

Musterlösung zu Übungsblatt 11

Aufgabe 1) Transistor

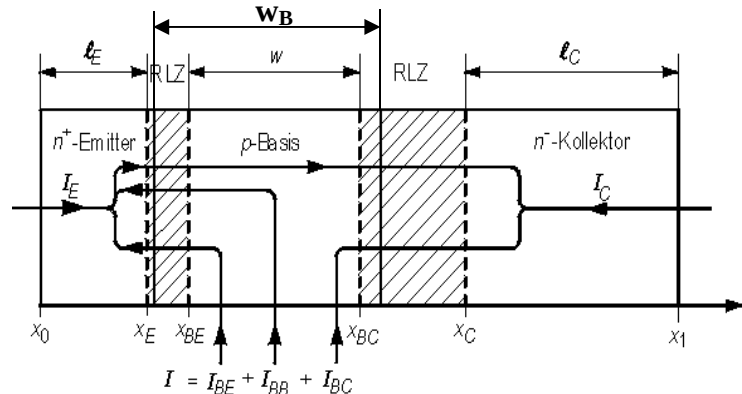
Betrachten Sie einen npn-Transistor, Fig. 1, aus Silizium, der in Emitter, Basis und Kollektor jeweils die folgenden Dotierdichten aufweist:

$n_{DE} = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $n_{DC} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,
 $n_{AB} = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Die aktive Querschnittsfläche des pn Überganges ist $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$, physikalische Breite der Basis ist $w_B = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$ und die Breite des Emitters beträgt $l_E = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$. Die Diffusionslängen im Kollektor, Emitter und der Basis sind gegeben durch

$L_{pC} = L_{pE} = 30 \text{ } \mu\text{m}$, $L_{nB} = 50 \text{ } \mu\text{m}$, und die entsprechenden Minoritätslebensdauern betragen $\tau_{pC} = 10^{-5} \text{ s}$, $\tau_{pE} = 10^{-6} \text{ s}$ und $\tau_{nB} = 10^{-5} \text{ s}$.

Weiterhin herrscht Raumtemperatur ($U_T = 25.8 \text{ mV}$), die intrinsische Ladungsträgerdichte beträgt $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ und die relative Dielektrizitätszahl in Silizium ist $\epsilon_r = 12$. Verwenden Sie im folgenden die Schottky-Näherung und gehen Sie davon aus, dass außerhalb der Raumladungszone Störstellenerschöpfung vorliegt.

- a) Skizzieren sie für $U_{EB} = U_{CB} = 0$ den Verlauf der Raumladung und des E -Feldes sowie das Banddiagramm. Wie breit sind die einzelnen Bereiche der Raumladungszone? Berechnen Sie die effektive Breite w der Basis.



Figur : npn-Transistor

Geg.: $U_{EB} = U_{CB} = 0$,

$n_{DE} = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $n_{DC} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $n_{AB} = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $U_T = 25.8 \text{ mV}$, $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $w_B = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $\epsilon_r = 12$.

Ges.:

Werte für Längen $l_{p,EB}$, $l_{n,EB}$, $l_{p,CB}$, $l_{n,CB}$

Skizze der Raumladung und des E -Feldes sowie des Banddiagramms.

Lösung:

- i) Für die Breite der RLZ-Bereiche betrachten wir die beiden pn-Übergänge getrennt. Pro Übergang gibt es drei Unbekannte, aber auch drei Gleichungen:

$$l_p = \frac{n_D}{n_A + n_D} \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e} U_D \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right)}, \quad l_n = \frac{n_A}{n_A + n_D} \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e} U_D \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right)}, \quad U_D = U_T \ln \left(\frac{n_A n_D}{n_i^2} \right),$$

Ergebnis-Tabelle:

Emitter-Basis Diode	Kollektor-Basis Diode
$U_{D,EB} = 1.0173 \text{ V}$	$U_{D,CB} = 0.7929 \text{ V}$

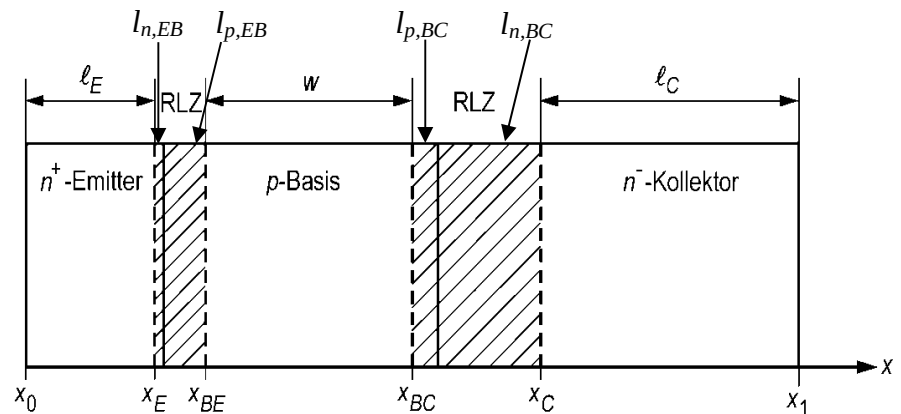
$l_{p,EB} = 36.16 \text{ nm}$	$l_{p,CB} = 2.29 \text{ nm}$
$l_{n,EB} = 1.20 \text{ nm}$	$l_{n,CB} = 457.5 \text{ nm}$

Die physikalische Basislänge w_B ist gegeben durch die Basislänge w und Teile der anschließenden RLZ ohne äußere Spannungen:

$$w = w_B - l_{p,EB} - l_{p,CB} = 100 \text{ nm} - 36.2 \text{ nm} - 2.3 \text{ nm} = 61.5 \text{ nm}.$$

ii) Verlauf der Raumladung

(Nicht maßstabsgetreu)

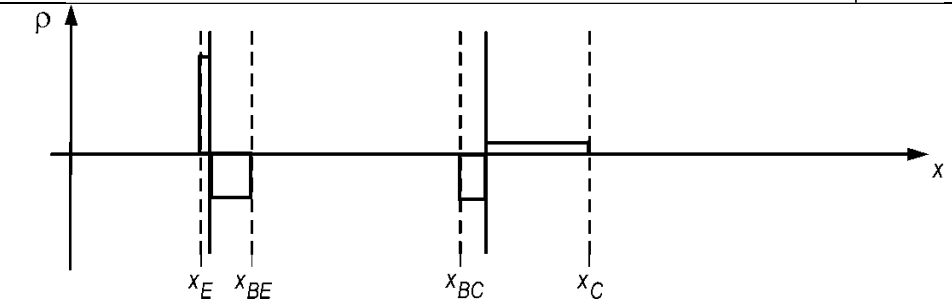


iii) Raumladungsdichten

$$\rho(x) = e[n_D - n(x) - n_A + p(x)]$$

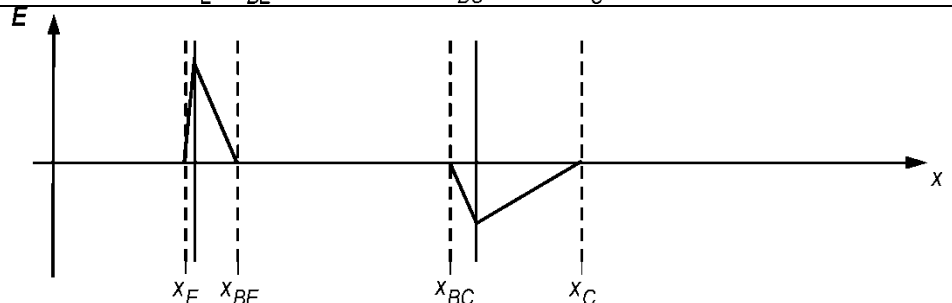
Schottky-Näherung

$n(x) = p(x) = 0$ in Raumladungszone



iv) Feldstärke E(x):

$$\epsilon E = \int \rho dx$$

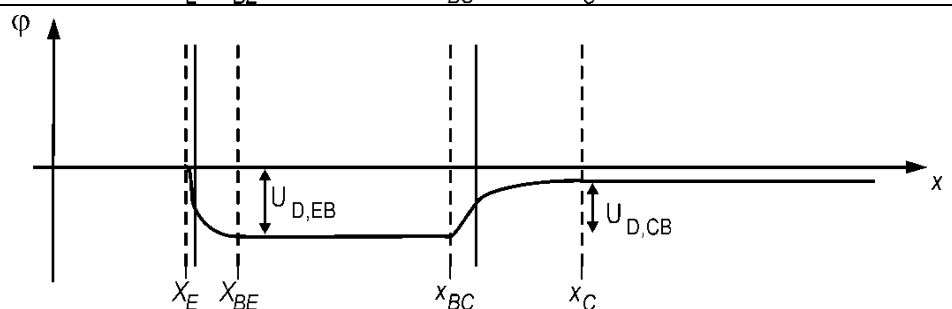


v) Potential phi(x):

folgt mit

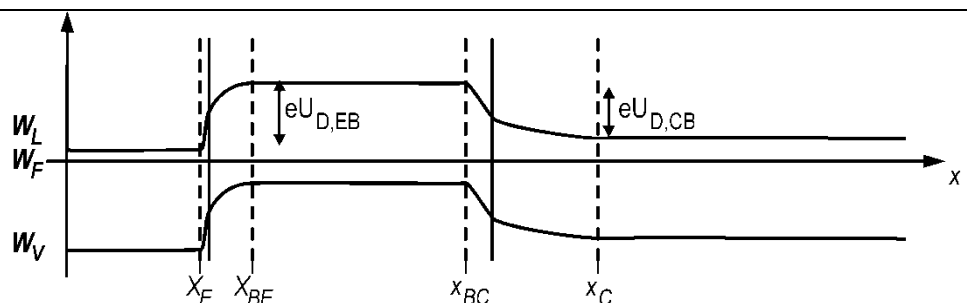
$$\phi(x) = -\int E dx$$

Beachte, die Linie $x_E \rightarrow x_{BE}$ und $x_{BC} \rightarrow x_C$ sind parabolisch



vi) Banddiagramm

$$W(x) = W - e\phi(x)$$



- b) An den Transistor werden jetzt die Spannungen $U_{EB} = -0.75 \text{ V}$ und $U_{CB} = 1 \text{ V}$ angelegt. Berechnen Sie die Länge der Raumladungszonen und skizzieren Sie das Banddiagramm inklusive der Quasi-Ferminiveaus. Skizzieren Sie qualitativ den Verlauf der Trägerdichten außerhalb der Raumladungszonen.

Geg. : Angelegt werden: $U_{EB} = -0.75 \text{ V}$, $U_{CB} = 1 \text{ V}$.

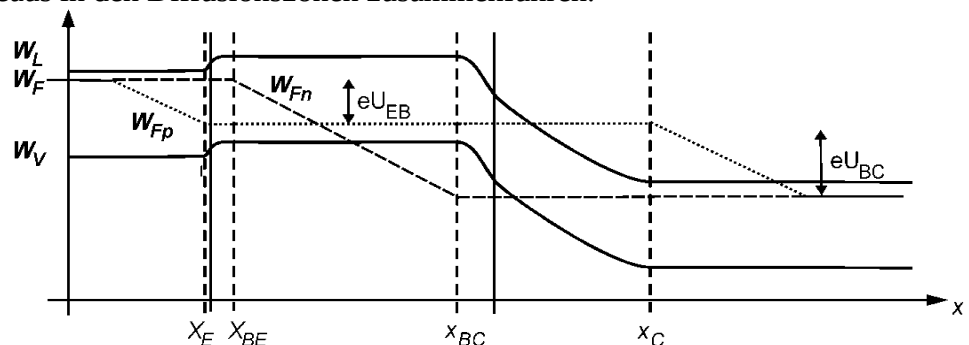
Ges. : Das resultierende Banddiagramm mit Quasi-Ferminiveaus.

Die sich unter den angelegten Spannungen einstellenden $l_{p,EB}$, $l_{n,EB}$, $l_{p,CB}$, $l_{n,CB}$.

Lösung:

Das Banddiagramm aus Aufgabenteil a) wird durch die angelegten Spannungen modifiziert. Schritte bei der Konstruktion des Banddiagramms:

- Mit den Energieniveaus der Basis beginnen.
- Verschiebung der Fermi-Niveaus von Emitter und Kollektor durch angelegte Spannungen links und rechts einzeichnen (Lücken für RLZ lassen und deren Weiten im Vergleich zu a) anpassen; Sperr-/Durchlass-Betrieb).
- Bänder parabolisch verbinden
- Quasi-Fermi-Niveaus der Majoritäten in RLZ einzeichnen (horizontaler Verlauf).
- Quasi-Fermi-Niveaus in den Diffusionszonen zusammenführen.

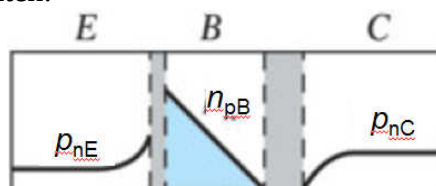


- vi) Genau wie in Aufgabenteil a) berechnen wir die RLZ-Weiten, nur kommt zur Diffusionsspannung noch die von außen angelegte Spannung hinzu (Beachte das Vorzeichen von U_{EB} und U_{CB} ! Hier np-Übergang!):

$$l_p = \frac{n_D}{n_A + n_D} \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e}(U_D + U)} \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right), \quad l_n = \frac{n_A}{n_A + n_D} \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e}(U_D + U)} \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right)$$

Emitter-Basis Diode	Kollektor-Basis Diode
$l_{p,EB} = 18.53 \text{ nm}$	$l_{p,CB} = 3.44 \text{ nm}$
$l_{n,EB} = 0.62 \text{ nm}$	$l_{n,CB} = 687.95 \text{ nm}$

Verlauf der Minoritätsträgerdichten:



c) Wie groß ist der Kollektorstrom I_C ?

Geg.: $l_E = 0.1 \mu\text{m}$, $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$, $L_{pC} = L_{pE} = 30 \mu\text{m}$, $L_{nB} = 50 \mu\text{m}$, $\tau_{pE} = 10^{-6} \text{ s}$, $\tau_{nB} = \tau_{pC} = 10^{-5} \text{ s}$.

Ges.: Kollektorstrom I_C

Lösung:

i) Der Kollektorstrom I_C berechnet sich nach Gleichung (8.37) aus dem Skript

$$I_C = I_{TS} \left(e^{-U_{EB}/U_T} - e^{-U_{CB}/U_T} \right) - I_{BCS} \left(e^{-U_{CB}/U_T} - 1 \right)$$

ii) Vereinfachungen sind möglich, da $e^{-U_{EB}/U_T} \gg e^{-U_{CB}/U_T}$ und $e^{-U_{EB}/U_T} \gg 1 \rightarrow I_C \approx I_{TS} e^{-U_{EB}/U_T}$

iii) Der noch fehlende Transfersättigungsstrom ist für einen npn-Transistor gegeben durch Gleichung (8.16) im Skript

$$I_{TS} \approx A e n_i^2 \frac{D_{nB}}{w n_{AB}} \text{ mit } D_{nB} = L_{nB}^2 / \tau_{nB}$$

$$\text{mit } w = w_B - l_{p,EB} - l_{p,CB} = 100 \text{ nm} - 18.5 \text{ nm} - 3.5 \text{ nm} = 78 \text{ nm}$$

$$\rightarrow I_{TS} = 11.54 \cdot 10^{-16} \text{ A und damit } \boxed{I_C = 4.86 \text{ mA}}.$$

Aufgabe 2) Transistor: Rekombination in der Basis

Betrachten Sie einen npn-Transistor im Vorwärtsbetrieb. Ein wichtiges Designziel besteht darin, den Anteil der in der Basis rekombinierenden Minoritätsträger möglichst gering zu halten. Dies kann erreicht werden indem die Basisbreite wesentlich kleiner als die Diffusionslänge der Minoritäten gewählt werden. Gehen Sie davon aus, dass maximal 1% der in die Basis injizierten Minoritätsträger verloren gehen dürfen. Berechnen Sie dafür das maximal zulässige Verhältnis von Basisweite w und Diffusionslänge L_{nB} der Minoritätsträger in der Basis.

Benutzen Sie die Verhältnisse $U_{BE}/U_T \gg 1$ und $U_{CB}/U_T \gg 1$, sowie $I_{TS} \gg I_{BB}$ und $I_{TS} \gg I_{BES}$.

Geg.: Normaler, aktiver Vorwärtsbetrieb des Transistors; 1% der in die Basis injizierten Ladungsträger rekombinieren.

Ges.: Basisweite w im Verhältnis zur Diffusionslänge der Minoritätsträger?

Lösung:

1) Die in die Basis injizierte Ladung ist gegeben durch den Emitterstrom, Gl.(8.35):

$$I_E = -(I_{TS} + I_{BES}) (\exp(-U_{EB}/U_T) - 1) + I_{TS} (\exp(-U_{CB}/U_T) - 1) - I_{BB}$$

2) Dieser soll zu 1% in der Basis rekombinieren und verursacht einen Basisstrom, Gl. (8.18):

$$I_{BB} = I_{TS} \left[(\exp(-U_{EB}/U_T) - 1) + (\exp(-U_{CB}/U_T) - 1) \right] \left[\cosh(w/L_{nB}) - 1 \right]$$

3) Die beiden Ströme lassen sich mit folgenden Annahmen vereinfachen:

Im normalen Verstärkerbetrieb ist

- der Transfersättigungsstrom $I_{TS} \gg I_{BES}$ sowie $I_{TS} \gg I_{BB}$,
- der Faktor $\exp(-U_{EB}/U_T) \gg 1$ weil $-U_{EB}/U_T \gg 1$
- der Faktor $\exp(-U_{CB}/U_T) \approx 0$ weil $-U_{CB}/U_T \ll -1$

$$\text{Damit: } I_E \cong -I_{TS} \exp(-U_{EB}/U_T) \text{ und } I_{BB} \cong I_{TS} \exp(-U_{EB}/U_T) \left[\cosh(w/L_{nB}) - 1 \right]$$

4) Im Verhältnis gilt: $\frac{I_{BB}}{I_E} \cong 1 - \cosh(w/L_{nB}) \equiv -0.01$ oder auch: $\cosh(w/L_{nB}) = 1.01$

Dies ist erfüllbar mit $w = 0.14 \cdot L_{nB}$

Aufgabe 3) Betriebsarten des pnp-Transistors

Betrachten Sie nun einen pnp-Transistor. Welche Vorzeichen haben die Spannungen U_{BE} und U_{CB} für den Fall des Normalbetriebs, des inversen Betriebs, des Sättigungsbetriebs und des Sperrbetriebs? Wie unterscheiden sich die Verläufe der Minoritätsträgerdichten außerhalb der Raumladungszonen von denen im npn-Transistor?

Inverser Betrieb CB-Diode: FLUSS $\rightarrow U_{CB} > 0$ EB-Diode: SPERR $\rightarrow U_{EB} < 0$	Sperrbetrieb CB-Diode: SPERR $\rightarrow U_{CB} < 0$ EB-Diode: SPERR $\rightarrow U_{EB} < 0$
Sättigung CB-Diode: FLUSS $\rightarrow U_{CB} > 0$ EB-Diode: FLUSS $\rightarrow U_{EB} > 0$	Normalbetrieb CB-Diode: SPERR $\rightarrow U_{CB} < 0$ EB-Diode: FLUSS $\rightarrow U_{EB} > 0$

Die Verläufe der Minoritätsträgerdichten unterscheiden sich nicht von denen eines npn-Transistors. Allerdings sind die jeweils anderen Trägersorten hier im pnp-Transistor Minoritäten, im Vergleich zum npn-Transistor.