1

$$Y = \frac{1}{r} = \frac{e}{k_B T} \cdot \underbrace{A \cdot j_E}_{I_E} = \frac{\partial I}{\partial U} = A \frac{\partial j}{\partial U}$$

$$= \frac{e}{k_B T} \cdot I_E$$

$$= \frac{1}{25{,}9\,mV} \cdot 1\,mA = 40\,mS$$

$$\Rightarrow r = \frac{1}{Y} = \underline{25\,\Omega}$$

Frage aus der Übung:

$$I = I_s \cdot \left(e^{eU/k_B T} - 1\right) = A \cdot j_s\, e^{eU/k_B T}$$

Ableiten nach U

$$\Rightarrow A \cdot \frac{e}{k_B T} \cdot \underbrace{j_s \cdot e^{eU/k_B T}}_{j}$$

2

Formel Plattenkondensator für die Sperrschichtkapazität

$$C_S = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{b} \cdot A$$

mit $b = 0{,}1\,\mu m$ (Breite der RLZ)

$A = 200\,\mu m^2$

$$C_S = \frac{11{,}4 \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}\, F/m}{0{,}1\,\mu m} \cdot 200\,\mu m^2$$

$$= 201{,}9\, fF$$

Diffusionskapazität

$$C_D = \frac{e}{k_B T} \cdot \tau_n \cdot \underbrace{j_n \cdot A}_{I} = \frac{e}{k_B T} \cdot \tau_n \cdot I$$

(Abh. von der Lebensdauer)

③ a) $$\beta = \frac{D_B \cdot n_0^3 \cdot L_E}{D_E \cdot p_0^E \cdot W} = \frac{\mu_B \cdot N_E \cdot L_E}{\mu_E \cdot N_B \cdot W}$$

Diffusionslänge :

$$L_E = \sqrt{D_E \cdot \tau_E} \quad \text{mit} \quad D_E = \mu_h^E \frac{k_B T}{e}$$

Diffusionskoeffizient :

$$D_E = \mu_h^E \cdot \frac{k_B T}{e} = 140 \frac{cm^2}{Vs} \cdot 25{,}9 mV$$

aus FS !

$$= \underline{3{,}62 \frac{cm^2}{s}}$$

$$L_E = \sqrt{D_E \cdot \tau_E} = \sqrt{3{,}62 \frac{cm^2}{\cancel{s}} \cdot 10^{-8} \cancel{s}}$$

10ns

$$= \underline{1{,}9 \mu m}$$

$$\beta = \frac{\mu_B \cdot N_E L_E}{\mu_E \cdot N_B \cdot w}$$

$$= \frac{1250 \cancel{\frac{cm^2}{s}} \cdot 10^{18} \cancel{cm^{-3}} \cdot 1{,}9 \cancel{\mu m}}{140 \cancel{\frac{cm^2}{s}} \cdot 10^{16} \cancel{cm^{-3}} \cdot 2 \cancel{\mu m}}$$

$$= \underline{848}$$

Werte aus der FS!

b) $$L_E = \sqrt{D_E \cdot \tau_E} = \sqrt{3{,}62 \frac{cm^2}{\cancel{s}} \cdot 10^{-6} \cancel{s}}$$

$$= \underline{19{,}03 \, \mu m}$$

$$\beta = \frac{\mu_B \cdot N_E \cdot L_E}{\mu_E \cdot N_B \cdot w}$$

$L_E \hat{=} w_E$, da $w_E < L_E$!

$$= \frac{1250 \frac{cm^2}{s} \cdot 10^{18} cm^{-3} \cdot 3 \mu m}{140 \frac{cm^2}{s} \cdot 10^{16} cm^{-3} \cdot 2 \mu m}$$

$$= \underline{1340}$$

Die Lebensdauererhöhung hilft wegen der geringen Emitterbreite nur bedingt bei der Erhöhung der Stromverstärkung!

4

$$j^E = -\left(\frac{eD_B}{L_B}\cdot n_0^B \cdot \coth a + \frac{eD_E}{L_E}\cdot p_0^E\right)\cdot \left(e^{eU_{EB}/k_BT} - 1\right) + \frac{eD_B}{L_B \sinh a}\cdot n_0^B \cdot \left(e^{eU_{CB}/k_BT} - 1\right)$$

Vereinfachung durch aktive Betriebsart:

- U_{CB} Anteile verschwinden
- -1 - Terme verschwinden

$$\Rightarrow j^E = -e\left(\frac{D_B}{L_B}\cdot n_0^B \cdot \coth a + \frac{D_E}{L_E}\cdot p_0^E\right)\cdot e^{eU_{EB}/k_BT} - \cancel{\frac{eD_B}{L_B \cdot \sinh a}} \cdot n_0^B$$

blau korrigiert
Tafelanschrieb der Übung!

analog dazu die Kollektorstromdichte:

$$j^C = \frac{eD_B}{L_B \cdot \sinh a}\cdot n_0^B \cdot e^{eU_{EB}/k_BT} + e\left(\frac{D_B}{L_B}\cdot n_0^B \cdot \coth a + \frac{D_C}{L_C}\cdot p_0^C\right)$$

$$j^E = -e\left(\frac{D_B}{50\,\mu m}\cdot n_0^3 \cdot \coth a + \frac{D_E}{49\,\mu m}\cdot p_0^E\right)\cdot$$

$$e^{0{,}1\,V / 25{,}9\,mV}$$

$$D_E = \mu_h^E \cdot \frac{k_B T}{e} = 90\,\frac{cm^2}{Vs}\cdot 25{,}9\,mV$$

$$= 2{,}33\,\frac{cm^2}{s}$$

aus FS!

$$D_B = \mu_e^B \cdot \frac{k_B T}{e} = 600\,\frac{cm^2}{s}\cdot 25{,}9\,mV$$

$$= 15{,}54\,\frac{cm^2}{s}$$

$$n_0^B = \frac{n_i^2}{N_B} = \frac{(6{,}71\cdot 10^9\,cm^{-3})^2}{2\cdot 10^{17}\,cm^{-3}} = 2{,}25\cdot 10^2\,cm^{-3}$$

$$p_0^E = \frac{n_i^2}{N_E} = \frac{(6{,}71\cdot 10^9\,cm^{-3})^2}{3\cdot 10^{18}\,cm^{-3}} = 15\,cm^{-3}$$

$$a = \frac{W}{L_B} = \frac{1\,\mu m}{59\,\mu m} = 0{,}02$$

$\rightarrow$ alle unbekannten Größen zur Berechnung j^E bestimmt!

$$j^E = -e\left(\frac{15{,}54\,\frac{cm^2}{s}}{50\,\mu m}\cdot 2{,}25\cdot 10^2\,cm^{-3}\cdot \coth(0{,}02) + \frac{2{,}33\,\frac{cm^2}{s}}{40\,\mu m}\cdot 15\,cm^{-3}\right)\cdot e^{\frac{0{,}6V}{25{,}9mV}}$$

$$= -6{,}9\cdot 10^{-2}\,A/cm^2$$

$$\Rightarrow I_E = j^E\cdot A = -6{,}9\cdot 10^{-2}\,A/\cancel{cm^2}\cdot 0{,}001\,\cancel{cm^2}$$

$$= -6{,}9\cdot 10^{-5}\,A = -69\,\mu A$$

$$j^C = \frac{e D_B}{L_B \sinh q}\cdot n_0^B\cdot e^{0{,}6V/25{,}9mV}$$

$$= \frac{e\cdot 15{,}4\,\frac{cm^2}{s}}{5\cdot 10^{-3}\,cm\cdot \sinh(0{,}02)}\cdot 2{,}25\cdot 10^2\,cm^{-3}\cdot e^{0{,}6V/25{,}9mV}$$

$$= 6{,}88\cdot 10^{-2}\,A/cm^2$$

$$I_C = j^C\cdot A = 6{,}88\cdot 10^{-2}\,A/\cancel{cm^2}\cdot 1\cdot 10^{-3}\,\cancel{cm^2}$$

$$= 6{,}88 \cdot 10^{-5}\,A = \underline{69\,\mu A}$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{6{,}88 \cdot 10^{-5}\,A}{6{,}9 \cdot 10^{-5}\,A} = 0{,}997 \approx 1$$

5 a) Diffusionsspannung

$$U_D = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_B \cdot N_E}{n_i^2}\right) =$$

$$= 25{,}9\,mV \cdot \ln\left(\frac{3\cdot 10^{16} \cdot 2\cdot 10^{17}}{(6{,}71\cdot 10^{9})^2}\right)$$

$$\underline{= 0{,}84\,V}$$

b) $$x = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{e} \cdot \frac{N_A}{N_D \cdot N_A + N_A^2} \cdot (U_D - U)}$$

Fall a : $U = 0V$
Fall b : $U = 5V$
} Differenzbildung

$$\Rightarrow \quad \Delta x = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{e} \cdot \frac{N_C}{N_B(N_C + N_B)}} \cdot$$

$$\left(\sqrt{(U_D - U)} - \sqrt{U_D}\right)$$

$$= \sqrt{\frac{2\cdot 11{,}4\cdot 8{,}854\cdot 10^{-12}\,As/Vm}{1{,}602\cdot 10^{-19}\,As} \cdot 2{,}083\cdot 10^{-18}\,cm^3}$$

$$\cdot \left(\sqrt{5{,}84V} - \sqrt{0{,}84V}\right)$$

$= 0{,}077\ \mu m = 77\ nm$

6

$$x_{p,EB}^2 = \frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 (U_{D,EB} - U_{EB})}{e} \cdot \frac{N_E}{N_E N_B + N_B^2}$$

Basis p-dot.

Dotierungskonzentrationen:

donatordotierter Emitter N_E

akzeptordotierte Basis N_B

$$U_{D,EB} = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_E \cdot N_B}{n_i^2}\right) = 0{,}973V$$

$$x_{p,EB}^2 = \frac{2 \cdot 11{,}4 \cdot \varepsilon_0 (0{,}973V - 0{,}9V)}{e} \cdot$$

$$\frac{10^{19}\,cm^{-3}}{10^{19}\,cm^{-3} \cdot 10^{17}\,cm^{-3} + (10^{17}\,cm^{-3})^2}$$

$$= \underline{3{,}02\,\mu m}$$

$$x_{p,CB}^2 = \frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 (U_{D,CB} - U_{CB})}{e} \cdot \frac{N_C}{N_C N_B + N_B^2}$$

$$U_{D,CB} = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_C N_B}{n_i^2}\right)$$

$$= 0{,}675\,V$$

$$w_{ges} = x_{p,EB} + x_{p,CB} = 5\,\mu m$$

$$\Rightarrow \quad x_{p,CB} = 1{,}98\,\mu m$$

$$U_{CB} = U_{D,CB} - \frac{x_{p,CB}^2}{2\varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot \frac{1}{e}} \cdot \left(\frac{N_C N_B + N_B^2}{N_C}\right)$$

$$= 0{,}675V - \frac{(1{,}98\,\mu m)^2 \cdot 1{,}001 \cdot 10^{-20}\,cm}{1{,}26 \cdot 10^9\,\frac{1}{Vm}}$$

$$= 0{,}675V - 31{,}15V = \underline{-30{,}5V}$$

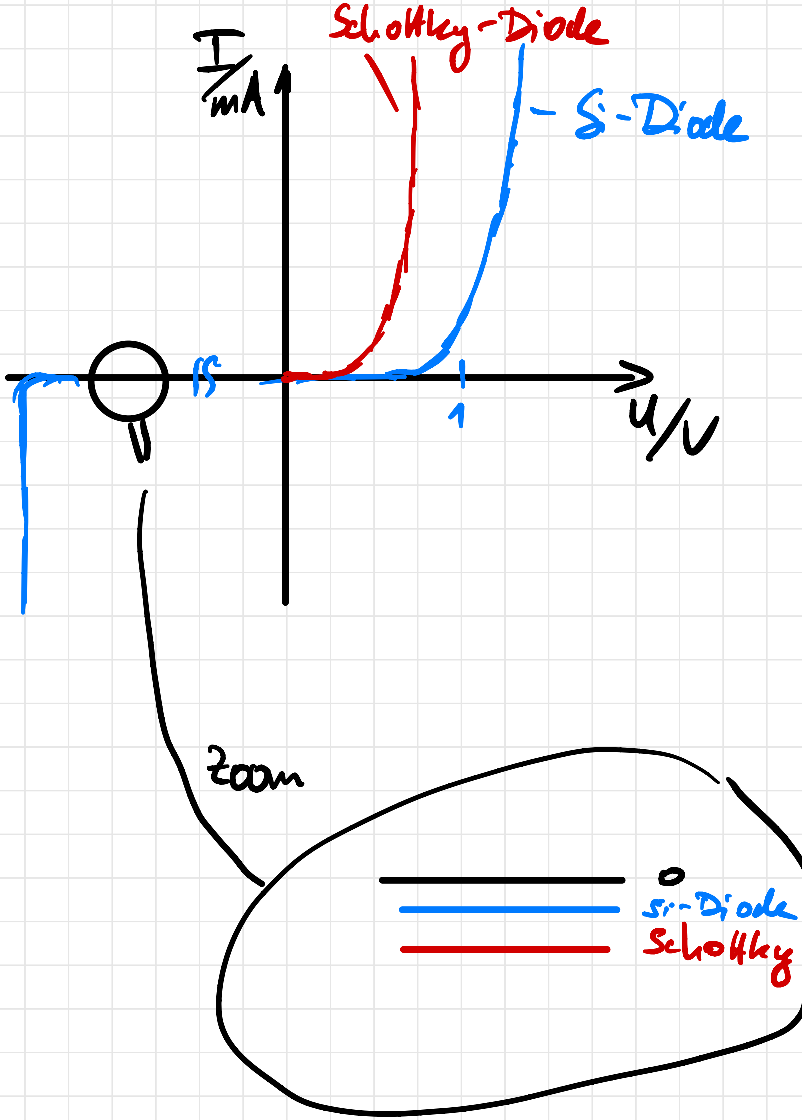
7 Ohmische Kontakte

→ Gleichrichtung muss verhindert werden!

@1 Wahl eines HL-Materials, bei dem die Fermi-Energie tiefer als die des Metalls liegt.

@2 sehr starke Dotierung des HL
→ wird die Potentialbarriere zum Metall sehr schmal und kann von den Ladungsträgern durchtunnelt werden.
(Dotierung > $10^{18}\,cm^{-3}$)

⑧



9 p^+n - Diode

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(7\cdot 10^9 cm^{-3})^2}{10^{14} cm^{-3}} = 4{,}9\cdot 10^5 cm^{-3}$$

$$j_s^{pn} = \frac{e\cdot D_h}{L_h}\cdot p_0$$

$$= \frac{1{,}602\cdot 10^{-19} As \cdot 12 cm^2/Vs}{34{,}6\cdot 10^{-4} cm}\cdot 4{,}9\cdot 10^5 cm^{-3}$$

$$= 2{,}72\cdot 10^{-10}\ A/cm^2$$

Schottky - Diode

$$j_s^{schottky} = R^*\cdot T^2\cdot e^{\frac{-e\phi_s}{k_B T}}$$

$$= 260\frac{A}{cm^2 K}\cdot(300K)^2\cdot e^{-\frac{720}{25{,}9}}$$

$$= 1{,}98\cdot 10^{-5}\ A/cm^2$$

$$\frac{j_S^{\text{Schottky}}}{j_S^{\text{pn}}} = \underline{7{,}27 \cdot 10^4}$$

$\Rightarrow$ Die Schottky-Diode hat einen um den Faktor $7{,}27 \cdot 10^4$ (73 000) größeren Sperrstrom!

⑩

$$j^{Schottky} = j_s^{Schottky} \cdot \left(e^{eU_1/k_BT} \cancel{-1}\right)$$

$$j^{pn} = j_s^{pn} \cdot \left(e^{eU_2/k_BT} \cancel{-1}\right)$$

Vereinfachen

$$\Rightarrow \quad j_s^{Schottky} \cdot e^{eU_1/k_BT} = j_s^{pn} \cdot e^{eU_2/k_BT}$$

$$\frac{j_s^{Schottky}}{j_s^{pn}} = \frac{e^{eU_2/k_BT}}{e^{eU_1/k_BT}} \qquad \text{logarithmieren}$$

$$\ln\left(\frac{j_s^{Schottky}}{j_s^{pn}}\right) = \frac{e}{k_BT}\left(U_2 - U_1\right)$$

$$U_2 - U_1 = \frac{k_BT}{e} \cdot \ln \frac{j_s^{Schottky}}{j_s^{pn}}$$

$$= 25{,}9\,mV \cdot \ln\left(7{,}27 \cdot 10^4\right)$$

$$= \underline{290\,mV}$$

Spannung der pn-Diode muss 290mV höher sein!

11

Es würde sonst ein zusätzlicher Schottky-Kontakt entstehen!

Anders formuliert:
Typisches Metall auf n-HL bildet Schottky-Kontakt, daher 2 entgegen-läufige Dioden (pn + MS). Daher starke Dotierung am Anschluss, um aus Schottky-Kontakt einen ohm'schen Kontakt zu machen.

(12)

pn-Diode:

- Elektronen-Loch-Paare
  (s. I_S in der Shockley-Gl.)
  → beide Minoritätsträgerarten

Schottky-Diode:

- Elektronen (Metallsystem dominant)
- nur Majoritätsladungsträger
  → M-nHL: Elektronen!
  → M-pHL: Löcher!