Aufgabe 2.2.1

Ein Silizium PN-Übergang wurde mit $n_A = n_D = 10^{17}$ cm^{-3} dotiert. Die Dotierungen sind bei Raumtemperatur vollständig ionisiert, so dass $p_p = n_n = 10^{17}$ cm^{-3} (bei $n_i = 1{,}6 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}) betragen.
Frage 1: Wie groß sind n_p und p_n?
Frage 2: Wie groß ist die Diffusionsspannung?
Hinweis: Die Überlegungen finden bei thermischem Gleichgewicht statt. Das Verhältnis von $n_p/n_n = f_F(W_{L\ P\text{-}Elektrode}) / f_F(W_{L\ N\text{-}Elektrode})$ mit f_F nach (2.2) kann durch Einsetzen von $W_{L\ P\text{-}Elektrode} = q_0\ \varphi$ (P-Elektrode) und $W_{L\ N\text{-}Elektrode} = q_0\ \varphi$ (N-Elektrode) (vergleiche auch Abb. 2.10) und vernachlässigen der „1" gegenüber den Exponentialfunktionen zu $U_{Diff} = \varphi$ (N-Elektrode) – φ (P-Elektrode) umgeformt werden (kT/q_0 = 26 mV bei etwa Raumtemperatur ca. 300 °K).
Zusatzfrage 1: Welche Schwellspannung ist bei der Kennlinie zu erwarten?
Zusatzfrage 2: Was ergäbe Galliumarsenid mit ni = $1{,}3 \cdot 10^6$ cm^{-3} bei gleicher Dotierung?

Zu 1:

n_n ist die Elektronendichte in der N-Bahn bis zur Elektrode und p_p ist die Löcherdichte in der P-Bahn bis zur Elektrode. Donatoren wie Akzeptoren sind bei Raumtemperatur voll ionisiert.

$$n_n = p_p = 1 \cdot 10^{17} cm^{-3}$$

$$n \cdot p = n_i^2 = 2{,}56^{20} cm^{-6}$$

Also ist $n_p = \dfrac{2{,}56^{20} cm^{-6}}{p_p} = 2{,}56 \cdot 10^3 cm^{-3}$.

und $p_n = \dfrac{2{,}56^{20} cm^{-6}}{n_n} = 2{,}56 \cdot 10^3 cm^{-3}$.

Zu 2:

$n_p/n_n = f_F(W_{L\ P\text{-}Elektrode}) / f_F(W_{L\ N\text{-}Elektrode})$ mit $f_F = \left(1 + e^{\frac{(W - W_F)}{k \cdot T}}\right)^{-1}$ somit wird

$$\frac{n_P}{n_N} = \frac{f_F(W_P)}{f_F(W_N)} = \frac{\left(1+e^{\frac{(W_P-W_F)}{k\cdot T}}\right)^{-1}}{\left(1+e^{\frac{(W_N-W_F)}{k\cdot T}}\right)^{-1}} = \frac{\left(1+e^{\frac{(W_N-W_F)}{k\cdot T}}\right)}{\left(1+e^{\frac{(W_P-W_F)}{k\cdot T}}\right)} \approx \frac{\left(e^{\frac{(W_N-W_F)}{k\cdot T}}\right)}{\left(e^{\frac{(W_P-W_F)}{k\cdot T}}\right)} = e^{\left[\frac{(W_N-W_F-W_P+W_F)}{k\cdot T}\right]} = e^{\left[\frac{(W_N-W_P)}{k\cdot T}\right]}$$

$$\ln\left(\frac{n_P}{n_N}\right) = \ln\left(e^{\left[\frac{(W_N-W_p)}{k\cdot T}\right]}\right) = \frac{W_N - W_P}{k \cdot T}$$

Mit $W_N = e \cdot \varphi_N$ und $W_P = e \cdot \varphi_P$. (Vergleiche Abb. 2.10 beide Energien negativ und $W_N < W_P$)

φ_N und φ_P sind die Potentiale an den Elektroden der N- und P-Schicht.

$$\ln\left(\frac{n_P}{n_N}\right) = \frac{e \cdot \varphi_N - e \cdot \varphi_P}{k \cdot T} = (\varphi_N - \varphi_P) \cdot \frac{e}{k \cdot T} = (\varphi_N - \varphi_P) \cdot \frac{-q_0}{k \cdot T}$$

Mit kT/q_0 = 26 mV = kT/q_0 wird daraus:

$$U_D = \ln\left(\frac{n_P}{n_N}\right)\cdot\frac{k\cdot T}{-q_0} = \ln\left(\frac{2{,}56\cdot 10^3 cm^{-3}}{1\cdot 10^{17} cm^{-3}}\right)\cdot(-26\,\mathrm{mV}) = (-31{,}3)\cdot(-26\,\mathrm{mV}) = 0{,}81V$$

bei Dotierung mit nur 10^{16} cm^{-3} ergäbe es:

$$U_D = \ln\left(\frac{n_P}{n_N}\right)\cdot\frac{k\cdot T}{-q_0} = \ln\left(\frac{2{,}56\cdot 10^4 cm^{-3}}{1\cdot 10^{16} cm^{-3}}\right)\cdot(-26\,\mathrm{mV}) = (-26{,}7)\cdot(-26\,\mathrm{mV}) = 0{,}7V$$

Zusatzfrage 1:

Die Schwellspannung wird ca. 0,8 V (bzw. 0,7 V) betragen.

Zusatzfrage 2:

$$n_p = \frac{1{,}3^2\cdot 10^{12} cm^{-6}}{10^{17} cm^{-3}} = 1{,}69\cdot 10^{-5} cm^{-3}$$

$$U_D = \ln\left(\frac{n_P}{n_N}\right)\cdot\frac{k\cdot T}{-q_0} = \ln\left(\frac{1{,}69\cdot 10^{-5} cm^{-3}}{1\cdot 10^{17} cm^{-3}}\right)\cdot(-26\,\mathrm{mV}) = (-50{,}1)\cdot(-26\,\mathrm{mV}) = 1{,}3V$$

Die Schwellspannung wird ca. 1,3 V betragen.

Diese Schwellspannungen sind typisch für Si bzw. GaAs.