときの、 x に関する方程式(時間に依存しないシュレディンガー方程式)を示せ。ただし、エネルギーを表す定数は E とせよ。
- (2) 同様に、 t に関する方程式を示し、その解を求めよ。

以下では、上で考えた電子が $0 < x < L$ の空間に完全に閉じ込められており、ハミルトニアンは

$$\mathcal{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

であるとする。

- (3) 問(1)の方程式を解き、エネルギー固有値 E_n と規格化された固有関数 $\psi_n(x)$ を求めよ。ここで、 $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ である。
- (4) $t = 0$ で電子が

$$\Psi(x,0) = \sqrt{\frac{2}{3}}\psi_1(x) + \sqrt{\frac{1}{3}}\psi_2(x)$$

の状態にあったとする。時刻 t におけるこの電子の波動関数 $\Psi(x,t)$ を、 $\psi_1(x)$ 、 $\psi_2(x)$ 、 E_1 、および E_2 を用いて書け。

- (5) 問(4)の電子の時刻 t におけるエネルギーの平均値(期待値)を E_1 および E_2 を用いて表せ。

(配点 25 点)

[II-6]

下図のpn接合に順方向バイアスを印加したときに、p形領域からn形領域に注入された正孔は、拡散により伝導する。n形領域の接合界面からの位置 $x(>0)$ および時刻 t における正孔密度 $p(x,t)$ についての拡散方程式は、

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = -\frac{p(x,t) - p_0}{\tau} + D \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{①}$$

で表される。ここで、 D および τ はそれぞれ正孔の拡散定数および寿命である。また、 p_0 は熱平衡状態でのn形領域の正孔密度である。以下の問に答えよ。

(1) 式①をもとに、定常状態での微分方程式を示せ。

以下では定常状態を考える。n形領域の空乏層端 $x = x_n$ における正孔密度を p_n とし、接合界面から十分離れた位置での正孔密度は p_0 になっているとする。

(2) n形領域($x \geq x_n$)での過剰正孔密度 $p(x) - p_0$ を求めよ。

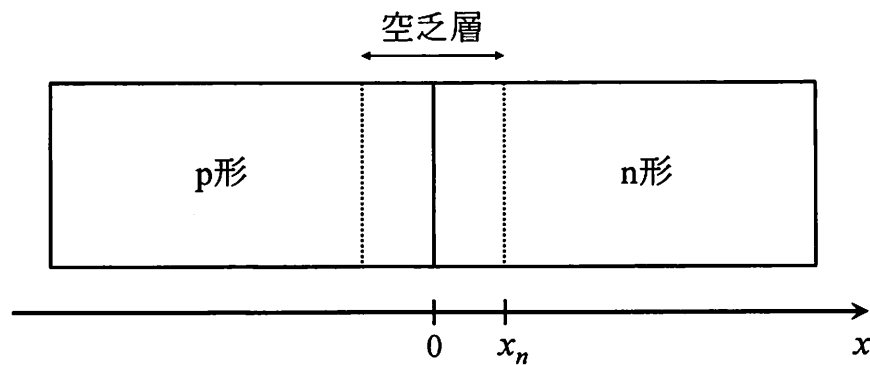
(3) x_n での正孔の拡散電流密度 $J(x_n)$ を求めよ。電気素量は e とする。

(4) 順方向バイアス V を印加したときの x_n での正孔密度が

$$p_n = p_0 \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad \text{②}$$

と表されるとき、 $J(x_n) - V$ 関係の概略を図示せよ。ただし、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。

(配点 20 点)



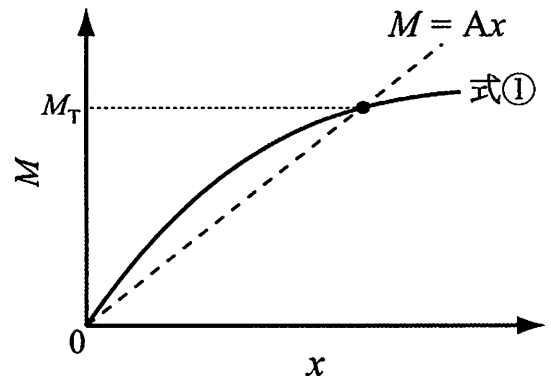
[II-7]

強磁性体の磁化 M は次式①で与えられる。

$$M = Ng\mu_B J B_J(x) \quad \text{①}$$

ただし、 N は単位体積あたりの原子磁気モーメント数、 g は g 因子、 μ_B はボーア磁子、 J は全角運動量の量子数、 $B_J(x)$ はブリュアン関数である。式①は右図のように振

る舞うことが知られており、 x は $x = \frac{g\mu_B H_e}{k_B T}$ である。



ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度、 H_e は $H_e = H + \lambda M$ と表される有効磁界であり、 H は外部磁界、 λ はスピン間の交換相互作用と関係する係数である。次の間に答えよ。

(1) キュリー温度 (T_C) 以下における強磁性体の磁化 M_T は、図に示すように、式①の描く関数と $M = Ax$ で表される一次関数の交点から導かれる。 A に相当する適切な式を求めよ。ただし、強磁性体は外部磁界がゼロで自発磁化（残留磁化）を有していることを考慮せよ。

(2) T_C において強磁性体の磁化がゼロとなることを考慮し、 $T_C = N(g\mu_B)^2 \frac{J(J+1)}{3k_B} \lambda$ を導出せよ。

ただし、 $x \ll 1$ において $B_J(x) = \frac{J+1}{3J} x$ と近似できるとする。

(3) 問(2)を利用して、 $T > T_C$ で成立するキュリー・ワイス則 $\chi = \frac{C}{T-T_C}$ を導出せよ。ここで、 χ は磁化率、 C はキュリー一定数である。

(配点 10 点)

[II-8]

面心立方格子は、立方体の頂点と各面の中心に格子点をもつ空間格子である。格子定数を単位として、以下の位置に格子点が存在する。

$$(x, y, z) = (0, 0, 0), \left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right)$$

また、閃亜鉛鉱構造とは、 $(0, 0, 0)$ と $\left(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right)$ の位置にそれぞれ異なる種類の原子をもち、それを単位構造とする面心立方格子である。

- (1) 閃亜鉛鉱構造の異種原子を、それぞれ A, B とする。単位格子における A 原子の位置と B 原子の位置を、すべて記せ。

次に、これらの結晶による回折を考える。回折強度が、構造因子 F を用いて $|F|^2$ で与えられるとする。ただし、 F はミラー指数 h, k, l を用いて、次式で与えられる。

$$F = \sum_j f_j \exp\{-2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)\}$$

ここで、 f_j は単位格子内の j 番目の原子の原子散乱因子、 x_j, y_j, z_j は同 j 番目原子の位置、 i は虚数単位である。

- (2) 面心立方格子の構造因子 F_F は、原子散乱因子を f とすると以下のように表される。

$$F_F = f \times \boxed{\text{(ア)}}$$

- a) $\boxed{\text{(ア)}}$ に相当する式を、 h, k, l を用いて表せ。

- b) h, k, l が偶数奇数混合のとき、回折強度 $|F_F|^2$ はゼロとなる。偶数奇数非混合の場合における回折強度を、 f を用いて表せ。

- (3) 閃亜鉛鉱構造の構造因子 F_Z は、A 原子および B 原子の原子散乱因子を、それぞれ、 f_A および f_B とすると以下のように表される。ただし、下記の $\boxed{\text{(ア)}}$ は、問(2)のそれと同一である。

$$F_Z = \boxed{\text{(イ)}} \times \boxed{\text{(ア)}}$$

- a) $\boxed{\text{(イ)}}$ に相当する式を、 f_A, f_B, h, k, l を用いて表せ。

- b) h, k, l が偶数奇数非混合のとき、回折強度 $|F_Z|^2$ を、 f_A および f_B を用いて表せ。ただし、回折強度は、 $h + k + l$ の値によって異なるので、場合分けをして考えること。

(配点 20 点)