

10.4.2 Was man wissen muss

Ganz tief verinnerlicht ist der Zusammenhang von Diodenkennlinie und Solarzellenkennlinie.

Wir verstehen, was mit den durch Licht zusätzlich generierten Ladungsträgern passiert und dass nur diejenigen, die den **pn**-Übergang erreichen, zum Strom beitragen. Die Bedeutung der **Diffusionslänge** in diesem Zusammenhang ist uns klar.

Die wichtigen Solarzellenparameter **Leerlaufspannung** ("open circuit") U_{OC} , **Kurzschlussstrom** ("short circuit") I_{SC} , **Füllfaktor FF**, **optimaler Arbeitspunkt**, **Wirkungsgrad** η können wir erläutern und, soweit möglich, in eine Kennlinie eintragen

Wir verstehen, warum bei gegebenem Sonnenspektrum der Wirkungsgrad ein Optimum für ein bestimmtes Bandgap erreicht, und wir wissen, dass mehr als $\eta \approx 30\%$ für einen einzelnen **pn**-Übergang nicht möglich ist.

Wir kennen die wichtigsten Zahlen zur Solarenergie:

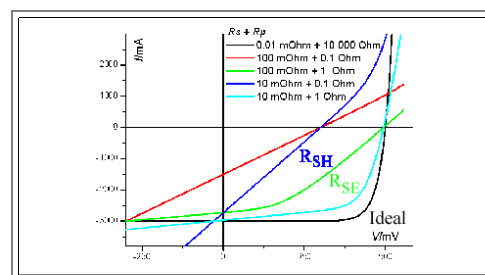
Typ. Sonnenleistung ("Europa"):	1 kW/m ²
"Peak"-Solarzellenleistung:	$W_P = 1 \text{ kW/m}^2 \cdot 10\% = 100 \text{ W/m}^2$
Mittelwert Solarleistung:	$W_m = W_P \cdot 10\% = 10 \text{ W/m}^2$
Energieernte pro Jahr:	$E_a = W_m \cdot 365 \cdot 24 = 100 \text{ kWh/(a} \cdot \text{m}^2)$
Gesamtenergiebedarf je Deutscher	6.000 kWh/a
Platzbedarf für Solarzellen je Deutscher	50 m ²

Wir wissen, dass für reale Solarzellen die technische Herausforderung nur in **einer** Eigenschaft liegt: Sie produzieren (demnächst, so um **2015**) Strom zu "grid parity"-Kosten.

Das bedeutet **2** billige, aber gute Solarzellen / 3 Sekunden in der Fertigung – und das ist sehr schwer!

Wir können ein Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle geben und die Bedeutung von Shunt- und Serienwiderstand erläutern.

Dabei ist uns klar, warum man zur Diskussion der beiden Widerstände zweckmäßigerweise die Fälle "Leerlauf" und "Kurzschluss" betrachtet.



Wir können die wichtigsten Eigenschaften von Transistoren definieren und folgende Bilder zeichnen:

- Schematischer Aufbau Bipolartransistor.
- Banddiagramm Bipolartransistor.
- Stromflüsse im Bipolartransistor.
- Querschnitt **MOS**-Transistor

Wir können die Stromverstärkung im Bipolartransistor erklären und in einer einfachen Näherungsformel wiedergeben, wobei wir die Näherung über die Geometrie begründen können.

Wir können das Prinzip des **MOS**-Transistors beschreiben, wobei das **Massenwirkungsgesetz** zur Geltung kommt.

Wir können über die Bedeutung des "**O**" im **MOS**-Transistors einiges sagen und auch Größenordnungen zur Geometrie und kritischen Größen wie Feldstärke angeben.

Zahlen und Formeln

 Unbedingt erforderlich:

 **Anmerkung:** In der Regel reichen "Zehner"-Zahlen; genauere Werte sind in Klammern gegeben.

Zahlen neu			
Größe		Zehnerwert	Besserer Wert
Technischer Wirkungsgrad Solarzellen:	≈	10 %	15 % ... 20 %
Gesamtenergiebedarf und Solarzellen-Platzbedarf "Deutscher Bürger"	≈	6.000 kWh/a 50 m ²	

Zahlen alt			
Größe		Zehnerwert	Besserer Wert
Energielücke E_G von Si	=	1 eV	1,1 eV
Lebensdauer Diffusionslänge	≈	Direkte HL (GaAs): ns und nm Indirekte HL (Si): ms und mm	
Typische Dotierkonzentrationen in Si:	≈	As od. P für n-Typ; B für p-Typ ($10^{15} \dots 10^{19}$) cm ⁻³	
Typische spezif. Widerstände ρ		ρ Metall: ≈ 1 μΩcm ρ Halbleiter (dotiert): ≈ 1 Ωcm ρ Isolator: >> 1 Ωcm	
Typische Energielücken E_G		Metall: ≈ 0 eV Halbleiter: ≈ (0,5 ... 2,5) eV Isolator: > 2,5 eV	
Permeabilität μ_r		Diamagnete: <≈ 1 Paramagnete: >≈ 1 Ferromagnete: >> 1; bis >1000	
Frequenzabhängigkeit Magnetismus		relevant nur <≈ GHz; darüber $\mu_r \approx 1$	
Durchschlagsfestigkeiten $E_{\max}$	≈	(0,1 ... 10) MV/cm	≈ 15 MeV/cm (Limit)
Maximale Stromdichten $j_{\max}$	≈	($10^3 \dots 10^5$) A/cm ²	

Einige Dielektrizitätskonstanten ϵ_r		$\epsilon_r(\text{H}_2\text{O}): \approx 80$ $\epsilon_r(\text{SiO}_2): \approx 3,7$ $\epsilon_r(\text{Halbleiter}): \approx 10 \dots 20$	
"Interessante" Frequenzen		$\approx 10 \text{ GHz}$: Relaxation H_2O $\approx 10^{13} \text{ Hz}$: Resonanz Ionenpolarisation $\approx 10^{15} \text{ Hz}$ = "Optik": Resonanz Elektronenpolarisation	
Daten Licht: Wellenlänge Frequenz Energie	$\approx$ $\approx$ $\approx$	 $1 \mu\text{m}$ 10^{14} Hz 1 eV	 500 nm $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ $2,5 \text{ eV}$
Avogadrokonstante		10^{24} mol^{-1}	$6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Bildungs- und Wanderungsenergie Leerstelle	$\approx$	1 eV	ca. (0,5 ... 5) eV
$(k_B T)_{\text{RT}}$	$\approx$	$1/40 \text{ eV} = 0,025 \text{ eV}$	
Typische Gitterkonstante a	$\approx$	$1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$	$2 \text{ \AA} \dots 5 \text{ \AA}$
Größe eines Atoms	$\approx$	$1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$	$1 \text{ \AA} \dots 3 \text{ \AA}$
Photonenenergie Licht	$\approx$	1 eV	(1,6 ... 3,3) eV
Vibrationsfrequenz Atome im Kristall	$\approx$	10^{13} Hz	

Formeln neu	
Größe	Formel
Stromverstärkung Bipolartransistor	$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{j_F(\text{BK})}{j_D(\text{BE})} = \frac{j_D(\text{EB})}{j_D(\text{BE})} = \frac{N_{\text{Dot}}(\text{E})}{N_{\text{Dot}}(\text{B})}$

Formeln alt	
Größe	Formel
Konzentration Majoritäten (Si, RT)	$n_{\text{Maj}} = N_{\text{Dot}}$

Konzentration Minoritäten (Si, RT)	$n_{\text{Min}}(T) = \frac{n_i^2(T)}{N_{\text{Dot}}}$
Generationsrate, Rekombinationsrate, Gleichgewichtsbedingung	$R = G = \frac{n_{\text{Min}}}{\tau} = \frac{n_i^2}{N_{\text{Dot}} \cdot \tau}$
Intrinsische Ladungsträgerdichte	$n_i = N_{\text{eff}} \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{2k_B T}\right)$
Sperrstrom beim pn- Übergang = Generationsstrom	$j_{\text{Gen}} = \pm e \cdot G \cdot L = \frac{\pm e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_{\text{Dot}} \cdot \tau} = \text{const.}$
Diodengleichung	$j(U_{\text{ex}}) = \left(\frac{e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_A \cdot \tau} + \frac{e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_D \cdot \tau} \right) \cdot \left(\exp\left(\frac{eU_{\text{ex}}}{k_B T}\right) - 1 \right)$
Ohmsches Gesetz	$j = \sigma \cdot E = \frac{E}{\rho}$
Spezif. Leitfähigkeit	$\sigma = q \cdot n \cdot \mu$
"Masterformel" für Teilchendichten; hier Dichte e^- im Leitungsband	$n_{e^L}(T) = \int_{E_L}^{\infty} D(E) \cdot f(E; E_F, T) dE$ $= N_{\text{eff}} \cdot \exp[-(E_L - E_F)/(k_B T)]$
Dichte h^+ im Valenzband	$n_{h^V}(T) = N_{\text{eff}} \cdot \exp[-(E_F - E_V)/(k_B T)]$
Massenwirkungsgesetz	$n_e \cdot n_h = n_i^2$

Magnetische Größen	$B = \mu_0 \cdot H + J = \mu_0 \cdot (H + M)$ $M = J / \mu_0 = (\mu_r - 1) \cdot H = \chi_{\text{mag}} \cdot H$ $\mu_r = \chi_{\text{mag}} + 1$
Dielektrische Größen	$\underline{p} = q \cdot \underline{\xi}$ $\underline{p} = \frac{\sum \underline{\mu}}{V} = \langle \underline{\mu} \rangle \cdot N_V$ $\epsilon_r = \chi + 1$
Schwingungsgleichung und Resonanzfrequenz	$m \frac{d^2 x}{dt^2} + m k_R \cdot \frac{dx}{dt} + k_F x = q E_0 \cos(\omega t)$ $\omega_0' = \left(\frac{k_F}{m} \right)^{1/2}$
Komplexer Brechungsindex n	$(n + i \kappa)^2 = \epsilon' - i \cdot \epsilon''$
Entropie S_i	$S_i = k_B \cdot \ln p_i$
Freie Energie G	$G = U - TS$
Stirling-Formel	$\ln x! \approx x \cdot \ln x$
Dichte Teilchen bei E	$n(E) = D(E) \cdot w(E) \cdot dE$
Boltzmann-Näherung an Fermiverteilung $f(E)$ für $\Delta E = E - E_F > 2k_B T$	$f(E) \approx \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right)$
Boltzmannfaktor (Wahrscheinlichkeit für E)	$w(E) = \exp[-E/(k_B T)]$

Boltzmannverteilung	$\frac{n(E)}{n(E_0)} = \exp\left(-\frac{E - E_0}{k_B T}\right)$
Leerstellenkonzentration (E^F : Bildungsenergie)	$c_V = \exp[-E^F / (k_B T)]$
Sprungrate r atomarer Defekte (E^M : Wanderungsenergie)	$r = v_0 \cdot \exp[-E^M / (k_B T)]$
Diffusionsstromdichte $\underline{j}_{\text{Diff}}$ (Vektor!)	$\underline{j}_{\text{Diff}} = -D \nabla c$
Diffusionslänge L	$L = (D \tau)^{1/2}$
Coulombpotential	$U_{\text{Cou}} = \frac{e^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$
Beziehung Kraft $\underline{F}(r)$ — Potential $U(r)$	$\underline{F}(r) = -\nabla U(r)$
Mech. Spannung σ , Dehnung ϵ , E-Modul E	$\sigma = \frac{F}{A}$ $\epsilon = \frac{l(\sigma) - l_0}{l_0}$ $E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$
Innere Energie pro Freiheitsgrad (Gleichverteilungssatz; einzelnes Teilchen)	$U_{\text{Freiheitsgrad}} = \frac{1}{2} k_B T$
Mittlere thermische Energie eines klassischen Teilchens (innere Energie; Def. der Temperatur)	$U_{\text{Teilchen}} = \frac{1}{2} f k_B T$ (f: Anzahl der Freiheitsgrade)
Thermische Energie (Größenordnung von U_{Teilchen})	$E_{\text{therm}} = k_B T$ ($U_{\text{Teilchen}} \approx k_B T$)