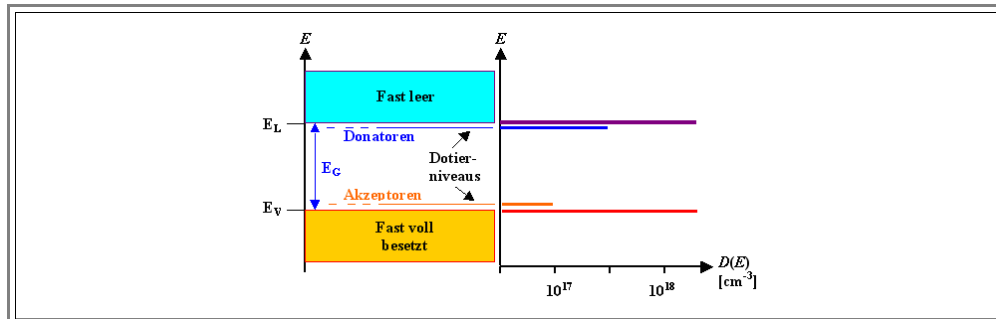


9.1.2 Dotieren und die Fermienergie

Dotieren von Halbleitern und Wichtigkeit der Fermienergie

Technisches Dotieren erfolgt in **Si** durch die Substitution eines **Si**-Atoms entweder durch die fünfwertigen Elemente **P** und **As** oder durch das dreiwertige Element **B**.

- Einziger Zweck ist, eine genau definierte Dichte (per cm^3) N_{Dot} an Zuständen für Elektronen dicht an den **Bandkanten** zu erzeugen. Das sieht schematisch dann so aus:



Wo immer ein Dotieratom ins Kristallgitter eingebaut ist, hat sich die Welt für die Elektronen geändert. Die dort vorhandenen Zustände können sich von denen im perfekten Kristall unterscheiden – warum auch nicht?

- Insbesondere können, und bei den drei genannten Dotierelementen werden, wohl definierte Energieniveaus in der Energielücke auftreten. Bei Dotierelementen sind diese Energieniveaus *per definitionem* dicht an den Bandkanten – der Abstand liegt rund und roh um die **50 meV**.
- Was Dotierelemente können, können auch Defekte *aller Art*: Sie bewirken Energieniveaus "*aller Art*". Sind diese Niveaus mehr in Bandmitte, spricht man von "deep levels", tiefen Niveaus, **tiefen Störstellen** – oder auch gleich von Dreck und nutzlosem Material, denn diese Niveaus wirken verheerend (was wir aber jetzt noch nicht im Detail verstehen können).

Es ist qualitativ leicht einzusehen, daß fünfwertige Elemente wie **P** und **As** ein zusätzliches Energieniveau dicht an der Leitungsbandkante einfügen, während das dreiwertige Element **B** ein zusätzliches Niveau dicht oberhalb der Valenzbandkante einführt.

- **P** und **As** bringen **5** äußere Elektronen ein, können aber nur **4** davon in die Bindung mit den benachbarten **Si**-Atomen investieren. Das **5.** Elektron, sozusagen die Mitgift des **P**-Atoms für die Ehe mit dem **Si**-Kristall, ist nur noch lose an sein **P**-Atom gebunden, ein bißchen Energie (ca. **50 meV**) reicht schon, um es ins **Leitungsband** des **Si** zu heben. Dort ist es jetzt ein Leitungsbandelektron wie jedes andere auch, frei beweglich und nicht mehr am **P**-Atom lokalisiert. Im [Link](#) kann man sich das schematisch illustriert ansehen.
- Das Phosphoratom ist nach Verlust seines **5.** Elektrons jetzt einfach positiv geladen (**P⁺**). Im Gegensatz zu seinem negativ geladenen Elektron, das sich im Leitungsband herumtreibt, ist es aber **ortsfest** und kann sich (bei **RT**) nicht bewegen. Daher ist es kein **Ion** im eigentlichen Sinn; im allgemeinen Sprachgebrauch wird es aber trotzdem gelegentlich so genannt.
- Das **B**-Atom bringt nur **3** Elektronen ein; eine der vier Bindungen zu den **Si**-Nachbarn kann deshalb nicht mit zwei Elektronen gefüllt werden. Anders ausgedrückt, das **B**-Atom hat ein **Loch** als Mitgift für die Ehe mit dem **Si**-Kristall. Diese Loch ist nur lose gebunden. Ein bißchen Energie (ca. **50 meV**) reicht schon, um es ins **Valenzband** des **Si** zu "heben". Dort ist es jetzt ein Valenzbandloch wie jedes andere auch, frei beweglich und nicht mehr am **B**-Atom lokalisiert.
- Die Symmetrie ist offensichtlich. Was "wirklich" passiert, ist natürlich, daß ein Elektron aus dem Valenzband auf das vom **B**-Atom eingebrachte Dotierniveau dicht oberhalb der Valenzbandkante springt. Im Ausgangszustand (neutrales **B**-Atom) ist dieses Niveau ja unbesetzt.
- Das Loch ist jetzt im Valenzband und das Bor-Atom hat ein Elektron abgekriegt – es ist jetzt also einfach negativ geladen, gewissermaßen ein "ortsfestes Bor-**Ion**" **B⁻**. Im [Link](#) kann man sich das schematisch illustriert ansehen.

Im obigen Bild ist das alles schematisch so eingezeichnet.

- Wir haben ein zusätzliches Niveau an der Stelle, an der das Atom sitzt. Da uns das aber zu viel Zeichenarbeit abverlangt, ziehen wir einfach einen ganzen Strich quer durch. Auf jeder halbwegs vernünftigen Längenskala würden die Dotieratomniveaus sowieso dicht an dicht sitzen.
- Den Abstand zu den jeweiligen Bandkanten zeichnen wir aber unverhältnismäßig groß – sonst können wir bei eindlicher Strichstärke keine **zwei** Linien sehen.
- Die effektiven Zustandsdichten kennen wir auch; sie sind (ausnahmsweise) zusätzlich eingezeichnet. An den Bandkanten haben wir die [effektiven Zustandsdichten des Siliziums](#) (hier um die $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), die Dotieratome bringen pro Atom genau einen Zustand ein, die effektive (oder auch exakte) Zustandsdichte ist also identisch zu der von uns *technisch* bestimmten Dichte N_{Dot} der Dotieratome. Deswegen kennen wir sie!

● Im Beispiel des Bildes sind es $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ **Donatoren** (=P oder As) und $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ **Akzeptoren** (=B).

▶ Damit haben wir zwei neue Fachwörter, die wir unbedingt kennen müssen:

Donatoren können ein Elektron ins **Leitungsband** abgeben (ein Donator gibt was her).

Das zugehörige Energieniveau sitzt dicht unterhalb der Leitungsbandkante.

Akzeptoren können ein Elektron aus dem Valenzband aufnehmen (ein Akzeptor nimmt etwas an), wodurch ein Loch im **Valenzband** entsteht.

Das zugehörige Energieniveau sitzt dicht oberhalb der Valenzbandkante

▶ Selbstredend gilt das hier am Beispiel des **Si** Ausgeführte für *alle* Halbleiter.

● Allerdings müssen wir für jeden Halbleiter die geeigneten Dotierdefekte oder Dotieratome finden. Das ist nicht immer leicht oder überhaupt möglich. Falls wir geeignete Defekte haben, müssen wir immer noch Mittel und Wege finden, um die richtigen Mengen an die richtigen Stellen zu bringen.

● Dotieren ist der Dreh- und Angelpunkt der **Halbleitertechnologie**, *aber*: it ain't easy, man!

▶ Wir haben nur noch zwei Fragen:

Wieviele Plätze der Dotierniveaus sind jetzt eigentlich mit Elektronen (oder Löchern) besetzt?

Und wie wirkt sich das auf die Besetzung der Plätze im Valenz- und Leitungsband aus?

● In andern Worten: Wir wollen wissen, wo genau die Fermienergie jetzt liegt.

▶ Warum das so wichtig ist, machen wir uns an einem Stück Silizium (mit nahezu perfekter Materialqualität) klar, aus dem man eine integrierte Schaltung, einen Chip, machen kann. Wir wissen bereits:

● Die Bandlücke $E_g = 1,12 \text{ eV}$ ist eine **Materialkonstante**.

● Die Zustandsdichtefunktion $D(E)$ oder die daraus ableitbare effektive Zustandsdichte N_{eff} ist eine **Materialkonstante**.

● Die **intrinsische Ladungsträgerdichte** $n_i = N_{\text{eff}} \cdot \exp[-E_g/(2k_B T)]$ im Valenz- und Leitungsband ist eine **Materialkonstante**.

▶ Wir müssen aber technisch irgendwas mit dem Silizium tun, damit ein **IC** daraus wird, wir müssen seine Eigenschaften (lokal) ändern. Die drei oben genannten Parameter sind aber unabänderliche Konstanten – was bleibt?

▶ Es bleiben **2** Möglichkeiten:

1. Wir dotieren den Halbleiter gezielt und ändern dadurch die Fermienergie E_F so, wie wir das wollen.

2. Wir verdrecken den Halbleiter unabsichtlich und ändern die Fermienergie E_F *und* die Minoritätsladungsträgerlebensdauer τ irgendwie.

● Aha! Noch'n Parameter, der bisher nicht vorkam – die **Minoritätsladungsträgerlebensdauer**. Wir werden in Kürze lernen, was das bedeutet.

● Das war's dann aber. Es bleibt bei diesen zwei technisch manipulierbaren Parametern; es wird auch sonst kein neuer mehr kommen.

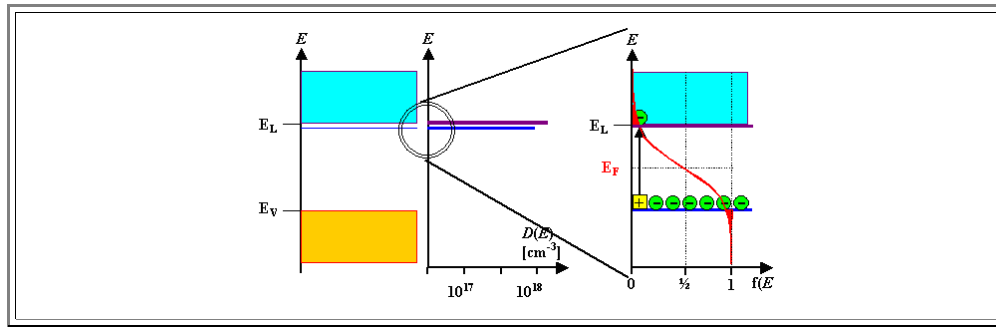
▶ Die Fermienergie ist spätestens jetzt der zentrale Begriff der Halbleiterei. Auch wenn sie zunächst unanschaulich und abstrakt erscheint, bleibt keine Wahl: man muß die Fermienergie in Halbleitern einfach verinnerlichen!

Lage der Fermienergie in dotierten Halbleitern und Ladungsträgerdichte in den Bändern

▶ Wir können die Lage der Fermienergie halbwegs richtig *ohne Rechnen* und nur durch Nachdenken herausfinden.

● Dazu betrachte wir zunächst ein Stück **Si** bei $\approx 0 \text{ K}$, das nur **Donatoren** in einer Dichte N_D enthält, die ungefähr der effektiven Zustandsdichte des Leitungsbands von $\approx 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ entspricht.

● Das sieht dann in Anlehnung an das Bild oben so aus:



Bei $T \approx 0 \text{ K}$ sitzen alle Elektronen bei ihren Atomen – das Valenzband ist voll, das Leitungsband ist leer, und alle Dotieratome haben ihr **5.** Elektron auf dem Niveau dicht unterhalb des Leitungsbandes sitzen.

- Wir erhöhen jetzt die Temperatur ein kleines bißchen – gerade so weit, daß einige wenige Elektronen des Donatorniveaus ins Leitungsband wechseln können, aber Elektronen aus dem Valenzband das noch nicht schaffen. Im Bild ist das für **ein** Elektron gezeigt. Wir haben jetzt **1** bzw. ein bißchen allgemeiner n_L Elektronen im Leitungsband und $n_L = N_D^+$ unbesetzte Plätze auf dem Donatorniveau und damit N_D^+ positiv geladene Donatoren – und immer noch ein volles Valenzband.
- Wir haben auch – wie immer – für die jeweiligen Dichten die Beziehung $n_L = N_{\text{eff}} \cdot f(E_L)$ und $N_D^+ = N_D \cdot \{1 - f(E_D)\}$.
- Das bedeutet, daß die beiden roten "Zwickel" im obigen Bild (rechts) ungefähr gleichgroß sind – und damit **muß** die Fermienergie ungefähr in der Mitte zwischen Leitungsbandkante und Donatorniveau liegen! Für das folgende nehmen wir mal an, daß sie **genau in der Mitte liegt**.

Damit können wir für tiefe Temperaturen, bei denen noch kaum Elektronen aus dem Valenzband es ins Leitungsband schaffen, für die Ladungsträgerdichte im Leitungsband schreiben:

$$n_L(\text{Dot}) \approx N_D \cdot \exp\left(-\frac{E_L - E_D}{2k_B T}\right)$$

- Wie groß ist jetzt die Dichte n_V der Löcher im Valenzband? Nach dem, wie wir uns das überlegt haben, **gleich null**. Aber halt mal – wir hatten dafür doch schon eine **völlig allgemeine Gleichung** namens **Massenwirkungsgesetz** :

$$n_V = \frac{n_i^2}{n_L}$$

- Durch Dotieren haben wir n_L jetzt viel größer gemacht als im intrinsischen Fall. Damit wird n_V jetzt viel kleiner – das ist genau das, was die Formel sagt.

Zeit für einen neuen Eintrag im Halbleiterwörterbuch: Falls wir Halbleiter dotieren, ist die Dichte der Elektronen im Leitungsband und die der Löcher im Valenzband **nicht** mehr gleich groß, sondern (sehr) verschieden. Wir definieren:

- Wir nennen **alle** Halbleiter, die **mehr** Elektronen im Leitungsband als Löcher im Valenzband haben **"n-dotiert"** oder **n-leitend**, bei einem bestimmten Material (hier: Silizium) auch einfach **n-Si**, da **negative** bewegliche Ladungen überwiegen.
 - Den umgekehrten Fall (mehr Löcher als Elektronen) nennen wir **"p-dotiert"** oder **p-leitend**, bei einem bestimmten Material (hier: Silizium) auch einfach **p-Si**, da **positive** bewegliche Ladungen überwiegen.
- Achtung:** Eine n- oder p-Dotierung bedeutet **nicht**, daß ein Material als Ganzes negativ oder positiv geladen ist!!
 - Achtung:** Es kommt hier auf die korrekte Groß-/Kleinschreibung an, denn "p-dotiert" bzw. "p-Dotierung" bedeutet etwas anderes als "P-dotiert" bzw. "P-Dotierung"! Letzteres ist "Dotierung mit P = Phosphor", und im Silizium ist das ein Fall von n-Dotierung!
 - Wir nennen diejenigen Ladungsträger, die die Mehrheit haben, die **Majoritätsladungsträger** oder kurz **Majoritäten**. Die anderen sind dann die **Minoritätsladungsträger** oder kurz **Minoritäten**.
 - In Kurzform für **Silizium** (und **nur** für Silizium):

Donatoren: P und As \Rightarrow **n-Si**

\Rightarrow **Majoritäten** sind Elektronen im Leitungsband. **Minoritäten** sind Löcher im Valenzband.

Akzeptor: B \Rightarrow **p-Si**

\Rightarrow **Majoritäten** sind Löcher im Valenzband. **Minoritäten** sind Elektronen im Leitungsband.

Jetzt kommen die Fragen:

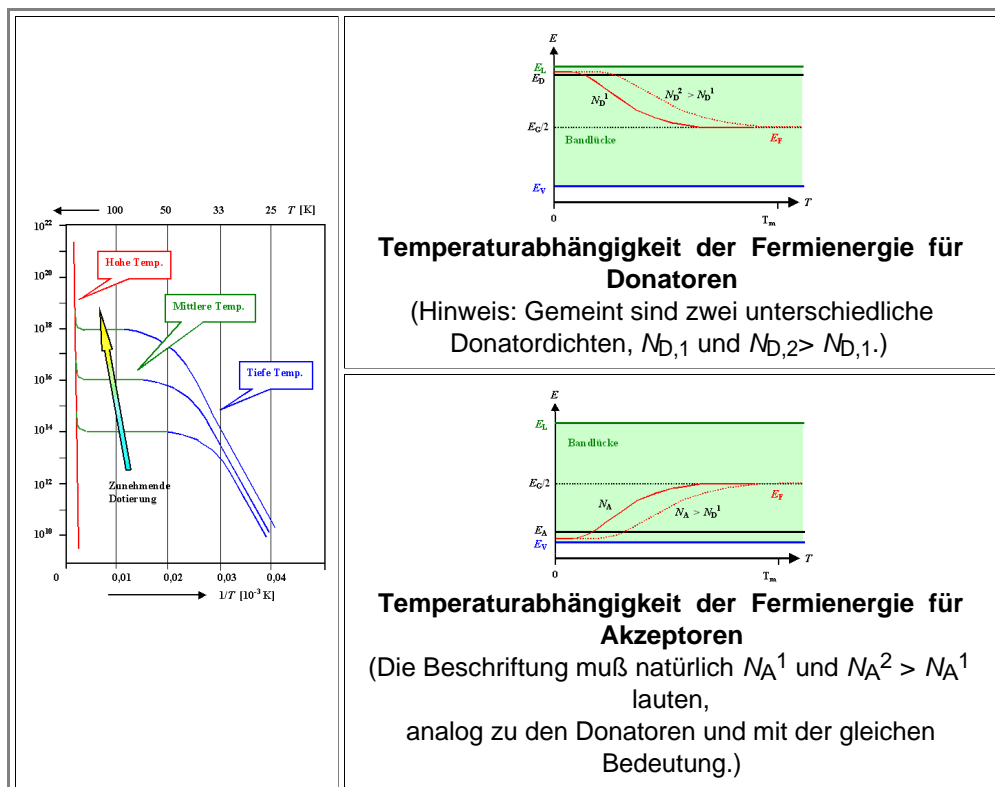
Frage 1. Wie lange gilt denn die oben gemachte Näherung, daß nur Elektronen vom Donatorniveau es ins Leitungsband schaffen? Wenn man die Temperatur immer mehr erhöht, werden irgendwann ja auch mal nennenswerte Mengen an Elektronen vom Valenzband "hochgeschickt", die Konzentration ist dann höher als berechnet.

- Dieselbe Frage, nur anders formuliert: Wie ändert sich die Lage der Fermienergie mit der Temperatur? Denn woher auch immer die Elektronen im Leitungsband kommen, es gilt $n_L = N_{\text{eff}} \cdot \exp[-(E_L - E_F)/(k_B T)]$. Soll die Konzentration n_L größer werden als mit der Näherung von oben berechnet, muß die Fermienergie ...?
- Zeit für eine Übung. (Hinweis: Solange die Fermienergie oberhalb des Donatorniveaus liegt, sind noch nicht alle Donatoratome umgeladen worden, d. h. noch nicht alle Donatorelektronen ans Leitungsband abgegeben worden.)
- Wir nehmen gleich noch mit, daß die Beantwortung der Fermienergiefrage für **alle** Dotierungen und **alle** Temperaturen usw. die Frage nach der Ladungsträgerkonzentration beantwortet.

Frage 2. Wie funktioniert p-Dotierung?

- Die Antwort ergibt sich aus der nächsten schnellen Übung.

Um eine lange Geschichte kurz zu machen, hier die Antwort auf **Frage 1**:



Die linke Graphik ist extrem wichtig. Deshalb erarbeiten wir sie uns in einfacher (und ungefährender) Weise in einer Übungsaufgabe:

Übungsaufgabe 9.1-2

Ladungsträgerdichte und Temperatur

Die rechte Graphik zeigt, was die Fermienergie als Funktion der Temperatur so treibt. Es ist nicht so schwer zu verstehen, leider kann man das nicht analytisch rechnen. Wie's geht, ist für Interessenten in einem eigenen Modul gezeigt.

- Wir nehmen einfach nur so zur Kenntnis, daß in **Si** die **Majoritäts** ladungsträgerdichte in einem vernünftigen Temperaturbereich in hinreichend guter Näherung schlicht identisch ist zur Dotierstoffkonzentration!

- Warum? Weil beim **Silizium** es glücklicherweise gerade so läuft, daß um die Raumtemperatur herum die Donatoren ihre Elektronen fast zu **100 %** schon ins Leitungsband geschickt haben, aus dem Valenzband aber noch nicht viel "hochkommt". Das passiert erst bei **$T > 100 \text{ °C}$** . In Halbleitern mit anderen Energielücken ist das anders!
 - Dies bedeutet, daß im interessanten Temperaturbereich die Ladungsträgerdichte sowohl halbwegs konstant ist als auch durch Dotieren genau eingestellt werden kann – und das sind genau die Anforderungen, die die Halbleitertechnik nun mal stellt!
- ▶ Für uns bedeutet das: Wir benutzen **ab sofort** nur noch zwei extrem simple und extrem wichtige Gleichungen für die Ladungsträgerdichte:

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

▶ Jetzt fehlt uns nur noch **eine** wichtige Grundgleichung; die werden wir uns schon im nächsten Modul verschaffen.

Fragebogen

Schnelle Fragen zu 9.1.2