Heiko Dumlich 19. Juni 2007

8 Übungsblatt Photovoltaik

8.1 (Tunneldiode)

Wir betrachten eine Tunneldiode (p^{++}/n^{++}-Kontakt).

a)

(1)

In diesem Fall ist eine negative Spannung angelegt, d.h. das Energieband auf der p-Seite besitzt besetzte Zustände, während auf der n-Seite unbesetzte Zustände existieren, was zu einem Tunnelstrom führt, da die Elektronen von der p zu n Seite tunneln.

(2)

Legen wir eine positive Spannung an, so gibt es ein Energieband in dem sich auf der n^{++} Seite besetze Zustände befinden während auf der p^{++} Seite unbesetzte Zustände existieren. Die Elektronen können daher von der n zur p Seite tunneln, was uns einen Tunnelstrom liefert. Ab einer bestimmten Spannung beginnt jedoch die Anzahl der Elektronen, die tunneln können zu sinken, so dass sich ein Maximum ergibt, welches bei (2) liegt.

3

In diesem Fall befinden sich die besetzten Zustände des Energiebandes zu hoch, als dass der Tunneleffekt stattfindet könnte, hier ist dann der Diffusionsstrom verantwortlich für den Strom.

b)

Es ergibt sich eine Abnahme des Tunnelstroms, während der Diffusionsstrom noch nicht einsetzt, was daran liegt, dass das Energieband mit den unbesetzten Zuständen auf der n-Seite nach oben "geschoben" (energetisch gesehen) wird und somit der Überlapp mit der p-Seite abnimmt, wobei dann weniger unbesetzte Zustände weniger besetzten Zuständen gegenüberstehen und ein Strom somit geringer ausfällt.

c)

Es geht im Idealfall keine Leistung verloren, da der Tunnelkontakt im Idealfall alle Elektronen überträgt und keine Rekombination stattfindet.

8.2 (Tunnelwahrscheinlichkeit im Tunnelkontakt)

Das elektrische Feld $E = \frac{V(x)}{x} = \frac{E_G}{x_0}$ ist, da der Potenzialverlauf von $V(x)$ linear ist, konstant. Die Tunnelwahrscheinlichkeit durch eine Potenzialbarriere ist in guter Näherung als:

$$T_t \approx \exp\left(-2\int_0^{x_0} |k(x)|\, dx\right)$$

gegeben.

a)

Es gilt für den Verlauf des elektrischen Potentials:

$$V(x) = \begin{cases} E_G\left(1-\frac{x}{x_0}\right), & 0 \le x \le x_0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Wir prüfen die Vorraussetzung der Aufgabenstellung $E = -\frac{\partial}{\partial x}V(x) = 0 + \frac{E_G}{x_0}$, somit stimmt das Potential mit der geforderten Konstantheit des elektrischen Feldes überein. Die kinetische Energie sei die Referenzenergie, wobei wir diese $E_{kin} = 0$ setzen. Für den Wellenvektor folgt somit:

$$k(x) = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}V(x)}$$

bzw. wenn wir $V(x)$ einsetzen:

$$k(x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}E_G\left(1-\frac{x}{x_0}\right)} & 0 \le x \le x_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

b)

Es ist zu zeigen, dass für die Tunnelwahrscheinlichkeit gilt:

$$T_t \approx \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}E_G^{\frac{3}{2}}}{3q\hbar E}\right),$$

Wir nutzen jetzt unser Ergebnis aus **a)**, Formel (1) des Übungsblattes und $E = \frac{E_G}{qx_0}$:

$$
\begin{aligned}
T_t &\approx \exp\left(-2\int_0^{x_0}|k(x)|\,dx\right)\\
&= \exp\left(-2\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}E_G}\int_0^{x_0}\sqrt{\left(1-\frac{x}{x_0}\right)}dx\right)\\
&= \exp\left(-2\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}E_G}\left[-\frac{2}{3}\left(1-\frac{x}{x_0}\right)^{\frac{3}{2}}x_0\right]_0^{x_0}\right)\\
&= \exp\left(-2\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}E_G}\left[0+\frac{2}{3}x_0\right]\right)\\
&= \exp\left(-\frac{4}{3}\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}E_G}x_0\right)\\
&= \exp\left(-\frac{4}{3\hbar}\sqrt{2m^*}E_G^{\frac{3}{2}}\frac{1}{q}\frac{qx_0}{E_G}\right)\\
&= \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}E_G^{\frac{3}{2}}}{3q\hbar E}\right)
\end{aligned}
$$

□

c)

Wir betrachten einen p^{++}/n^{++}-Kontakt aus Silizium ($m_e^* = 1.09\,m_e$). Das Diffusionspotential sei $\approx E_G$. Es ist die Tunnelwahrscheinlichkeit für die Konzentration der Akzeptoren und Donatoren von jeweils $10^{20}\,cm^{-3}$ zu berechnen und mit dem Ergebnis für den Fall einer Konzentration von $5 \cdot 10^{19}\,cm^{-3}$ zu vergleichen. Wir können über die Approximation, dass $E_G \approx \psi_{bi}$ ist, die Konzentrationen von Akzeptoren und Donatoren in die Tunnelwahrscheinlichkeitsformel einbringen. Es gilt

$$\psi_{bi} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right).$$

Für Silizium ist $n_i = 10^{10}\,cm^{-3}$. Hieraus folgt dann ein Diffusionspotential für den ersten Fall mit $N_{A,D} = 10^{20}\,cm^{-3}$ von ($T = 300\,K$):

$$\psi_{bi,1} = \frac{kT}{q}\ln\left(10^{20}\right) = 1,191\,V$$

und für den zweiten Fall mit $N_{D,A} = 5 \cdot 10^{19}\,cm^{-3}$:

$$\psi_{bi,2} = \frac{kT}{q}\ln\left(2.5 \cdot 10^{19}\right) = 1,155\,V$$

Setzen wir dies in unsere Formel für die Tunnelwahrscheinlichkeit ein, so folgt:

$$T_t \approx \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}\psi_{bi}^{\frac{3}{2}}}{3q\hbar E}\right)$$

Leider fehlt E bzw. x_0, so dass ein weiteres ausrechnen leider nicht möglich ist (schade eigentlich). Aber qualitativ lässt sich schon sagen, dass durch das höhere ψ_{bi} für den Fall einer höheren Konzentration die Tunnelwahrscheinlichkeit sinken wird, da der Faktor im Exponenten im Zähler steht, wobei der Exponent negativ ist, somit ist für ein größeres ψ_{bi} der negative Exponent größer und somit das Ergebnis insgesamt kleiner, d.h. die Tunnelwahrscheinlichkeit geringer.