Heiko Dumlich 30. Mai 2007

5 Übungsblatt Photovoltaik

5.1 (Back-Surface-Field)

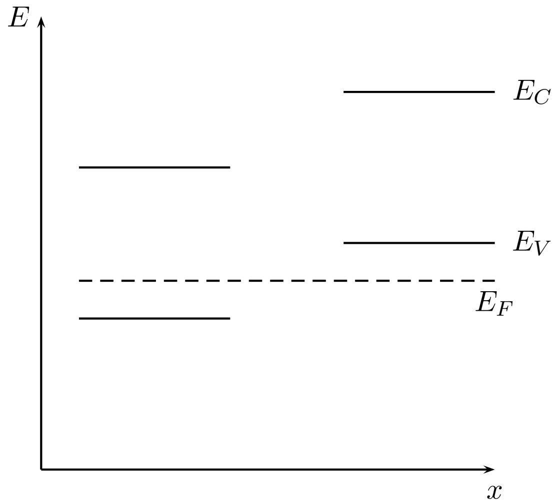
a)

Es ist die Rekombination am Rückseitenkontakt gemeint. Dies ist eine Oberflächenrekombination. Es existiert ein Halbleiter-Metall-Kontakt, wobei die Zustandsverteilung bei diesem eine hohe Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit zur Folge hat.

b)

Beim Back-Surface-Field wird eine p^+ Schicht eingebaut, wobei ein pp^+-Übergang entsteht. Das resultierende Feld wirkt für die Elektronen wie eine Art Spiegel, da es eine abstoßende Kraft auf diese bewirkt, es treibt die Elektronen zurück in die Basis. Dadurch erreichen weniger Elektronen den Halbleiter-Metall-Kontakt und somit rekombinieren auch weniger Elektron-Loch-Paare an der Oberfläche.

Skizze:



Die Elektronen werden am Kontakt nun zum Teil reflektiert.

c)

Es besteht weiterhin die Möglichkeit der Reduzierung der Kontaktfläche, somit finden auch weniger Oberflächenrekombinationen statt, da die Anzahl dieser von der Größe der Oberfläche abhängig ist.

5.2 (Antireflexionsschicht)

Wir nehmen eine Antireflexionsschicht der Dicke d und dem Brechungsindex n_g auf Silizium (Brechungsindex $n_s \approx 4$) und an Luft (Brechungsindex $n_l = 1$) an. Die Gesamtreflexion R dieser Schichten in Abhängigkeit der Wellenlänge λ lässt sich beschreiben durch:

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(2\theta)}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(2\theta)}$$

$$\text{mit}: \; r_1 = \frac{n_l - n_g}{n_l + n_g}; \quad r_2 = \tfrac{n_g - n_s}{n_g + n_s}; \quad \theta = \frac{2\pi n_g d}{\lambda}$$

a)

Es wird ein Reflexionsminimum für eine optische Weglänge in der Antireflexionsschicht von $n_g d = \frac{\lambda}{4}$ angenommen. Es ist zu bestimmen, unter welcher Nebenbedingung $R = 0$ wird. D.h.

$$R = 0 = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(2\theta)}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(2\theta)}$$

mit $\theta = \frac{2\pi n_g d}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$, somit also:

$$R = 0 = \frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2}{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2},$$

Dies verschwindet also für $r_1^2 - 2r_1 r_2 + r_2^2 = (r_1 - r_2)^2 = 0$, dies wird durch $r_1 = r_2$ erfüllt.

b)

Es ist die Dicke d der Antireflexionsschicht für minimale Reflexionsverluste in Abhängigkeit der Wellenlänge und des Silizium-Brechungsindexes zu bestimmen. Wir wissen bereits aus **a)**, dass das Minimum für $n_g d = \frac{\lambda}{4}$ angenommen wird. Das heisst $d(\lambda) = \frac{\lambda}{4 n_g}$. Wir wollen nun d in Abhängigkeit von der Wellenlänge und des Silizium-Brechungsindex n_s darstellen, d.h. wir müssen $d(\lambda, n_s)$ bestimmen. Es gilt:

$$r_2 = \frac{n_g - n_s}{n_g + n_s} \Leftrightarrow n_g = \frac{(1 + r_2)}{(1 - r_2)} n_s.$$

Dies können wir einsetzen und wir erhalten:

$$d(\lambda, n_s) = \frac{\lambda (1 - r_2)}{4 (1 + r_2) n_s}.$$

c)

Es ist die Antireflexionsschicht in Hinblick auf Dicke d und Brechungsindex n_g bei einer Wellenlänge von $500\,nm$ zu optimieren. Wir haben in **a)** die Nebenbedingung für $R = 0$ als $r_1 = r_2$ gefunden. Wir können nun mit $n_l = 1$ und $n_s = 4$ schreiben:

$$r_1 = \frac{n_l - n_g}{n_l + n_g} = \frac{1 - n_g}{1 + n_g} = \frac{n_g - 4}{n_g + 4} = \frac{n_g - n_s}{n_g + n_s} = r_2$$

Dies können wir umformen zu $n_g = 2$. Nutzen wir die Bedingung $n_g d = \frac{\lambda}{4}$ mit $n_g = 2$ und $\lambda = 500 \cdot 10^{-9}\,m$, so ergibt sich eine Dicke von $d = 6.25 \cdot 10^{-8}\,m$. Wir benutzen nun d und n_g für den Fall von $\lambda = 800 \cdot 10^{-9}\,m$, wir können zuerst θ bestimmen:

$$\theta = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 6.25 \cdot 10^{-8}}{800 \cdot 10^{-9}} \approx 0,982 \Rightarrow \cos(2\theta) \approx -0,383$$

Hieraus folgt für R (wobei immer noch $r_1 = r_2 = r = -\frac{1}{3}$):

$$R = \frac{2r^2\,(1 + \cos(2\theta))}{1 + r^4 + 2r^2 \cos(2\theta)} = \frac{2\frac{1}{9}\,(1 - 0,383)}{1 + \frac{1}{81} + 2\frac{1}{9}\,(-0,383)} \approx \frac{0,137}{0,927} \approx 0,148.$$

Es werden also ca. 15% des $800\,nm$ Lichtes reflektiert und sind somit Reflexionsverlust.

5.3 (Kontaktfingeranordnung zur Wirkungsgradmaximierung)

Wir betrachten eine n^+p-Silizium-Solarzelle mit einer Fläche von $5 \times 5\,cm^2$, welche am Arbeitspunkt betrieben wird ($j_A = 40\,\frac{mA}{cm^2}; U_A = 0,6\,V; P_A^* = U_A j_A = 24\,\frac{mAV}{cm^2}$, für $25\,cm^2$ ist die Leistung maximal also: $P_A = 0,6\,W$). Wir ordnen $b = 30\,\mu m$ breite Kontaktfinger parallel zueinander und senkrecht zu den Kantenflächen der Zelle an. Das Ziel ist es für einen hohen Wirkungsgrad den optimalen Fingerabstand d zu berechnen, wobei nur der Serienwiderstand im Emitter R_n berücksichtigt werden soll. Die Kontaktfingerlänge beträgt $l = 5\,cm$, der Flächenwiderstand $R_S = 20\,\frac{\Omega}{cm^2}$, wobei sich der Emitterwiderstand über

$$R_n = \frac{R_s d}{6l}$$

berechnen lässt, mit d dem optimalen Fingerabstand, der zugleich der Breite der zwischen zwei Kontaktfingern eingeschlossenenen Emitterfläche entspricht. Für den Wirkungsgrad gilt:

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_L} = \frac{I_A \cdot V_A}{P_L}$$

Es ist nun zu beachten, dass jeder Kontaktfinger $A = l \cdot b = 5 \cdot 3 \cdot 10^{-3}\,cm^2 = 0.015\,cm^2$ Fläche verbraucht, die der Zelle nicht mehr zur Energiegewinnung zur Verfügung steht. Daher ist die Breite der nutzbaren Fläche gegeben mit $D = l - N \cdot b$ (Die nutzbare Fläche ist gegeben mit $D \cdot l = l^2 - N \cdot A$), wobei N die Anzahl der Kontakfinger ist. Hieraus folgt für den Abstand der Kontakfinger $d = \frac{D}{N} = \frac{l}{N} - b$. Für den Emitterwiderstand können wir dies jetzt einsetzen:

$$R_n = \frac{R_s}{6l}\left(\frac{l}{N} - b\right) = \frac{R_s}{6N} - \frac{R_s b}{6l},$$

unser Ziel ist es N zu bestimmen, wobei η in Abhängigkeit von d maximiert werden soll. Es gilt $V_A = R_n I_A$, hieraus folgt:

$$\eta = \frac{I_A \cdot V_A}{P_L} = \frac{R_n I_A^2}{P_L} = \frac{R_s d}{6l}\frac{I_A^2}{P_L}$$

ableiten nach d und 0 setzen liefert:

$$\frac{\partial \eta}{\partial d} = 0 = \frac{R_s}{6l}\frac{I_A^2}{P_L},$$

wir sehen sofort, dass der Weg kein sinnvolles Ergebnis liefert. Anderer Ansatz $U_A = R_n I_A \Leftrightarrow R_n = \frac{U_A}{j_A} = \frac{0{,}6\,V}{40\,mA} = 0,015\,\frac{\Omega}{cm^2}$. Setzen wir R_n ein, erhalten wir:

$$N = \frac{R_s}{6\left(R_n + \frac{R_s b}{6l}\right)} = \frac{20\,\frac{\Omega}{cm^2}}{6\left(0,6\,\frac{\Omega}{cm^2} + \frac{20\,\frac{\Omega}{cm^2}\,30\,10^{-4}\,cm}{30\,cm}\right)} = \frac{10}{(1,8\,+0.006)} = \frac{10}{1,806} \approx 5,54$$

D.h. ca. $N = 6$. Hieraus folgt dann $d = \frac{5}{6}\,cm - 0,003\,cm = 0,83\,cm$. Dies liefert einen Widerstand R_n von:

$$R_n = \frac{20\frac{\Omega}{cm^2}0,83\,cm}{30\,cm} = 0,553\,\frac{\Omega}{cm^2} \neq 0,015\,\frac{\Omega}{cm^2}.$$

Ist also auch falsch, das liegt vermutlich am Ansatz, da $U_A \neq R_n I_A$!