Halbleiter

Feststoffe liegen meistens als Kristalle vor. Die elektrischen Eigenschaften solcher Kristalle hängen davon ab, wie stark die Valenzelektronen an die Atomrümpfe gebunden sind, siehe die schematischen Abbildungen 460-462. Einzelne Atome haben scharfe Energieniveaux, ein Festkörper hat Energiebänder. Die Energiebänder werden von unten nach oben mit Elektronen besetzt. Elektronen im sogenannten Valenzband sind an die Atome gebunden. Elektronen im Leitungsband sind an den Festkörper gebunden, aber nicht mehr an die einzelnen Atome. Elektronen im Leitungsband sind frei beweglich und stehen für den Ladungstransport zur Verfügung.

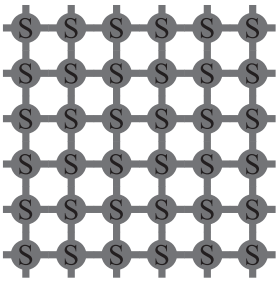

Abbildung 460: Kristallgitter aus einem Isolator, z.B. Schwefel
Da alle Elektronen stark gebunden sind, hat es in einem Schwefelkristall keine freine Ladungsträger, welche Ladung über grössere Strecken transportieren könnten. Deshalb ist Schwefel ein Isolator. (Fachsprache: Das Valenzband ist voll und liegt weit unterhalb des Leitungsbandes. Die Bandlücke ist viel grösser als die verfügbare, thermische Energie der Valenzelektronen.)

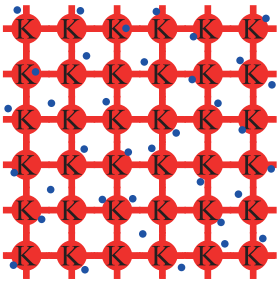

Abbildung 461: Kristallgitter aus einem Metall, z.B. Kalium.
Die Elektronen sind so schwach gebunden, dass sie sich allein durch die stets vorhandene thermische Energie von den Atomrümpfen lösen können. (Das Valenzband überlappt mit dem Leitungsband.) Jedes Metallatom gibt ein bis zwei Elektronen ab, die dann eine Art Gas (nach Drude) von frei beweglichen Elektronen bilden. Diese Leitungselektronen stehen für den Ladungstransport zur Verfügung. Die Atomrümpfe (Metallionen) bilden das Kristallgitter und wirken wie eine unbewegliche, positive Hintergrundladung (Raumladung). Bei höherer Temperatur bewegen sich die Metallionen stärker und behindern den Ladungsfluss: Der elektrische Widerstand steigt mit der Temperatur.

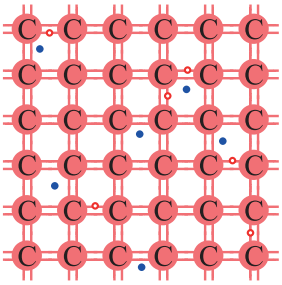

Abbildung 462: Kristallgitter aus einem Halbleiter, z.B. Kohlenstoff.
Die Elektronen sind mittelstark an die Atomrümpfe gebunden. (Das Valenzband ist voll und durch eine kleine Lücke vom Leitungsband getrennt. Die Bindungsenergie (Bandlücke) beträgt für Silizium z.B. 0.7 eV.*) Nur wenige Elektronen können sich durch thermische Anregung von den Atomen lösen (ca.* 10^{12} *Mal weniger als bei den Metallen). Die elektrische Leitfähigkeit liegt deshalb zwischen der von Metallen und Isolatoren, deshalb heissen sie Halbleiter. Bei höherer Temperatur können sich mehr Elektronen von den Atomen lösen und der Halbleiter leitet besser.*

Der heute für die Technik wichtigste Halbleiter ist Silizium, weil Silizium einfach zu verarbeiten ist. Silizium bildet z.B. eine isolierende Oxidschicht (Quarz), ist ungiftig und in grossen Mengen vorhanden. Es gibt elementare Halbleiter (C, Si, Ge) und Verbindungshalbleiter (GaAs, InP, etc). Verbindungshalbleiter werden z.B. für Leucht- und Laserdioden verwendet.

© Martin Lieberherr

Dotierung

Aus reinen Halbleitern werden beispielsweise temperaturabhängige Widerstände fabriziert. Für die Elektronik werden jedoch meistens dotierte Halbleiter verwendet. In diesen ist ein kleiner Teil der Halbleiteratome durch Fremdatome ersetzt, Grössenordnung jedes Millionste, siehe Abbildung 463-464. Die Dotierung verändert die Eigenschaften des Halbleiters radikal und je nach Dotierungsmaterial anders. Man kann so die elektrischen Eigenschaften massschneidern.

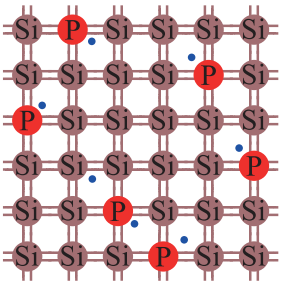

Abbildung 463: n-otiertes Si-Gitter, z.B. mit Phosphor (Schema). Phosphor hat ein Valenzelektron mehr als Silizium. Wird Phosphor ins Siliziumgitter eingebaut, so kann sich jenes Elektron vom Phosphor lösen und sich frei im Kristall bewegen, während die positiven Phosphorionen zurück bleiben. Weil die beweglichen Ladungsträger negativ sind, nennt man dieses Material einen n-Leiter. Die Phosporionen sind unbeweglich und bilden eine positive Raumladung.

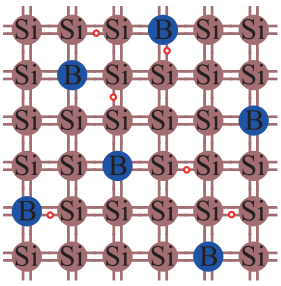

Abbildung 464: p-dotiertes Si-Gitter, z.B. mit Bor (Schema). Bor hat ein Valenzelektron weniger als Silizium. Wird Bor ins Siliziumgitter eingebaut, so kann das Bor ein Elektron "stehlen". Das gestohlene Elektron hinterlässt an anderer Stelle eine Lücke (sog. "Loch", engl. hole). Dieses Loch kann im Kristall herumwandern und verhält sich wie ein positiver Ladungsträger, man spricht von p-Leitung. Die Löcher sind etwas weniger beweglich als die Elektronen in einem n-Leiter. Die zurückbleibenden Borionen bilden eine negative Raumladung.

Interessant wird es, wenn zwei oder mehr verschieden dotierte Halbleiter kombiniert werden. Die einfachste Kombination ist ein pn-Übergang.

© Martin Lieberherr

pn-Übergang

Ein Halbleiterkristall kann so dotiert werden, dass sich im Innern ein pn-Übergang bildet. Das ist eine Grenzfläche, wo p- und n-dotierte Bereiche aufeinander stossen, siehe Abbildungen 465-467.

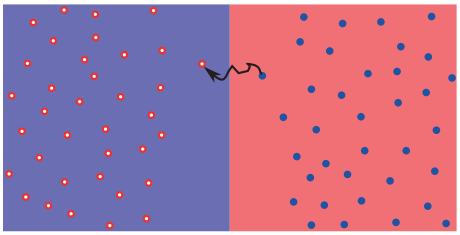

Abbildung 465: pn-Übergang
Freie Elektronen und Löcher können im ganzen Kristall diffundieren, auch über die pn-Grenze. Trifft dort ein Elektron auf ein Loch, so wird das Elektron gebunden und das Loch "gefüllt". Mit der Zeit verschwinden im Bereich der Grenzfläche alle freien Ladungsträger. Übrig bleiben die positive und negative Raumladung der Gitterionen. Diese Raumladungen verhindern eine weitere Diffusion der Elektronen oder Löcher über die Grenze. Man nennt diese Raumladungszone deshalb auch Sperrzone.

Versieht man einen Halbleiterkristall, der einen pn-Übergang enthält, wie in den Abb. 466-467 mit zwei elektrischen Anschlüssen (und baut ihn in ein Gehäuse ein), so erhält man eine Halbleiterdiode. Diese Diode reagiert anders, je nachdem wie die Anschlüsse gepolt werden.

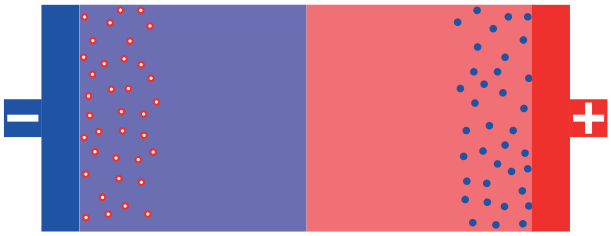

Abbildung 466: pn-Übergang in Sperrichtung gepolt
Die Elektronen und Löcher werden vom pn-Übergang weggezogen, die Sperrschicht vergrössert sich. Der elektrische Strom wird blockiert.

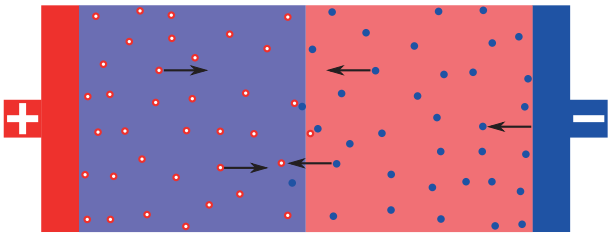

Abbildung 467: pn-Übergang in Flussrichtung gepolt
Die Elektronen und Löcher werden in die Sperrzone gedrückt, welche dadurch verschwindet. Bei den Anschlüssen entstehen laufend neue Elektronen und Löcher; am pn-Übergang rekombinieren sie wieder. Es fliesst ein Strom durch das Halbleiterelement.

Abbildungen 466-467 illustrieren den sogenannten Gleichrichtereffekt: Elektrischer Strom kann nur in einer Richtung durch diese Diode fliessen, in Gegenrichtung wird der Ladungsfluss stark gehemmt. Solche Gleichrichterdioden kommen beispielsweise zum Einsatz, wenn aus Wechselstrom Gleichstrom gemacht werden soll.

© Martin Lieberherr