

専門科目（午後）

1 5 大修

時間 13 時 30 分～15 時 00 分

## 電気電子工学・電子物理工学

電気電子工学  
電子物理工学

### 注意事項

1. 次の 4 題の中から 1 題を選択して解答せよ。2 題以上解答した場合はすべて無効とする。
  2. 解答は 2 枚の解答用紙に記入せよ。問題 4【電子デバイス・回路システム】を選択したものは、設問 2)の解答を別の指定された解答用紙に記入せよ。
  3. 各解答用紙に問題番号及び受験番号を記入せよ。
  4. 電子式卓上計算機等の使用は認めない。
-

# 1 . 電力・エネルギーに関する以下の問題に解答せよ。

【電力・エネルギー】

1) 電力システムの解析に関連した以下の問に答えよ。

- a) インピーダンスの基準値  $Z_B$  について、相電圧  $E_B$ 、および 1 相あたりの容量  $S_B$  をそれぞれ基準値として用いて表せ。次に、電流の基準値  $I_B$  について、電圧  $V_B$ 、および三相容量の基準値  $S'_B$  をそれぞれ基準値として用いて表せ。
- b) 送電線において、電圧 65 kV で、電力、無効電力(遅れ)がそれぞれ 40 MW、5 Mvar の潮流があるとき、電圧 66 kV、容量 100 MVA を基準として、送電線に流れる電流を単位法表示で求めよ。
- c) 図 1.1 のように、定格電圧 15 kV、容量 400 MVA、%インピーダンス 18 %の発電機に、変圧比 15/275 [kV]、容量 500 MVA、%インピーダンス 20 %の変圧器-1 が接続されている。変圧器-1 の二次側には電圧 275 kV の送電線が接続されており、500 MVA を基準として送電線の抵抗は 2 %、リアクタンスは 21 %である。この送電線の終端には、変圧比 275/66 [kV]、容量 400 MVA、%インピーダンス 15 %の変圧器-2 が接続されている。容量 1000 MVA を基準として、この系統全体の%インピーダンスを求めよ。

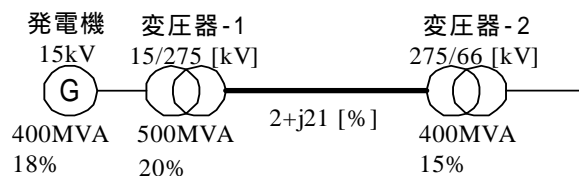


図 1.1

- d) 前問の図 1.1 において、発電機を定格電圧で運転しているとき、変圧器-1 の二次側で三相一括地絡故障が起こった。このとき流れる地絡電流  $I$  [P.U.]を求めよ。次に、変圧器-1 の一次側ならびに二次側の電流  $I_1$  [A]、 $I_2$  [A] を求めよ。
- e) 電力システムにおいて前問のような地絡故障が生じたとき、この影響が電力システム全体に波及しないようにするために、どのような機器およびシステムが使われているか説明せよ。
- f) 図 1.2 のような電圧  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  および電流  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$  で示される 2 ノード系統について、ノード 1 および 2 における、電力と無効電力である  $P_1 + jQ_1$  および  $P_2 + jQ_2$  それぞれの関係を示す電力方程式を求めよ。ただし、 $\dot{Y}$  はアドミタンス、電圧  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  の位相角はそれぞれ  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  である。

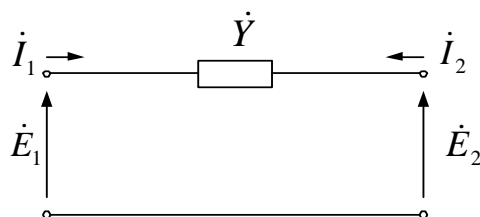


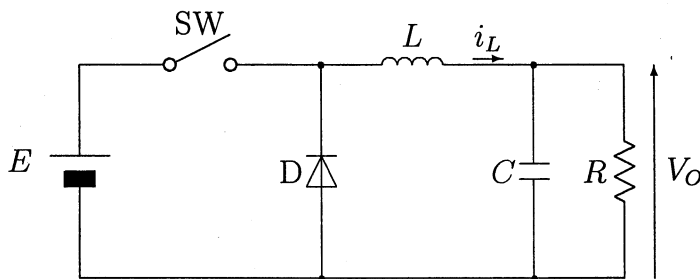
図 1.2

2) 定格電圧 200 V、定格出力 10 kW、定格周波数 50 Hz、4 極 (極対数 2) の三相同期電動機を 200 V、50 Hz の平衡三相交流電源に接続し、定格の機械的負荷 10 kW を課した。同期リアクタンス  $X = 3 \Omega$  として以下の問に答えよ。ただし、同期電動機の銅損、鉄損および機械損と磁気飽和の影響は無視できるものとする。

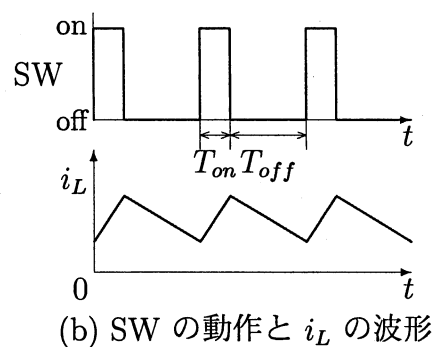
- この同期電動機の定格回転数 [rpm]、および定格トルク [N·m] を求めよ。
- 力率が 1 となるように界磁電流を調整したときのフェーザ図の概略を描け。また、このときの無負荷誘導起電力はいくらか。
- 力率が 1 となるように界磁電流を調整した後に、界磁電流を増減すると無負荷誘導起電力と電機子電流はどのように変化するか説明せよ。
- 無負荷誘導起電力が 200 V となるように界磁電流を調整した後、定格負荷 10 kW を課した。電源電圧を低下してゆくと、同期電動機は脱調した。脱調する直前の電源電圧を求めよ。

3) 図 1.3 (a) のチョッパ回路がある。図 1.3 (b) のように、スイッチ SW をオン・オフすると、インダクタ  $L$  には  $i_L$  の電流が流れた。コンデンサ  $C$  は十分に大きく電圧リプルは無視できるものとして、以下の問に答えよ。

- スイッチ SW がオンしている期間およびオフしている期間それぞれの電流変化率  $di_L/dt$  を表す式を示せ。
- チョッパ回路の出力電圧  $V_O$  が、 $V_O = E/4$  となった。スイッチ SW がオンしている期間  $T_{on}$  とオフしている期間  $T_{off}$  の比を求めよ。また、その理由を説明せよ。
- ダイオード D の役割を説明せよ。また、D がいない場合、どのようなことが生じるかを述べよ。



(a) チョッパ回路



(b) SW の動作と  $i_L$  の波形

図 1.3

## 2 . 波動・通信に関する以下の設問 1)および 2)に答えよ。

- 1) 図 2.1 に示すように真空中に荷電粒子  $M$  (質量  $m$ 、電荷  $q$ ) が重さ 0 の細い弾性線により固定点  $A$ 、 $B$  に結ばれている。線は絶縁体であり、直線  $AB$  に沿って座標  $x$ 、それと垂直方向に座標  $y$ 、座標原点を  $AB$  の中点にとる。 $M$  が  $y$  軸上を原点を中心に周波数  $f = 10\text{MHz}$  で振動しているとき、以下の問に答えよ。ただし 1 回の振動で失うエネルギーは非常に僅かなので、数回の振動の間では  $M$  の振動振幅は一定と近似でき、振動は  $y = a \sin 2\pi ft$  と表わすことができると仮定せよ。
  - a) 古典電磁気学によると、加速された点電荷は単位時間当り  $dq^2b^2/c^3$  のエネルギーを放射する。ここで  $d$  は定数、 $b$  は瞬時の加速度  $[\text{m/s}^2]$ 、 $c$  は光の速度  $[\text{m/s}]$ 、 $q$  は点電荷の電荷量  $[\text{C}]$  である。 $M$  が振動の 1 周期の間に放射するエネルギー  $\delta h$  を  $d$ 、 $q$ 、 $a$ 、 $f$ 、 $c$  を用いて表せ。
  - b)  $M$  の力学的エネルギーを  $h_0$  とする。 $\delta h/h_0$  を式で表せ。ただし力学的エネルギーとは、位置および運動エネルギーの和を意味する。表 2.1 に示す数値を用いて  $\delta h/h_0$  の概略値 (有効数字 1 桁) を計算せよ。
  - c)  $M$  の力学的エネルギーが、放射によって初期値の  $e^{-1}$  倍に減少する時間  $\Delta t$  を式で表せ。ただしエネルギーは  $h_0 e^{-\gamma t}$  のように時間  $t$  とともに減少し、エネルギーの変化が小さいときには、 $e^{-x} = 1 - x$  と近似せよ。表 2.1 の数値を用いて  $\Delta t$  の概略値 (有効数字 1 桁) を計算せよ。
  - d)  $y$  軸上  $(0, \ell)$  および  $(0, -\ell)$  に等しい電荷  $q_0$  をもつ固定された点電荷  $C$ 、 $D$  を導入する。電荷  $q$  と  $q_0$  の極性が等しいとき、 $y$  軸上  $(0, y)$  にある  $M$  に働くクーロン力を、 $y$  の関数として表せ。ただし  $M$  は点電荷と仮定でき、弾性線の張力はクーロン力に比較して十分大きいので、 $M$  は  $y$  軸に沿って振動し続け、振動振幅  $a$  は  $\ell$  に比較して十分小さいとして近似せよ。真空の誘電率を  $\epsilon_0$  と表せ。
  - e)  $M$  には弾性線による復元力とクーロン力しか働かないとして運動方程式を求めよ。ただし復元力を  $-ky$  ( $k$  は定数) と表せ。
  - f)  $C$ 、 $D$  の導入により振動の周波数は  $f + \delta f$  に変化した ( $|\delta f/f| \ll 1$ )。  $\delta f$  を式を用いて表せ。ただし  $|x| \ll 1$  の場合には  $\sqrt{1+x} = 1 + x/2$  と近似せよ。表 2.1 の数値を用いて  $q_0$  の概略値 (有効数字 1 桁) を計算せよ。

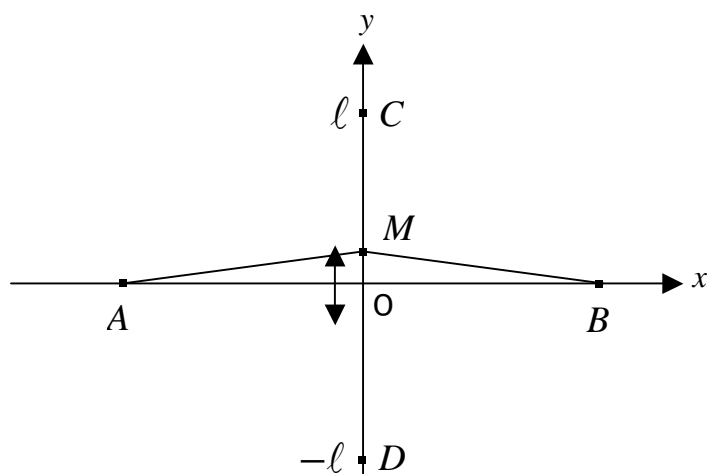


図 2.1 振動している荷電粒子  $M$

$m$	$10^{-5} \text{ kg}$
$q$	$10^{-4} \text{ C}$
$f$	$10 \text{ MHz}$
$d$	$6 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
$c$	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
$\pi$	$3$
$\ell$	$10 \text{ mm}$
$\epsilon_0$	$9 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
$\delta f / f$	$10^{-3}$

表 2.1

- 2) 図 2.2 に示す受信モデルにおいて、パルス信号  $s(t)$  が白色雑音  $n(t)$  とともに入力されたときに、サンプル時刻における信号対雑音電力比を最大化する最適受信フィルタを考える。

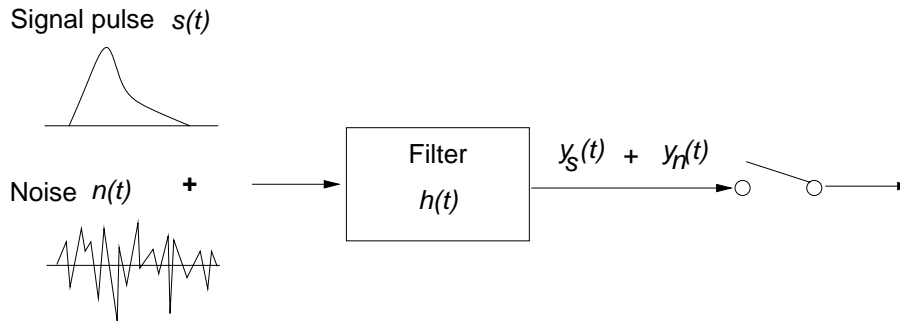


図 2.2 受信モデル

- a) 最適受信フィルタのインパルス応答を  $h(t)$  とする。最適受信フィルタ出力のパルス信号成分  $y_s(t)$  と雑音成分  $y_n(t)$  を各々式で表せ。
- b) パルス信号  $s(t)$  が  $0 \leq t \leq t_0$  以外において 0 のとき、最適受信フィルタのインパルス応答  $h(t)$  は、 $s(t_0 - t)$  で表すことができる。この最適受信フィルタを用いたときの  $t = t_0$  における信号対雑音電力比  $SNR$  を求めよ。ただし、この時の  $SNR$  は  $N_0$  を雑音の電力スペクトル密度として次の式で表せるとし、

$$SNR = \frac{y_s^2(t_0)}{\frac{1}{2}N_0 \int_0^{t_0} h^2(t_0 - \tau) d\tau}$$

次の  $E$  を用いて簡単な形で示せ。

$$E = \int_0^{t_0} s^2(t) dt$$

- c)  $t = 0$  で立ち上がる幅  $t_0$  の矩形パルスが  $s(t)$  として入力されたとき、最適受信フィルタ  $h(t)$  の出力波形を図示せよ。この際、横軸の時刻  $t$  の値を明確に記入せよ。
- d) c) の図に、信号対雑音電力比が最大であるサンプル時刻を書き入れよ。
- e) 次に間隔  $T$  でパルス信号 (信号継続時間  $> T$ ) が次々に受信される場合を考える。シンボル間干渉が生じないために  $s(t) * h(t)$  が満たすべき条件の名称を答えよ。ここで  $*$  は畳み込みを表す。
- f) e) の条件を満たす  $s(t) * h(t)$  についてインパルス応答の一例を図示せよ。この際、値が 0 となる時間を明示せよ。
- g) b) において、最適受信フィルタのインパルス応答  $h(t)$  は、 $s(t_0 - t)$  で表すことができることを証明せよ。(ヒント：以下の Cauchy-Schwarz の不等式を用いる)

$$\left( \int_{-\infty}^{\infty} g_1(t)g_2(t)dt \right)^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} g_1^2(t)dt \int_{-\infty}^{\infty} g_2^2(t)dt$$

## 3.

1) 半導体の電気伝導に関して以下の問いに答えよ。必要があれば以下の数値を用いよ。

素電荷  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C、電子の静止質量  $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$  kg

- a) いま、ある n 形半導体の移動度を決めている散乱機構には、フォノン散乱とイオン化不純物散乱の二種類があると仮定する。フォノン散乱機構のみで決まる移動度が  $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  で、イオン化不純物散乱のみで決まる移動度が  $500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  である。

この半導体の電子移動度と、電子の平均自由行程を求めよ。なお、移動度  $\mu$  は、緩和時間  $\tau$ 、有効質量  $m^*$ 、素電荷  $e$  と  $\mu = e\tau/m^*$  の関係があり、ここでは  $m^* = 0.25m_0$  である。また電子の熱速度は  $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$  とする。

- b) 電子の有効質量に関して、以下の問いに答えよ。

- 自由電子では、エネルギー  $E$  と運動量  $p$  の間には、どのような関係があるか。ここで自由電子の質量を  $m_0$  とする。
- ある半導体の伝導帯の下端付近では、電子のエネルギー  $E$  と運動量  $p$  の関係が  $E = 5p^2/m_0$  と表される。この半導体の電子の有効質量を求めよ。
- 伝導帯の下端付近のエネルギーが、 $E(p)$  のように運動量  $p$  の関数として与えられている場合には、電子の有効質量はどのように表されるか。

- c)  $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$  の P がドーピングされた Si がある。

- この Si は n 形か p 形か。また多数キャリア濃度はいくらか。
- 室温でのフェルミ準位は、禁制帯のどの位置にあるか計算せよ。また、バンド図を描いて、フェルミ準位の位置を示せ。なお、有効状態密度を  $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$  とし、室温で  $kT = 25 \text{ meV}$  とする。また  $\log(e) = 0.43$  ( $e = 2.718 \dots$ ) である。
- この半導体に B を均一にドーピングしていった。B 濃度を 0 から  $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$  まで変化させた場合、フェルミ準位がどのように変化するか、図 3.1 を解答用紙に描き、定性的に説明せよ。

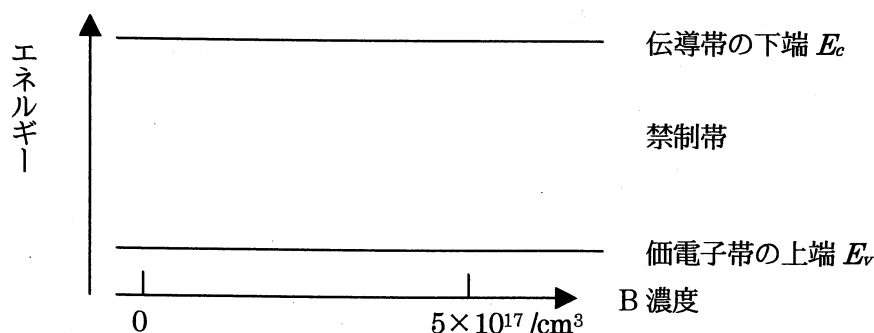


図 3.1 フェルミ準位の B 濃度依存性

【電気物性】(つづき)

2) 分子長軸方向に沿って双極子モーメント  $m$  [C·m]の大きさの永久双極子  $\vec{m}$  をもつ棒状分子が3次元空間に分布しているときの誘電分極に関して、以下の問に答えよ。ただし、単位体積あたりの分子数は  $N$  [1/m<sup>3</sup>]で、分子の電子分極は無視できるものとする。また、分子の向きは双極子  $\vec{m}$  の方向で定義するものとする。

- a) 図 3.2(a)のように、すべての分子が  $x$  軸正方向に向いているとき、
- $x$  軸正方向に形成される分極の大きさ  $P_x$  を求めよ。
  - $x$  軸正方向に電界  $E$  を加えたときの分極  $P_x$  の大きさを求めよ。
- b) 図 3.2(b) のように分子が無秩序に並んでいるとき、
- $x$  軸正方向とのなす角度が  $\theta$  である一つの分子による  $x$  軸正方向への双極子モーメントの大きさを求めよ。
  - 全体の分子のうち、 $x$  軸正方向とのなす角度  $\theta$  が  $0 \leq \theta \leq \theta_A (< \pi)$  の範囲にある分子が占める割合を求めよ。
  - $x$  軸正方向に形成される分極の大きさ  $P_x$  を求めよ。
- c) 図 3.2(b) のように分子が無秩序に並んでいるとき、 $x$  軸正方向に電界  $E$  を加えた。
- $x$  軸正方向とのなす角度が  $\theta$  である分子の電氣的ポテンシャルエネルギー  $W(\theta)$  は、 $\theta = \pi/2$  のときを 0 としてどのように記述されるか。
  - 分子がボルツマン分布しているとき、一つの分子が  $x$  軸正方向と  $\theta$  の角度をなす確率  $f(\theta)$  は  $f(\theta) = A \exp(-W(\theta)/kT)$  と記述される。このとき、一つの分子が  $x$  軸正方向になす双極子モーメントの平均値を、 $f(\theta)$  を用いてあらわせ。ただし、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度、 $A$  は定数である。
  - $W(\theta) \ll kT$  の関係が成立するとき、分極  $P_x$  の大きさを、 $N$ 、 $m$ 、 $k$ 、 $T$ 、 $E$  などを用いて記述せよ。また、この関係が成立しているときの分子の状態を説明せよ。
  - iii) で求められた分極  $P_x$  は  $N$  に (あ) ことが明らかになった。実際には  $N$  の増加とともにどのようなことが起きるか。(あ) に入るべき言葉として、  
(a) 比例する、(b) 比例しないのいずれかを選んだ後、解答せよ。

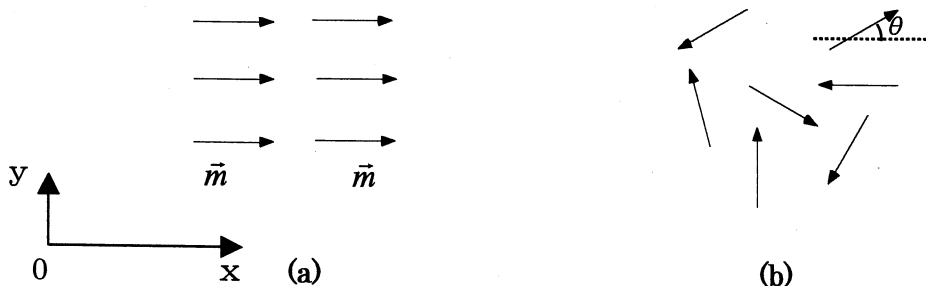


図 3.2



4 .

1) イネーブル端子付き 2 ビット同期式アップダウンカウンタを設計する。回路は表 4.1 の真理値表に従って動作するものとする。 $Q_1^{(n)}$  と  $Q_0^{(n)}$  は現在のカウンタの状態、

$Q_1^{(n+1)}$  と  $Q_0^{(n+1)}$  はクロック信号が入った後の次の状態を表す。表 4.1 内のは立ち上がりのエッジで状態が変化することを表す。

表4.1 真理値表

CLK	E	U	$Q_1^{(n)}$	$Q_0^{(n)}$	$Q_1^{(n+1)}$	$Q_0^{(n+1)}$
↑	1	1	0	0	0	1
↑	1	0	0	0	1	1
↑	0	1	0	0	0	0
↑	0	0	0	0	0	0
↑	1	1	0	1	1	0
↑	1	0	0	1	0	0
↑	0	1	0	1	0	1
↑	0	0	0	1	0	1
↑	1	1	1	0	1	1
↑	1	0	1	0	0	1
↑	0	1	1	0	1	0
↑	0	0	1	0	1	0
↑	1	1	1	1	0	0
↑	1	0	1	1	1	0
↑	0	1	1	1	1	1
↑	0	0	1	1	1	1

- a) 同期式カウンタとはどのような回路かを説明し、その特徴を非同期式カウンタと比較して述べよ。
- b) 図 4.1 は全体の回路構成である。図 4.1 の A1、A2 の部分の回路を 2 入力 NOR とインバータ回路のみを用いて示せ。ただし、できるだけ各部の素子の数が最小になるように回路を構成すること。
- c) 図 4.1 の A3 を CMOS 回路で構成することを考える。A3 部分を 3 入力 NOR とインバータで構成し、さらに p チャネル MOS トランジスタ、n チャネル MOS トランジスタを用いて回路図を描け。p チャネル MOS トランジスタ、n チャネル MOS トランジスタの記号として図 4.2 を用いること。
- d) b) で作成した回路を用いた場合、 $Q_0$  に関して現在の状態から次の状態に遷移する際、A1 部分における伝搬遅延の時間を求めよ。ただし、 $E=1$  で固定されており、2 入力 NOR 及びインバータの遅延時間はいずれも 5 ns とする。

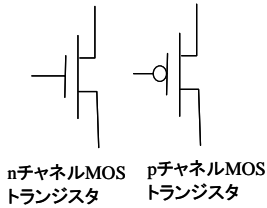
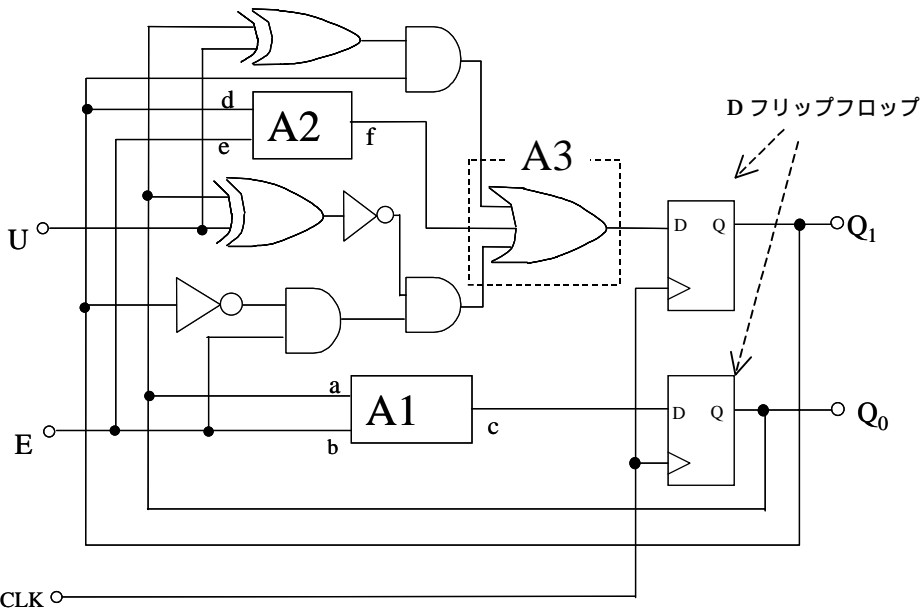


図 4.2 MOS トランジスタの記号

図 4.1 イネーブル端子付 2 ビットアップダウンカウンタの構成

[注:設問2)は専用の解答用紙を使用すること]

2) MOS ダイオードならびに MOS トランジスタについて以下の問に答えよ。

- a) 図 4.3 の測定回路で MOS ダイオードにバイアス電圧  $V$  ならびに十分高い周波数の小信号交流電圧源  $v$  を印加した時のキャパシタンス  $C$  を測定したところ、 $C - V$  特性曲線の概形は図 4.4 のようであった。バイアス電圧  $V=0V$  でフラットバンド状態であるとして以下の問に答えよ。

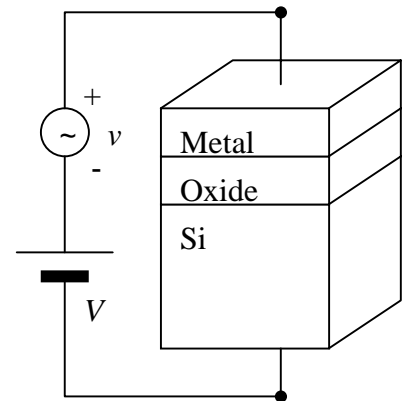


図 4.3

- i) この MOS ダイオードに使われている半導体は p 形であるか、n 形であるか答えよ。
- ii)  $C - V$  特性 ( 図 4.4 ) の点 T における MOS ダイオードのバンド図を描け。バンド図には半導体の価電子帯端  $E_V$ 、伝導帯端  $E_C$ 、フェルミレベル  $E_F$ 、真性フェルミレベル  $E_i$  を明記すること。さらに、点 T のバイアス電圧  $V_T$  がバンド図のどの部分に現われているか示せ。なお電子の素電荷は  $e$  とする。
- iii)  $C - V$  特性 ( 図 4.4 ) の領域 ならびに において、キャパシタンス  $C$  が一定となる理由を説明せよ。
- iv) 半導体の不純物濃度を高めた場合、 $C - V$  特性はどのように変化するか理由を添えて答えよ。
- v) 図 4.3 の測定回路の交流電圧源  $v$  の周波数を十分に下げると  $C - V$  特性曲線はどのように変化するか理由を添えて答えよ。

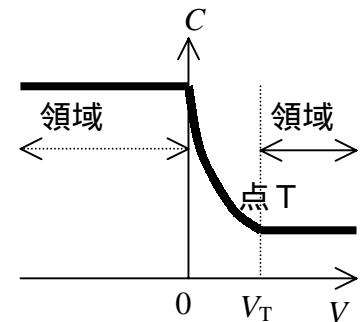


図 4.4

- b) 図 4.5 に示した構造の MOS トランジスタがある。端子 1 と端子 4 を  $0V$ 、端子 3 を  $1mV$  一定にして、端子 2 の電圧を  $-5V \sim +5V$  の範囲で変化させ、端子 3 に流れ込む電流  $I_3$  を測定した結果を図 4.6 に示す。

- i) 端子 4 は開放にして、端子 1 を  $0V$  一定、端子 3 の電圧を  $-3V \sim +3V$  の範囲で変化させた。端子 2 を  $+2V$  で一定にした場合と、 $+3V$  で一定にした場合の 2 通りについて、端子 3 に流れる電流  $I_3$  の概形を同じグラフにプロットせよ。
- ii) 図 4.6 の測定条件のうち、端子 4 の条件を変えて測定した。端子 4 に負の一定電圧を印加した場合、図 4.6 の特性はどのように変化するか理由を添えて答えよ。

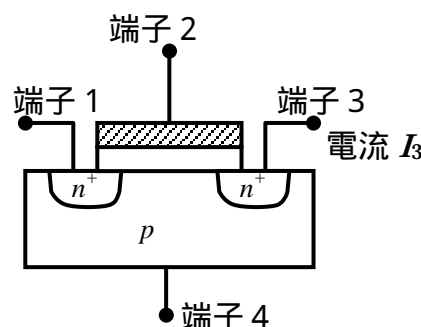


図 4.5

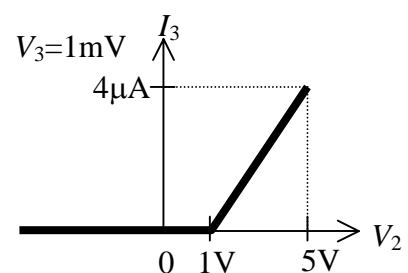


図 4.6

電子デバイス・回路システム 設問 2 ) 専用解答用紙

試験科目名	受験番号
電子デバイス・回路システム	

電子デバイス・回路システムの、設問 2 ) 専用の解答用紙です。その他の問題の解答は記入しないこと。無効になります。

4. 2) a)

i)	iii)
ii)	
iv)	
v)	

4. 2) b)

i)	ii)