

9.3 Raumladungszonen und Kontakte

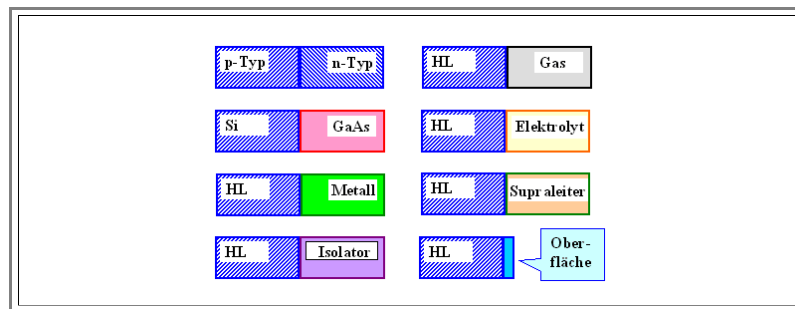
9.3.1 Grundsätzliches

Der Kontakt als solcher

Es gibt keine **Halbleiterbauelemente** ohne **Halbleiterkontakte!**

- Eine vielleicht verblüffende Behauptung. Aber man muß sich nur klarmachen, daß selbst ein popeliger **Photowiderstand** – also ein Stück Halbleiter, dessen Widerstand mit zunehmender Beleuchtung zwangsweise kleiner wird – zwei Anschluß**drähte** braucht, und Drähte sind normalerweise aus **Metall**.
- Wir haben also minimal zwei Kontakte zwischen dem Halbleiter und einer (oder zwei) Metallsorten.
- Es wäre schon sehr naiv, jetzt anzunehmen, daß der Kontakt Halbleiter-Metall **keine** besondere Eigenschaften hat, d.h. daß Elektronen ungehindert vom Halbleiter ins Metall strömen können oder umgekehrt. Spätestens wenn man sich überlegt, wie das mit den Löchern wäre, muß man ins Grübeln kommen.

Was ist ein Kontakt? **Idealerweise** sowas:



- Wir haben einen geometrisch einfachen und sauber definierten Übergang zwischen einem Material I und einem Material II (das im Extremfall des "**Gases**" auch ein stark verdünntes Gas oder sogar Vakuum sein kann).
- Wir betrachten weiterhin den **strukturellen** Defekt Phasengrenze als elektronisch uninteressant, d.h. die **strukturellen** Einflüsse der Phasengrenzenstruktur auf Elektronen und Löcher vernachlässigen wir hier. Das ist, um es deutlich auszudrücken, ein **massiver Fehler** bei fast allen Kontakten – nur nicht bei denen, die wir hier behandeln.
- Wir betrachten auch Kontakte, die ein bißchen abstrakt sind, zum Beispiel den "Kontakt" des Volumens eines Halbleiters mit seiner eigenen Oberfläche. Das ist sinnvoll, falls die dünne Schicht der oberflächennahen Atome andere elektronische Eigenschaften hat als das Volumen.

Da wir über eine gewisse Allgemeinbildung verfügen, wissen wir natürlich schon, daß die **gesamte Festkörperelektronik von Kontakten beherrscht wird** (oder von "**Übergängen**", nur ein anderes Wort für Kontakt). Die zugehörigen Stichworte sind:

- Der **pn-Übergang**, der Kontakt zwischen verschiedenen Dotierungstypen desselben Halbleiters – in anderen Worten: die klassische **Diode** und, für zwei aufeinanderfolgende **pn-Übergänge**, der klassische **Bipolartransistor**.
- Der **MOS-Kontakt**, d.h. die Materialfolge **Metall-Oxid-Halbleiter** (=Semiconductor); zusammen mit **pn-Übergängen** gibt das einen **MOS-Transistor**, das Arbeitspferd der **MOS- und CMOS -Technik**, d.h. fast aller **integrierten Schaltungen**.
- Der **Schottky-Kontakt**; etwas unbekannter, aber einfach ein Halbleiter-Metall-Kontakt, der **Dioden** eigenschaften hat.
- Der **ohmsche Kontakt**, normalerweise nicht besonders erwähnt, aber besonders wichtig: Ein Metall-Halbleiter-Kontakt, der **keine** Diodeneigenschaften hat, sondern eine lineare Strom-Spannungs-Kurve mit kleiner Steigung (d.h. kleinem Widerstand) zeigt.
- Die **Heteroübergänge**, also der Kontakt zwischen zwei verschiedenen Halbleitern (mit verschiedener Bandlücke), ohne die es keine vernünftige **Optoelektronik** gäbe.

Wir sehen ganz klar: Wir müssen uns mit Halbleiterkontakten intensiv beschäftigen!

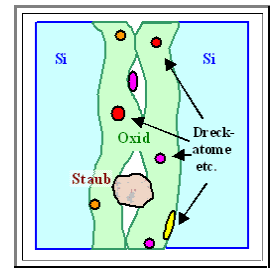
Das tun wir Schritt für Schritt – es ist nicht unbedingt einfach! Zum Beispiel wird ein quantitatives Verständnis eines **MOS-Transistors** hier unsere Kräfte überfordern, aber den **pn-Übergang** können wir packen – im **4. Schritt**.

- Vorher aber überlegen wir ansatzweise, wie ein **realer Kontakt** aussehen wird.

Der reale Kontakt

Wer sich bis hierher sein (oder ihr) kindliches Gemüt noch bewahrt hat, darf natürlich auch jetzt noch annehmen, daß ein **pn**-Kontakt hergestellt wird, indem man zum Beispiel ein Stück **n-Si** nimmt und auf ein Stück **p-Si** drückt.

- Das gibt zwar schon einen Kontakt, aber halt keinen **pn**-Kontakt. Wir müssen hier die Dinge auf *atomarer* Ebenen betrachten, und ein solcher Kontakt sieht dann so aus →
- Wir haben eine wilde Mischung aus allem möglichen – sicherlich erstmal einen Oxid-Oxid-Kontakt, da **Si** (und auch sonst jeder Halbleiter) an Luft immer mit einer dünnen Oxidschicht bedeckt ist, die ca. **2 nm** dick sein wird (damit ist auch der Maßstab in nebenstehendem Bild definiert).
- Da die Oberflächen nie atomar eben sein werden, berühren sich die Materialien sowieso nur punktuell; in den Zwischenräumen finden wir automatisch die in der Luft herumschwebenden Staubeilchen – und dazu zählen auch die nur sehr schwer faßbaren "Partikel" mit nur einigen **nm** Größe.
- Da das Oxid unkontrolliert an Luft entstanden ist, wird noch so mancher Dreck eingebaut sein – atomar oder in Form kleiner Partikel.
- Auch bei allen anderen Kontaktsorten, die wir in dieser Art herstellen würden, müssen wir ähnliche Probleme erwarten.



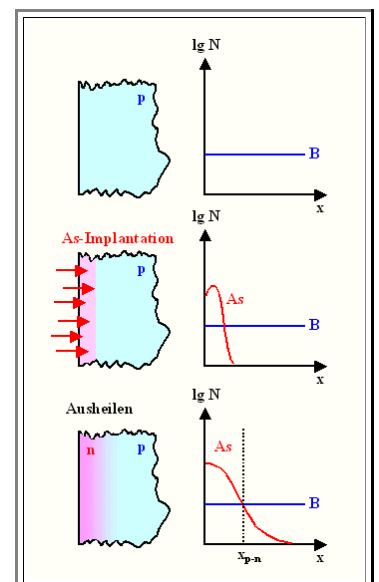
Wir würden *immer* einen "Kontakt" mit der Abfolge Material 1 / Dreck / Material 2 erhalten. Andere Leute jedoch, die uns schon einiges voraus haben und wissen was sie tun, erhalten mit dieser "Technik" manchmal etwas Sinnvolles (natürlich nur im Vakuum und bei hochreinen Oberflächen; Stichwort: "wafer bonding") – aber das sprengt den hiesigen Rahmen.

Was für *elektronische* Eigenschaften können wir bei so einem Kontakt erwarten?

- Richtig! Jedenfalls nichts, was man einigermaßen einfach verstehen kann.
- Ein Gutteil der Halbleitertechnologie beschäftigt sich deshalb damit, wie man *vernünftige* reale Kontakte herstellt, die dem gewünschten *idealen* Verhalten wenigstens nahe kommen. Das ist oft ziemlich schwierig oder gar unmöglich, und viele im Prinzip spannende Bauelemente scheitern an der Kontaktproblematik.

Wir betrachten jetzt als einziges Beispiel, wie man einen *realen* **pn**-Übergang herstellt.

- Wir fangen mit einem **Silizium-Wafer** (d.h. einer sehr perfekten einkristallinen **Si**-Scheibe) an, der eine bestimmte Grunddotierung hat – im Beispiel ist es Bor (**B**); der Wafer ist also **p**-leitend.
- Wir wollen dicht unter der linken Oberfläche einen **pn**-Übergang realisieren. In der Realität integrierter Schaltungen gilt für die Tiefe x_{pn} des **pn**-Übergangs beispielsweise $x_{pn} \ll 1 \mu\text{m}$.
- Da es *keine* sinnvolle Möglichkeit gibt, das Bor *lokal* wieder herauszuholen (wer eine weiß, wird ganz schnell sehr reich), haben wir nur *eine* Option: Wir bringen *mehr* **As** (oder **P**) in den Kristall ein, als Boratome vorhanden sind. Als Dotierung wirkt nämlich immer nur (näherungsweise) die Differenz der Donator- und Akzeptorkonzentration.
- Die **As**-Atome können *implantiert* werden, d.h. sie werden mit einer Ionenkanone (und Energien im Bereich **1 keV ... 200 keV**) regelrecht in den Kristall hineingeschossen. Dieser Prozeß heißt **Ionenimplantation**.
- Dabei wird aber das Kristallgitter kurz und klein geschlagen – wenn das Material nicht sogar amorph geworden ist, enthält der Kristall jetzt untolerierbar viele Kristallgitterdefekte.
- Die müssen "**ausgeheilt**" werden – durch längeres Erhitzen. Dabei diffundieren aber die **As**-Atome munter durch die Gegend, das implantierte **Konzentrationsprofil** wird verschmiert, und der **pn**-Übergang verschiebt sich zunehmend in die Tiefe.



Falls das ziemlich kompliziert klingt, liegt das daran, daß es ziemlich kompliziert *ist*; außerdem muß man viele Parameter optimieren.

- Aber so und nicht anders wird's (fast immer) gemacht – mit entsetzlich vielen Varianten und Komplikationen.

- Wenn alles richtig gemacht wurde, erhalten wir einen **pn**-Übergang, der sich nahezu exakt so verhalten wird, wie wir es in Kürze theoretisch vorhersagen werden!

Fragebogen

Schnelle Fragen zu 9.3.1