

Lösung zur Übung 6.3-1

Der Halbleiter-Metall Kontakt mit p-dotierten Halbleitern

Die Lösung zu dieser Aufgabe ist wichtig, deshalb wollen wir sie relativ ausführlich behandeln.

Wir starten mit der Ausgangssituation und folgen [unserem Rezept](#):

0. Ausgangssituation

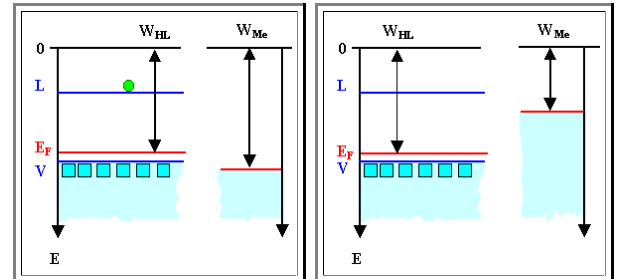
Wir haben ein erstes Problem: Eigentlich sollten jetzt **links** die **Löcher** vom Metall auf die energetisch höhergelegenen Plätze im Halbleiter fließen, rechts die **Löcher** vom Halbleiter ins Metall - **aber gibt es überhaupt Löcher im Metall ??**

Warum nicht? Es gibt sicher unbesetzte Plätze, auch unterhalb der Fermienergie. Falls ein Elektron genügend Energie bekommen hat, entschwindet es (energetisch) "nach oben" - zurück bleibt ein Loch.

Die Antwort ist also: Ja es gibt Löcher in Metallen - auch bei **"strenger" Definition**.

$$W_{HL} < W_{Me}$$

$$W_{HL} > W_{Me}$$



Wir können damit ohne weiteres den Kontakt **p**-Halbleiter-Metall diskutieren, indem wir einfach auch im Metall mit Löchern arbeiten - ohne einen Fehler zu machen. Aber wir können es auch **ohne** Löcher im Metall tun - nur mit Elektronen.

Wir stoßen hier auf eine prinzipielle Frage, die für jedes reale Bauelement auftritt: Wie wird ein im Halbleiter fließender **Löcher**strom in einen im Metall in der Regel fließenden **Elektronen**strom umgewandelt?

Die Antwort folgt aus der Definition des Stromflusses: Die Elektronen müssen für gleiche **Strom**richtung in die entgegengesetzte Richtung wie die Löcher fließen. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten

1. Am (ohmschen) Kontakt Halbleiter-Metall treffen Löcher und Elektronen paarweise aufeinander ($\Rightarrow \Leftarrow$) und verschwinden per **Rekombination**. Der elektrisch fließende Strom ist dann gleich der Rekombinationsrate (= geladene Teilchen pro Zeiteinheit = Ladung pro Zeit = Strom).
 2. Am ohmschen Kontakt werden Elektron Lochpaare **generiert**, die dann in entgegengesetzte Richtungen laufen ($\Leftarrow \Rightarrow$). Der elektrische fließende Strom ist dann gleich der Generationsrate (= geladene Teilchen pro Zeiteinheit = Ladung pro Zeit = Strom).
- Bildhaft ausgedrückt zuzzelt das Metall Elektronen aus dem Valenzband, dabei bleiben Löcher zurück.

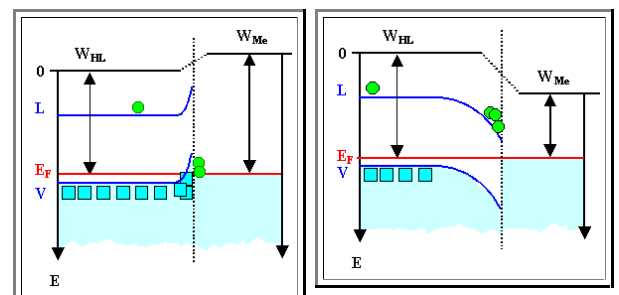
Hilft das weiter? Ja! denn nun können wir nach Belieben mit Löchern oder Elektronen arbeiten. Ob wir vom Metall aus Löcher ins Valenzband des Halbleiters injizieren, oder ihm Elektronen raussaugen bleibt sich wie so vieles andere auch, (gehn' wir zu dir oder zu mir?) vom Ergebnis her gleich.

Hier gleich die fertigen Banddiagramme (immer **nach "Rezept"**)

2. Zeichne **"weit"** links vom Kontakt das Banddiagramm von Material 1; weit rechts das von Material 2; immer relativ zu der bereits festgelegten Fermienergie.

3. Verbinde Leitungs- und Valenzband durch eine **"gefühlsmäßig" gezeichnete Bandverbiegung**

Im linken Fall laden wir die Metallseite negativ (Elektronen aus dem Valenzband herausaugen = Löcher hineinzugeben); die Halbleiterseite ist dann positiv - wir haben wieder das Phänomen der **Akkumulation**

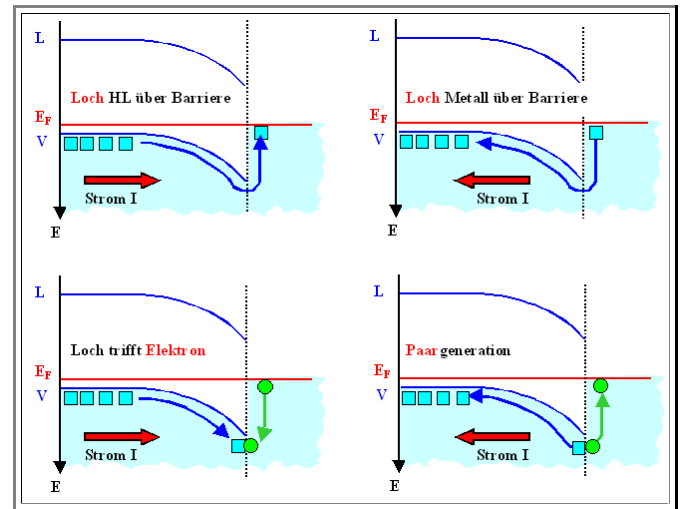


- Rechts läuft alles umgekehrt: Wir injizieren Elektronen ins Valenzband (oder ziehen Löcher raus), und erniedrigen in jedem Fall lokal die Löcherdichte - es entsteht eine **Raumladungszone**.
- Natürlich steigt dadurch auch die Elektronendichte im Leitungsband, aber das ist nicht so wichtig.

Natürlich fließen auch wieder entgegengesetzt gleichgroße Ströme - aber jetzt über die **Energiebarriere im Valenzband**! Das ist nicht so ganz einfach zu illustrieren; wir nehmen dafür ein extra Bild mit allen Details.

- Wir schauen uns dazu nur den rechten Fall der obigen Bilder an, denn nur dort gibt es eine "richtige" Energiebarriere. Wir betrachten den Vorwärts- und Rückwärtsstrom getrennt, sowohl im reinen "Lochbild", als auch im gemischten Fall Löcher im Halbleiter - Elektronen im Metall.

- Die beiden Teilströme müssen im Gleichgewicht gleichgroß sein. Obwohl es im Metall bei E_F oder darüber sehr viel mehr "Löcher" gibt als im Halbleiter, ist der Strom doch nicht größer - denn die Energiebarriere ist etwas höher, nämlich um die Differenz von Valenzbandkante und Fermienergie im Halbleiter
- Die obere Reihe zeigt die beiden Teilströme als reine Löcherströme - sowohl im Halbleiter als auch im Metall.
- Die untere Reihe zeigt genau dasselbe - nur daß diesmal der Löcherstrom an der Grenzfläche in einen Elektronenstrom umgewandelt wird.
- Links hat das Loch die Energiebarriere, rechts das Elektron (es muß nach "oben" gebracht werden!).



- Und wieder mal kann man sich fragen "Wat denn nu?" Und wieder mal ist die Antwort: In der "Realität" wuseln nur Elektronen durcheinander, stoßen sich, und spüren individuelle Kräfte. Sonst nichts.
- Wir haben hier nur ein System zur Buchhaltung entwickelt. Wichtig ist nur immer wieder, daß wir im gewählten System bleiben und nicht alles durcheinander werfen!

Der Rest ist nun klar.

- Mit einer externen Spannung erhalten wir Diodenverhalten im rechten Fall, und einen ohmschen Kontakt im linken Fall - genau umgekehrt wie mit **n**-Halbleitern.
- Damit ist die graphische Darstellung der Gesamtsituation, die wir hier noch mal wiederholen, gerechtfertigt.

