

Halbleitertechnologie von A bis Z

Grundlagen

Dotieren: n- und p-Halbleiter	3
<i>Dotieren</i>	3
<i>n-Dotierung</i>	3
<i>p-Dotierung</i>	4
<i>Bänderschema bei dotierten Halbleitern</i>	5

Dotieren: n- und p-Halbleiter

Dotieren

Dotieren bedeutet das Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiterkristall zur gezielten Veränderung der Leitfähigkeit. Zwei der wichtigsten Stoffe mit denen Silicium dotiert werden kann sind Bor (3 Valenzelektronen = 3-wertig) und Phosphor (5 Valenzelektronen = 5-wertig). Weitere sind: Aluminium, Indium (3-wertig) und Arsen, Antimon (5-wertig).

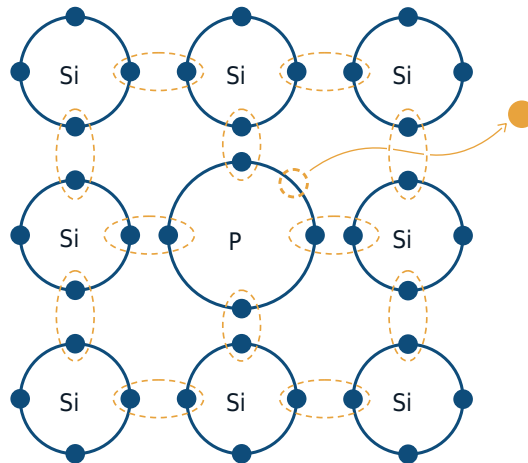
Die Dotierelemente werden in die Gitterstruktur des Halbleiterkristalls eingebaut, die Anzahl der Außenelektronen bestimmt die Art der Dotierung. Elemente mit 3 Valenzelektronen werden zur p-Dotierung benutzt, 5-wertige Elemente zur n-Dotierung. Die Leitfähigkeit eines gezielt verunreinigten Siliciumkristalls kann so um den Faktor 10^6 erhöht werden.

n-Dotierung

Das 5-wertige Dotierelement besitzt ein Außenelektron mehr als die Siliciumatome. Vier Außenelektronen können sich mit je einem Siliciumatom binden, das fünfte ist frei beweglich und dient als Ladungsträger. Dieses ungebundene Elektron benötigt sehr viel weniger Energie um vom Valenzband in das Leitungsband gehoben zu werden, als die Elektronen, die die Eigenleitfähigkeit des Siliciums verursachen. Das Dotierelement, welches ein Elektron abgibt, wird als Elektronendonator (donare, lat. = geben) bezeichnet.

Die Dotierelemente werden durch die Abgabe negativer Ladungsträger positiv geladen und sind fest im Gitter eingebaut, es bewegen sich nur die Elektronen. Dotierte Halbmetalle, deren Leitfähigkeit auf freien (negativen) Elektronen beruht sind n-leitend bzw. n-dotiert. Während Löcher (und ebenso viele Elektronen) im Kristall jederzeit spontan erzeugt werden können, überwiegt nun die Anzahl freier Elektronen durch die eingebrachten Donatoren, weshalb diese als Majoritätsladungsträger bezeichnet werden. Löcher hingegen als Minoritätsladungsträger.

n-Dotierung mit Phosphor



Vier Bindungselektronen, ein Elektron als freier Ladungsträger

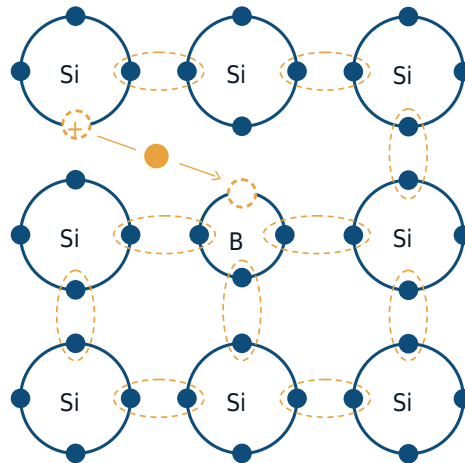
Arsen wird als Alternative zu Phosphor verwendet, da dessen Diffusionskoeffizient geringer ist. Das bedeutet, dass der Dotierstoff bei späteren Prozessschritten weniger stark diffundiert und die Dotierung somit an der Stelle bleibt, wo sie eingebracht wurde.

p-Dotierung

Im Gegensatz zum freien Elektron bei der Dotierung mit Phosphor bewirken 3-wertige Dotierelemente genau das Gegenteil. Sie können ein zusätzliches Außenelektron aufnehmen und hinterlassen so ein Loch im Valenzband der Siliciumatome. Dadurch werden die Elektronen im Valenzband beweglich. Die Löcher bewegen sich in entgegengesetzter Richtung zur Elektronenbewegung. Die dazu nötige Energie beträgt bei Indium als Dotierelement nur 1 % der Energie die nötig ist, um die Valenzelektronen der Siliciumatome in das Leitungsband zu heben.

Durch die Aufnahme eines Elektrons wird das Dotierelement einfach negativ geladen; solche Dotieratome nennt man Elektronenakzeptor (acceptare, lat. = aufnehmen). Auch hier ist das Dotierelement fest im Kristallgitter eingebaut, es bewegt sich nur die positive Ladung. P-leitend oder p-dotiert nennt man diese Halbleiter weil die Leitfähigkeit auf positiven Löchern beruht. Analog zu n-dotierten Halbleitern, sind hier die Löcher die Majoritätsladungsträger, freie Elektronen die Minoritätsladungsträger.

p-Dotierung mit Bor



Vier Bindungselektronen, ein Elektron als freier Ladusträger

Nach außen sind dotierte Halbleiter elektrisch neutral. Die Bezeichnungen n- bzw. p-Dotierung beziehen sich nur auf die Majoritätsladungsträger.

N- und p-dotierte Halbleiter verhalten sich in Bezug auf den Stromfluss annähernd gleich. Mit steigender Anzahl an Dotierelementen nimmt auch die Zahl von Ladungsträgern im Halbleiterkristall zu. Dabei genügt schon eine sehr geringe Menge an Dotierelementen. Schwach dotierte Siliciumkristalle enthalten nur 1 Fremdatom pro 1.000.000.000 Siliciumatomen, bei den höchsten Dotierungen ist das Verhältnis von Fremdatomen zu Siliciumatomen z.B. 1 zu 1000.

Bänderschema bei dotierten Halbleitern

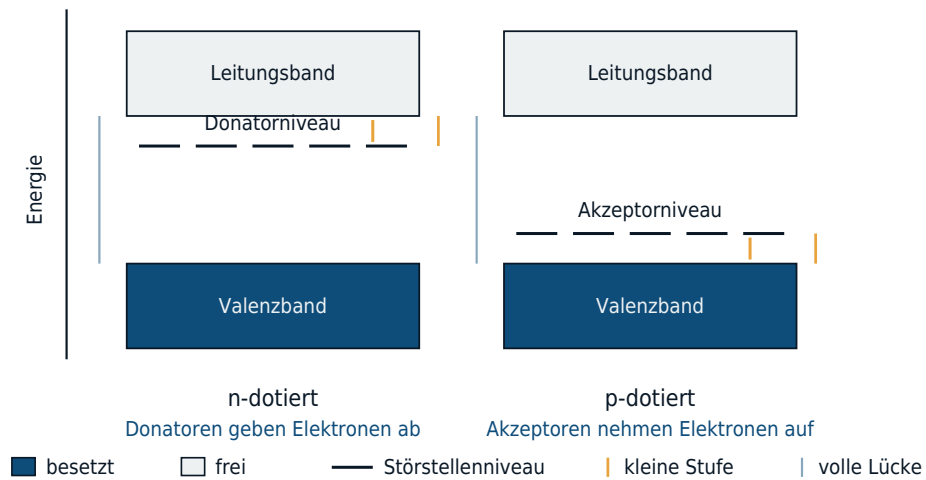
Bei n-dotierten Halbleitern steht durch das Einbringen eines Dotierelements mit fünf Außenelektronen ein Elektron im Kristall zur Verfügung das nicht gebunden ist, und so mit vergleichsweise geringer Energie in das Leitungsband gehoben werden kann. Somit findet man in n-dotierten Halbleitern ein Donatorniveau nahe der Leitungsbandkante, die zu überwindende Bandlücke ist sehr klein.

Durch das Einbringen eines 3-wertigen Dotierelements steht bei p-dotierten Halbleitern eine Leerstelle zur Verfügung, die schon mit geringer Energie von einem Elektron aus dem Valenzband besetzt werden kann. Bei p-dotierten Halbleitern befindet sich somit ein Akzeptorniveau nahe der Valenzbandkante.

Bänderschema bei dotierten Halbleitern

Bänderschema bei dotierten Halbleitern

Das Störstellenniveau liegt dicht an der Bandkante – die Stufe wird klein



Ohne Dotierung müsste ein Elektron die ganze Bandlücke überwinden. Mit Störstellen genügt ein Bruchteil davon – deshalb steigt die Leitfähigkeit schon bei Raumtemperatur deutlich an.