

Halbleiterbauelemente

Übungsserie 7: *Bipolartransistor*

Musterlösungen

16. Mai 2011

Aufgabe 1: Bipolartransistor im aktiven Verstärkerbetrieb

1. Siehe Abbildung 1.
2. Mit der Formel $L = \sqrt{D \cdot \tau} = \sqrt{V_t \mu \cdot \tau}$ (Einstein Relation) kann man die gewünschten Grössen berechnen. Bei 300 K: $V_t \simeq 25.9 \text{ mV}$, $L_e = \sqrt{V_t \mu_p \tau_{p0}} \simeq 0.466 \mu\text{m}$, $L_b = \sqrt{V_t \mu_n \tau_{n0}} \simeq 13.3 \mu\text{m}$, $L_c = \sqrt{V_t \mu_p \tau_{p0}} \simeq 56.5 \mu\text{m}$.

Um zu wissen, ob die Rekombination in einem gegebenen Bahngebiet eine Rolle spielt, muss man die Weite W des Gebietes mit der Diffusionslänge L der Minoritätsträger im selben Gebiet vergleichen. Solange $W/L \ll 1$, ist die Rekombination vernachlässigbar. In unserem konkreten NPN-Transistor findet man: $W_e/L_e \simeq 12.9$, $W_b/L_b \simeq 0.06$, $W_c/L_c \simeq 0.15$. Deshalb wird die Rekombination lediglich im Emitter eine Rolle spielen.

3. Nach Definition ist $\beta = j_c/j_b \approx j_{b,n}/j_{e,p}$. Wir müssen deshalb die Stromdichte $j_{e,p}$ der Löcher im Emitter sowie die Stromdichte $j_{b,n}$ der Elektronen in der Basis berechnen, **und zwar am Rand der RLZ zwischen Emitter und Basis**. Um diese Ströme zu berechnen, brauchen wir die effektive Emitterweite $W_{e,eff}$ sowie die effektive Basisweite $W_{b,eff}$. Nach der Formel 7.28 ist die Breite $x_{RLZ,e}$ der RLZ auf der Emitterseite:

$$x_{RLZ,e} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}-V_{be})}{q} \frac{N_A}{N_D} \frac{1}{N_A+N_D}}, \text{ wobei}$$

$$V_{bi} = V_t \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \simeq 0.954 \text{ V. Mit den numerischen Werten } V_{be} = -V_{eb} = 0.8 \text{ V,}$$

$$N_D = 10^{19} \text{ und } N_A = 10^{17}, \text{ findet man } W_{e,eff} = W_e - x_{RLZ,e} \simeq 5.999 \mu\text{m.}$$

$$\text{Analog ergibt sich: } x_{RLZ,b1} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}-V_{be})}{q} \frac{N_D}{N_A} \frac{1}{N_A+N_D}} \simeq 0.044 \mu\text{m.}$$

Die basisseitige Breite der **RLZ zwischen Basis und Kollektor** ist

$$x_{RLZ,b2} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}'+V_{cb})}{q} \frac{N_D'}{N_A} \frac{1}{N_A+N_D'}} \simeq 4.90 \cdot 10^{-3} \mu\text{m, wobei } V_{bi}' = V_t \ln\left(\frac{N_D' N_A}{n_i^2}\right) \simeq 0.66 \text{ V.}$$

Somit ist $W_{b,eff} = W_b - x_{RLZ,b1} - x_{RLZ,b2} \simeq 0.75 \mu\text{m}$. Jetzt können wir $j_{e,p}$ und $j_{b,n}$ berechnen. Da im Emitter die Rekombination eine Rolle spielt (Vgl. Aufgabe 1.3), brauchen wir die

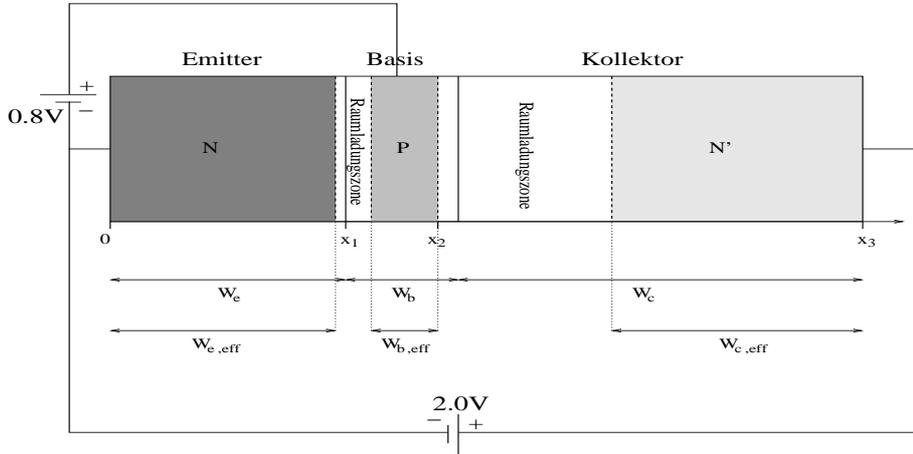


Abbildung 1: NPN' Transistor

Formel 8.27 (Neamen), um die Dichte der Überschussladungen von Minoritätsträgern zu berechnen:

$$\delta p_e(x) = p_{e0} \left[\exp\left(\frac{V_{be}}{V_t}\right) - 1 \right] \frac{\sinh(x/L_e)}{\sinh(W_{e,eff}/L_e)}. \quad (1)$$

In der Basis ist die Rekombination vernachlässigbar, deshalb dürfen wir die linearisierte Formel für $\delta n_b(x)$ benützen. Am Rande der RLZ zum Kollektor hin fällt die Elektronenkonzentration auf $n_{b0} \cdot \exp(V_{bc}/V_t) \approx 0$ ab. Daher kriegen wir (für das x-Koordinatensystem gemäss Abb.1):

$$\delta n_b(x) = n_{b0} \left[\exp\left(\frac{V_{be}}{V_t}\right) - 1 \right] - n_{b0} \exp\left(\frac{V_{be}}{V_t}\right) \cdot \frac{x - x_2 + W_{b,eff}}{W_{b,eff}}. \quad (2)$$

Emitter Diffusionsstrom (Funktion von x wegen der Rekombination):

$$j_{e,p}(x) := -qD_{e,p} \frac{d\delta p_e}{dx} = -qV_t \mu_p p_{e0} \left[\exp\left(\frac{V_{be}}{V_t}\right) - 1 \right] \frac{\cosh(x/L_e)}{\sinh(W_{e,eff}/L_e)} \frac{1}{L_e} \quad (3)$$

wobei $p_{e0} \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$.

Basis Diffusionsstrom (unabhängig von x , da Rekombination vernachlässigbar):

$$j_{b,n} := qD_{b,n} \frac{d\delta n_b}{dx} = -qV_t \mu_n n_{b0} \exp\left(\frac{V_{be}}{V_t}\right) \cdot \frac{1}{W_{b,eff}}. \quad (4)$$

wobei $n_{b0} \simeq \frac{n_i^2}{N_A}$.

Damit ergibt sich (mit $[e^{V_{be}/V_t} - 1] \approx e^{V_{be}/V_t}$):

$$\begin{aligned} \beta &= j_c/j_b = j_{b,n}/j_{e,p}(W_{e,eff}) \\ &\simeq \frac{\mu_n L_e \sinh(W_{e,eff}/L_e) N_D}{\mu_p W_{b,eff} \cosh(W_{e,eff}/L_e) N_A} = \frac{\mu_n L_e \tanh(W_{e,eff}/L_e) N_D}{\mu_p W_{b,eff} N_A} \simeq 373 \end{aligned} \quad (5)$$

Aufgabe 2: Parameteranpassung für einen integrierten NPN-Bipolartransistor

1. Da es sich um ein NPN Bauteil handelt, sind die Minoritäten in der Basis die *Elektronen*. Ihre Diffusionslänge ist

$$L_B = L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{ cm} . \quad (6)$$

Somit muss die Basis eine Breite von

$$W_B = \text{acosh} \left(\frac{1}{\alpha_T} \right) \cdot L_B = 0.85 \mu\text{m} \quad (7)$$

aufweisen.

2. Die Durchbruchspannung ist dann

$$V_{pt} = \frac{eW_B^2}{2\epsilon_0\epsilon_{Si}} \cdot \frac{N_B(N_C + N_B)}{N_C} - V_t \ln \left(\frac{N_C N_B}{n_i^2} \right) = 60.7 \text{ V} . \quad (8)$$

3. Es soll nun $V_{pt} = 65 \text{ V}$ sein. Um Gl. (8) analytisch nach N_C auflösen zu können, nehmen wir das eingebaute Potential des Basis-Kollektor-Überganges $V_{bi} = 0.66 \text{ V}$ als konstant (unabhängig von N_C) an. Wir erhalten dann

$$N_C \approx N_B \left(\frac{2(V_{pt} + V_{bi})\epsilon_0\epsilon_{Si}}{eW_B^2 N_B} - 1 \right)^{-1} = 9.3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} . \quad (9)$$

Der Kollektor muss folglich leicht schwächer dotiert werden, als dies Ihr Mitarbeiter vorschlug.