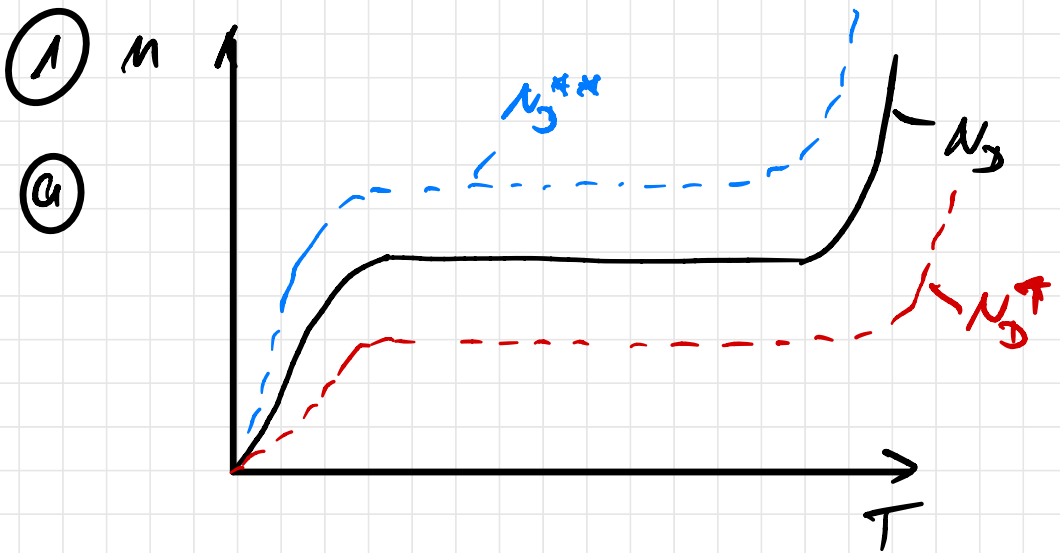
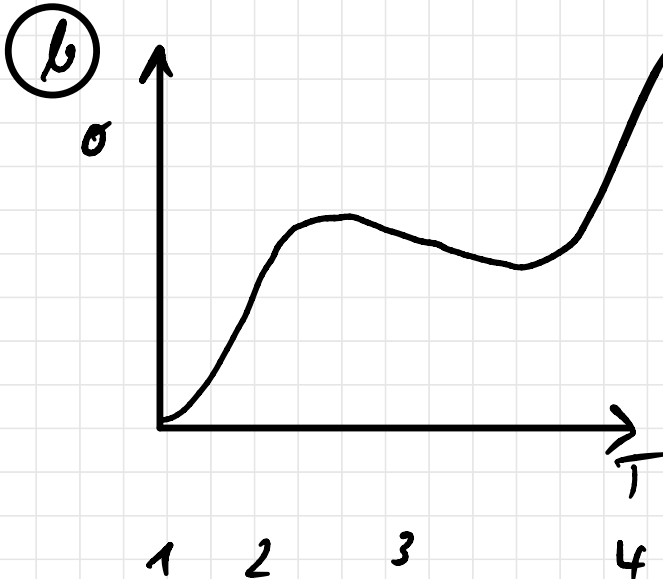




1: $n_D^+ < n_D$

2: $n_D^{**} > n_D$



1: $n=0$
extrem tief Temp.

2: mittlere Temp.
(teilweise ionisiert)

3: normale Temp.
alle ionisiert
 $n = n_D^+ = n_D$

4: hohe Temp.
 $n \gg n_D^+$
 $n_i \approx n$ (Eigenleitung)

②

Generation - Rekombination

besondere Anregung (optisch) $\left\{ \begin{array}{l} n > n_0 \\ p > p_0 \end{array} \right.$
 $\uparrow$
Lichtstrom

pro Zeiteinheit $\Rightarrow$ damit Rate

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - R$$

Mechanismen

- direkte Band-Band-Rekombination
 - Elektron aus LB rekombiniert mit Loch aus VB unter Aussendung eines Photons (z.B. GaAs)
 - direkter HL
- Nicht-strahlende Rekombination über tiefe Zustände
 - Energieniveau der Störstellen

in der Mitte der verbotenen
Zone. Einfangen eines Elektrons
- danach Rekombination durch
Shockley-Read-Hall-Gleichung
(wichtiger Prozess in indirekten
HZ)

③

Bor als Akzeptor:

$$N_A^+ = N_A = p = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

a) 300K $\rightarrow$ aus der Materialtabelle der FS folgt:

$$N_C = 2,73 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3},$$

$$N_V = 1,08 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = 6,71 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{4,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}}{10^{14} \text{ cm}^{-3}} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$p = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

b) 500K

$$\frac{k_B \cdot T}{e} = k_B \cdot 500K \cdot \frac{1}{e} = 43,1 \text{ meV}$$

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot e^{-E_g/k_B T}$$

$$N_c(300K) = 2 \cdot v_c \cdot \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$= 2 \cdot v_c \cdot \left(\frac{m_e}{m_0} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T}{300K} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{m_0 k_B 300K}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$N_c(500K) = N_c(300K) \cdot \left(\frac{500K}{300K} \right)^{3/2}$$

$$= N_c(300K) \cdot 2,1516$$

$$= \underline{5,86 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}}$$

$$N_v(500K) = N_v(300K) \cdot \left(\frac{500K}{300K} \right)^{3/2}$$

$$= \underline{2,3237 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}}$$

$$n_i^2 = 5,86 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \cdot 2,3237 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \cdot e^{-E_g/k_B T}$$

$$= 5,86 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \cdot 2,3237 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \cdot e^{-1,12 \text{ eV} / 43,1 \text{ meV}}$$

aus Material-
tabelle FS
für Silizium

$$n_i^2 = 7,055 \cdot 10^{29} \text{ cm}^{-6}$$

$$\Rightarrow \underline{n_i = 8,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}}$$

Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration :

$$p = \frac{N_A^+}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A^+}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

$$N_A^+ = N_A \quad @ \quad 500 \text{ K}$$

$$\Rightarrow p = \frac{N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

$$= \frac{10^{14} \text{ cm}^{-3}}{2} + \sqrt{\left(\frac{10^{14} \text{ cm}^{-3}}{2}\right)^2 + 7,055 \cdot 10^{29} \text{ cm}^{-6}}$$

$$= 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} + 9,75 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$\underline{p = 1,475 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}}$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{7,055 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-3}}{1,475 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}}$$

$$n = 4,75 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

Gegenüberstellung im Vergleich zu T:

	n	p
300 K	$4,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$	$1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
500 K	$4,75 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	$1,475 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

④

- a) Beweglichkeit in Abhängigkeit von der Störstellenkonzentration bei Raumtemperatur (RT). Mit wachsender Konzentration nimmt die Beweglichkeit ab, da die Störstellen die Bewegung der Ladungsträger immer mehr behindern.
- b) Rechtes Bild zeigt das Verhalten der Beweglichkeit bei festgehaltener Störstellenkonzentration. Mit steigender Temperatur nimmt die Beweglichkeit ab, weil die Stöße der Elektronen mit den schwingenden Gitteratomen zunehmen.

⑤

Bor als Akzeptor, bei 300K (RT)

a)

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

Die Elektronenkonzentration ist wegen $n = \frac{n_i^2}{p}$ sehr viel geringer, ihr Beitrag zur Leitfähigkeit kann damit vernachlässigt werden. Daten der Beweglichkeit aus der FS:

$$\Rightarrow \mu_h = 330 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \quad (\text{Locher} \equiv \text{Holes})$$

$$\sigma = \sigma_h = e \cdot \mu_h \cdot p =$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 330 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$= \underline{\underline{5,287 \frac{1}{\Omega \text{cm}}}}$$

c) undot. Silizium $n = p = n_i = 6,71 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$

Auch hier Beweglichkeiten aus FS:

$$\mu_e = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \quad , \quad \mu_h = 480 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

(da $N_A \ll 10^{15} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow \mu$ in Sättigung)

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_h = e (\mu_e + \mu_h) n_i$$

$$\sigma = 1,97 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\Omega \text{ cm}}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } v_d^h &= \frac{j_h}{e \cdot p} = \frac{I}{e \cdot A \cdot p} \\ &= \frac{10^{-6} \text{ A}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 0,001 \text{ cm}^2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}} \\ &= 0,0624 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Bem.: ziemlich langsam, oder?!

Beobachtung: Lichtschalter betätigt $\Rightarrow$ sofort Licht an (keine merkliche Verzögerung)

$\Rightarrow$ Wirkung des elektr. Stroms breitet sich viel schneller aus!

⑥

$$N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

@ 300K

$$\begin{aligned} U_D &= \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} = \\ &= 25,9 \text{ meV} \cdot \ln \left[\frac{10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}}{(6,71 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2} \right] \\ &= 0,674 \text{ V} \end{aligned}$$

$$|X_m| = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{N_A}{N_D \cdot (N_A + N_D)} \cdot U_D}$$

aus
Material-
tabelle

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 11,4 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ As/cm} \cdot \text{V}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}}}$$

$$\sqrt{\frac{10^{17} \text{ cm}^{-3}}{10^{14} \text{ cm}^{-3} (10^{17} + 10^{14}) \text{ cm}^{-3}} \cdot 0,674 \text{ V}}$$

$$= 354,962 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{\text{cm}}} \cdot 82,147 \cdot 10^{-9} \sqrt{\frac{1}{\text{cm}^3}}$$

$$= 29,15 \cdot 10^{-3} \text{ cm} = 2,915 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 2,9 \mu\text{m}$$

$$|x_p| = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \cdot \frac{N_D}{N_A (N_D + N_A)} \cdot \varphi_D}$$

Zahlenwerte einsetzen führt zu

$$|x_p| = 2,92 \cdot 10^{-7} \text{ cm} = 2,92 \cdot 10^{-9} \text{ m} \\ = \underline{\underline{2,92 \text{ nm}}}$$

⇒ Sperrschichtbreite $b = |x_n| + |x_p|$

$$b = 2,92 \text{ } \mu\text{m} + 2,92 \text{ nm}$$

↑
Beitrag vernachlässigbar

$$\Rightarrow \underline{\underline{b = 2,92 \text{ } \mu\text{m}}}$$

7 a) $T = 300K$ (RT) $\rightarrow n_i = 6,71 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$
 $N_A = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

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

$$= \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 300 \text{ K}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 10^{18} \cdot 10^{16}}{(6,71 \cdot 10^9)^2} \right)$$

$$1 \text{ J} \hat{=} 1 \text{ V As} \Rightarrow \left[\frac{\text{J}}{\text{As}} \right] = [\text{V}] \text{ units}$$

$$= 0,0258 \text{ V} \cdot \ln (8,88 \cdot 10^{14})$$

$$= 0,0258 \text{ V} \cdot 34,42 = \underline{0,89 \text{ V}}$$

$$|x_p| = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0}{e}} \cdot \sqrt{\frac{N_D}{N_A (N_A + N_D)} \cdot U_D}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 11,4 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ As/Vcm}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}}}$$

$$\sqrt{\frac{10^{16} \text{ cm}^{-3}}{4 \cdot 10^{18} (4 \cdot 10^{18} + 10^{16}) \text{ cm}^{-3}} \cdot 0,89 \text{ V}}$$

$$= 3,549 \cdot 10^3 \cdot 23,55 \cdot 10^{-12} \text{ cm}$$

$$= 83,58 \cdot 10^{-9} \text{ cm} = 830 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

$$\approx 830 \text{ pm} = \underline{0,830 \text{ nm}}$$

$|x_n|$ wird entsprechend berechnet

$$\Rightarrow |x_n| = \underline{0,3345 \text{ } \mu\text{m}}$$

b) Raumladungen im p- und n-Gebiet sind gleich groß! $\Rightarrow x_p \cdot N_A = x_n \cdot N_D$

$$Q_+ = -Q_- = e \cdot A \cdot x_n \cdot N_D = e \cdot A \cdot x_p \cdot N_A$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \pi r^2 \cdot 0,3345 \text{ } \mu\text{m} \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \pi (250 \text{ } \mu\text{m})^2 \cdot 0,3345 \text{ } \mu\text{m} \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$= 1,07 \cdot 10^{-10} \text{ As} = 1,07 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

$$= \underline{107 \text{ pC}}$$

⑧ n-leitendes Gebiet $\Rightarrow$ Stromtransport durch Elektronen

Beweglichkeit μ_e für 10^{16} cm^{-3} aus FS:

$$\mu_e = 1250 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= \mu_e \cdot e \cdot n = 1250 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \\ &= 2 \frac{1}{\Omega \text{ cm}}\end{aligned}$$

spez. Widerstand : $\rho_e = \frac{1}{\sigma_e} = 0,5 \Omega \text{ cm}$

p-leitendes Gebiet $\Rightarrow$ Stromtransport durch Löcher

Beweglichkeit μ_h für $4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ aus FS:

$$\mu_h = 80 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$\sigma_h = e \cdot \mu_h \cdot p = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 80 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_h = 51,27 \frac{1}{\Omega \text{cm}}$$

spez. Widerstand: $\rho_h = \frac{1}{\sigma_h} = 0,0195 \Omega \text{cm}$

Bemerkenswert:

geringere Beweglichkeit der Löcher, aber durch viel größere Konzentration höhere Leitfähigkeit als die Elektronen im n-leitenden Gebiet!

9

$$U_{D,Ge} = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_{i,Ge}^2} \right)$$

$$U_{D,Si} = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_{i,Si}^2} \right)$$

$$U_{D,Ge} - U_{D,Si} = \frac{k_B \cdot T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_{i,Ge}^2} \right) -$$

$$\frac{k_B \cdot T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_{i,Si}^2} \right)$$

$$= \frac{k_B \cdot T}{e} \cdot \ln \left(\frac{n_{i,Si}^2}{n_{i,Ge}^2} \right)$$

$$= \frac{2 k_B T}{e} \cdot \ln \left(\frac{n_{i,Si}}{n_{i,Ge}} \right)$$

$$= \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 300 \text{ K}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \text{ V} \cdot \ln \frac{6,71 \cdot 10^9}{2,14 \cdot 10^{13}}$$



Werte $n_{i,Si}$ m.

$n_{i,Ge}$ aus Mat.
tabelle FS

$$= 2 \cdot 25,9 \text{ mV} \cdot (-8,06755)$$

$$= -417,9 \text{ mV}$$

→ bei beliebiges aber gleicher
Dotierung ist die Diffusions-
spannung in Germanium um
417 mV kleiner als in Silizium!

10

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

$$\Rightarrow \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} = \frac{U_D \cdot e}{k_B T}$$

$$\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} = e^{U_D e / k_B T} = \frac{N^2}{n_i^2}$$

$N_A = N_D$
↓

$$N^2 = N_A \cdot N_D = n_i^2 \cdot e^{U_D e / k_B T}$$

$$N = n_i \cdot e^{U_D e / 2 k_B T}$$

Werte aus
Materialtab.
der FS

$$\hookrightarrow = 2,25 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3} \cdot e^{1,15 \text{ eV} / 2 k_B T_{\text{room}}}$$

$$= 2,25 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3} \cdot 4,566 \cdot 10^9$$

$$= 1,03 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

(11)

RT!

$$\sigma_e = \mu_e \cdot e \cdot n$$

$$n = \frac{\sigma_e}{\mu_e \cdot e} = \frac{1,25 \text{ S/cm}}{3900 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \\ = \underline{2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}}$$

$$p = \frac{\sigma_h}{\mu_h \cdot e} = \frac{12 \text{ S/cm}}{750 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \\ = \underline{10^{17} \text{ cm}^{-3}}$$

$$U_D = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \\ = 25,9 \text{ mV} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10^{15} \cdot 10^{17}}{(2,14 \cdot 10^{15})^2} \leftarrow \text{Wert aus Mat. tabel der TS}$$

$$= 25,9 \text{ mV} \cdot 12,99 = 336 \text{ mV} = \underline{0,34 \text{ V}}$$