

- ① Phosphor in Silizium $\rightarrow$ Donator!
Gallium in Silizium $\rightarrow$ Akzeptor!

a) $N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n$

$$N_A = \frac{x_n}{x_p} \cdot N_D = 100 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{cm}^3} \\ = \underline{10^{17} \text{ cm}^{-3}}$$

b) $U_D = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2} \right)$

$$= 25,9 \text{ mV} \cdot \ln \left(\frac{10^{15} \cdot 10^{17}}{(6,71 \cdot 10^9)^2} \right) \\ = \underline{0,736 \text{ V}}$$

- c) Flusspolung $\Rightarrow$ qualitativ klar das die Sperrschichtbreite (RLZ) kleiner wird.

$$\frac{b + \Delta b}{b} = \sqrt{\frac{U_D - U}{U_D}} = \sqrt{1 - \frac{U}{U_D}} \\ = \sqrt{1 - \frac{0,5}{0,73}} = 0,57$$

=> 43% kleinere RLZ!

②

$$b = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{N_D + N_A}{N_D \cdot N_A}} \cdot \sqrt{U_D - U}$$

ohne äußere Spannung ($U=0$) $\rightarrow b_0$!

$$\frac{b}{b_0} = \frac{\sqrt{U_D - U}}{\sqrt{U_D}} = \sqrt{1 - \frac{U}{U_D}}$$

nach U auflösen ergibt:

$$\left[1 - \left(\frac{b}{b_0}\right)^2\right] \cdot U_D = U$$

Fall 1: $b = \frac{1}{2} \cdot b_0$

$$U = \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2\right] \cdot 0,65V = \frac{3}{4} \cdot 0,65V \\ = \underline{\underline{0,4875V}}$$

Fall 2: $b = 2b_0$

$$U = \left[1 - \left(\frac{2}{1}\right)^2\right] \cdot 0,65V = (-3) \cdot 0,65V = \underline{\underline{-1,95V}}$$

③ Diffusionskoeffizienten der Minoritätsträger

$$D_e = \mu_e \cdot \frac{k_B T}{e} = 1360 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot \frac{k_B \cdot 300\text{K}}{e}$$

↑
aus FS für $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

$$= \underline{35,2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}}$$

$$D_h = \mu_h \cdot \frac{k_B T}{e} = 70 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot \frac{k_B \cdot T}{e}$$

↑
aus FS für $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

$$= \underline{1,81 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}}$$

Diffusionslängen :

$$L_e = \sqrt{D_e \cdot \tau_e} = 59,3 \mu\text{m}$$

$$L_h = \sqrt{D_h \cdot \tau_h} = 13,4 \mu\text{m}$$

Spektrum:

$$j_s = e \left(\frac{D_h}{L_h} \cdot p_0 + \frac{D_e}{L_e} \cdot n_0 \right)$$

D_h, D_e, L_h, L_e bereits bestimmt

$$n_0 = \frac{n_i^2}{N_A} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 4,5 \text{ cm}^{-3}$$

$n_0 \gg p_0 \Rightarrow \frac{D_h}{L_h} \cdot p_0$ - Term kann
vernachlässigt werden!

$$j_s = e \cdot \frac{D_e}{L_e} \cdot n_0$$

$$= e \cdot \frac{35,2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}}{59,3 \mu\text{m}} \cdot 4,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$= e \cdot \frac{35,2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}}{59,3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \cdot 4,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$= 4,66 \cdot 10^{-10} \text{ A/cm}^2 = 4,66 \cdot 10^{-12} \text{ A/mm}^2$$

$$\Rightarrow \underline{I_s} = 4,66 \mu\text{A} \quad (A = 1 \text{ mm}^2)$$

④

$$a) I = I_s \cdot (e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1)$$

(Vereinfachung)

$$= A \cdot j_s \cdot e^{\frac{eU}{k_B T}}$$

$$= A \cdot 4,66 \cdot 10^{-12} \frac{A}{mm^2} \cdot e^{\frac{0,4V}{25,9mV}}$$

$$= A \cdot 2,37 \cdot 10^{-5} \frac{A}{mm^2}$$

$$= \cancel{1 mm^2} \cdot 2,37 \cdot 10^{-5} \frac{A}{\cancel{mm^2}}$$

$$= 2,37 \cdot 10^{-5} A = \underline{\underline{23,7 \mu A}}$$

$$\frac{1}{r} = \frac{eI}{k_B T} = 9,15 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\Omega}$$

$$\Rightarrow r = \underline{\underline{1,09 k\Omega}}$$

$$b) \quad U_D = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

$$= 25,9 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{14} \cdot 10^{19}}{(6,71 \cdot 10^9)^2} = 0,794 \text{ V}$$

$$b = \sqrt{\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0 \cdot (N_A + N_D) (U_D - U)}{e \cdot N_A \cdot N_D}}$$

$$= 3,549 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{1}{N_A}} \cdot \sqrt{U_D - U}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{0,794 \text{ V} - 0 \text{ V}}$

$$= \underline{\underline{2,23 \mu\text{m}}}$$

c) Sperrschichtkapazität

$$C_S = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{b} \cdot A = \frac{11,7 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As}}{2,23 \mu\text{m}} \cdot 1 \text{ mm}^2$$

$$= \underline{\underline{45,3 \text{ pF}}} \quad \text{bei } A = 1 \text{ mm}^2$$

Diffusionskapazität

$$C_D = \frac{e}{k_B T} \cdot I \cdot \tau_h = \underline{916 \text{ pF}}$$

Gesamtkapazität

$$\begin{aligned} C &= C_S + C_D = 45,3 \text{ pF} + 916 \text{ pF} \\ &= \underline{961 \text{ pF}} \end{aligned}$$

⑤

$$I = I_s \cdot (e^{eU/k_B T} - 1)$$

Vereinfachung

(Shockley - Gleichung)

$$U = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \frac{I}{I_s}$$

$$\frac{I}{I_s} = 10000!$$

$$= 25,9 \text{ mV} \cdot \ln(10000)$$

$$= \underline{\underline{0,23 \text{ V}}}$$

6

$$b = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{N_D + N_A}{N_D \cdot N_A}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \sqrt{\ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}}$$

$$N_A = N_D$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow b &= \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{2}{N_D}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \sqrt{\ln \frac{N_D^2}{n_i^2}} \\ &= \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \sqrt{\frac{2}{N_D}} \cdot \sqrt{\ln \frac{N_D^2}{n_i^2}} \\ &= \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \sqrt{\frac{2}{N_D}} \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \frac{N_D}{n_i}} \\ &= \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \sqrt{\frac{4}{N_D}} \cdot \sqrt{\ln \frac{N_D}{n_i}} \\ &= \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \frac{2}{\sqrt{N_D}} \cdot \sqrt{\ln \frac{N_D}{n_i}} \end{aligned}$$

Substitution: $x = \frac{N_D}{n_i}$ bzw. $N_D = x \cdot n_i$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \frac{2}{\sqrt{x \cdot n_i}} \cdot \sqrt{\ln x} \\ &= \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \cdot \frac{2}{\sqrt{n_i}} \cdot \sqrt{\frac{\ln x}{x}} \end{aligned}$$

$\sqrt{\frac{\ln x}{x}} \rightarrow 0$ für wachsendes x !

Steigt also die Dotierung, wird die RLZ kleiner!

für die gegebenen Zahlenwerte:

$$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\begin{aligned} L &= \sqrt{1,26 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Vcm}}} \cdot \sqrt{25,9 \text{ mV}} \cdot \frac{2}{\sqrt{6,71 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}}} \\ &\quad \cdot \sqrt{\frac{1,4 \times}{\kappa}} \\ &= \underline{\underline{1,47 \cdot 10^{-5} \text{ cm}}} \end{aligned}$$

7

$$h \cdot \nu = 1,7 \text{ eV}$$

aus der FS ergibt sich damit $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$

$$G = \alpha \cdot j_{ph} = \alpha \cdot \frac{P_{opt}}{h \cdot \nu} = 10^4 \text{ cm}^{-1} \cdot \frac{5 \text{ W cm}^{-2}}{1,7 \text{ eV}}$$
$$= 1,8 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

($\hat{=}$ $1,8 \cdot 10^{23}$ Elektron-Loch-Paare pro Volumen und pro Zeiteinheit)

gilt streng genommen aber nur an der Oberfläche, da die Intensität des Lichtstrahls zum Inneren des Körpers sinkt. Dennoch brauchbar um die Größenordnung abzuschätzen.

$$\Delta n = \Delta p = G \cdot \tau = 1,8 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

gleiches, da ja $1,8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Elektron-Loch-Paare!

8

Photonenstrom dichte

$$\begin{aligned}
 j_{ph} &= \frac{P_{opt}}{h \cdot \nu} = \frac{1 \text{ W}}{\text{cm}^2 \cdot 1,43 \text{ eV}} \\
 &= \frac{1 \text{ W}}{\text{cm}^2 \cdot 1,43 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \\
 &= \underline{4,37 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}}
 \end{aligned}$$

Es treffen also pro Sekunde $4,37 \cdot 10^{18}$

Photonen auf die Photodiode.

Absorptionskoeffizient kann aus der FS entnommen werden: $\alpha = 700 \text{ cm}^{-1}$

$$\begin{aligned}
 j_L &= e \cdot j_{ph}(0) \left[1 - e^{-\alpha L} \right] = e \cdot \frac{P_{opt}}{h \cdot \nu} \cdot \left[1 - e^{-\alpha L} \right] \\
 &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 4,37 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot \left[1 - e^{-700 \text{ cm}^{-1} \cdot 20 \mu\text{m}} \right] \\
 &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 4,37 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot 0,753 \\
 &= \underline{0,527 \text{ A/cm}^2}
 \end{aligned}$$

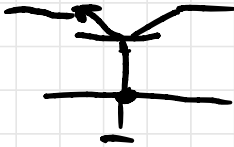
9

Betriebsmodi :

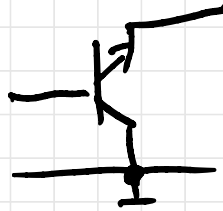
Verstärkung | Durchlassbetrieb |
Sperrbetrieb | Inversbetrieb

Grundschaltungen :

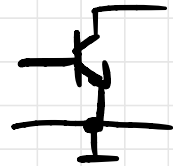
Basis



Kollektor



Emitter



10

$$\beta = \frac{\mu_B N_E \cdot L_E}{k_B N_B \cdot W} \approx \frac{N_E}{N_B} \cdot 10$$

$$\Rightarrow \frac{N_E}{N_B} = \frac{\beta}{10} = 100$$

Daherung des Erweitergebietes muss also
2 Größenordnungen höher sein als
in der Basis

11

Beim npn-Transistor ist $\frac{\mu_B}{\mu_E}$ durch das Verhältnis von Elektronen- zu Lochbeweglichkeiten bestimmt. In einem pnp-Transistor genau umgekehrt.

$$\frac{\mu_B^e}{\mu_E^h} = \frac{1258}{140} = 8,98 \quad \text{nnp-Trans.}$$

$$\frac{\mu_B^h}{\mu_E^e} = \frac{447}{245} = 1,82 \quad \text{pnp-Trans.}$$

Trotz gleicher Dotierungskonzentrationen in beiden Transistoren (npn/pnp), ist das Verhältnis größer.

Hochfrequenzanwendungen: sich (schnell) änderndes Wechselfeld, dem der Trans. folgen können soll $\rightarrow$ großes Verhältnis der Beweglichkeiten wünschenswert (npn)

12

$$a) \beta = \frac{\mu_B \cdot N_E \cdot L_E}{\mu_E \cdot N_B \cdot W}$$

$$= \frac{1260 \cancel{\text{cm}^2} \cancel{\text{V}^{-1} \text{s}^{-1}} \cdot 10^{19} \cancel{\text{cm}^{-3}} \cdot 5 \cancel{\mu\text{m}}}{679 \cancel{\text{cm}^2} \cancel{\text{V}^{-1} \text{s}^{-1}} \cdot 10^{16} \cancel{\text{cm}^{-3}} \cdot 2 \cancel{\mu\text{m}}}$$

$$= 4,85 \cdot 10^4$$

↑

sehr hoher Wert, der in der Praxis nicht erreicht wird!

b) Verringerung der Gap-Energie E_g muss eine Änderung des Wertes n_i in Massenwirkungsgesetz nach sich ziehen.

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{E_g - \Delta E_g}{2k_B T}}$$

$$= n_{i0} \cdot e^{\frac{\Delta E_g}{2k_B T}}$$

↑ n_i ohne Gapsenkung
($6,71 \cdot 10^9 \text{cm}^{-3}$)

$$\Delta E_g = 74,3 \text{ meV}$$

$$\Rightarrow n_i = n_{i,0} \cdot e^{\Delta E_g / 2k_B T}$$

$$= 6,71 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3} \cdot 4,21 = \underline{\underline{2,82 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}}}$$

$$p_0^E = \frac{n_i^2}{N_E} = \frac{(2,82 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{19} \text{ cm}^{-3}} = 79,5 \text{ cm}^{-3}$$

$$\left[p_0^E = \frac{n_{i,0}^2}{N_E} = \frac{(6,71 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2}{10^{19} \text{ cm}^{-3}} = 4,5 \text{ cm}^{-3} \right]$$

→ ohne Sparsenkompensierung ca. 20fach kleinere Minoritäts trägerkonzentration!

$$c) \beta_{\text{Korc}} = \frac{\mu_B \cdot n_0^B \cdot L_E}{\mu_E \cdot p_0^E \cdot w} = \frac{\mu_B \cdot n_0^B \cdot L_E}{\mu_E \cdot 20 \cdot p_{0,i}^E \cdot w} = \frac{\beta}{20}$$

aus b) 20fach geringere Minoritäts-
ladungsträgerkonzentration

$$= \frac{4,85 \cdot 10^4}{20} = \underline{2425}$$

Achtung: auch für die Stromverstärkung ergibt sich eine Reduktion um den Faktor 20!