

1 Metallisierung

1.1 Der Metall-Halbleiter-Kontakt

1.1.1 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 ($-273,15\text{ °C}$) 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.

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).

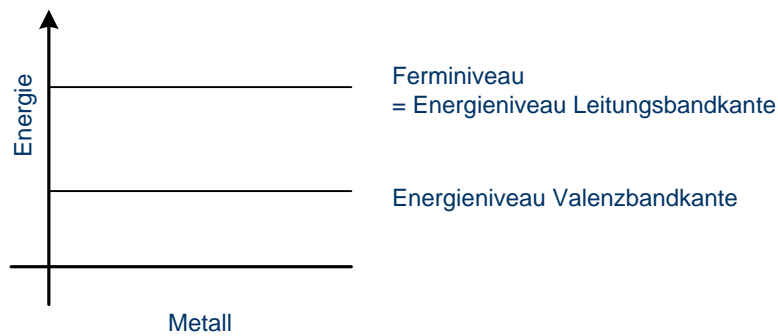


Abb. 1.1: Ferminiveau in Metallen

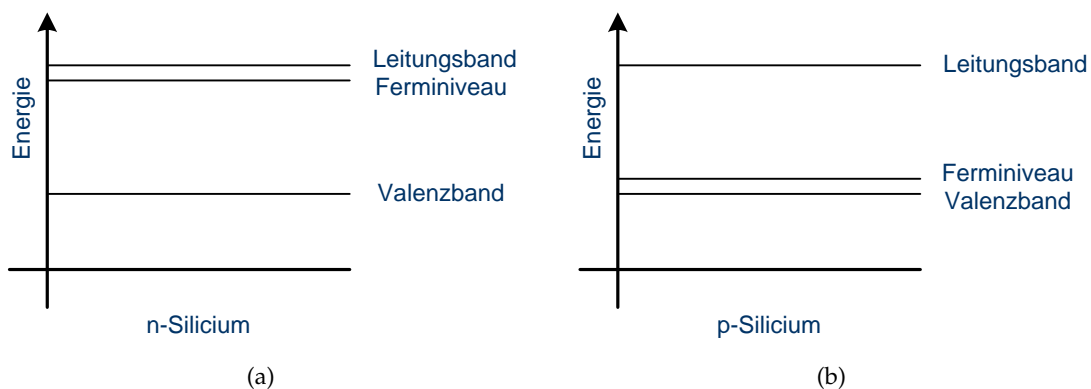


Abb. 1.2: Ferminiveau in dotierten Halbleitern

1.1.2 n-Halbleiter-Kontakt

Da das Leitungsband in n-Halbleitern energetisch höher liegt als das Ferminiveau, können bei der Kontaktierung Elektronen aus dem Silicium in das Metall fließen, da diese den energetisch niedrigsten Zustand einnehmen.

Es verringert sich somit die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Elektronen im Leitungsband des Halbleiters, und das Ferminiveau, welches den höchsten noch mit Elektronen besetzten Energiezustand beschreibt, entfernt sich.

Durch die abgeflossenen 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.

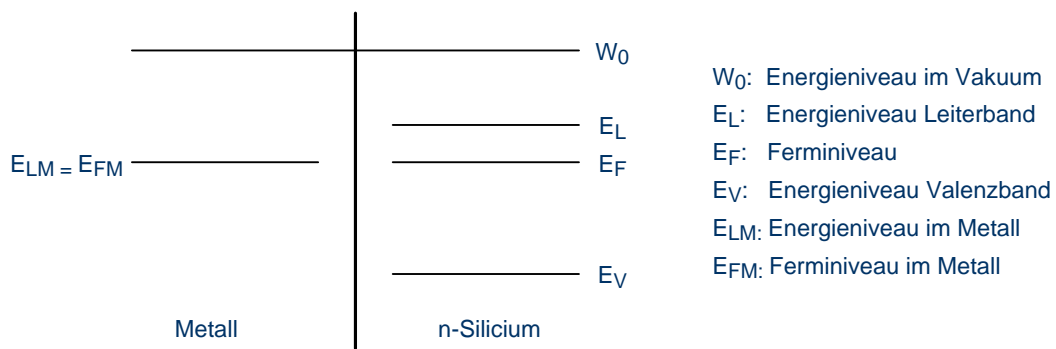


Abb. 1.3: Bändermodell vor dem Kontakt von Metall und n-Silicium

Beim Kontakt von Metall und Halbleiter gleichen sich die Fermienergien also durch Diffusionsprozesse an, im Bereich der Grenzfläche ist das Fermienergie konstant.

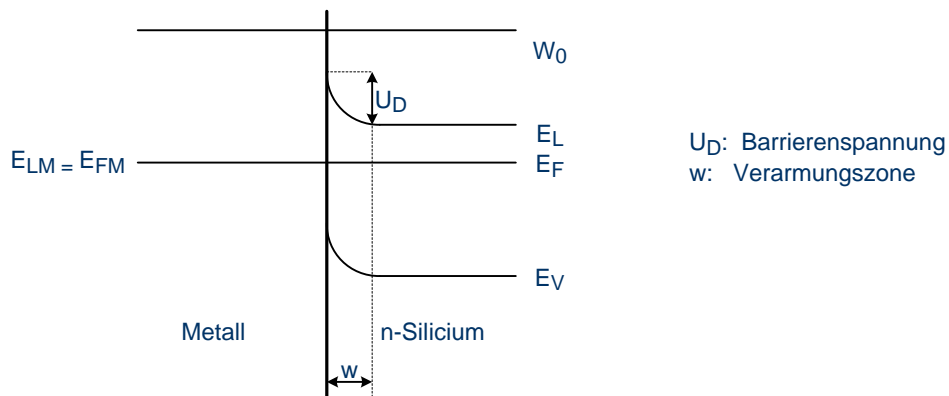


Abb. 1.4: Bändermodell nach dem Kontakt von Metall und n-Silicium

Die Weite w der Verarmungszone hängt von der Stärke der Dotierung ab. Die 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 in dem 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 Tunnel-effekts ein lineares Strom-Spannungsverhältnis aufweist.

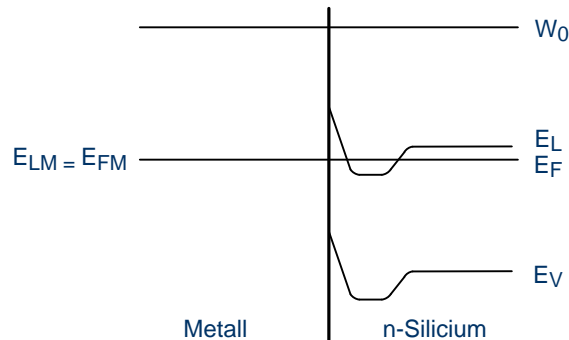


Abb. 1.5: Bändermodell nach n^+ -Dotierung

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.

1.1.3 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, das Fermi-niveau – repräsentativ für die höchsten Besetzungszustände durch Elektronen – entfernt sich und die so entstandene Potentialbarriere an der Valenzbandkante verhindert eine weitere Bewegung der Löcher, welche – komplementär zu Elektronen – die energetisch höchsten Zustände einnehmen wollen.

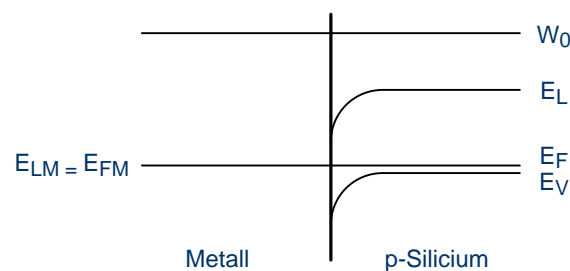


Abb. 1.6: Bändermodell nach dem Kontakt von Metall und p-Silicium

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

1.1.4 Bändermodell eines p-n-Übergangs

Aus der Tatsache, dass das Fermi-niveau konstant sein muss (andernfalls würden Elektronen an Orte mit niedrigerem Fermi-niveau fließen, dort freie Zustände besetzen und damit das Fermi-niveau 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. 0,7V.

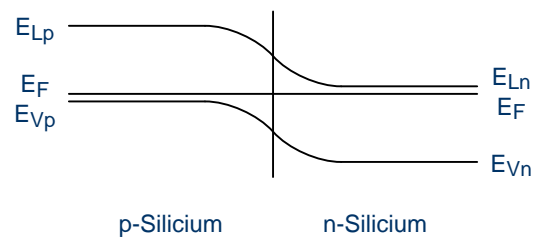


Abb. 1.7: Bändermodell am Übergang p- und n-dotierter Siliciumkristalle