



**MATERIAUX ET
NANOTECHNOLOGIES**

Cours de physique des composants à semi-conducteurs
TD n°4 : Le transistor bipolaire à jonctions

Exercice I

On considère un transistor P⁺NP. La section du dispositif est $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$. On suppose que les régions P⁺ et P des diodes Emetteur-Base (E-B) et Collecteur-Base (C-B) sont **courtes** et que l'on travaille toujours en régime de faible injection.

On prendra par ailleurs : $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $V_T = 26 \text{ mV}$, $\epsilon = 10^{-12} \text{ F/cm}$. Les caractéristiques des trois régions sont :

Région P ⁺	Région N	Région P
$N_A^+ = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
$\mu_p = 80 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
$\mu_n = 150 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
$X_E = 5 \text{ }\mu\text{m}$	$X_B = 5 \text{ }\mu\text{m}$	$X_C = 10 \text{ }\mu\text{m}$
	$\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$	

I. Tous les phénomènes de recombinaison sont négligés

1) Ecrire les équations d'Ebers-Moll en précisant les conventions de signe concernant les courants et les tensions. A quoi se réduisent ces équations lorsque le transistor est en régime normal de fonctionnement. Expliquer qualitativement l'effet transistor.

2) En régime normal de fonctionnement, écrire l'expression du courant de base et des gains en courant α et β . Quelle relation y a-t-il entre l'efficacité d'injection γ_E et β ?

3) Sans tenir compte des zones dépeuplées des jonctions, vérifier que la base est bien courte et calculer les courants I_{snE} , I_{snC} et I_{sp} qui interviennent dans les équations ou expressions précédentes. En déduire les valeurs de α et β .

4) Pour un courant émetteur $I_E = 1 \text{ mA}$, déterminer V_{EB} et l'étendue de la zone de charge d'espace de la jonction E-B dans la base. Ces grandeurs varient-elles beaucoup lorsque I_E varie ?

5) Les zones désertes des jonctions ne sont plus négligées, en particulier leur extension dans la base. Déterminer pour $I_E = 1$ mA et $V_{CB} = -1, -5, -10, -20$ V les nouvelles valeurs de β .

II. Les recombinaisons dans la base et dans la ZCE de la jonction E-B sont maintenant prises en considération

- 1) Exprimer β en fonction de l'efficacité d'injection, du facteur de transport dans la base et du courant de recombinaison dans la zone déserte.
- 2) Déterminer les valeurs de β pour $V_{CE} = -1, -5, -10, -20$ V et $I_E \approx 1$ mA. En utilisant les valeurs de β calculées, tracer la caractéristique $I_C = f(V_{CE})$ pour $I_B = 10$ μ A. Commenter ce tracé. Quelles approximations fait-on ? Tracer sur le graphique la frontière séparant le régime normal du régime saturé correspondant à $V_{CB} = 0$.
- 3) Evaluer la résistance du collecteur $R_{CC'}$ pour $V_{CB} = -5$ V.
- 4) Evaluer les paramètres hybrides h_{11} , h_{21} , h_{22} pour le point de fonctionnement $I_B = 10$ μ A et $V_{CE} = -5$ V. Tracer le schéma équivalent sur lequel figurera $R_{CC'}$ (on supposera en revanche que $h_{12} = 0$).
- 5) Donner un ordre de grandeur du gain en courant β en régime inversé.
- 6) Discuter les défauts de ce transistor et des améliorations possibles.
- 7) En supposant que $V_{CB}/V_T \ll -1$, donner les expressions du courant I_C lorsque $I_E = 0$ puis $I_B = 0$ (on néglige pour cette question tout phénomène de recombinaison).
- 8) Calculer pour $I_C = 1$ mA et $V_{CE} = -5$ V les capacités des jonctions.

Exercice II

On considère un transistor P⁺NP de section $A = 10^{-4}$ cm² dont les caractéristiques des trois régions sont :

Région P ⁺	Région N	Région P
$N_A^+ = 10^{18}$ cm ⁻³	$N_D = 10^{16}$ cm ⁻³	$N_A = 5 \cdot 10^{15}$ cm ⁻³
$\mu_p = 80$ cm ² /V.s	$\mu_p = 1000$ cm ² /V.s	$\mu_p = 450$ cm ² /V.s
$\mu_n = 150$ cm ² /V.s	$\mu_n = 400$ cm ² /V.s	$\mu_n = 1200$ cm ² /V.s
$X_E = 5$ μ m	$X_B = 4$ μ m	$X_C = 10$ μ m
	$\tau_p = 10^{-6}$ s	

Hypothèses : régions courtes, faible injection, pas de recombinaisons dans la zone de transition.

- 1) Ecrire les équations d'Ebers-Moll en régime normal de fonctionnement.
- 2) Calculer l'efficacité d'injection et le facteur de transport dans la base.
- 3) Ecrire le gain en courant β en régime normal, en négligeant les courants de recombinaison dans la zone de transition émetteur-base (E-B).
- 4) Pour un courant $I_E = 1$ mA, calculer V_{EB} et l'extension W_{T1} de la zone de charge d'espace.
- 5) Calculer la capacité émetteur base $C_S = C_{SE} + C_{SB}$. Calculer les capacités de transition C_{TE} et C_{TC} pour $V_{CB} = -5$ V. En déduire la capacité totale C_{TT} .
- 6) Calculer la pulsation de coupure ω_β . Calculer la résistance $R_{CC'}$.