Heiko Dumlich 15. Juli 2007

11 Übungsblatt Photovoltaik

11.1 (Auger-Rekombination)

Wir betrachten Auger-Rekombination, wobei hierfür zwei Elektronen und ein Loch benötigt werden, daher hängt die Rate von n^2 und p ab. Über den Auger-Koeffizienten lässt sich dann die Rate exakt bestimmen:

$$R_{Au} = C_{ee} n^2 p$$

Der Auger-Koeffizient ist in der Größenordnung $C_{ee} \approx 10^{-30}\,\frac{cm^6}{s}$.

Wir betrachten eine Solarzelle mit einem Absorber aus kugelförmigen Quantendots mit dem Durchmesser $d_{QD} = 3\,nm$. Die Atome im Quantendot besitzen einen Durchmesser von $d_A = 3\,\text{Å}$. Wir nehmen die Atome kugelförmig an. Das Volumen einer Kugel ist gegeben mit $V_{Kugel} = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3$, um eine grobe Abschätzung zu erhalten, wie viele Atome sich in einem Quantendot befinden, können wir das Volumen des Quantendots durch das Volumen eines Atoms teilen. Hieraus folgt dann eine ungefähre Anzahl an Atomen im Quantendot (ungefähr, da die Kugeln "starr" sind und sich nicht so verformen lassen, dass sie den gesamten Raum ausfüllen können, den der Quantendot offeriert, daher haben wir je nach packungsdichte weniger Atome als berechnet, wir nehmen grob 70% Packungsdichte an, d.h. wir multiplizieren unser Ergebnis mit 0.7, um ein einigermaßen realistisches Ergebnis für die Atomanzahl im Quantendot zu erhalten). Es ergibt sich also für die Anzahl der Atome im Quantendot:

$$N = 0.7\,\frac{V_{QD}}{V_A} = 0.7\,\frac{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_{QD}}{2}\right)^3}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_A}{2}\right)^3} = 0.7\,\frac{d_{QD}^3}{d_A^3} = 0.7\,\frac{3^3\cdot 10^{-27}}{3^3\cdot 10^{-30}} = 700$$

Wir besitzen also ca. 700 Atome pro Quantendot. Wir nehmen eine Generation von einem Elektron pro Quantendot an, d.h. einem Elektron pro 700 Atomen. Die Gleichgewichtsladungsträgerdichte ist mit $n = p = 10^{11} cm^{-3}$ gegeben, woraus die Auger-Lebensdauer der Elektronen zu bestimmen ist. Die Auger-Lebensdauer ergibt sich mit (Niedriginjektion siehe Henning Nagel - Analyse und Verluste der optischen und elektrischen Verluste in multikristallinen Silizium-Solarzellen[1]):

$$\tau_{Auger} \approx \frac{1}{C_{ee} n^2} \approx 10^8\,s$$

Wir vergleichen dies mit der Störstellen-Rekombination ($\tau_{Str} = 1\,ms$) und sehen sofort, dass im Fall der Niedriginjektion die Augerrekombination vernachlässigbar ist, da die Lebensdauer sehr viel größer ist. Die Niedriginjektion setzt jedoch nur eine geringe

[1] http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967773008&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=967773008.pdf

Injektion von Ladungsträgern vorraus, was bei uns anscheinend nicht gegeben ist (leider keine Angabe wieviele Quantendots pro Volumen, d.h. wieviele Elektronen wir pro Volumen und Zeiteinheit erhalten, nur Angabe über Elektronen pro Quantendotvolumen, aber Zelle besteht nicht nur aus Quantendots). Gehen wir von einer Hochinjektion (wieder[1]) aus, so ist die Auger-Lebensdauer über:

$$\tau_{Auger} \approx \frac{1}{C_{ee}\Delta n^2}$$

gegeben. Wir besitzen ein Elektron pro Quantendot, d.h. die Elektronendichte im Quantendot ist gegeben mit $\Delta n = 1/V_{QD} \approx 1.91 \cdot 10^{21\ -3}$, mit dem Anteil der Quantendots am Gesamtmaterial könnten wir dann die Überschussladungsdichte der Elektronen für die Zelle bestimmen. Wir können diesen nur selbst schätzen, da wir einen Einfluss im Falle von Quantendots erwarten, schätzen wir den Quantendotanteil auf $\frac{V_{QD}}{V_{ges}} = 10^{-4}$. Wir erhalten dann für die Dichte $\Delta n \approx 1.91 \cdot 10^{17}\, cm^{-3}$ und daraus eine Auger-Lebensdauer von:

$$\tau_{Auger} \approx 2.7 \cdot 10^{-5}\, s$$

Damit wäre die Auger-Rekombination der dominierende Einfluss. Man kann also mit dem Quantendotanteil den Einfluss der Augerrekombination stark beeinflussen. (Andere Effekte vernachlässigt).

11.2 (Quantendots)

Wir betrachten ein sich im Quantendot befindliches Teilchen äquivalent zu einem Teilchen im Potentialkasten. Die Lösung der Schrödingergleichung für ein Elektronengas im Kasten der Länge L ergibt sich dann mit:

$$E_n = \frac{n^2\hbar^2\pi^2}{2mL^2}$$

mit $n \in \mathbb{N}$ der Hauptquantenzahl und m der Teilchenmasse. Wir berechnen die Energien für den niedristen Zustand $n = 1$ der Elektronen, daher entspricht die Masse der Elektronenmasse m_e. Die Breite des Kastens ist mit der Länge L gegeben, was in diesem Fall dem Durchmesser des Quantenpunktes entspricht, welcher mit d gegeben ist, es gilt also $d = L$, wobei der Quantenpunkt kugelförmig ist. Es folgt also mit den Durchmessern $L_a = 2\,nm$, $L_b = 5\,nm$, $L_c = 10\,nm$, $L_d = 100\,nm$ und $L_e = 500\,nm$ für die Energien:

$$\begin{aligned}
E_a &= 1.51 \cdot 10^{-20}\, J \\
E_b &= 2.41 \cdot 10^{-21}\, J \\
E_c &= 6.02 \cdot 10^{-22}\, J \\
E_d &= 6.02 \cdot 10^{-24}\, J \\
E_e &= 2.41 \cdot 10^{-25}\, J
\end{aligned}$$

Die Graphen und Rechnungen befinden sich im angehängten Mathematica Ausdruck.