3.2 Solarzellensimulation

Von der University of New South Wales gibt es ein recht detailliertes Programm zur Simulation von Solarzellen. Es ist kostenlos und heißt PC1D. Installieren Sie einfach das Programm bei sich und "spielen" sie mit den Parametern!

Genau das wollen wir nun auch machen und die Ergebnisse des Schnelldurchgangs durch die kristalline Zelle "abklopfen".

3.2.1 Die Ladungsträgerdichte der Diode

Das Beispiel "Diode.prm" ist eine Diode mit 1μm n-Halbleiter: $N_D = 10^{17}\,cm^{-3}$

9μm p- " : $N_A = 10^{16}\,cm^{-3}$

der intrinsischen Konzentration $n_i \approx 2.6 \cdot 10^{6}\,cm^{-3}$

Stellen sie sicher, daß die angelegte Spannung $V_a = 0$ gesetzt ist! Siehe Blatt 18 der letzten Vorlesung (Fig 4.4) erwarten wir, daß in der p-Region gilt:

$$p \approx N_A$$

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

gleichfalls in der n-Region mit exponentiellem Übergang zwischen den Bereichen, da ~~n~~ n bzw p exponentiell von $E_V - E_F$ bzw $E_C - E_F$ abhängt und in der Übergangszone diese Differenzen geändert werden (als Funktion vom Ort) [Siehe Blatt 16, Fig 4.3] vom letzten Mal.

In der Tat finden wir in der Simulation

$$\frac{n_i^2}{N_D} = 6.8 \cdot 10^{-5} \quad ; \quad \frac{n_i^2}{N_A} = 6.8 \cdot 10^{-4}$$

3.2.2 Minority Carrier Injection

Nach ein wenig Rechnung, die wir zu diesem Zeitpunkt nicht machen werden, findet man, daß die Minoritätenladungsträger am Rande der Verarmungszone exponentiell von einer äußeren ~~A~~ angelegten Spannung ~~abhält~~. abhängt:

$$n\,(x = \text{Rand der Verarmungszone p-seitig}) \propto e^{\frac{qV_a}{kT}}$$

Mit $T = 300\,K$; $k_B = \frac{1}{11000} \frac{eV}{K}$ wählen wir

z.B. $V_a = 0.3\,V$: $\quad \frac{qV_a}{kT} = \frac{0.3\,eV}{300 \frac{1}{11000} \frac{eV}{K}} = 11$

$\Rightarrow e^{11} \approx 6 \cdot 10^4$

und wir erwarten für $p = \frac{n_i^2}{N_D} \cdot e^{11} \approx 4\ cm^{-3}$

bzw. $n = \frac{n_i^2}{N_A} \cdot e^{11} \approx 40\ cm^{-3}$

was in der Simulation auch schön bestätigt wird.

Nebenbei ~~be~~ bemerkt, durch den raschen Abfall von z.B. $n = N_D \rightarrow n = \frac{n_i^2}{N_A}$ in der Verarmungszone entsteht natürlich grade die Raumladung, denn die N_D Phosphorrümpfe sind nicht länger von $N_D = n$ $e^{\ominus}$ abgeschirmt, sondern von exponentiell weniger werdenden n, so daß N_D positive Ladungen übrig bleiben (siehe Blatt 19, Figur 4.5).

3.2.3 Elektrisches Feld in der Raumladungszone

Schauen wir nochmals auf Figur 4.5:
Es bildet sich nun also eine Raumladungszone mit

$\rho = qN_A$ auf der p-Seite und $\rho = qN_D$ auf der n-Seite. Die Breiten l_p und l_n in denen ρ diese Werte hat kann man sozusagen ~~Ra~~ rückwärts berechnen und zwar so:

① Wir wissen, daß (Fig 4.3)

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

setzen wir der Einfachheit $N_A = N_D = 10^{17}\,cm^{-3}$ (?).
Dann ist

$$\varphi_0 = \frac{300\cancel{K} \cdot 11000^{-1}\,\cancel{e}V\cancel{K}^{-1}}{\cancel{e}} \ln \left(\frac{10^{34}}{(2.6 \cdot 10^6)^2} \right)$$

$$= 0.027 \cdot 21.2\ V$$

$$= \underline{\underline{0.57\ V}}$$

② Anhand von Fig 4.5 sieht man, daß

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= V(\infty) - V(-\infty) \\ &= V(x_n) - V(x_p) \\ &= \text{Fläche unter } \rho\text{-Kurve} \\ &= -\frac{1}{2} \underbrace{(x_n - x_p)}_{\equiv W \text{ (Weite der Verarmungszone)}} \rho_{max} \\ &= \underline{\underline{-\frac{1}{2} W \rho_{max}}} \end{aligned}$$

③ $\mathcal{E}_{max}$ ist aber durch die Gleichung

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{q}{\varepsilon} \text{ gegeben.}$$

$$\mathcal{E}_{max} = \int_{x_p}^{0} \frac{d\mathcal{E}}{dx}\, dx = -\frac{q}{\varepsilon} N_A \,(0 - x_p)$$

$$= \frac{qN_A}{\varepsilon} x_p$$

Da $N_D = N_A$ ist aus Symmetriegründen $x_p = x_n$,

$$W = 2x_p \Rightarrow \underline{\underline{\mathcal{E}_{max} = \frac{qN_A}{\varepsilon} \frac{1}{2} W}}$$

Und aus ②:

$$\mathcal{E}_{max} = -\frac{2\varphi_0}{W} \quad \text{Sowie aus ③: } \mathcal{E}_{max} = \frac{qN_A}{\varepsilon}\frac{1}{2}W$$

$$\Rightarrow \quad -\frac{2\varphi_0}{W} = \frac{1}{2}\frac{qN_A}{\varepsilon} W$$

$$\Rightarrow \quad \cancel{W^2 = -\frac{4 q \varphi_0 N_A}{\varepsilon}} \quad W^2 = -\frac{4\varepsilon\varphi_0}{qN_A}$$

wobei: $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 = 13.2 \cdot 8.9 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

$q = -1.6 \cdot 10^{-19}$ As

$N_A = 10^{17}$ cm^{-3} $= 10^{23}$ m^{-3}

⑤

Und somit

$$W = \left[\frac{4 \cdot 1.2 \cdot 10^{-10} \, As \, (Vm)^{-1} \cdot 0.6 V}{1.6 \, As \cdot 10^{-19} \cdot 10^{23} \, m^{-3}} \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{2{,}9 \cdot 10^{-10} \quad m^2}{1.6 \cdot 10^4} \right]^{1/2}$$

$$= \sqrt{1.8 \cdot 10^{-14}} \quad m = \underline{\underline{0.13 \, \mu m}}$$

ξ_{max} ist aber $\xi_{max} = - \frac{2 \psi_0}{W} = -85 \, \frac{kV}{cm}$

In der Simulation erhalte ich $\xi_{max} = 130 \, \frac{kV}{cm}$ (das Vorzeichen ist Definitionssache)

3.2.4 Die Solarzelle in der Simulation

Die Datei "Pvcell.prm" enthält das Modell einer Solarzelle. Dabei wird die I-V Kurve durchfahren

Ändern wir hier (und Sie Ihre auch!) einige Parameter, z.B.:

- τ_n und τ_p, die Lebensdauer von $e^\ominus$ und Löchern im Kristall selbst durch Rekombination. Dies ist der Effekt von "schlechterem" Wafermaterial
- Die Dicke der Zelle von $300\mu m \to 100\mu m \to 10\mu m$
- Wir schauen die Dotierungskonzentration an
- Wir schauen den $e^\ominus$-Loch Generation + Recombination Plot an. Achtung: die Funktionen sind das Integral bis zur jeweiligen Position! Was ist bei peak doping $1.5 \cdot 10^{20}$ ($\hat{=}$ $30\,\Omega/sq$) bzw. $3.5 \cdot 10^{20}$ ($\hat{=}$ $40\,\Omega/sq$) ?
- Anti-Reflex-Beschichtung
- Temperatur

3.3 Wichtige Kenngrößen von Solarzellen

Es werden für gewöhnlich drei Kenngrößen zur Charakterisierung der Leistung einer Zelle angegeben. Erstens die der Kurzschlußstrom I_{sc}. Idealerweise ist dieser gleich dem Strom welcher durch Lichteinfall erzeugt wird. Zweitens die Leerlaufspannung V_{oc}. Setzt man idealisiert $I = I_0 (e^{qV/kT} - 1) - I_L = 0$ V_{oc} so findet man

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

Die Leistung der Zelle ist gleich der Fläche im IV. Quadranten der I-V Kurve. ~~Er~~ Sie wird maximal bei einer Kombination aus I_{mp} und V_{mp} (oder anders gesagt: $\left.\frac{\partial P}{\partial V}\right|_{V_{mp}} = \left.\frac{\partial P}{\partial I}\right|_{I_{mp}} = 0$)

Der dritte Parameter ist der sogenannte Füllfaktor FF, der angibt wie "rechteckig" die Ausgangs-Characteristik der Zelle im I(V) Diagramm ist, d.h welchen Prozentsatz von $P_{rechteck} = V_{oc} I_{sc}$ man nutzen kann:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}}$$

Der Wirkungsgrad der Zelle ist natürlich

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}}$$

mit P_{in} der Eingangsleistung der Strahlung.

Für Geld kann man zur Zeit Zellen mit 21% Wirkungsgrad kaufen. Typisch sind aber 14–18%.

3.3.1 Effizienzgrenzen der Solarzelle

Als obere Grenze des Kurzschlußstromes gilt sicherlich die Annahme, daß alle Photonen mit $E_\gamma > E_g$ ein e^--Loch Paar erzeugen, welches zum Strom beiträgt (siehe Folie)

Die Leerlaufspannung hängt wiederum vom Dioden Sättigungsstrom I_0 ab. I_0 muß möglichst klein sein. Für Silizium ergibt sich $V_{oc} \approx 700mV$.

Am sensitivsten hängt n_i^2 vom Halbleitermaterial ab:

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-E_g/kT\right)$$

und eine gute Schätzung für I_0 als Funktion vom E_g ist dann

$$I_0 = 1.5 \cdot 10^5 \exp\left(-E_g/kT\right) \quad A/cm^2$$

Da $V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$ folgt daraus, daß:

V : E_g größer $\rightarrow$ I_0 kleiner $\rightarrow$ V_{oc} größer

I : E_g größer $\rightarrow$ I_{sc} kleiner (weniger Photonen haben $E_\gamma > E_g$!)

9 Woraus man sieht, daß es ein Optimum geben muß. (Folie)

Der Hauptgrund für ~~die~~ den niedrigen Wirkungsgrad der Solarzelle ist, daß für alle γ mit $E_\gamma > E_g$ nur die Energie E_g verwertbar ist. Dies limitiert die maximal mögliche Effizienz alleine schon ~~auf~~ 44%.

Doch es kommt noch schlimmer: Wie wir gesehen haben wird hiervon nur die Spannung 700mV für Silizium erzeugt, obgleich die Ladungsträger $E_g \approx 1.1\,eV$ Energie erhalten hatten (plus die vorgenannten $E_\gamma - E_g$!)

d.h. es bleibt davon auch nur maximal

$$qV_{oc}/E_g \approx 0.7/1.1 \approx 60\% \text{ für Silizium}$$

Die käuflich zu erwerbenden Zellen mit 21% Wirkungsgrad sind somit schon sehr sehr gut!

3.4 ERSATZSCHALTBILD, ZUSAMMENSCHALTUNG + ABSCHATTUNG

Wir haben die Strom-Spannungskurve der beleuchteten Zelle in der letzten Vorlesung berechnet:

$$I = I_0 \left[e^{qV/kT} - 1 \right] - I_L$$

wobei

$$I_0 = A \left[\frac{q D_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{q D_h n_i^2}{L_h N_D} \right]$$

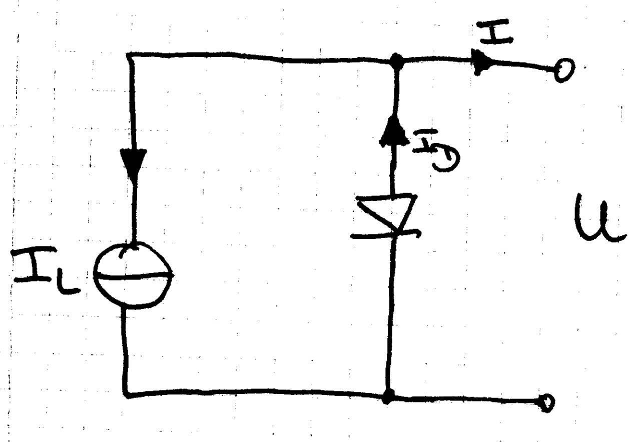
von der unbeschatteten Zelle abhängt und

$$I_L = qAG \left[L_e + W + L_h \right]$$

von den Zellparametern, sowie der Erzeugungsrate G abhängt. Nimmt man L_e, W, L_h als konstanten in guter Näherung an (d.h. keine große T abhängigkeit), so kann man auch vereinfacht schreiben

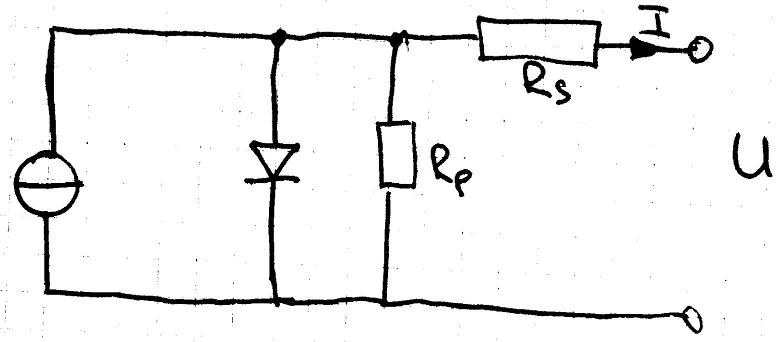
$$I_L = \text{const} \cdot G$$

Und ein einfaches Ersatzschaltbild der Zelle ist



mit der Stromquelle $I_L = \text{const.} \cdot G$

Dieses einfache Bild ist auf wenige Prozent genau. Man kann es natürlich weiter verfeinern, bsp. durch den Spannungsabfall zwischen dem Halbleiter und den äußeren Kontakten (ausgedrückt durch einen Serienwiderstand R_s) und Leckströme längs der Zellenkante (beschrieben durch R_p):

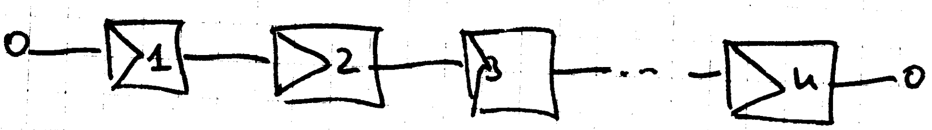


$R_s \sim m\Omega$ Bereich

$R_p \gtrsim 10\,\Omega$

Reihenschaltung:

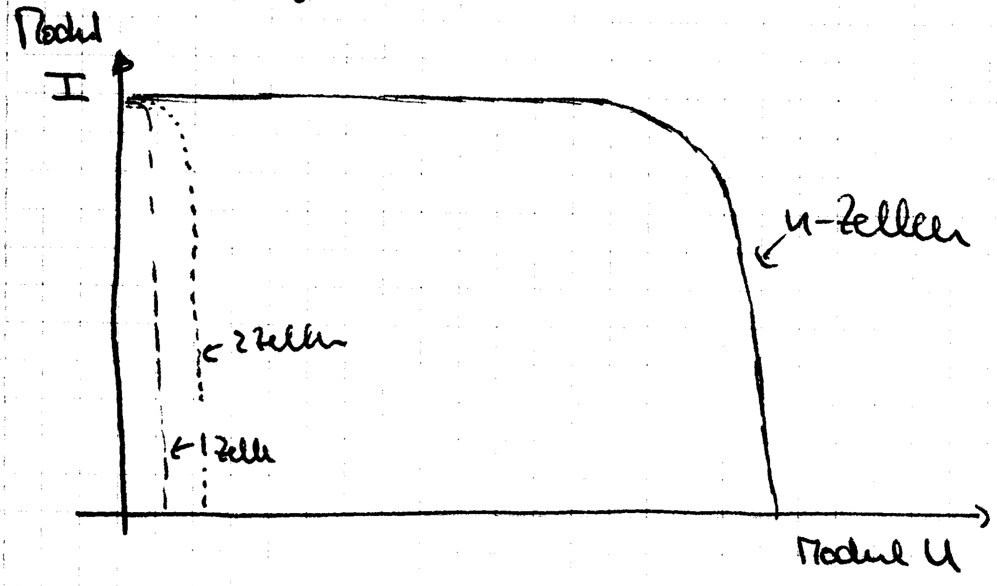
Um auf höhere Spannungen zu kommen, werden Zellen in Reihe geschaltet.



$$\Rightarrow \quad I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$U = \sum_{i=1}^{n} U_i$$

und die Modulkennlinie kann im Fall von n identischen Zellen einfach aus den Einzelkennlinien zusammengesetzt werden:

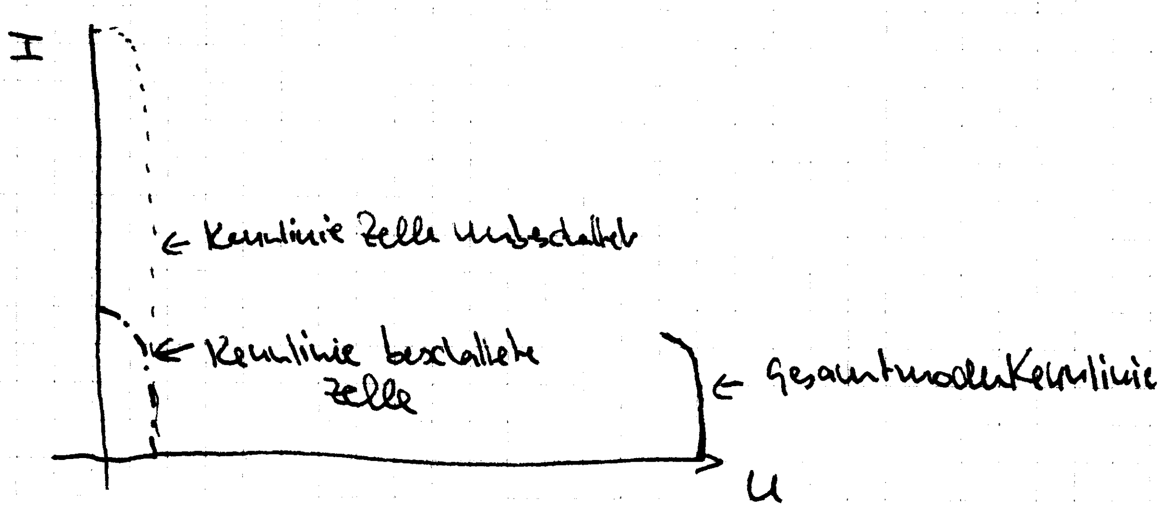


Abschattung

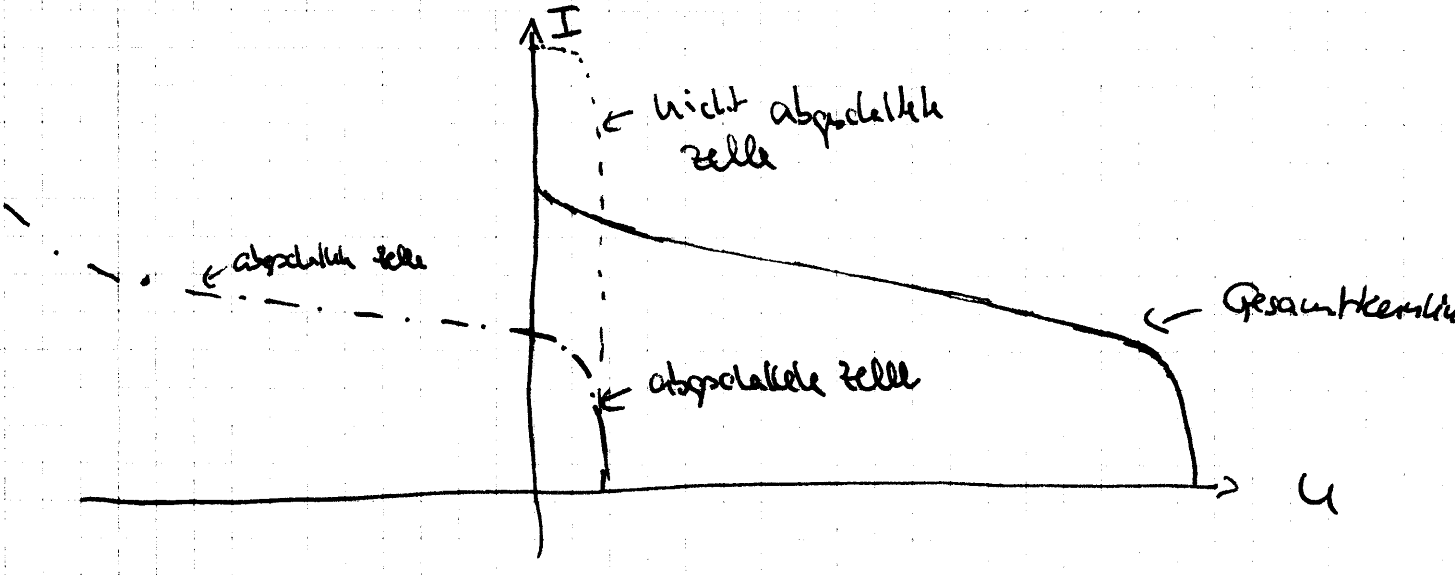
Nehmen wir als Bsp an, daß eine Zelle zu 75 % abgeschattet ist und das Modul insgesamt aus 36 Zellen besteht. Dann ist

$$U = U_a(I) + 35 U_b(I)$$

und man fängt am einfachsten von $I=0$ an, die Modulkennlinie zu konstruieren:



Bis zum Kurzschlußstrom der beschatteten Zelle ist die Konstruktion nicht schwierig, allerdings gelingt dies nur für ein kurzes Stück der Modulkurve.
Offensichtlich muß, um die Kurve zu vervollständigen, ein größerer Strom durch die abgeschattete Zelle als deren Kurzschlußstrom? Das geht aber nur bei negativer Spannung an dieser Zelle! Unsere Zelle wird zum Verbraucher!



Die Modulleistung nimmt durch Abschattung rapide ab. Obwohl nur 2% des Moduls in unserem Beispiel abgeschattet waren, sinkt die Modulleistung um ca. 70%. Dabei kann die Abgeschattete Zelle soviel Lestung aufnehmen, daß sie durch Überhitzung zerstört werden kann!
Um dies zu verhindern werden parallel zu den einzelnen Zellen oder aber Gruppen von Zellen Bypassdioden geschaltet. Sie begrenzen die negative Spannung auf einer abgeschatteten Zelle.