

Halbleitertechnologie von A bis Z

Metallisierung

Der Metall-Halbleiter-Kontakt	3
<i>n-Halbleiter-Kontakt</i>	<i>3</i>
<i>p-Halbleiter-Kontakt</i>	<i>5</i>
<i>Kontaktierung von dotierten Halbleitern</i>	<i>6</i>
<i>Bändermodell eines p-n-Übergangs</i>	<i>8</i>

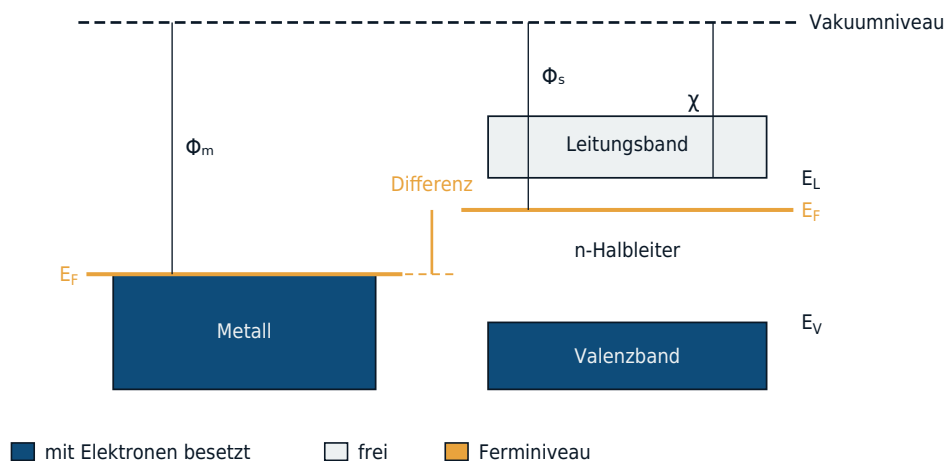
Der Metall-Halbleiter-Kontakt

n-Halbleiter-Kontakt

Ob und in welche Richtung beim Kontakt Elektronen fließen, bestimmt die Austrittsarbeit der beiden Materialien – die Energie, die nötig ist, um ein Elektron vom Fermi-niveau aus dem Material zu lösen. Ist die Austrittsarbeit des Metalls größer als die des n-Halbleiters (wie z.B. bei Aluminium auf Silicium), liegt das Fermi-niveau des Metalls energetisch tiefer: Bei der Kontaktierung fließen Elektronen aus dem Silicium in das Metall, da sie dort energetisch günstigere Zustände besetzen können. Im umgekehrten Fall – Austrittsarbeit des Metalls kleiner als die des n-Halbleiters – entsteht keine Barriere, sondern von vornherein ein ohmscher Kontakt.

Bändermodell vor dem Kontakt

Das Metall hat die größere Austrittsarbeit, sein Fermi-niveau liegt tiefer



Φ ist die Austrittsarbeit, χ die Elektronenaffinität. Weil Φ_m größer ist als Φ_s , liegt das Fermi-niveau des Metalls tiefer. Beim Kontakt fließen deshalb Elektronen aus dem Halbleiter in das Metall, bis beide Niveaus gleich sind.

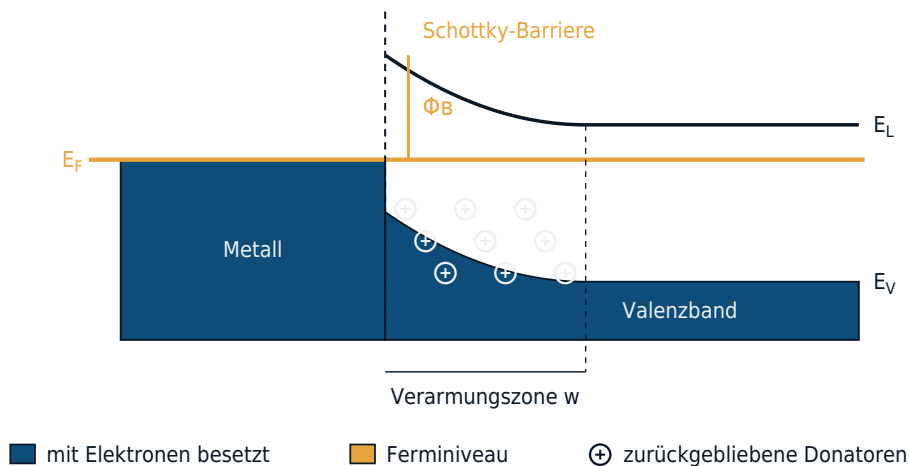
Es verringert sich somit die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Elektronen im Leitungsband des Halbleiters: Der Abstand zwischen Leitungsbandkante und Fermi-niveau – welches den höchsten noch mit Elektronen besetzten Energiezustand beschreibt – wird an der Grenzfläche größer.

Durch die abgeflommenen negativen Ladungsträger bleiben positive Donatoren (z.B. Phosphorionen) zurück und es entsteht eine Raumladungszone. Die Verbiegung des Leitungsbandes veranschaulicht die Spannungsbarriere (Schottky-Barriere), welche die verbliebenen Elektronen im n-Leiter überwinden müssen, um in das Metall zu fließen.

Beim Kontakt von Metall und Halbleiter gleichen sich die Fermi-niveaus also durch Diffusionsprozesse an, im Bereich der Grenzfläche ist das Fermi-niveau konstant.

Bändermodell nach dem Kontakt

Die Fermi-niveaus gleichen sich an, die Bänder verbiegen sich



Die abgeflossenen Elektronen hinterlassen positive Donatorrümpfe. Deren Raumladung verbiegt die Bänder – parabolisch, wie es die Poisson-Gleichung verlangt. Je stärker dotiert, desto schmaler wird w .

Die Weite w der Verarmungszone hängt von der Stärke der Dotierung ab. Die aus dem Halbleiter abgewanderten Elektronen erzeugen im Metall eine negative Raumladung, welche auf den Oberflächenbereich begrenzt ist.

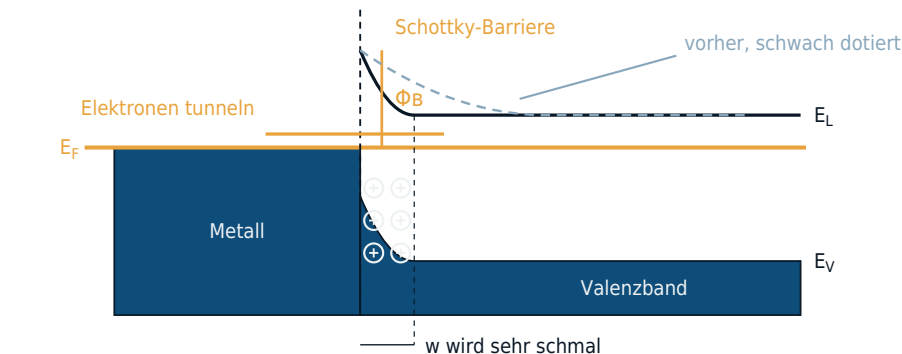
Dieser Metall-Halbleiter-Kontakt weist eine nichtlineare Strom-Spannungscharakteristik auf, eine so genannte Schottky-Diode. Diese Barriere können die Elektronen durch Wärmeenergie von außen überwinden oder durch ein anliegendes elektrisches Feld "untertunneln" (nach der Quantentheorie kann ein Teilchen einen Bereich, in dem es aus energetischen Gründen nicht sein kann, überwinden, indem es sich, stark vereinfacht gesprochen, kurzzeitig Energie ausleiht, um die Barriere zu überwinden und die Energie dann wieder zurückgibt: der Tunneleffekt). Auch bei Aluminium kann dieser Effekt beobachtet werden. Da Aluminium an der Oberfläche immer oxidiert, hätten zwei aneinander liegende Aluminiumflächen eine isolierende Wirkung. Es ist jedoch ein Stromfluss zu verzeichnen, der auf dem Tunneleffekt beruht.

Je nach Anwendung will man diesen Dioden-Effekt herstellen oder aber verhindern. Um einen ohmschen Kontakt, also einen Kontakt ohne diese Potentialbarriere zu erzeugen, kann die Kontaktfläche stark dotiert werden (n^+ -Dotierung), so dass die Verarmungszone sehr dünn wird und der Metall-Halbleiter-Kontakt in Folge des Tunneleffekts ein lineares Strom-

Spannungsverhältnis aufweist.

Bändermodell nach n^+ -Dotierung

Die Barriere bleibt gleich hoch, wird aber so dünn, dass Elektronen durchtunneln



■ mit Elektronen besetzt ■ Fermi-niveau ⊕ zurückgebliebene Donatoren

Die starke Dotierung drängt die Raumladung auf wenige Nanometer zusammen.
Die Barriere ist dadurch zwar unverändert hoch, aber so dünn, dass die Elektronen sie durchtunneln – der Kontakt wird ohmsch.

Da Aluminium im Silicium als Elektronenakzeptor eingebaut wird (es nimmt Elektronen auf) und sich so eine p-Dotierung an der Grenzfläche bildet, entsteht bei p-dotiertem Silicium ein ohmscher Kontakt. Bei einem n-dotierten Gebiet verursacht das Aluminium eine Dotierungsumkehr, so dass hier ein p-n-Übergang entsteht: eine Diode. Um diese zu vermeiden gibt es zwei Möglichkeiten:

- das n-dotierte Gebiet wird so stark dotiert, dass das Aluminium dieses nur abschwächt, nicht aber umkehrt
- eine Zwischenschicht aus Titan, Chrom oder Palladium verhindert die Umdotierung der n-dotierten Gebiete

Zur Verbesserung der Kontakte können auch Metallsilicide (Metalle in Verbindung mit Silicium) an der Kontaktfläche aufgebracht werden.

Im Gegensatz zur Diode beim **p-n-Übergang**, bei der die Schaltgeschwindigkeit auf der Diffusion von Elektronen beruht, haben Schottky-Dioden sehr kurze Schaltzeiten. Sie eignen sich daher als Schutzdioden, um Spannungsspitzen abzufangen.

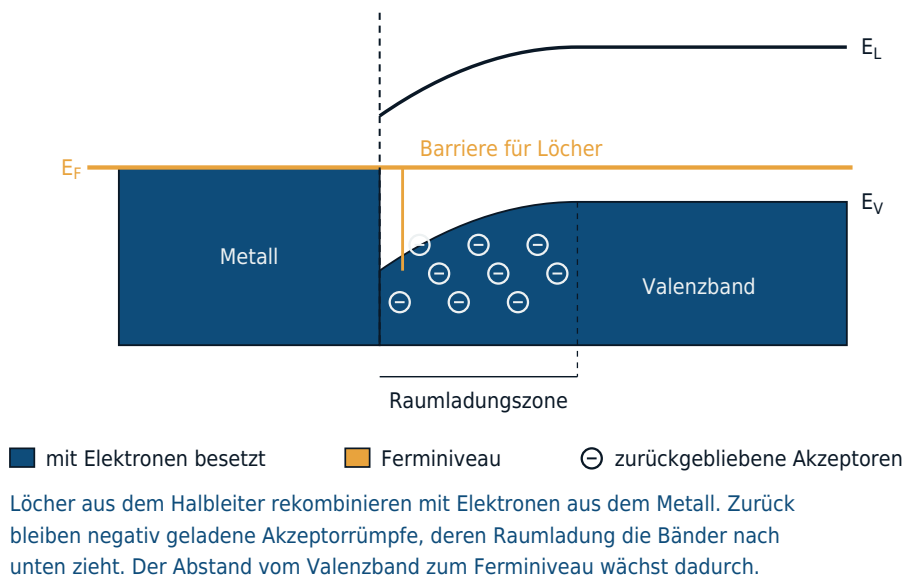
p-Halbleiter-Kontakt

Bei Metall-p-Halbleiter-Kontakten ergibt sich in Folge des Ladungsträgeraustauschs zwischen Metall und Halbleiter eine Bandverbiegung nach unten, Löcher im Halbleiter rekombinieren mit Elektronen aus dem Metall.

Durch die Verringerung der Löcherkonzentration ergibt sich eine negative Raumladungszone im Halbleiterkristall, der Abstand zwischen Valenzbandkante und Fermi-niveau – repräsentativ für die höchsten Besetzungszustände durch Elektronen – wird an der Grenzfläche größer, und die so entstandene Potentialbarriere an der Valenzbandkante verhindert eine weitere Bewegung der Löcher, welche – komplementär zu Elektronen – die energetisch höchsten Zustände einnehmen wollen.

Bändermodell nach Metall-p-Halbleiter-Kontakt

Die Bänder verbiegen sich nach unten, die Barriere liegt am Valenzband



Ohne eine äußere Spannung kommen die Diffusionsprozesse zum Erliegen. Auch hier gleichen sich die Fermi-niveaus im thermodynamischen Gleichgewicht einander an.

Kontaktierung von dotierten Halbleitern

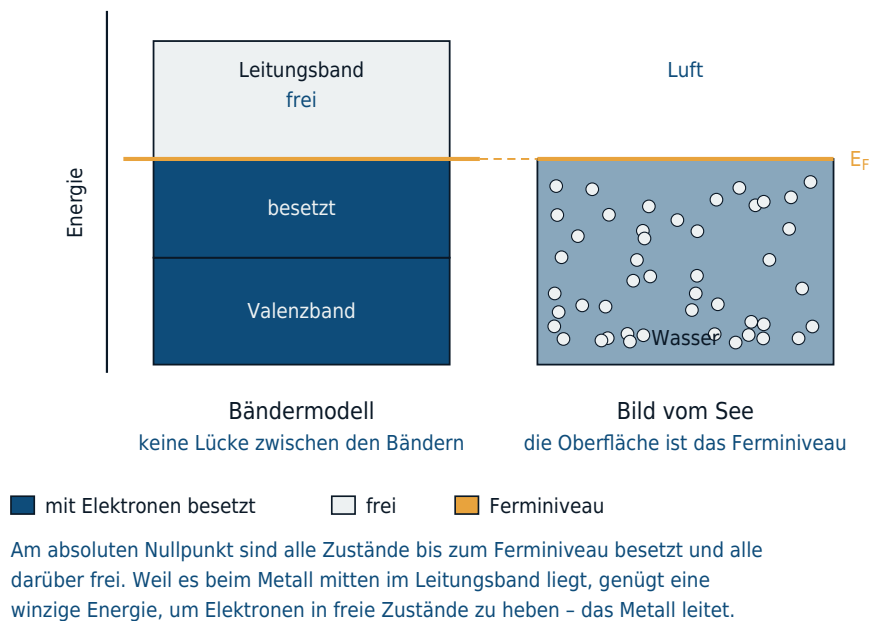
Nach der Herstellung der Transistoren im Siliciumsubstrat müssen diese mittels elektrischer Kontakte miteinander verbunden werden. Dabei wird zum einen die Gateelektrode zur Steuerung des Transistors kontaktiert, zum anderen müssen die dotierten Source- und Draingebiete, über die der Stromfluss erfolgt, angesteuert werden. Hier ergeben sich Probleme an den Kontaktflächen beim Übergang von Metallisierung zu Silicium, da je nach Dotierungstyp von Source und Drain Elektronenmangel (p-dotiert) oder Elektronenüberschuss (n-dotiert) vorherrscht.

Dabei spielt das Fermi-niveau eine wichtige Rolle. Das Fermi-niveau ist das

Energieniveau, bis zu dem sich am absoluten Temperaturnullpunkt (-273,15 °C) noch Elektronen befinden. In Leitern befinden sich Elektronen im Valenzband und im energetisch höheren Leitungsband, folglich ist das Fermi-niveau auf Höhe des Leitungsbandes. Zur Veranschaulichung kann die Wasseroberfläche eines Sees betrachtet werden. Die Wassermoleküle darunter stellen die Elektronen dar, welche bis an die Oberfläche – das Fermi-niveau – reichen.

Fermi-niveau in Metallen

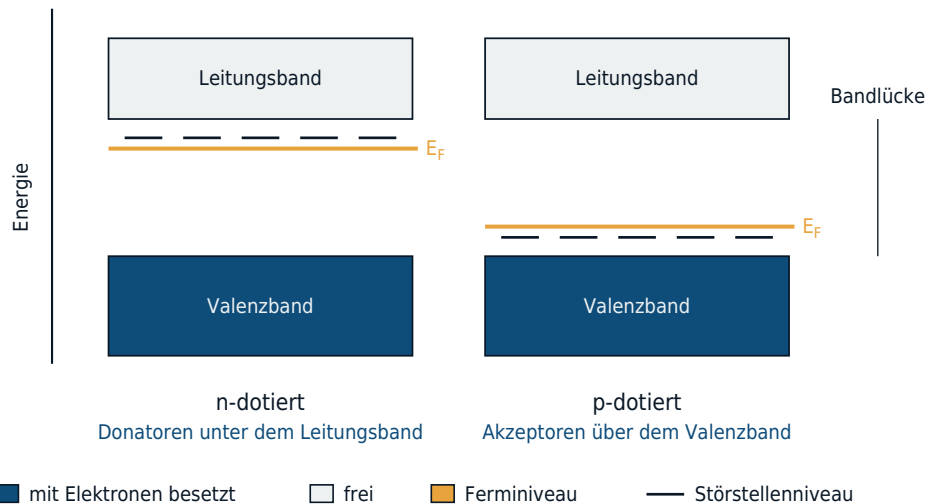
Beide Bänder grenzen ohne Lücke aneinander, besetzt ist alles bis zum Fermi-niveau



In dotierten Halbleitern befinden sich Fremdatome als Donatoren oder Akzeptoren im Kristallgitter. In n-dotierten Halbleitern befindet sich das Fermi-niveau in der Nähe der Leitungsbandkante, da die Donatoratome schon bei geringer Energiezufuhr freie Elektronen zur Verfügung stellen können. Dementsprechend befindet sich das Fermi-niveau in einem p-dotierten Halbleiter in der Nähe der Valenzbandkante, da Elektronen aus dem Valenzband des Siliciumkristalls leicht vom Akzeptoratom aufgenommen werden können (vgl. Kapitel [Dotieren](#)).

Ferminiveau in dotierten Halbleitern

Anders als im Metall liegt zwischen den Bändern eine Lücke



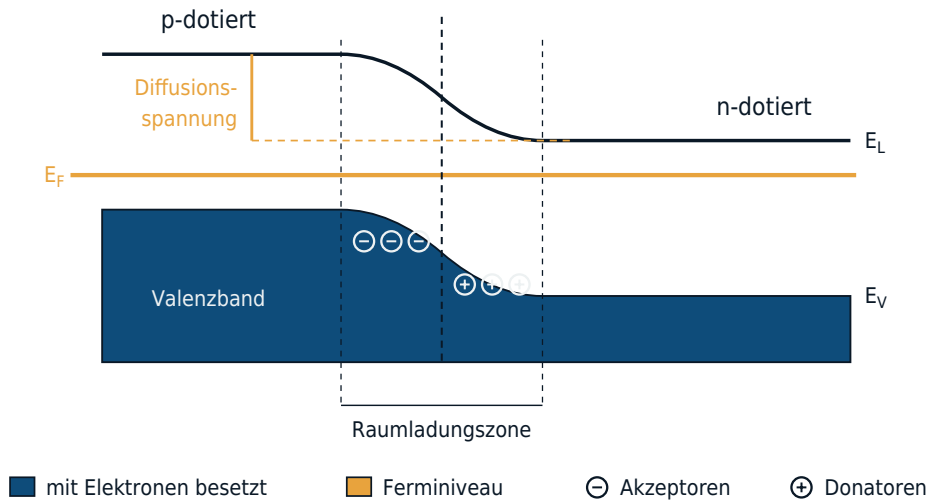
Das Ferminiveau rückt dorthin, wo die Ladungsträger leicht verfügbar sind: bei n-Dotierung nach oben zur Leitungsbandkante, bei p-Dotierung nach unten zur Valenzbandkante. Diese Lage bestimmt später den Kontaktwiderstand.

Bändermodell eines p-n-Übergangs

Aus der Tatsache, dass das Ferminiveau konstant sein muss (andernfalls würden Elektronen an Orte mit niedrigerem Ferminiveau fließen, dort freie Zustände besetzen und damit das Ferminiveau wieder anheben), ergibt sich auch beim p-n-Übergang eine Bänderverbiegung. Diese veranschaulicht die Raumladungszone, welche sich in Folge der abgewanderten Majoritätsladungsträger und der verbleibenden festen Dotieratome einstellt; also die Potentialschwelle, welche im Gleichgewichtszustand (ohne äußere Spannung) eine weitere Diffusion von Elektronen und Löchern in den jeweils anderen Kristall verhindert. Bei Silicium beträgt die Diffusionsspannung zum Überwinden des Potentialgefälles ca. 0,7 V.

Bändermodell am p-n-Übergang

Das Fermi-niveau ist konstant, deshalb verbiegen sich die Bänder



Elektronen und Löcher wandern über den Übergang und rekombinieren. Zurück bleiben ortsfeste Dotieratome, deren Raumladung die Bänder verbiegt. Die entstehende Potentialschwelle bringt die Diffusion zum Erliegen; bei Silicium sind dafür etwa 0,7 V zu überwinden.