

# Übungsblatt zur Vorlesung Einführung und Grenzflächenaspekte der Photovoltaik

PD Dr. Thomas Dittrich, PD Dr. Thomas Hannappel,  
Dipl.-Ing. Julian Tornow



## Übungsblatt 4

### Aufgabe 1 (5 Punkte)

- In welche vier Gruppen lassen sich die Verluste einer Solarzelle einteilen? Erläutere knapp die Mechanismen.
- Benenne und erläutere kurz die drei wesentlichen Rekombinationsmechanismen, die in der Solarzelle eine Rolle spielen.

### Aufgabe 2 (6 Punkte)

Die Rekombination in einem indirekten Halbleiter mit  $E_G = 1.1$  eV erfolgt im wesentlichen durch den Shockley-Read-Hall-Mechanismus. Dabei ist die Rekombinationsrate  $R$ :

$$R = \frac{np - n_i^2}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)}$$

$n$ ,  $p$  sind die Elektronen- bzw. Löcherkonzentrationen,  $n_i$  die intrinsische Ladungsträgerkonzentration,  $\tau_{n0}$  und  $\tau_{p0}$  die Lebensdauer der Elektronen und Löcher.  $n_1$  und  $p_1$  sind gegeben durch:

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_r}{kT}\right) \quad \text{und} \quad p_1 = N_V \exp\left(-\frac{E_r - E_V}{kT}\right)$$

- Die Lebensdauer der Elektronen kann berechnet werden durch den Wirkungsquerschnitt  $\sigma_e$  ( $10^{-15}$  cm<sup>2</sup>), die thermische Geschwindigkeit  $v_{th}$  ( $10^7$  s<sup>-1</sup>cm) und die Störstellenkonzentration  $N_t$  durch  $\tau_{n0} = (\sigma_e v_{th} N_t)^{-1}$ . Berechne die Lebensdauer für eine Störstellenkonzentration von  $10^{12}$  und  $10^{14}$  cm<sup>-3</sup>.
- Nehme eine durch Licht induzierte Überschussladungsträgerkonzentration von  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup> an. Nehme an, dass  $N_t = 10^{12}$  cm<sup>-3</sup> und  $\tau_{n0} = \tau_{p0}$ . Die effektiven Zustandsdichten sind:  $N_C = N_V = 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>. Nimm nun Störstellen mit der energetischen Lage 100 meV unterhalb  $E_C$ , 500 meV unterhalb  $E_C$  bzw. 100 meV oberhalb  $E_V$  an und berechne die Rekombinationsrate für die drei verschiedenen Störstellen.

### Aufgabe 3 (4 Punkte + 6 Punkte Bonus)

Wie aus der Vorlesung bekannt ist, lässt sich die ideale Diode mit der Diodengleichung beschreiben. Ziel dieser Übung ist es den Sperrsättigungsstrom  $j_0$  zu berechnen. Es wird dazu angenommen, dass in der Raumladungszone weder Generation noch Rekombination von Ladungsträgern erfolgt, damit sind die Stromdichten hier konstant (vgl. Abb. 1)

- Betrachte zunächst nur den Elektronenstrom im p-Halbleiter außerhalb der Raumladungszone. Der Stromfluß erfolgt hier ausschließlich durch Diffusion. Die ortsabhängige Änderung der Stromdichte  $j_n$  wird beschrieben durch die zeitliche Änderung

der Ladungsträgerkonzentration  $n$  und durch die Rekombination der Überschussladungsträger  $\Delta n_p$ , wobei  $\tau_n$  die Minoritätslebensdauer ist

$$\frac{dj_n}{dx} = q \frac{dn}{dt} + q \frac{\Delta n_p}{\tau_n}$$

Zeige, dass sich die Überschussladungsträgerdichte im stationären Zustand durch folgende Differentialgleichung bestimmen lässt:

$$D_n \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} = \frac{\Delta n_p}{\tau_n}$$

b) Die Elektronenkonzentration  $n_p$  am Rand der Raumladungszone  $-x_p$  im p-Gebiet beträgt

$$n_p(-x_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{qU_{ext}}{kT}\right)$$

hierbei ist  $n_{p0}$  die Gleichgewichtskonzentration der Elektronen und  $U_{ext}$  die angelegte Spannung. Löse die Differentialgleichung aus Aufgabenteil a) unter Berücksichtigung dieser Randbedingung.

c) Gib die Elektronenstromdichte bei  $-x_p$  an. Die Löcherstromdichte bei  $x_n$  ist völlig analog.

Die Gesamtstromdichte ist die Summe aus Elektronen- und Löcherstromdichte. Da die Stromdichten in der Raumladungszone konstant sind und

$$\frac{dj(x)}{dx} = 0 \quad (\text{Kirchhoff'sche Knotenregel}),$$

sowie  $L = (D\tau)^{1/2}$  gilt die Diodengleichung (wird in der Übung vorgerechnet)

$$j = j_n(-x_p) + j_p(x_n) = q \underbrace{\left[ \frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right]}_{j_0} \left[ \exp\left(\frac{qU_{ext}}{kT}\right) - 1 \right]$$

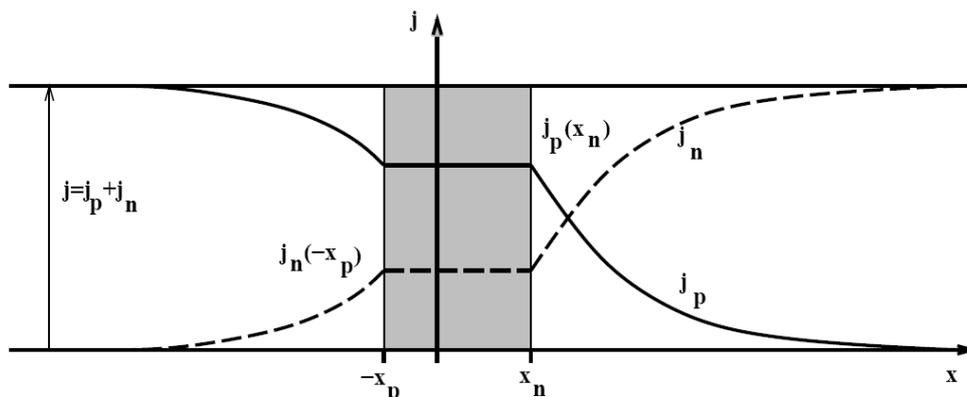


Abb. 1: Verlauf des Elektronen- und Löcherstroms im p- und n-Gebiet sowie in der Raumladungszone