

1. (50 点) 差動増幅回路について以下の設問に答えなさい。ただしトランジスタ  $Q_1$  と  $Q_2$ ,  $Q_3$  と  $Q_4$ , および  $Q_5$  と  $Q_6$  の特性はそれぞれそろっているものとする。

(1) (10 点) 図 1 (a) のトランジスタ交流等価回路を用いて, 同図 (b) の基本差動増幅回路の交流等価回路を描きなさい。

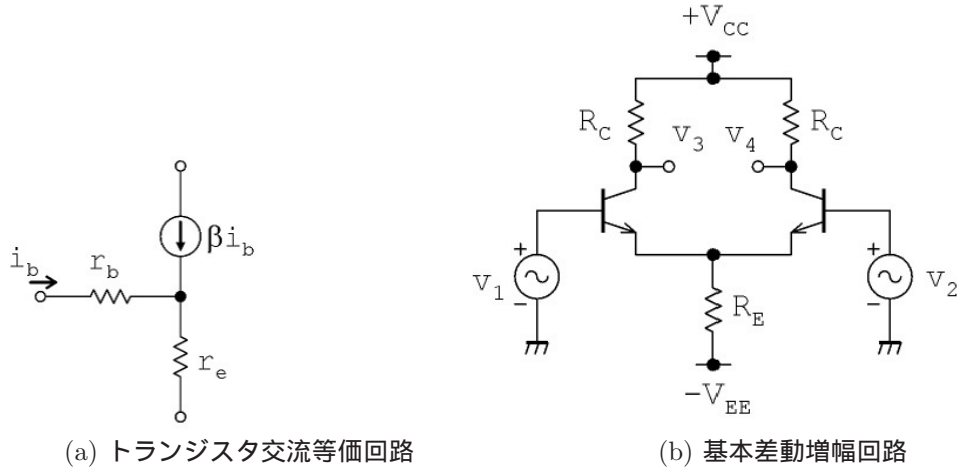
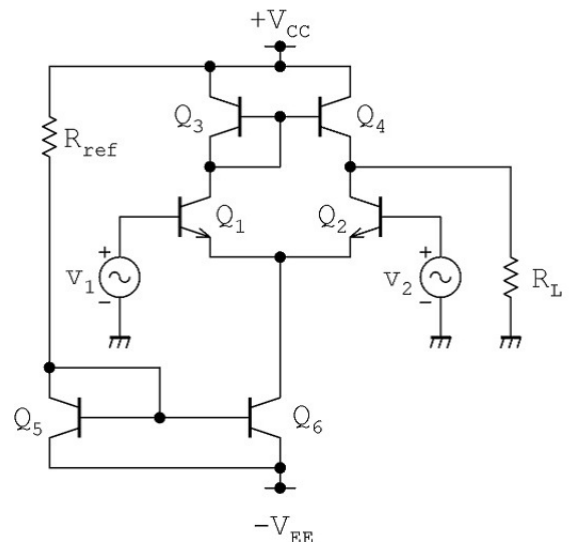


図 1: 差動増幅の基本回路

- (2) (12 点) 差動利得  $A_d$  と同相利得  $A_c$  を求めなさい。ただし,  $A_d = \frac{v_3 - v_4}{v_1 - v_2}$ ,  $A_c = \frac{v_3 + v_4}{v_1 + v_2}$
- (3) (4 点)  $A_d$  を大きく,  $A_c$  を小さくしたい。なぜか。その理由が A, B のいずれであるか, 答えなさい。  
 A. 温度は近接する 2 点では同じと考えられる。しかるに,  $A_c$  は電位の平均値できまるから, 温度変動分を表現する。一方,  $A_d$  は電位差できまるから, 温度変動分は減算で消え, 差動信号成分だけが増幅される。  
 B. 温度は近接する 2 点では逆極性で変化すると考えられる。しかるに,  $A_c$  は電位の平均値できまるから, 温度変動分の変換で消える。一方,  $A_d$  は電位差できまるから, 温度変動分は差動によって増幅される。
- (4) (4 点)  $A_d$  を大きく,  $A_c$  を小さくしたい。どうすればよいか。
- (5) (4 点) 右図の差動増幅集積回路について  $Q_3 \sim Q_6$  のエミッタの矢印を描きなさい。
- (6) (4 点)  $V_{CC} = V_{EE} = 3.3V$ ,  $V_{B'E} = 0.6V$  とする。 $Q_1$  と  $Q_2$  にそれぞれ  $1mA$  の直流バイアス電流を供給するには  $R_{ref}$  の値をいくらにすればよいか, 計算しなさい。
- (7) (4 点)  $Q_3$  と  $Q_4$  の役割についてあてはまる説明を A ~ E の中からいくつでも選びなさい。  
 A. エミッタバイアス抵抗を高くし, 同相利得を下げる  
 B. 電流源を形成し, 直流バイアスを供給する  
 C. 高抵抗の能動負荷を形成し, 高利得を得る  
 D. 電流をコピーして単一出力 (single-ended output) にする  
 E. 電圧をコピーして単一帰還 (single-ended feedback) にする
- (8) (4 点)  $Q_5$  と  $Q_6$  の役割についてあてはまる説明を A ~ E の中からいくつでも選びなさい。
- (9) (4 点)  $Q_1$ ,  $Q_2$  のコレクタ電流をそれぞれ  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  とかくとき, 負荷  $R_L$  に流れる電流を答えなさい。ただし, ベース電流は無視する。



**Solution:**

(1) 省略。(要点) 直流電圧源を接地に短絡する。  $i_{b1}, i_{b2}$  を明記する。

(2)

$$v_1 = r_b i_{b1} + r_e (1 + \beta) i_{b1} + R_E (1 + \beta) (i_{b1} + i_{b2}), \quad (1)$$

$$v_2 = r_b i_{b2} + r_e (1 + \beta) i_{b2} + R_E (1 + \beta) (i_{b1} + i_{b2}), \quad (2)$$

$$v_3 = -R_C \beta i_{b1}, \quad (3)$$

$$v_4 = -R_C \beta i_{b2}. \quad (4)$$

これより,  $A_d = \frac{-R_C \beta}{r_b + r_e (1 + \beta)}, \quad A_c = \frac{-R_C \beta}{r_b + r_e (1 + \beta) + 2R_E (1 + \beta)}$ .

(3) A (半導体は温度に敏感なので, 温度変動分を排除したいのだ。)

(4)  $R_C$  と  $R_E$  を大きくする。

(説明)  $CMRR = \frac{A_d}{A_c} = 1 + \frac{2R_E(1 + \beta)}{r_b + r_e(1 + \beta)} \simeq 1 + \frac{2R_E(1 + \beta)}{r_e(1 + \beta)} \simeq 1 + \frac{2R_E}{r_e}$  であるから,  $R_E$  を大きくすることが重要だと分かる。

なお, 集積回路では原理的に  $R_C \rightarrow \infty, R_E \rightarrow \infty$  とする。

すなわち,  $R_C$  も  $R_E$  も電流源で構成する。(ん? 電流源の内部インピーダンスは無限大だもんね。) こうして温度変化に敏感な半導体なのに, 温度変化に不感な電子回路が得られる。☺

(5) 下図のとおり。

(説明) エミッタの矢印は順方向直流電流の向きを示す。また, 電流は高電位の点から低電位の点に向かって流れる。しかるに, カレントミラーは, コピー元のトランジスタのコレクタとベースを接続して形成される。したがって,  $Q_3$  と  $Q_4$  は pnp トランジスタとする。  $Q_5$  と  $Q_6$  は npn トランジスタである。

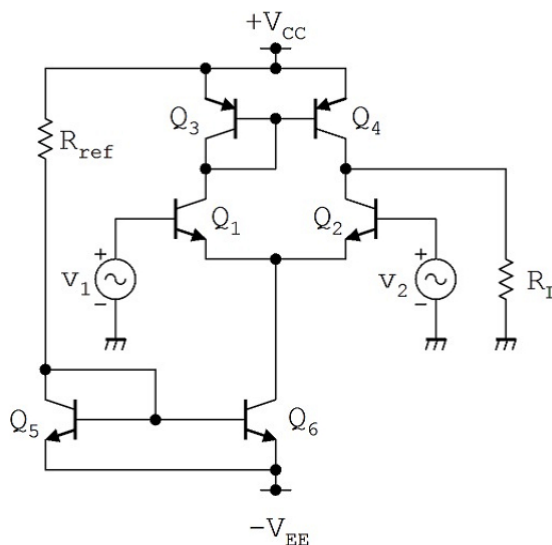
(6) 題意より,  $Q_6$  のコレクタ電流は 2mA である。したがって,

$$R_{ref} \times 2\text{mA} + 0.6 = 3.3 - (-3.3). \quad \text{ゆえに, } R_{ref} = 3 \text{ k}\Omega.$$

(7) C, D

(8) A, B

(9)  $I_{c1} \simeq I_{c3}$  であり, これが  $I_{c4}$  にコピーされる。一方,  $Q_2$  のコレクタにおける KCL (キルヒホッフの電流則) により,  $I_{c4} = I_{RL} + I_{c2}$ . したがって,  $I_{RL} = I_{c1} - I_{c2}$  である。



2. (32 点) 図 2 の発振回路について設問に答えなさい。

- (1) (4 点) この発振回路の名称は何か。
- (2) (4 点) ループ利得を定義するために帰還路を切断する。適切な切断箇所に × 印を記入しなさい。
- (3) (16 点) ループ利得  $AH$  を計算しなさい。
- (4) (4 点) 発振角周波数を計算しなさい。
- (5) (4 点) 発振の持続に必要な利得  $g_m r_d$  の下限を計算しなさい。

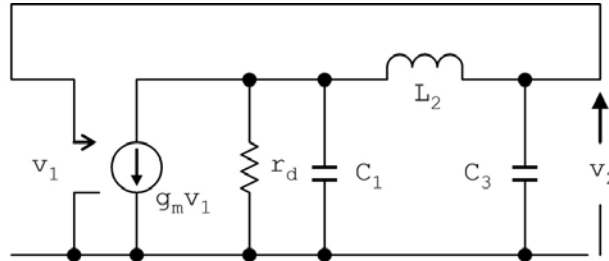
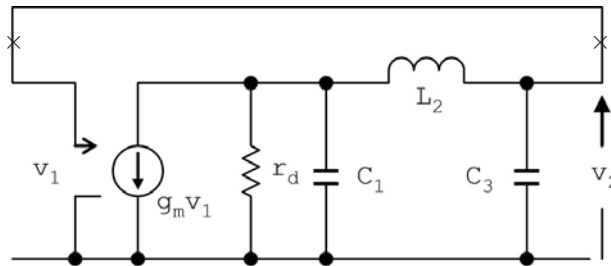


図 2: 発振回路.

**Solution:**

- (1) コルピッツ発振回路 . (Colpitts Oscillator)
- (2) 電圧制御電流源の入力インピーダンスは無限大であるから流れ込む電流は 0 であり, この部分を切断しても電流分布は不変である. したがって, 回路図で最上部の帰還配線を切断する. そして,  $v_1 = v_2$  であるような独立電圧源  $v_1$  で入力端子対 (ゲートとソース間) を駆動すると, 電圧分布も切断前と同一である.



- (3) 電流源  $g_m v_1$  と  $r_d$  と  $C_1$  の並列インピーダンスを, 電圧源と並列インピーダンスの直列接続による等価電源に書き換える. 並列インピーダンスを  $Z_1$  とかくと,  $Z_1 = \frac{r_d}{1 + sC_1 r_d}$ . テブナンの等価電源定理により, この発振回路は電圧源  $-g_m v_1 Z_1$  と  $Z_1, L_2, \text{ および } C_3$  の直列接続として表わされる. したがって,

$$v_2 = \frac{\frac{1}{sC_3} \left( -g_m v_1 \frac{r_d}{1 + sC_1 r_d} \right)}{\frac{r_d}{1 + sC_1 r_d} + sL_2 + \frac{1}{sC_3}} \quad (5)$$

ループ利得を  $AH = \frac{v_2}{v_1}$  と定義すると,

$$AH = \frac{-g_m r_d}{r_d s C_3 + s L_2 (1 + s C_1 r_d) s C_3 + 1 + s C_1 r_d} \quad (6)$$

$$= \frac{-g_m r_d}{(1 + s^2 L_2 C_3) + r_d (s C_3 + s C_1 + s^3 L_2 C_1 C_3)} \quad (7)$$

- (4)  $s = j\omega$  において定常応答を調べる.  $\text{Im}[AH] = 0$  より,

$$C_3 + C_1 + s^2 L_2 C_1 C_3 = 0. \quad \text{ゆえに, } \omega^2 = \frac{C_3 + C_1}{L_2 C_1 C_3} = \frac{1}{L_2} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} \right).$$

- (5)  $\text{Re}[AH] \geq 1$  より,  $\frac{-g_m r_d}{1 - \frac{1}{L_2} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} \right) L_2 C_3} = \frac{g_m r_d}{\frac{C_3}{C_1}} \geq 1.$  つまり,  $g_m r_d \geq \frac{C_3}{C_1}.$

3. (8 点) 図 3 の演算増幅器 (OPA) 回路において出力電圧  $V_o$  を求めなさい。

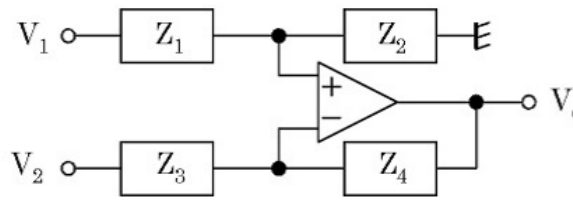


図 3: 演算増幅器回路

**Solution:**

(1) ミルマンの定理により, OPA の 2 つの入力端子電位を求める。そして仮想接地により, OPA の入力端子間電圧がゼロであるとして, 方程式を立てる。すなわち,

$$\frac{Y_1 V_1}{Y_1 + Y_2} - \frac{Y_3 V_2 + Y_4 V_0}{Y_3 + Y_4} = 0.$$

両辺に  $Y_3 + Y_4$  を乗算すると,  $\frac{Y_3 + Y_4}{Y_1 + Y_2} Y_1 V_1 - Y_3 V_2 = Y_4 V_0$ . ゆえに,

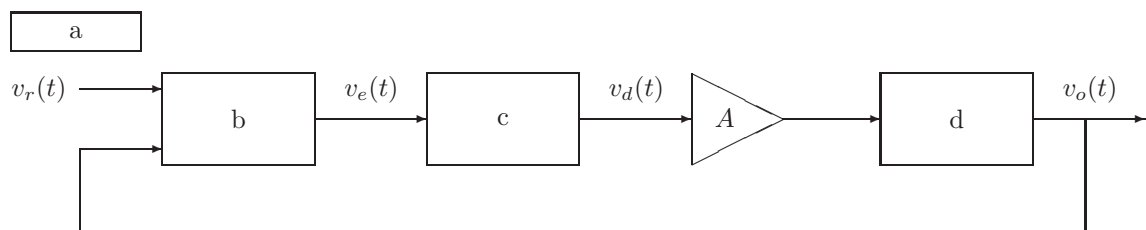
$$V_0 = \left( \frac{Y_3 + Y_4}{Y_1 + Y_2} \right) \frac{Y_1}{Y_4} V_1 - \frac{Y_3}{Y_4} V_2.$$

必要ないが, インピーダンスで書けば,

$$V_0 = \left( \frac{Z_3 + Z_4}{Z_1 + Z_2} \right) \frac{Z_2}{Z_3} V_1 - \frac{Z_4}{Z_3} V_2.$$

4. (10 点) 図 4 は PLL (Phase-Locked Loop, 位相同期ループ) のブロック図と説明文である。空欄 a, b, c, d, e に該当する言葉を次の語群から選びなさい。

位相同期器	位相比較器	位相乗算器	UFO	VGA	$\pi$
基準信号	誤差信号	還送差信号	USO	VCO	$\pi/2$
発振出力	直流差分信号	LTE	LPF	HPF	$\pi/4$



PLL がロックすると,  $v_r(t)$  と  $v_o(t)$  の位相差が  になる。

図 4: PLL (Phase-Locked Loop).

**Solution:** a: 基準信号, b: 位相比較器, c: LPF, d: VCO, e:  $\pi/2$

♡ 講義では分かり易い説明を心がけ, 板書を工夫したつもりです。講義を受けた感想とか, この分野に対する興味や思いなどを聞かせてください。

♡ 受講, ありがとうございます。問題用紙は持ち帰ってください。