

## 9.1.4 Merkpunkte 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).  $\Rightarrow$
- Für die jetzt vertrauten *Löcher* ergeben sich (immer mit entsprechendem Vorzeichenwechsel) völlig symmetrische Beziehungen.

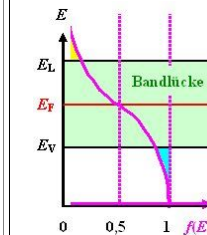
$$n_e \approx N_{\text{eff}} \cdot \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{k_B T}\right)$$

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

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  $4 k_B T \geq E_g$  gilt.

$$E_F = \frac{E_L + E_V}{2}$$



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

- Löchern kann neben einer Dichte und einer pos. Ladung auch eine *Beweglichkeit*  $\mu_h$  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!

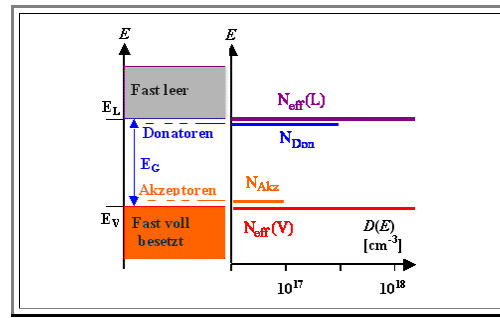
- Dabei ist  $n_i = n_e = n_h$  die *intrinsische Ladungsträgerdichte* für ideal-perfekte Halbleiter, bei denen Elektronen- und Löcherkonzentration per definitionem gleich groß sein müssen.
- $n_i$  ist eine *Materialkonstante*, direkt verknüpft mit der *Energielücke*  $E_g$ .

$$n_e \cdot n_h = n_i^2$$

| Halbleiter                    | Ge                | Si                | GaAs             |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Energielücke [eV]             | 0,661             | 1,12              | 1,424            |
| $n_i(RT)$ [cm <sup>-3</sup> ] | $2 \cdot 10^{13}$ | $1 \cdot 10^{10}$ | $2,1 \cdot 10^6$ |

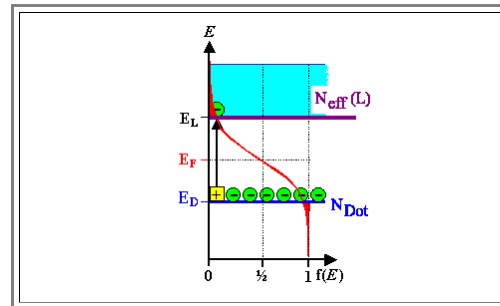
*Dotieren*=gezieltes Einbringen von Dotierstoffen (als substitutionelle atomare Fehlstellen) mit Elektronenzuständen in der Energielücke dicht an den Bandkanten.

- **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<sup>+</sup>-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<sup>-</sup>-Ion**.



Entscheidend ist, wie immer, die Lage der Fermienergie.

- Bei kleinen **T** kommen alle Elektronen in L von den Dotierniveaus; **E<sub>F</sub>** muss zwischen Donatorniveau **E<sub>D</sub>** und dem Leitungsband sitzen.
- Das gilt auch noch bei höheren Temperaturen: **E<sub>F</sub>** 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.



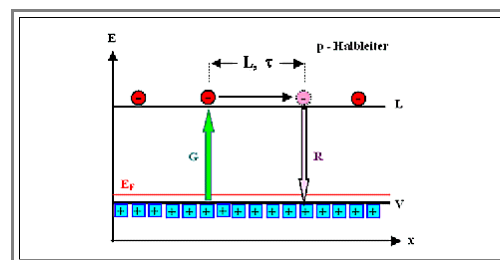
- Die Dichte **n<sub>Maj</sub>** der **Majoritätsladungsträger** ist in Si bei RT guter Näherung identisch zur Dichte der Dotieratome **N<sub>Dot</sub>**.
- Die Dichte der **Minoritätsladungsträger** **n<sub>Min</sub>** folgt aus dem **Massenwirkungsgesetz**.
- **Donatoren: P und As** ⇒ **n-Si**  
⇒ **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.

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

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

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 werden durch Raten beschrieben; Maßeinheit: s<sup>-1</sup>  
**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  $R_{\text{Min}}$  der Minoritäten, da Änderungen der Ladungsträgerdichte bei den Minoritäten sehr viel stärker "durchschlagen"

- Es gilt unmittelbar  $\Rightarrow$
- Dabei ist  $\tau$  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  $\tau$  sind *klein*  
(ungefähr **ns** /  $\mu\text{m}$ )

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

**Indirekte Halbleiter:**

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

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