

## Lösungen zu Kapitel 4:

### Aufgabe 4.1: Rekombination in der c-Si-Solarzelle

- a) Die wichtigsten sind Störstellen-Rekombinationen (Fremdatome, Kristallbaufehler) sowie Oberflächen-Rekombinationen
- b) Dies ist der oberste Bereich der  $n^+$ -Emitterschicht. Aufgrund der hohen Dotierung rekombinieren die erzeugten Löcher sehr schnell, so dass diese Schicht kaum einen Beitrag zum Photostrom liefert.
- c)  $x_{\text{Abs}} = 140 \mu\text{m}$ ,  $\tau_N = 7 \mu\text{s}$ ,  
$$L_N = \sqrt{D_N \cdot \tau_N} = \sqrt{35 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot 7 \cdot 10^{-6} \text{s}} = \underline{156,5 \mu\text{m}} > x_{\text{Abs}}$$

Ja, das erzeugte Elektron wird voraussichtlich zum Photostrom beitragen.

### Aufgabe 4.2: Absorptionswirkungsgrad einer c-Si-Zelle

Gegeben sei eine c-Si-Zelle der Dicke  $d = 140 \mu\text{m}$ , die mit Licht der Stärke  $E_0 = 1.000 \text{ W/m}^2$  beleuchtet wird ( $\alpha = 100/\text{cm}$ ;  $n = 3,3$ ;  $\lambda = 1.000 \text{ nm}$ ).

- a)  $x_E = 1/\alpha = 1 \text{ cm} / 100 = \underline{100 \mu\text{m}}$
- b) 
$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left( \frac{1 - 3,3}{1 + 3,3} \right)^2 = \underline{28,61 \%}$$
  
$$E_R = R \cdot E_0 = \underline{286,1 \text{ W/m}^2}$$
- c) 
$$E_1 = E(x=0) = (1 - R) \cdot E_0 = \underline{713,9 \text{ W/m}^2}$$
  
$$E_2 = E(x=d) = E_1 \cdot e^{-\alpha \cdot d} = \underline{176,0 \text{ W/m}^2}$$
  
$$E_{\text{Abs}} = E_1 - E_2 = \underline{537,9 \text{ W/m}^2}$$
- d) Durch die Verspiegelung auf der Rückseite verdoppelt sich praktisch die optische Zellenlänge:  
$$E_1 = E(x=0) = E_0$$
  
$$E_2 = E(x=2 \cdot d) = E_1 \cdot e^{-\alpha \cdot 2 \cdot d} = \underline{60,8 \text{ W/m}^2}$$
  
$$E_{\text{Abs}} = E_1 - E_2 = \underline{939,2 \text{ W/m}^2}$$
- e) 
$$\eta_{\text{Abs}} = \frac{E_{\text{Abs}}}{E_0} = \underline{93,22 \%}$$
  
$$S(\lambda) = \frac{q}{h \cdot c} \cdot \lambda \cdot \eta_{\text{Ext}}$$
  
  
Hier:  $\eta_{\text{Ext}} = \eta_{\text{Abs}} \Rightarrow S(\lambda) = \frac{1}{1,24 \mu\text{m}} \cdot 1 \mu\text{m} \cdot 93,22 \% = \underline{75,18 \%}$

#### Aufgabe 4.3: Eindiode-Ersatzschaltbild

- a) Siehe Abschnitt 4.5.2
- b) Serienwiderstand:  
Widerstand der Kontaktfinger auf der Zelloberseite, Metall-Halbleiter-Übergangswiderstand, Ohmscher Widerstand im Halbleiter.

Parallelwiderstand:

Lokale Kurzschlüsse des pn-Übergangs, unzureichende Isolation an den Kanten der Solarzelle

- c) Siehe Abbildung 4.15 a)  
Im Kurzschlusspunkt sinkt der Strom bei steigendem  $R_S$ , da an  $R_S$  eine steigende Spannung abfällt, hierdurch  $U_D$  ansteigt und der Diodenstrom stärker wird. Der Leerlaufpunkt ändert sich nicht, da hier kein Strom durch  $R_S$  fließt und somit auch keine Spannung an ihm abfällt.
- d) Siehe Abbildung 4.15 b)  
Im Leerlaufpunkt steigt bei fallendem  $R_P$  der Anteil des Photostroms, der durch  $R_P$  fließt. Für die Diode bleibt daher weniger Strom übrig, so dass  $U_D$  kleiner wird. Da im Leerlaufpunkt  $U_D = U_L$  gilt, sinkt somit  $U_L$  bei fallendem  $R_P$ . Der Kurzschlusspunkt ist fast unabhängig von  $R_P$ , da in diesem Fall  $R_P$  und  $R_S$  parallel geschaltet sind und  $R_S$  typischerweise mehr als eine Größenordnung kleiner als  $R_P$  ist.

#### Aufgabe 4.4: Spektraler und theoretischer Wirkungsgrad

- a) Der spektrale Wirkungsgrad gibt an, welcher Teil der einfallenden Strahlungsleistung theoretisch mit einem Halbleiter des Bandabstands  $\Delta W_G$  genutzt werden kann. Die **Transmissionsverluste** beschreiben den Teil des Spektrums, dessen Photonen zu energiearm sind, um die Bandlücke zu überwinden. Thermalisierung tritt dagegen bei Photonen auf, die energiereicher sind als die Bandlücke. In diesem Fall kann nur ein Teil der Energie für den Halbleiter genutzt werden, der Rest wird in Wärme umgewandelt.
- b) Der theoretische Wirkungsgrad berücksichtigt zusätzlich zwei Verlustursachen: Zum einen kann in einer Solarzelle nicht die volle Spannung  $\Delta W_G/q$  genutzt werden. Außerdem führt die Verwendung eines pn-Übergangs dazu, dass der Füllfaktor immer kleiner als 100 % ist.
- c) Der theoretische Wirkungsgrad für c-Si-Zellen liegt bei 28,6 %. Die Weltrekordzelle aus Australien liegt mit ihrem gemessenen tatsächlichen Wirkungsgrad von 25 % schon nah an diesem Optimum.

#### Aufgabe 4.5: Spektraler Wirkungsgrad bei monochromatischem Licht

Angenommen, wir wollen monochromatisches Laserlicht möglichst effizient in elektrische Energie umwandeln. Als Laserwellenlänge wählen wir  $\lambda = 1000 \text{ nm}$ , die weiteren Daten sind:  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $A_{\text{Zelle}} = 10 \text{ cm}^2$ ,  $m = 1$ ).

$$\text{a) } N_{\text{Ph}} = \frac{W_{\text{Opt}}}{W_{\text{Ph}}} = \frac{P_{\text{Opt}} \cdot \Delta t}{h \cdot f} = \frac{E \cdot A \cdot \Delta t}{\frac{h \cdot c}{\lambda}} = \frac{1000 \text{ W/m}^2 \cdot 10 \text{ cm}^2 \cdot 1 \text{ s}}{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{5,051 \cdot 10^{19}}$$

$$j_{\text{Max}} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit} \cdot \text{Fläche}} = \frac{N_{\text{Ph}} \cdot q}{\Delta t \cdot A_{\text{Zelle}}} = \frac{5,051 \cdot 10^{19} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}{1 \text{ s} \cdot 10 \text{ cm}^2} = \underline{80,8 \text{ mA/cm}^2}$$

$$\text{b) Sättigungsstromdichte: } j_s = K_S \cdot e^{-\frac{\Delta W_G}{k \cdot T}} = 40.000 \text{ A/cm}^2 \cdot e^{-\frac{1,12 \text{ eV}}{8,63 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} \cdot 298,15 \text{ K}}} = \underline{5 \text{ fA/cm}^2}$$

$$\text{Leerlaufspannung: } U_L = U_T \cdot \ln \frac{I_K}{I_S} = U_T \cdot \ln \frac{j_{\text{Max}}}{j_s} = 26 \text{ mV} \cdot \ln \frac{80,8 \text{ mA/cm}^2}{5 \cdot 10^{-15} \text{ A/cm}^2} = \underline{791 \text{ mV}}$$

$$\text{c) Mit Gleichung (4.18): } FF = 1 - \frac{1 + \ln(\frac{U_L}{U_T} + 0,72)}{\frac{U_L}{U_T} + 1} = 1 - \frac{1 + \ln(\frac{791 \text{ mV}}{26 \text{ mV}} + 0,72)}{\frac{791 \text{ mV}}{26 \text{ mV}} + 1} = \underline{85,9 \%}$$

$$\text{d) Mit Gleichung (4.48): } \eta_T = \frac{U_L \cdot j_{\text{Max}} \cdot FF}{E} = \frac{0,791 \text{ V} \cdot 80,8 \text{ mA/cm}^2 \cdot 0,859}{1000 \text{ W/m}^2} = \underline{54,9 \%}$$

$$\text{e) } j'_{\text{Max}} = j_{\text{Max}} \cdot 1.000 = \underline{80,8 \text{ A/cm}^2}$$

$$U'_L = U_T \cdot \ln \frac{1.000 \cdot j_{\text{Max}}}{j_s} = U_L + U_T \cdot \ln 1.000 = 791 \text{ mV} + 26 \text{ mV} \cdot 6,908 = \underline{971 \text{ mV}}$$

$$FF' = 1 - \frac{1 + \ln(\frac{U'_L}{U_T} + 0,72)}{\frac{U'_L}{U_T} + 1} = 1 - \frac{1 + \ln(\frac{971 \text{ mV}}{26 \text{ mV}} + 0,72)}{\frac{971 \text{ mV}}{26 \text{ mV}} + 1} = \underline{87,9 \%}$$

$$\eta'_T = \frac{U'_L \cdot j'_{\text{Max}} \cdot FF'}{E'} = \frac{0,971 \text{ V} \cdot 80,8 \text{ A/cm}^2 \cdot 0,879}{1.000.000 \text{ W/m}^2} = \underline{68,9 \%}$$