

電子光科学 - II

次の [II-1] から [II-6] までの6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のように抵抗 R とキャパシタ C からなる回路に、電圧源 $e(t)$ を接続し、キャパシタ C にかかる電圧 $v(t)$ を求めることを考える。以下の問に答えよ。

(配点25点)

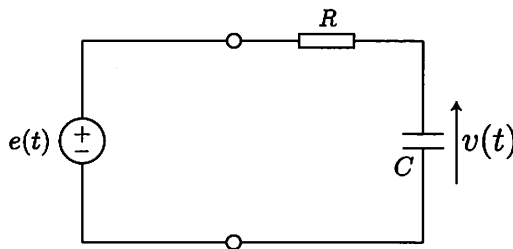


図1

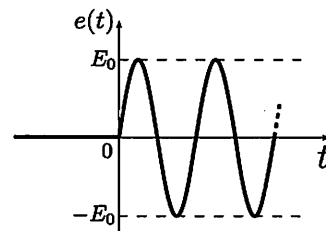


図2

- (1) $e(t) = E_0 \sin(\omega t)$ の電圧源を接続した。交流定常状態のときの $v(t)$ を求めよ。
- (2) 次に、 $e(t)$ を図2のような $t \geq 0$ で $e(t) = E_0 \sin(\omega t)$ の電圧を出力する電圧源とした場合を考える。 $v(t)$ をラプラス変換した $V(s)$ は以下の様な展開定理を適用した形で表すことができる。計算から求まる定数である $A_1, A_2, A_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ を示せ。

$$V(s) = \frac{A_1}{s + \lambda_1} + \frac{A_2}{s + \lambda_2} + \frac{A_3}{s + \lambda_3}$$

- (3) 問(2)の結果を用いて $v(t)$ ($t \geq 0$) を求めよ。解答には $A_1, A_2, A_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ が計算できたものとして、そのまま用いてよい。解は指数関数の形で示せ。
- (4) 問(3)の結果は、十分時間が経過したときに問(1)の答えと同じになることを、問(2)および問(3)の結果の式を変形することで示せ。

[II-2]

特性インピーダンスが Z_0 の無損失線路の，送端に内部インピーダンス Z_0 の高周波電圧源が接続されており，受端は負荷インピーダンス $-jZ_0$ で終端されている． j は虚数単位である．以下の問に答えよ．

(配点15点)

- (1) 受端での電圧反射係数を求めよ．
- (2) 線路上の波長を λ ，線路の長さを $9\lambda/8$ ，送端から受端に向かう進行波電力を P とする．線路上の電圧と電流の実効値の分布を，受端からの距離 y に対して，少なくとも $\lambda/8$ 毎の値がわかるように図示せよ．

[II-3]

図1に示すバイポーラトランジスタ、抵抗、キャパシタ、直流電圧源からなる回路を考える。 v_i は入力交流信号の電圧、 v_o は出力信号の電圧である。ただし、各キャパシタのインピーダンスは、入力交流信号の周波数帯において、十分に小さいものとする。以下の問に答えよ。

(配点20点)

- (1) トランジスタが h パラメータ h_i, h_f で表される簡略化した小信号交流等価回路で表されるとき、図1の小信号交流等価回路を図示せよ。
- (2) 回路全体の電圧増幅率 $A_v (= v_o/v_i)$ を問(1)の等価回路から求めよ。ただし、 $R_1 = 30 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 30 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 1 \text{ k}\Omega$, $h_i = 5 \text{ k}\Omega$, $h_f = 100$ とする。
- (3) h パラメータ h_f が、 $h_f(f) = 100/(1 + jf/f_0)$ の周波数依存性があるとき、電圧増幅率 A_v の高域遮断周波数 f_H を有効数字一桁で求めよ。ただし、 f は周波数、 $f_0 = 3 \text{ MHz}$, j は虚数単位である。

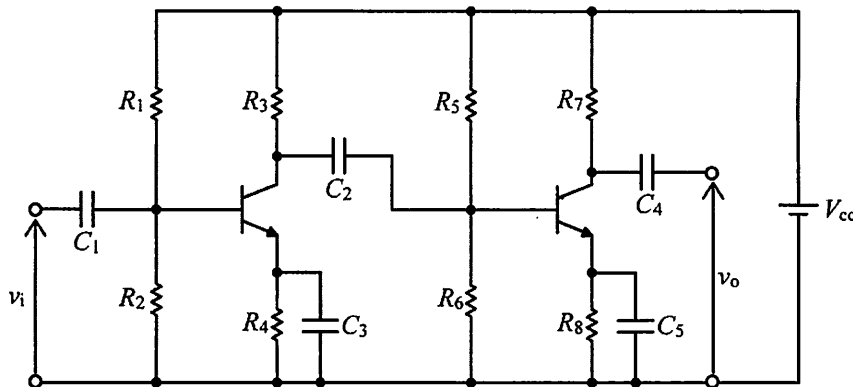


図1

[II-4]

4入力 A, B, C, D , 1出力 Y からなるデジタル回路について考える. この回路の論理式は,
 $Y = \overline{A \cdot C + \overline{A} \cdot B \cdot C + D + B \cdot \overline{D}}$ である時, 以下の問に答えよ. ただし, 回路におけるHレベル, Lレベルを論理式における1,0と各々対応させて考えるものとする.

(配点15点)

- (1) 論理式 \overline{Y} のカルノー図を作成し, \overline{Y} を簡略化しなさい.
- (2) 論理式 Y で表されるこの回路は, CMOSから構成されているものとする. 問(1)の結果を参考にして, この回路の回路図を答案用紙に書きなさい. なお, 入力 A, B, C, D , 出力 Y , 電源電圧(V_{DD}), グランド(GND)も書き示すこと. また, n-MOSFET, p-MOSFETの回路記号として, 図1に記載のものを使用すること.

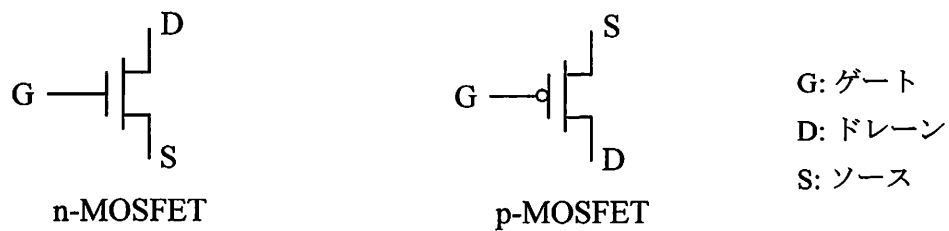


図1 n-MOSFET と p-MOSFET の回路記号.

[II-5]

金属の自由電子模型において、スピン縮退を考慮した単位体積あたりの全状態密度 $D(E)$ は、

$$D(E) = D_{\uparrow}(E) + D_{\downarrow}(E) = 2 \times \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}}$$

と記述できる (図1). ここで、 $D_{\uparrow}(E)$ および $D_{\downarrow}(E)$ は、それぞれ、アップスピン電子 (\uparrow) とダウンスピン電子 (\downarrow) の状態密度、 m は電子の質量、 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h はプランク定数)、 E はエネルギーである。このとき、次の (1) から (3) の間に答えよ。ただし、必要ならば電気素量 1.6×10^{-19} A·s を用いてよい。

(配点 35 点)

(1) 0 K において、電子が状態をフェルミ準位 (E_F) まで占有しているとしたとき、単位体積あたりの電子数 N を E_F を用いて表せ。

(2) 系の z 軸方向に一様な磁場 (B) を印加すると、Zeeman 相互作用によって、アップスピン電子 (\uparrow) とダウンスピン電子 (\downarrow) の間には Δ のエネルギー差が生じる (図2)。このとき、以下の間に答えよ。

a) スピン磁気モーメント $M_z = -g\mu_B S_z$ (g は g 因子、 μ_B はボーア磁子、 S_z はスピン量子数) において、 $g = (\text{ア})$ 、 $S_z = \pm(\text{イ})$ を考慮すると、無磁場の状態に対して \uparrow は (ウ) だけエネルギーが低い状態となり、 \downarrow は (ウ) だけエネルギーが高い状態となる。従って、 $\Delta = 2\mu_B B$ となる。(ア)~(ウ) を記せ。

b) 9.0 T の外部磁場が印加されているとき、 $\Delta = (\text{エ})$ eV である。 $\mu_B = 9.3 \times 10^{-24}$ J·T⁻¹ として、(エ) を求めよ。

c) 問 b) から、 Δ の値は E_F (~1 eV のオーダー) に比べて十分に小さいことが判る。ここで、磁場印加中の磁化 M は $(N_{\uparrow} - N_{\downarrow})\mu_0\mu_B$ と表記でき、 $(N_{\uparrow} - N_{\downarrow})$ は \uparrow と \downarrow の電子数差 (図2の斜線部)、 μ_0 は真空の透磁率である。 $(N_{\uparrow} - N_{\downarrow})$ を近似的に求め、 M を E_F を用いて表せ。

(3) 問 (1) と問 (2) の c) を用いて、常磁性磁化率 χ を E_F を用いて表し、 χ の温度に対する変化が小さい理由を簡単に説明せよ。

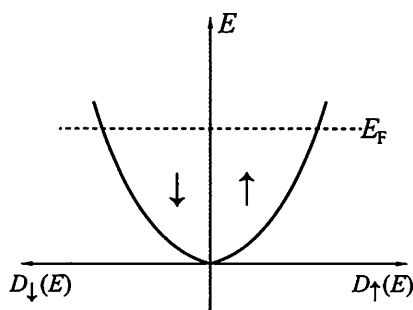


図1. 無磁場中の状態密度

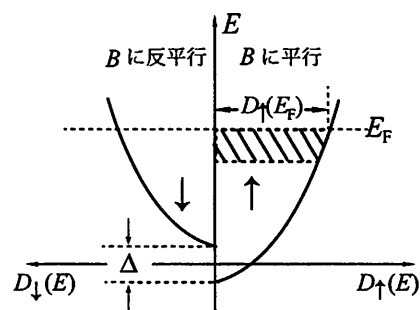


図2. 磁場 B 中の状態密度

[II-6]

オーム性電極が形成された半導体において、正孔による電流が流れる場合を考える。半導体に電界を印加すると、低電界では熱励起された正孔によるオーム性電流が流れるが、電界の増加に伴い、電極から注入される正孔による電流が支配的になる。ここでは、拡散電流を無視してドリフト電流のみを考慮し、定常状態にあるとする。また、半導体中の電界を E 、半導体の誘電率を ϵ 、正孔の移動度および電荷を、それぞれ、 μ および q とする。

- (1) 密度 p_0 の熱励起された正孔による電流密度 J_h を、 E 、 p_0 、 ϵ 、 μ 、 q のうち必要なものを用いて表せ。

電極から注入された正孔が半導体内部の電子によって中和されずに流れるとき、注入された正孔は空間電荷を形成する。その結果、オーム則からはずれた非線形の電流電圧特性が現れる。この現象について、図 1 のような電極 1 / 半導体 / 電極 2 構造において、電界 E が x 軸の正方向に印加されている場合を考えよう。ただし、電極 1 / 半導体界面 ($x=0$) における電界および電位をともにゼロ、注入された正孔の密度を p とする。

- (2) 注入された正孔による電流密度 J_i を、 E 、 p 、 ϵ 、 μ 、 q のうち必要なものを用いて表せ。
- (3) 電界の勾配 dE/dx を、 p 、 ϵ 、 μ 、 q のうち必要なものを用いて表せ。
- (4) 問(2)および問(3)の結果より、 J_i 、 ϵ 、 μ を用い、電界 E を座標 x の関数として表せ。
- (5) J_i 、 ϵ 、 μ を用い、半導体内の電位 V を座標 x の関数として表せ。

電極 1 を接地して、電極 2 に外部電圧として負電圧 $-V_x$ を印加した。注入された正孔は半導体内で空間電荷を形成すると考える。また、半導体の x 方向の長さを L とする。

- (6) 注入された正孔による電流密度 J_i を、 ϵ 、 μ 、 L 、 V_x を用いて表せ。
- (7) 注入された正孔による電流密度が、熱励起された正孔による電流密度を上回ると、電流電圧特性は、オーム特性から非線形特性に遷移する。この遷移が起こる外部電圧 V_T を、 L 、 p_0 、 ϵ 、 q を用いて表せ。

(配点 40 点)

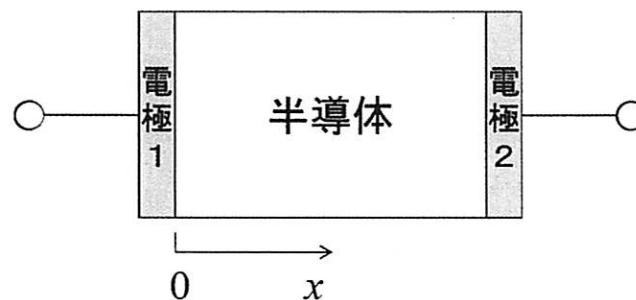


図 1