

5.4 Übersicht

5.4.1 Vergleich idealer, dotiert-idealer und realer Halbleiter

In diesem Unterkapitel wollen wir noch einmal die wichtigsten Formeln und Begriffe zusammenstellen und insbesondere die Unterschiede zwischen idealen, dotiert-idealen und realen Halbleitern herausarbeiten. Wir beginnen mit dem *idealen* Halbleiter

Idealer (intrinsischer) Halbleiter

Der ideale, unendlich ausgedehnte Halbleiter mit keinen wie auch immer gearteten Defekten ist natürlich immer auch ein *intrinsischer* Halbleiter. Er hat folgende Grundeigenschaften:

Größe der *Bandlücke* E_G

Gegeben durch Material und Gittertyp. Nicht leicht berechenbar. Wissen muß man: $E_G(\text{Si}) \approx 1,1 \text{ eV}$

Elektronendichte n_L im Leitungsband und *Löcherdichte* n_V im Valenzband.

In voller Strenge gilt

$$n_L(T) = \int_{E_L}^{\infty} D(E) \cdot f(E, T) \cdot dE = n_i$$
$$n_V(T) = \int_{-\infty}^{E_V} D(E) \cdot [1 - f(E, T)] \cdot dE = n_i$$

Dabei ist n_i die intrinsische Ladungsträgerkonzentration; sie ist eine (stark temperaturabhängige) Materialkonstante. In der Praxis gilt

$$n_L(T) = n_i(T) = N_{\text{eff}}^L \cdot \exp - \frac{E_L - E_F}{kT}$$
$$n_V(T) = n_i(T) = N_{\text{eff}}^V \cdot \exp - \frac{E_F - E_V}{kT}$$

Die *effektiven Zustandsdichten* N_{eff} sind dabei experimentell ermittelte Größen (mit oder ohne den $T^{3/2}$ Anteil).

Die *Fermienergie* E_F ergibt sich aus der Neutralitätsbedingung; sie liegt ungefähr in der Mitte der Bandlücke

$$E_F(\text{intrinsisch}) = \frac{E_L + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln(N_V/N_L) \approx \frac{E_L + E_V}{2}$$

Massenwirkungsgesetz

Aus $n_V(T) \cdot n_L(T)$ folgt unabhängig von der Lage der Fermienergie immer

$$n_V \cdot n_L = (n_i)^2$$

Damit ergibt sich eine einfache Bestimmungsgleichung für n_i

$$n_i = (n_i^2)^{1/2} = \left(N_{\text{eff}}^L \cdot N_{\text{eff}}^V \right)^{1/2} \cdot \exp - \frac{E_L - E_V}{2kT}$$

Lebensdauer τ und Diffusionslänge L

- Die Lebensdauer ist hoch in **indirekten Halbleitern**, z.B. **Si** (Größenordnung **ms**) und klein in **direkten Halbleitern**, z.B. **GaAs** (Größenordnung **ns**). Sie ist nicht leicht zu berechnen.
- Die zugehörige Diffusionslänge L ist (für "random walk" **immer**) gegeben durch

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

$$D = \frac{kT}{e} \cdot \mu$$

- Dabei verknüpft die zweite Gleichung, die sog. **Einstein Beziehung**, den Diffusionskoeffizienten D mit der Beweglichkeit μ .

Die Beweglichkeit μ ist ein Maß für die Größe der erreichbaren Driftgeschwindigkeit eines Ladungsträgerensembles unter der Wirkung einer treibenden Kraft (= elektrische Feldstärke). Sie subsummiert die Wirkung von Stößen der Ladungsträger mit Gitterschwingungen (= Phononen) oder anderen Defekten.

- Die **Beweglichkeit μ** oder der Diffusionskoeffizient D sind Materialkonstanten; sie sind nicht leicht zu berechnen.

Generation und Rekombination,

- Ladungsträger rekombinieren nach Verstreichen ihrer Lebensdauer τ . Die **Rekombinationsrate R** ist gegeben durch

$$R = \frac{n_i}{\tau}$$

- Aus der Bedingung für **(dynamisches) Gleichgewicht** folgt, daß die **Generationsrate G** gleichgroß sein muß.

$$G = R = \frac{n_i}{\tau}$$

Dotierter idealer Halbleiter

Der ideale, dotierte Halbleiter mit keinen wie auch immer gearteten Defekten **außer** den Dotieratomen hat folgende Eigenschaften:

Größe der Bandlücke E_G

- Wie der ideale Halbleiter.

Elektronendichte n_L im Leitungsband und Löcherdichte n_V im Valenzband.

- In **voller Strenge** gilt **immer** noch die **alte Gleichung** - nur die **Fermienergie** hat jetzt einen anderen Wert.
- Es lassen sich drei sinnvolle Näherungsgleichungen angeben
- 1. **Hohe Temperaturen**: Es ist alles wie im intrinsischen Fall
- 2. **Mittlere und tiefe Temperaturen**: Es gilt

$$n_L \text{ (mittlere } T) = \frac{2N_D}{1 + \left(1 + \frac{4 \cdot N_D}{N_{\text{eff}}} \cdot \exp \frac{E_L - E_d}{kT} \right)^{1/2}}$$

- 3. **Mittlere Temperaturen** in vielen Fällen; insbesondere **Si** um Raumtemperatur. Wir erhalten eine extrem einfache Gleichung für beide Ladungsträgerarten; für die 2. Gleichung wird das Massenwirkungsgesetz verwendet

$$n_{\text{Maj}} \text{ (mittlere } T) \approx N_D$$

$$n_{\text{Min}} \text{ (mittlere } T) \approx \frac{(n_i)^2}{N_D}$$

- Da wir uns jetzt nur noch mit **Si** bei Raumtemperatur beschäftigen wollen, **unterstellen wir ab jetzt immer diesen Fall.**

Die **Fermienergie** E_F ergibt sich nach wie vor aus der Neutralitätsbedingung, aber jetzt müssen auch die ionisierten Dotieratome berücksichtigt werden.

- Die **entsprechende Bilanzgleichung** ist zwar einfach aufzustellen, aber als transzendente Gleichung nicht analytisch lösbar. Numerische Lösungen sind aber nicht allzu schwer.

Das **Massenwirkungsgesetz** gilt **immer**; es erlaubt, wie oben schon gezeigt, aus der Kenntnis der Dotierstoffkonzentration beide Ladungsträgerkonzentrationen leicht zu berechnen

Lebensdauer τ und **Diffusionslänge** L

- Sowohl L und dann automatisch auch τ sind etwas kleiner als im intrinsischen Fall, da der Kristall nicht mehr absolut defektfrei ist.
- Die (ionisierten) Dotieratome wirken als Streuzentren für die Elektronen, damit sind L , τ und auch μ etwas reduziert. Für nicht zu große Dotieratomkonzentrationen ist das aber kein sehr großer Effekt.

Generation und Rekombination

- Nach wie vor gilt die Bedingung für **(dynamisches) Gleichgewicht**: **Generationsrate** G und Rekombinationsrate R sind gleich groß.

Dotierter realer Halbleiter

Reale dotierte Halbleiter sind Halbleiter die außer den Dotieratomen noch weitere Kristallgitterdefekte haben: Die Oberfläche, Versetzungen, Korngrenzen, Ausscheidungen, atomare Fehlstellen aller Arten. Alles, was wir unter **Kristallgitterdefekten** behandelt haben, findet sich in realen Halbleitern wieder - und dann gibt es noch einige spezielle Defekte.

Das führt im wesentlichen zu **drei** Unterschieden gegenüber **idealen** dotierten Halbleitern:

1. Die Defekte haben in der Regel auch Zustände in der Bandlücke - und das bedeutet, daß sie als **Donatoren** oder **Akzeptoren** wirken können.

- Die Konzentration der Ladungsträger wird dann im Extremfall durch die Defekte bestimmt und hat mit der Konzentration der gezielt eingebrachten Dotieratome **nichts mehr zu tun**. Das Material ist immun gegen Dotierung und nutzlos.
- Das ist leider die traurige Wahrheit für die weitaus überwiegende Mehrheit der bekannten Halbleiter! Denn es gibt nicht nur die paar Halbleiter, die wir alle nutzen (und hoffentlich kennen), im wesentlichen **Si**, **Ge**, **GaAs**, **GaP**, **InP**, **SiC**, **GaN**, sondern es gibt sehr viel mehr - der **Link zeigt einige Beispiele** aus der Klasse der binären und ternären Verbindungen.
- Zur Zeit gibt es jedoch nur die oben gezeigte kleine Zahl an Halbleitermaterialien, die so perfekt hergestellt werden können, daß die noch vorhandenen Defekte eine gezielte Dotierung nicht unmöglich machen. Dort stoßen wir auf den zweiten Effekt der noch vorhanden Defekte:

2. Die Defekte reduzieren die **Lebensdauer** τ (und damit automatisch auch die **Diffusionslänge** L) der indirekten Halbleitern (sie tun das auch bei direkten Halbleitern, aber da ist der Effekt nicht so merkbar).

- Das ist fast immer unerwünscht (obwohl es Ausnahmen gibt). Das Problem liegt darin, daß schon kleinste Konzentrationen an bestimmten Fremdatomen deutlich spürbar werden.

● Das kann dann nicht nur der Grund dafür sein, dass das Bauelement schlicht nicht richtig funktioniert, sondern auch dafür (und das ist viel schlimmer) dass es nach zu kurzer Betriebsdauer den Geist aufgibt.

3. Der dritte Punkt soll nur gestreift werden: Zunächst vorhandene und nicht furchtbar störende (kleine) Defekte können während der Prozessierung eines Bauelements miteinander reagieren und zu "großen" **prozessinduzierten Defekten** heranreifen.

● Wenn man Pech hat, wird aus einigen **ppqt Fe**-Atomen im Laufe der Zeit eine z.B. **5 nm** "große" **FeSi₂** **Ausscheidung**, die im "Gateoxid" eines Transistors sitzt und denselben schlicht umbringt. **Device kaputt** - wiederum hilft nur **äußerste Sauberkeit und Defektfreiheit**.