２０２３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

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１の RL 回路において，独立電圧源 $e(t)$（t は時刻）から図２および図３に示すような電圧を印加した場合を考える．図２および図３のそれぞれの場合において，R および L に流れる電流 $i(t)$ ($t > 0$) を求めよ．なお，図２において $t < 0$ では $e(t) = 0$，$t > 0$ では $e(t) = E$，図３において $t < 0$ および $t > 3T$ では $e(t) = 0$ である．

（配点 20 点）

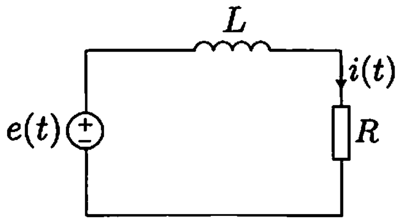


図 1

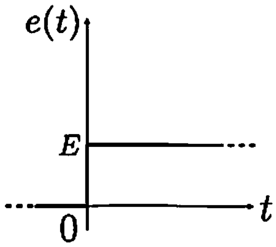


図 2

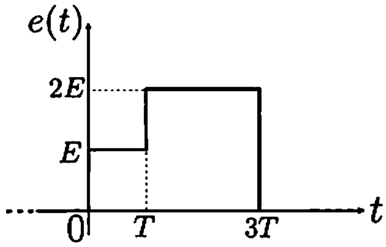


図 3

[II-2]

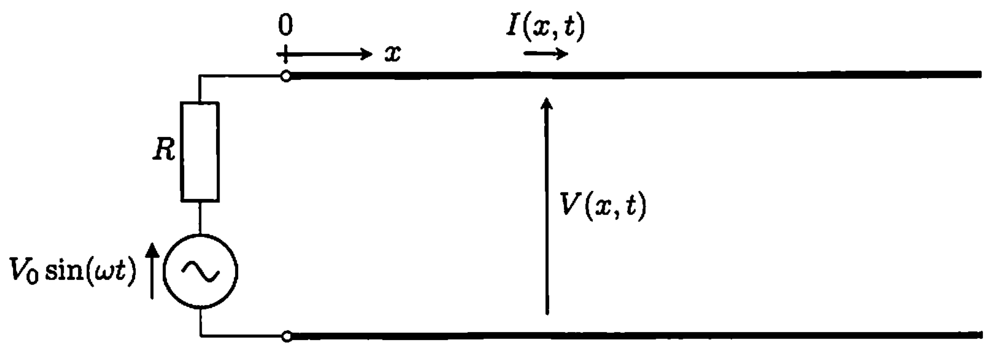
図のように半無限長の無損失伝送線路に抵抗 R (>0) と電源が接続されている．伝送線路の始点を $x=0$ とし，そこから線路方向に x 軸を定める．時刻を t, 角周波数を ω (>0) とし，電源電圧は $V_0 \sin(\omega t)$ のように時間変化している $(V_0 > 0$ とする$)$．伝送線路の特性インピーダンスを Z_0 (>0) とし，線路内での波長を λ (>0) とする．以下の問に答えよ．

(配点 20 点)

(1) 図に示される伝送線路中の位置 x，時刻 t における電圧 $V(x,t)$，および，電流 $I(x,t)$ を求めよ．ただし，電流は $x>0$ を正方向にとる．また，線路は半無限長のため $x>0$ では波が反射されて戻ってくることはない．

(2) $x=0$ において伝送線路に流れ込む平均電力 P を求めよ．

(3) P が最大となる Z_0 とそのときの P を導出せよ．



[II-3]

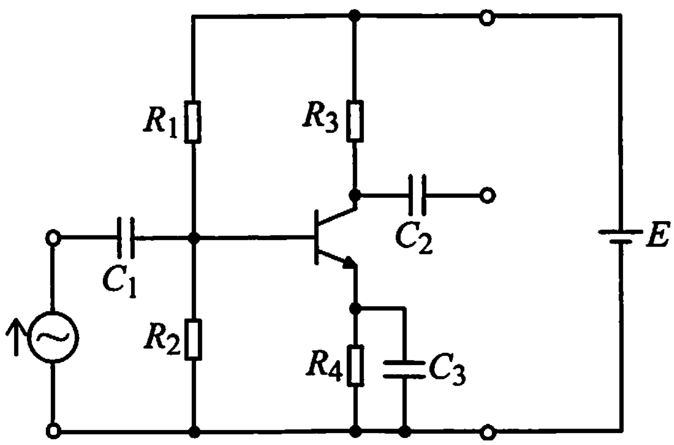
図に示すバイポーラトランジスタ，抵抗，キャパシタ，直流電圧源，角周波数 ω の交流電圧源からなる A 級電力増幅回路を考える．角周波数 ω におけるキャパシタ C_1，C_2，C_3 のインピーダンスは十分に小さく，ベース電流および抵抗 R_1 と抵抗 R_2 に流れる電流はコレクタ電流 I_C と比べて十分に小さいとして良い．以下の問に答えよ．

（配点 20 点）

(1) 図のエミッターコレクタ間の直流電圧 V_{CE} を抵抗 R_1，R_2，R_3，R_4，直流電圧 E とコレクタ電流 I_C のうち必要なものを用いて表せ．

(2) $V_{CE} = E/2$ のとき，直流電圧源から供給される電力 P_{DC} を抵抗 R_1，R_2，R_3，R_4，直流電圧 E のうち必要なものを用いて表せ．

(3) 問(2)の条件を満たし，トランジスタのエミッターコレクタ間の電圧が 0 から E の範囲において能動領域として動作するとみなせる場合を考える．その時の最大電力効率 η_{max} を求めよ．ただし，抵抗 R_3 で消費される交流平均電力を p_{AC} として，電力効率を $\eta = p_{AC}/P_{DC}$ と定義する．



[II-4]

図 1 に示す D-フリップフロップからなる回路について考える．以下の問に答えよ．なお，解答には，[II-4]と書かれた入試解答用紙を用いよ．

（配点 15 点）

(1) この回路に図 2 に示すようなクロック信号を与えたときの出力 Q_1, Q_2, Q_3 の時間変化を，図 2 にならって入試解答用紙に各々書き表せ．ただし，出力 Q_1, Q_2, Q_3 の初期値は全て L レベルであるとする．

(2) 問(1)のとき，回路の異なる出力の組み合わせは何通りあるか．

(3) D-フリップフロップの最大動作周波数は 100 MHz，クロック信号に対する出力 Q, $\bar{Q}$ のホールド時間，セットアップ時間，伝搬遅延時間はそれぞれ 1 ns, 3 ns, 10 ns であるとする．図 1 の回路が正しく動作するための最大動作周波数を有効数字 2 桁で求めよ．

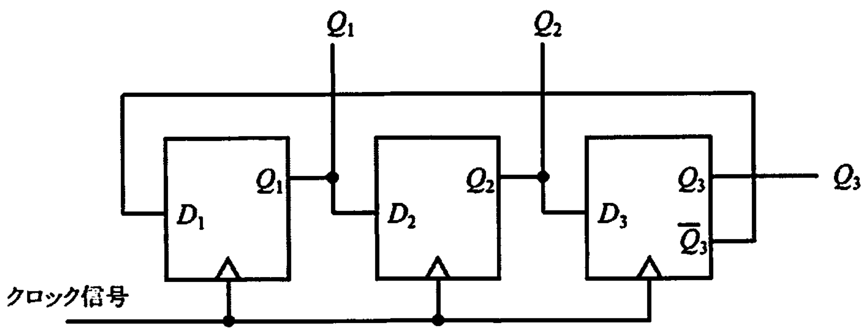


図 1

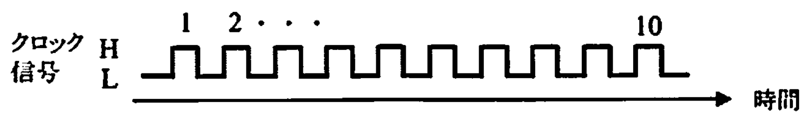


図 2

[II-5]

同じ半導体からなる p-n 接合に関する以下の問に答えよ．ただし，p 形半導体と n 形半導体には，それぞれ，密度が N_A と N_D のアクセプターとドナーが一様にドーピングされており，それらはすべてイオン化しており，バンド間の電子の熱励起は無視できるとする．また，接合界面は平面的でその面積は十分に大きく，界面準位は無視できるとする．

(配点 30 点)

図 1 は p 形半導体と n 形半導体が孤立して存在している時のエネルギーバンド図である．ここで，E_F はフェルミ準位であり，ϕ_p と ϕ_n は，それぞれ，p 形半導体と n 形半導体の仕事関数である．また，E_C，E_V，χ は，それぞれ，伝導帯下端のエネルギー，価電子帯上端のエネルギー，電子親和力である．図 2 は，図 1 に示された p 形半導体と n 形半導体を接触させ，熱平衡状態になったときのエネルギーバンド図である．ただし，q は電気素量である．

(1) 図 2 に示されている qV_D を図 1 の中の記号を用いて表せ．
(2) V_D の名称を述べよ．

図 2 に示されるように x 軸をとり，接合界面を原点とする．x_p と x_n は，それぞれ，p 形半導体と n 形半導体の空乏層幅である．

(3) $-x_\mathrm{p} < x < 0$ と $0 < x < x_\mathrm{n}$ の領域において，電位 $\Phi(x)$ が満たすべきポアソン方程式を，それぞれ書け．ただし，この半導体の誘電率を ε とする．
(4) 問 (3) のポアソン方程式から x_p と x_n をそれぞれ求め，全空乏層幅 $W \equiv x_\mathrm{p} + x_\mathrm{n}$ が

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q}\frac{N_\mathrm{A}+N_\mathrm{D}}{N_\mathrm{A}N_\mathrm{D}}V_\mathrm{D}}$$

となることを示せ．
(5) この p-n 接合に直流の逆方向バイアス電圧 $-V$ $(V>0)$ を印加した場合の単位面積あたりの静電容量 $C(V)$ を求めよ．ただし，$N_\mathrm{D} \gg N_\mathrm{A}$ とする．
(6) 問 (5) の $C(V)$ は実測することができる．ε が既知のとき，V_D と N_A を実験から求める方法を述べよ．

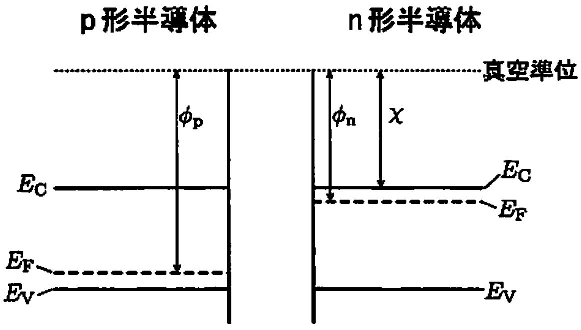


図 1

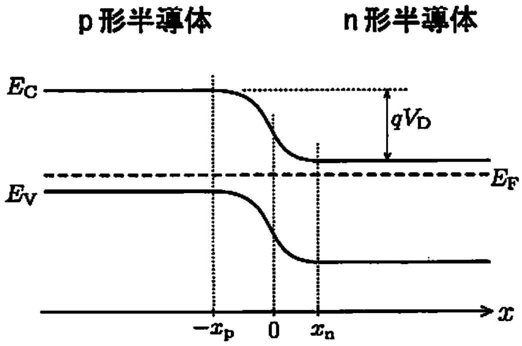


図 2

[II-6]

単結晶によるＸ線の弾性散乱を考える．図１のように，結晶は基本ベクトル$\vec{x}$，$\vec{y}$，$\vec{z}$の単純立方格子からなり，$\vec{x}$方向にN_1a，$\vec{y}$方向にN_2a，$\vec{z}$方向にN_3a（ただし，N_1，N_2，N_3は正の整数で，aは各基本ベクトルの大きさ）の大きさをもつ．また，結晶内における単位格子の位置ベクトル$\vec{r}$を，$\vec{r}=n_1\vec{x}+n_2\vec{y}+n_3\vec{z}$（ただし，$n_1$，$n_2$，$n_3$は０以上の整数）とする．Ｘ線の波数ベクトルの大きさは波長の逆数で定義されるとして，以下の問に答えよ．

（配点 15 点）

(1) 下記の文中の$\boxed{}$内を，（ア）から（オ）および（ケ）は数式で，（カ）から（ク）は語句で埋めよ．

Ｘ線の散乱ベクトル$\vec{K}$は，入射波の波数ベクトル$\vec{k}$と散乱波の波数ベクトル$\vec{k'}$を用いると，$\boxed{（ア）}$である．結晶全体からの散乱振幅は，構造因子を$F(\vec{K})$として，$\vec{K}$，$\vec{r}$を用いると，$F(\vec{K})\sum\boxed{（イ）}$と表される．ここで，$\sum\boxed{（イ）}$は結晶内の$\vec{r}$に関する総和であり，$N_1$，$N_2$，$N_3$を用いると，$n_1$については０から$\boxed{（ウ）}$，$n_2$については０から$\boxed{（エ）}$，$n_3$については０から$\boxed{（オ）}$までの総和となる．$\sum\boxed{（イ）}$の絶対値の二乗をラウエ関数と呼び，結晶全体からの散乱強度はこれに比例する．このラウエ関数を三角関数で表すと次式となる．

$$\frac{\sin^2(\pi N_1\vec{K}\cdot\vec{x})}{\sin^2(\pi\vec{K}\cdot\vec{x})}\cdot\frac{\sin^2(\pi N_2\vec{K}\cdot\vec{y})}{\sin^2(\pi\vec{K}\cdot\vec{y})}\cdot\frac{\sin^2(\pi N_3\vec{K}\cdot\vec{z})}{\sin^2(\pi\vec{K}\cdot\vec{z})}$$

図２は$\vec{K}\cdot\vec{x}$に対する$\frac{\sin^2(\pi N_1\vec{K}\cdot\vec{x})}{\sin^2(\pi\vec{K}\cdot\vec{x})}$のグラフの概略図であり，$\vec{K}\cdot\vec{x}$の値が$\boxed{（カ）}$になるとき，主極大をもつ．この条件は「散乱ベクトルが結晶の$\boxed{（キ）}$に一致したときに回折が起こる」とする$\boxed{（ク）}$と呼ばれている．また，主極大のピーク値は，N_1を用いると，$\boxed{（ケ）}$で与えられ，そのプロファイルの半値幅はおよそN_1に反比例するので，散乱強度分布はN_1の値に依存して広がりをもつ．

(2) 大きさと形状が，$N_1=N_2=N_3=N_0$で与えられる結晶１と，$N_1\ll N_0$，$N_2=N_3\gg N_0$で与えられる結晶２における回折現象を考える．問(1)の文を参考にして，結晶２の，$\vec{x}$，$\vec{y}$，$\vec{z}$方向の回折強度分布におけるピーク値の大きさとプロファイルの広がりを結晶１のそれらと比較し，100 字程度で記せ．

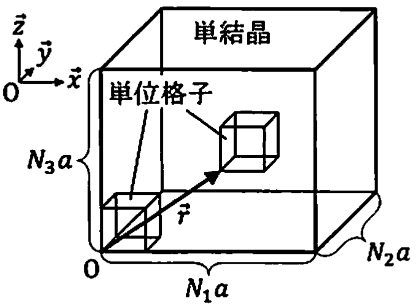


図１

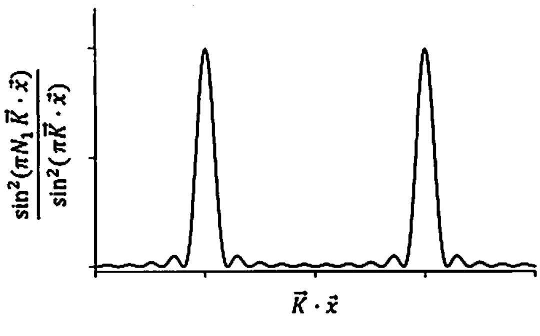


図２

[II-7]

エネルギー固有値が E_a, E_b ($E_a > E_b > 0$) である２つのエネルギー固有状態 a, b をもつ粒子が存在する．簡単な場合として，この粒子１つが温度 T でカノニカル分布に従うとした時の２準位系について考える．以下の問に答えよ．ただし，系がエネルギー固有状態 a と b をとる確率をそれぞれ p_a と p_b とし，k_B をボルツマン定数とする．なお，解答には，[II-7]と書かれた入試解答用紙を用いよ．

（配点 15 点）

(1) この系の分配関数を求めよ．

(2) p_a を求めよ．

(3) 横軸を$(k_B T)^{-1}$，縦軸を p_a および p_b とするグラフの概略をそれぞれ実線および点線で図示せよ．また，縦軸には p_a および p_b と縦軸との交点の値も書き入れること．

(4) 下記の文章が正しくなるように，$\boxed{\text{（ア）}}$，$\boxed{\text{（イ）}}$，$\boxed{\text{（ウ）}}$ において，下の選択肢の中から最も適切なものをそれぞれ選べ．

問(3)のグラフから，系は十分低温では，なるべく$\boxed{\text{（ア）}}$エネルギーの固有状態をとろうとすることがわかる．また，十分高温では，$\boxed{\text{（イ）}}$となり，これは$\boxed{\text{（ウ）}}$により，系がランダムにエネルギー固有状態 a, b をとっていると理解できる．一般に，同様の傾向は粒子数が多いマクロな系でもみられる．

$\boxed{\text{（ア）}}$ の選択肢：低い ・ 高い ・ 系を不安定にする

$\boxed{\text{（イ）}}$ の選択肢：$p_a \gg p_b$ ・ $p_a \fallingdotseq p_b$ ・ $p_a \ll p_b$

$\boxed{\text{（ウ）}}$ の選択肢 ：不可弁別性 ・ 熱揺らぎ ・ 縮退

(5) この系のエネルギー期待値を求めよ．

[II-8]

ある温度 T において常磁性絶縁体に外部磁場 H を印加した際の磁化Mが，$M = Ng\mu_B J B_J(x)$, $x = \frac{g\mu_B J H}{k_B T}$と表記されたとする．ここで，$B_J(x)$はブリュアン関数であり，次式で表される．

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J}\coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J}\coth\left(\frac{1}{2J}x\right)$$

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，k_Bはボルツマン定数，J は全角運動量の量子数である．また，$\alpha \ll 1$ において $\coth\alpha \approx \frac{1}{\alpha} + \frac{\alpha}{3}$, および $\alpha \to \infty$ において $\coth\alpha \approx 1$という近似が成立する．以下の問に答えよ．なお，解答には[II-8]と書かれた入試解答用紙を用いよ．

（配点 15 点）

(1) 高温・低磁場下において，キュリー定数を求めよ．ただし，導出過程も示すこと．

(2) 低温・強磁場下における磁化M_Sを求めよ．

(3) 低温における磁化Mと外部磁場 H の関係を表すグラフの概略を図示せよ．ただし，問(2)で求めたM_Sをグラフ中に明示すること．