

1^{AMPLIFICATEUR CHARGE PAR MIROIR DE COURANT}

1. On donne le schéma de principe en figure 1, dans lequel le transistor est centré. En négligeant dans cette première question, l'effet de la résistance interne du transistor r_{ce} , calculer le gain en tension $A = \frac{v_s}{v_e}$ en fonction de V_{CC1} et de U_T .

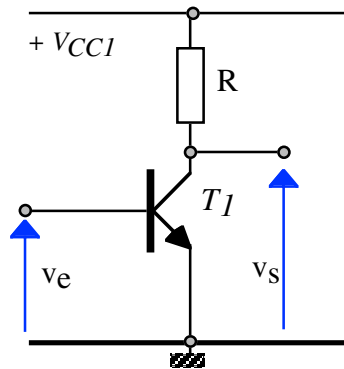


Figure 1

2. Dans les circuits intégrés, on cherche, pour plusieurs raisons, à avoir un gain en tension par étage de quelques milliers. Calculer, d'après la question précédente, la valeur de V_{CC1} nécessaire pour obtenir une amplification de 2000, le montage travaillant à la température ambiante de 25°C .
3. Dans le but de diminuer cette tension jugée excessive, on va remplacer la résistance R par une charge dynamique (ou charge active), constituée par le transistor de sortie d'un miroir de courant (figure 2).

Calculer le rapport $\frac{I_0}{I_{ref}}$ en fonction des paramètres des transistors. Les deux transistors sont au silicium et identiques.

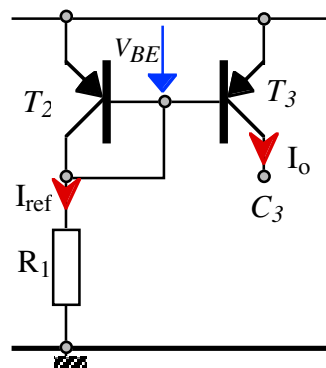


Figure 2

4. Montrer que I_{ref} est à peu près égal à $\frac{V_{CC2}}{R_1}$. Calculer alors la sensibilité S du courant I_o aux variations de V_{CC2} , c'est à dire le rapport du pourcentage de variation de I_o au pourcentage de variation de V_{CC2} qui l'a provoquée, soit :

$$S = \frac{\frac{\Delta I_o}{I_o}}{\frac{\Delta V_{CC2}}{V_{CC2}}} = \frac{\Delta I_o}{\Delta V_{CC2}} \frac{V_{CC2}}{I_o}$$

5. Dessiner le schéma équivalent du miroir aux petites variations, et déterminer en utilisant la méthode de l'ohmmètre, la résistance interne r_o équivalente au dipôle vu entre le collecteur de T_3 et la masse. Faire l'application numérique avec : tension de Early $V_A = 50$ V, $I_{ref} = 0,6$ mA et $\beta = 100$.
6. On branche maintenant le miroir en charge de T_1 (figure 3). T_1 est parfaitement complémentaire de T_2 et T_3 . Donner le schéma équivalent global aux petites variations, en remplaçant le miroir (partie encadrée) par le dipôle équivalent déterminé à la 5^{ème} question.

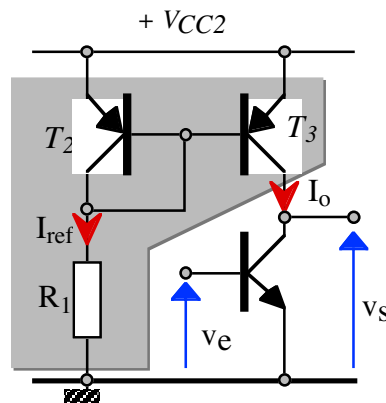


Figure 3

7. Déterminer littéralement le nouveau gain $A = \frac{v_s}{v_e}$.
8. L'écrire en fonction de V_A et U_T , et faire l'application numérique.
9. La sensibilité S étant jugée excessive, et le gain étant limité par la valeur trop faible de la résistance de sortie r_o , on imagine un miroir amélioré, conforme au schéma de la figure 4, où les transistors T_2 et T_3 sont les mêmes que les précédents.

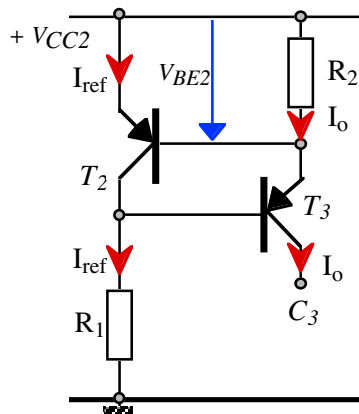


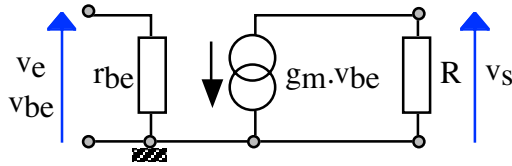
Figure 4

En négligeant les courants de base, écrire l'expression de I_{ref} en fonction de V_{BE2} .
En déduire l'expression de I_o en fonction de I_{ref} , U_T , R_2 et I_{SBC} (le courant de saturation de la jonction de collecteur).

10. On donne $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $U_T = 25 \text{ mV}$ et $I_{SBC} = 10^{-14} \text{ A}$. Tracer le graphe du courant I_o en fonction de I_{ref} pour I_{ref} compris entre 0 et 2 mA.
11. On donne $V_{CC2} = 15 \text{ V}$. Calculer la nouvelle valeur de R_1 nécessaire pour avoir $I_o = 0,6 \text{ mA}$. Donner la valeur de R_1 normalisée à 10% la plus proche.
12. A partir de l'expression de la 9^{ème} question, calculer la valeur de la sensibilité S pour ce nouveau miroir. Faire l'A.N.
13. Donner le schéma équivalent complet de ce miroir, aux petites variations.
14. On va chercher la résistance r_o du dipôle équivalent à ce nouveau miroir. R_1 et r_{ce2} ayant une valeur assez grande pour être négligées, écrire les deux équations aux nœuds régissant le montage.
15. Calculer la nouvelle valeur de r_o .
16. En donner une expression approchée, compte tenu des valeurs numériques habituelles des paramètres : $\beta = 100$. Faire l'A .N.
17. Trouver alors la nouvelle expression du gain de l'amplificateur. Faire l'A.N.

CORRECTION

1. Schéma aux variations du montage :



$$\frac{v_s}{v_e} = -g_m R \text{ avec la transconductance : } g_m = \frac{I_C}{U_T}.$$

Si le transistor est centré sur sa droite de charge, alors : $I_C = \frac{V_{CC1}}{2R}$

$$\frac{v_s}{v_e} = -\frac{V_{CC1}}{2U_T}$$

On rappelle que : $U_T = 25 \text{ mV}$ à 25°C .

2. Pour un gain de 2000, il faut choisir $V_{CC1} = 100 \text{ V}$!

3. Les transistors ont la même tension V_{BE} et obéissent à la loi : $I_C = I_{SBC} \exp\left(\frac{|V_{BE}|}{U_T}\right)$. Les transistors intégrés sont aussi identiques et possèdent donc le même courant I_{SBC} . Ce miroir de courant à transistors PNP est classique, aussi on trouvera facilement :

$$I_o = I_{ref} \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

Si le gain en courant β est suffisamment grand alors : $I_o \approx I_{ref}$

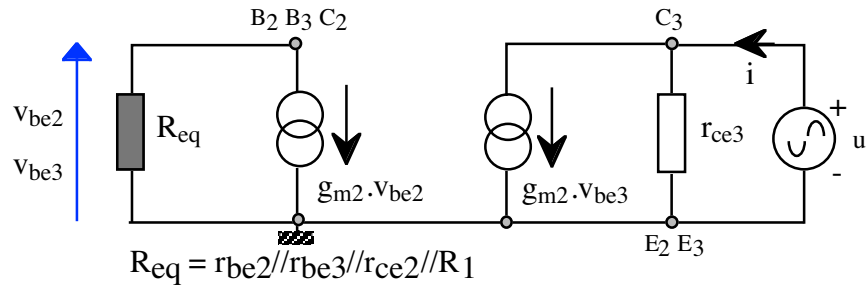
4. $I_{ref} = \frac{V_{CC2} - V_{BE}}{R_1} \approx \frac{V_{CC2}}{R_1}$ dans la mesure où : $V_{BE} \ll V_{CC2}$.

Le miroir de courant est tel que : $I_o \approx \frac{V_{CC2}}{R_1}$

$$dI_{ref} = dI_o = \frac{dV_{CC2}}{R_1}$$

On en déduit : $S = 1$. La sensibilité de I_o aux variations de V_{CC2} est importante.

5. Schéma équivalent du miroir aux petites variations.



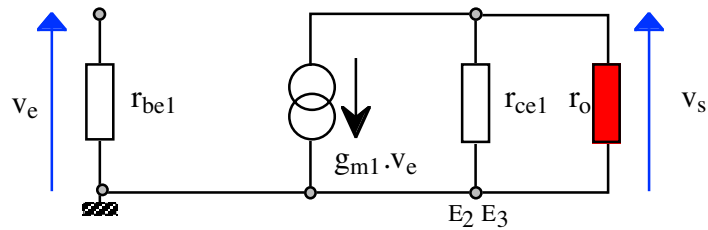
Selon la méthode de l'ohmmètre, la résistance r_o est égale au rapport de u/i .

$v_{be2} = v_{be3} = -R_{eq} g_{m2} v_{be2}$. Cette équation a pour solution : $v_{be2} = v_{be3} = 0$

Dans ces conditions : $r_o = r_{ce3}$.

$$r_o \approx \frac{V_A}{I_o} = 83k\Omega$$

6. Nouveau schéma équivalent :



7.

$$A = \frac{v_s}{v_e} = -g_{m1} (r_{ce1} // r_o)$$

8. Gain en tension :

$$A = -\frac{I_o}{U_T} \left(\frac{V_A}{2I_o} \right) = -\frac{V_A}{2U_T} = -1000$$

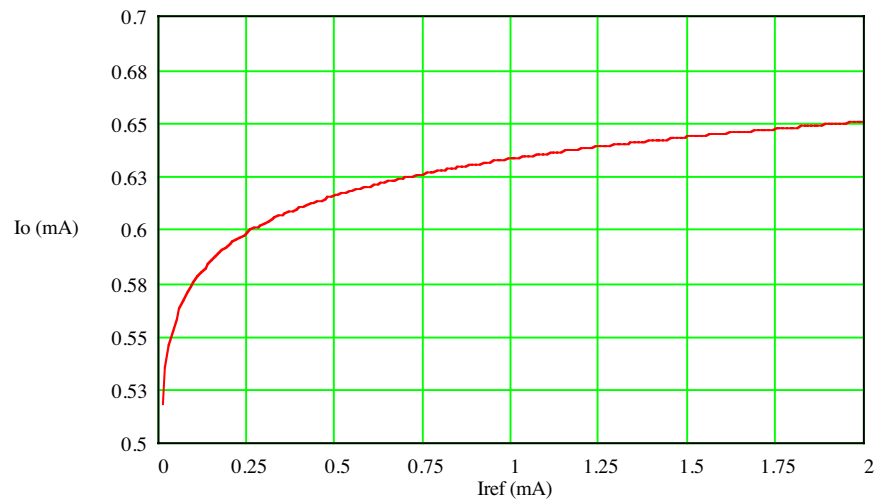
Ce gain en tension est proportionnel à la tension de Early des transistors.

9. Pour le transistor T_2 : $I_{ref} = I_{SBC} \exp\left(\frac{|V_{BE2}|}{U_T}\right)$ avec : $V_{BE2} = -R_2 I_o$.

On en déduit :

$$I_o = \frac{U_T}{R_2} \ln\left(\frac{I_{ref}}{I_{SBC}}\right)$$

10. Graphe de I_o en fonction de I_{ref} :



11. On obtient $I_{ref} = 0,265$ mA. $R_1 = \frac{V_{CC2} - 2|V_{BE}|}{I_{ref}}$ soit : $R_{1n} = 56k\Omega$.

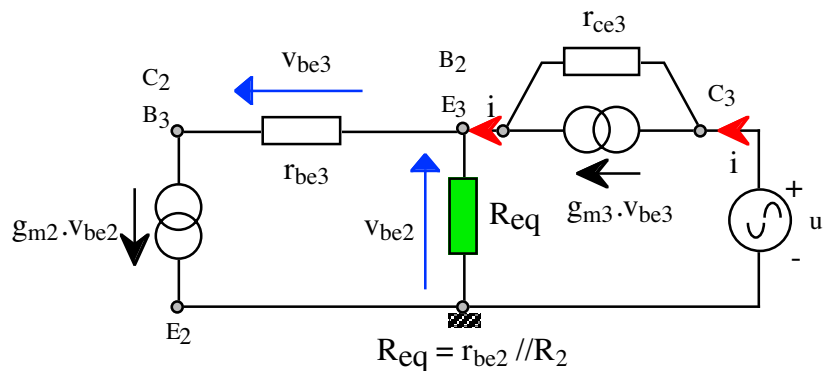
12. Sachant que : $I_{ref} \approx \frac{V_{CC2}}{R_1}$, on peut écrire : $I_o = \frac{U_T}{R_2} \ln\left(\frac{V_{CC2}}{R_1 I_{SBC}}\right)$

$$\frac{dI_o}{dV_{CC2}} = \frac{U_T}{R_2 V_{CC2}}$$

La sensibilité s'exprime alors : $S = \frac{U_T}{R_2 I_o} = 4,2 \cdot 10^{-2}$

Le montage est maintenant assez peu sensible aux variations de V_{CC2} .

13. Schéma équivalent avec R_1 et r_{ce2} négligés. Utilisation de la méthode de l'ohmmètre pour déterminer la résistance de sortie.



14. Nœud C_2 : $i - g_{m3} v_{be3} - \frac{u - v_{be2}}{r_{ce3}} = 0$ (1) Nœud E_3 : $i - g_{m2} v_{be2} - \frac{v_{be2}}{R_{eq}} = 0$ (2)

15. La tension v_{be3} s'exprime selon : $v_{be3} = -r_{be3} \cdot g_{m2} \cdot v_{be2}$

$$(1) \rightarrow i + g_{m3} g_{m2} v_{be2} - \frac{u - v_{be2}}{r_{ce3}} = 0$$

$$(2) \rightarrow v_{be2} = \frac{i}{g_{m2} + \frac{1}{R_{eq}}}$$

Conduisant à :

$$r_o = \frac{u}{i} = r_{ce3} \left[1 + \frac{g_{m2} g_{m3} r_{be3} + \frac{1}{r_{ce3}}}{g_{m2} + \frac{1}{R_{eq}}} \right]$$

16. Dans l'expression précédente on remarquera que : $g_{m3} v_{be3} = \beta$ le gain en courant.

$$r_{be2} = 9,4 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m2} = 10,6 \text{ mS}$$

$$R_{eq} = 904 \Omega$$

On peut alors écrire approximativement : $r_o = \frac{u}{i} = r_{ce3} [1 + \beta] = 8,4 \text{ M}\Omega$

17. Nouveau gain en tension : $A = -g_m (r_{ce1} // r_o) \approx -g_m r_{ce1} = -2000$