

9.1.4 Merkmale zu Kapitel 9.1: Majoritäten und Minoritäten

Die einfache Formel für die Ladungsträgerdichte (*effektive Zustandsdichten* und *Boltzmann-Näherung*) in *intrinsischen Halbleitern* ist ziemlich gut.

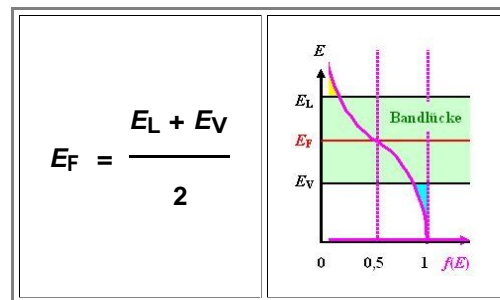
- Wir werden deshalb nur noch mit dieser Formel rechnen (bis wir eine noch einfachere Formel haben werden). →
- Für die jetzt vertrauten *Löcher* ergeben sich (immer mit entsprechendem Vorzeichenwechsel) völlig symmetrische Beziehungen.

$$n_e \approx N_{\text{eff}} \cdot \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{k_B T}\right)$$

$$n_h \approx N_{\text{eff}} \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$$

Die *Fermienergie* E_F für *intrinsische Halbleiter* folgt aus $n_e = n_h$ oder – allgemeiner – aus der notwendigen Ladungsneutralität.

- Die Fermienergie liegt in der Mitte der Bandlücke.
- Das lässt sich sowohl leicht errechnen, als auch graphisch sofort erkennen: Die "Zwickel" müssen gleich groß sein.
- Der gezeigte Fall, daß die "Zwickel" so weit in die Bänder hineinragen, entspricht der *Eigenleitung*; sie tritt bei Temperaturen auf, für die $4 k_B T \approx E_g$ gilt.



Löcher benehmen sich im wesentlichen wie *positiv geladene* Elektronen. Ihr Beitrag zur Leitfähigkeit ist damit →

- Löchern kann neben einer Dichte und einer pos. Ladung auch eine *Beweglichkeit* μ_h zugeordnet werden; sie ist ähnlich zu der der Elektronen.
- Während Elektronen, wenn sie können, energetisch tiefer sinken, steigen Löcher aber auf – wie Luftblasen im Wasser!

$$\sigma_h = +e \cdot n_h \cdot \mu_h$$

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_e + \sigma_h \approx 2\sigma_e$$

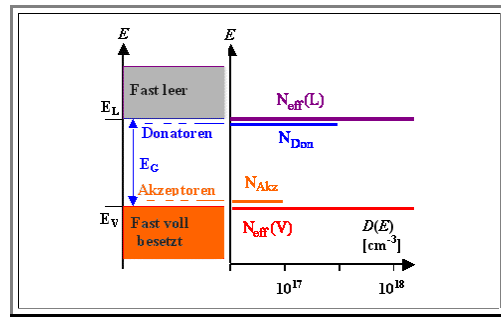
Das *Massenwirkungsgesetz* ergibt sich aus obigen Konzentrationsgleichungen; es ist sehr wichtig!

- Dabei ist $n_i = n_e = n_h$ die *intrinsische Ladungsträgerdichte* für ideal-perfekte Halbleiter, bei denen Elektronen- und Löcherkonzentration per definitionem gleich groß sein müssen.
- n_i ist eine *Materialkonstante*, direkt verknüpft mit der *Energielücke* E_g .

$n_e \cdot n_h = n_i^2$			
Halbleiter	Ge	Si	GaAs
Energielücke [eV]	0,661	1,12	1,424
$n_i(RT)$ [cm ⁻³]	$2 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^6$

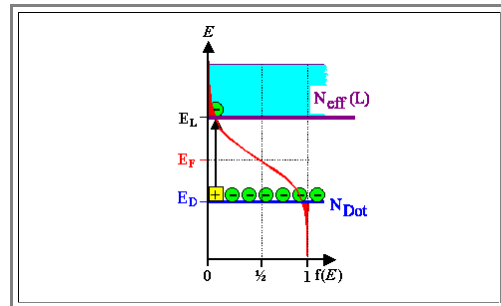
Dotieren=gezieltes Einbringen von Dotierstoffen (als substitutionelle atomare Fehlstellen) mit Elektronenzuständen in der Energielücke dicht an den Bandkanten.

- **Donatoren** (in **Si** entweder **P** oder **As**) haben einen am Atom lokalisierten **besetzten** Zustand dicht unterhalb der Leitungsbandkante. Das dort "sitzende" Elektron kann leicht ins Leitungsband springen und ist dann frei **beweglich**. Zurück bleibt ein **ortsfestes** positiv geladenes **P⁺ -Ion**.
- **Akzeptoren** (in **Si** immer **B**) haben einen am Atom lokalisierten **unbesetzten** Zustand für Elektronen dicht **oberhalb** der Valenzbandkante. Elektronen aus dem Valenzband können leicht auf diesen Zustand springen und ihn besetzen. Wir haben insgesamt ein frei **bewegliches** Loch im Valenzband und ein negativ geladenes **ortsfestes B⁻ -Ion**.



Entscheidend ist, wie immer, die Lage der Fermienergie.

- Bei kleinen **T** kommen alle Elektronen in **L** von den Dotierniveaus; **EF** muss zwischen Donatorniveau **ED** und dem Leitungsband sitzen.
- Das gilt auch noch bei höheren Temperaturen: **EF** ist in der Nähe des Dotierniveaus.
- Wir haben mit Dotieren sehr viel mehr Ladungsträger einer Sorte als im undotierten intrinsischen Halbleiter, bei dem beide Dichten gleichgroß sind.



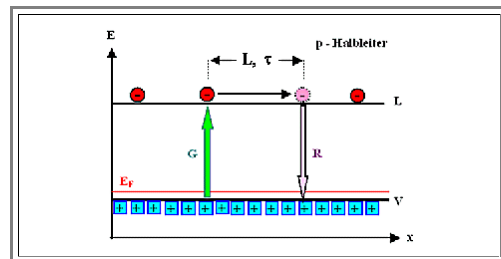
- Die Dichte **nMaj** der **Majoritätsladungsträger** ist in **Si** bei **RT** guter Näherung identisch zur Dichte der Dotieratome **NDot**.
- Die Dichte der **Minoritätsladungsträger** **nMin** folgt aus dem **Massenwirkungsgesetz**.
- **Donatoren: P** und **As** ⇒ **n-Si**
⇒ **Majoritäten** sind Elektronen im Leitungsband.
Minoritäten sind Löcher im Valenzband.
- **Akzeptoren: Nur B** ⇒ **p-Si**
⇒ **Majoritäten** sind Löcher im Valenzband.
Minoritäten sind Elektronen im Leitungsband.

$$n_{Maj} = N_{Dot}$$

$$n_{Min}(T) = \frac{n_i^2(T)}{N_{Dot}}$$

Ladungsträger in den Bändern werden durch **Generation** erzeugt (immer thermisch, bei Beleuchtung auch durch Licht), laufen etwa eine Diffusionslänge weit per "random walk" durch den Kristall, und verschwinden wieder durch **Rekombination**.

- Beide Prozesse werde durch Raten beschrieben; Maßeinheit: **s⁻¹**
G=**Generationsrate**
R=**Rekombinationsrate**
- Da im Gleichgewicht die Ladungsträgerdichte konstant ist, muss gelten: **G=R** sowohl für Minoritäten als auch für Majoritäten.



Von Interesse ist vor allem die Rekombinationsrate R_{Min} der Minoritäten, da Änderungen der Ladungsträgerdichte bei den Minoritäten sehr viel stärker "durchschlagen"

- Es gilt unmittelbar \Rightarrow
- Dabei ist τ die Minoritätsladungsträgerlebensdauer (kurz Lebensdauer); leicht zu visualisieren und mit der Diffusionslänge L gekoppelt durch \Rightarrow
- Daraus folgt die dritte wichtige Halbleitergleichung \Rightarrow

$$R = \frac{n_{\text{Min}}}{\tau}$$

$$L = (D \cdot \tau)^{1/2}$$

Im Gleichgewicht:

$$G = R = \frac{n_{\text{Min}}}{\tau}$$

Es gibt bezüglich der Rekombination zwei Arten von Halbleitern.

- **Direkte Halbleiter:** Rekombination ist leicht; die Überschussenergie produziert ein *Photon*, d.h. es wird Licht mit $h\nu = E_G$ emittiert. Direkte Halbleiter sind die Grundlage für die *Optoelektronik*
- **Indirekte Halbleiter:** Rekombination ist schwer; die Überschussenergie produziert *Phononen*, d.h. es wird Wärme erzeugt. *Silizium ist ein indirekter Halbleiter*.

Direkte Halbleiter:

L und τ sind *klein*
(ungefähr $\text{ns} / \mu\text{m}$)

Prominente Vertreter: **GaAs**, InP, GaN.

Indirekte Halbleiter:

L und τ sind *groß* und stark defektabhängig
(ungefähr $\mu\text{s} - \text{ms} / 500 \mu\text{m}$)

Prominente Vertreter: **Si**, Ge, SiC.