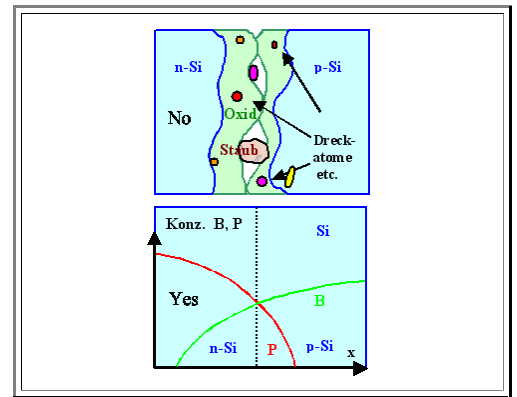


9.3.4 Merkpunkte zu Kapitel 9.3: Raumladungszonen und Kontakte

Kontakte oder "junctions" machen Bauelemente.

- Es gibt **kein** Halbleiterbauelement ohne Halbleiter-Metall Kontakt und so gut wie keines ohne "**pn-Kontakt**".
- Kontakte bei Halbleiterbauelementen macht man nicht durch "kontaktieren" im Sinne von "Zusammendrücken" sondern durch (extrem trickreiche) Halbleitertechnologie.
- Ein **pn**-Übergang liegt vor an der Stelle, an der die Akzeptor- und Donatorkonzentration gleich groß ist.
- "**Ohmsche Kontakte**", die man immer braucht, sind idealerweise eigenschaftslos, d. h. sie lassen bei jeder Spannung und Polarität den vollen Strom durch. Sie sind aber oft recht schwer zu machen.

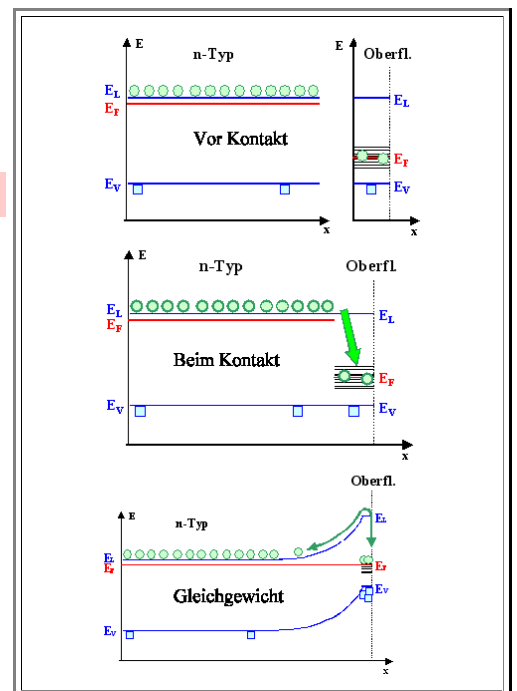


Links und rechts von einem Übergang können vor Kontakt unterschiedliche Fermienergien vorliegen.

- ⇒ Es gibt unterschiedliche Ladungsträgerkonzentrationen.
- ⇒ Es gibt unterschiedliche Zustände in der Energielücke bei "homo"-Kontakten wie dem **pn**-Übergang im **Si**.
- Beispiel:** "Kontakt" **Si** mit der Oberfläche des **Si**-Kristalls.

Es ist extrem wichtig, das Bild zu verstehen!

- Vor Kontakt: "Irgendwie" verschiedene **Si**-Varianten = verschiedene Zustände in der Energielücke = verschiedene Fermienergien.
- In der (Pico)sekunde nach (gedachtem) Kontakt fließen Elektronen auf jetzt verfügbare Zustände mit niedrigerer Energie (im Beispiel nach rechts zu den Oberflächenzuständen); Löcher laufen auf neu verfügbare (mit Elektronen besetzte) Plätze mit höherer Energie.
- In der Nähe des Kontakts herrscht keine Ladungsneutralität mehr. Im Beispiel lädt die Oberfläche sich negativ auf durch den Zustrom von Elektronen, die jetzt aber **auf** der Oberfläche lokalisiert sind.
- Im Volumen nahe der Oberfläche bleiben die ortsfesten positiv geladenen Donatoratome zurück; sie bilden eine **Raumladung** mit der Dichte N_{Don}^+ .
- Dadurch entsteht ein **elektrisches Feld**, das die zur Oberfläche strebenden Elektronen zurücktreibt.
- Die rechte Seite des Banddiagramms geht deshalb energetisch "hoch", es entsteht eine **Bandverbiegung**.



Entscheidend ist das Banddiagramm für **Gleichgewicht**. Einige Definitionen dazu, die alle im Grunde dasselbe sagen:

- Gleichgewicht** liegt vor, sobald es genausoviel Energie kostet gegen das Feld anzulaufen, wie man durch "Tieferfallen" an der Oberfläche gewinnen kann.
- Gleichgewicht** liegt vor, sobald energetisch nichts mehr zu gewinnen ist. ⇒ Die Fermienergie ist überall dieselbe.

← **Vollständig äquivalente Formulierungen**

Damit Rezept für Banddiagramm-Erstellung:

1.

Zeichne die Fermienergie als horizontale Linie; markiere den Übergang.

Zeichne "weit" links davon das Banddiagramm von

- **Gleichgewicht** liegt vor, sobald der nach rechts fließende Elektronen**strom** genau so groß ist wie der zurückfließende Strom.

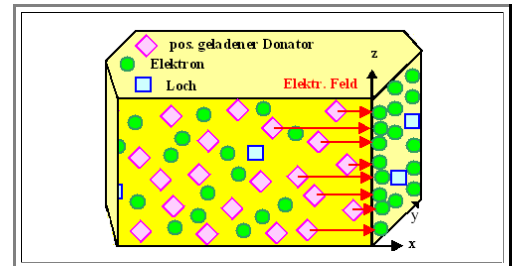
- Ströme fließen, weil es für Elektronen auf beiden Seiten eine Wahrscheinlichkeit $\exp(-\Delta E/kT)$ gibt, die **Energiebarriere** ΔE zur jeweils anderen Seite zu überwinden.

2. 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.

■ Eine Darstellung im **Ortsraum** verdeutlicht das Konzept der **Raumladungszone**.

- Es gibt "Ladungen im Raum", da die ionisierten Dotieratome nicht beweglich sind und "ihre" Ladungsträger jetzt woanders sind.
- Das **elektrische Feld** beginnt und endet auf den jetzt separierten Ladungen.
- Wir haben unvermeidlich einen geladenen **Kondensator** mit der Kapazität **C_{RLZ}**.



■ Die Weite **d_{RLZ}** der Raumladungszone (**RLZ** oder "**SCR**" für "space charge region") ergibt sich sofort aus dem Kondensatormodell:

- Wir haben Fläche **F** und (mittleren) Abstand der "Kondensatorplatten" = $\frac{1}{2}d_{RLZ}$
- Der Potentialunterschied in Volt = anliegende **Spannung** ist $\Delta E_F/e$
- Die **Ladung** auf den Platten ist gleich der **Zahl** der ionisierten Dotieratome = gleich **Dichte** mal **Volumen** = $N_D \cdot V$ der positiv geladenen Donatorionen im Volumen $V = F \cdot d_{RLZ}$.
- Aus den beiden Gleichungen für die Unbekannten **d_{RLZ}** und **C_{RLZ}** folgt sofort die Weite der **RLZ** ⇒

$$C_{RLZ} = \frac{2 \cdot \epsilon_{Si} \cdot \epsilon_0 \cdot F}{d_{RLZ}}$$

$$C_{RLZ} = \frac{Q}{U_K} = \frac{Q}{\Delta E_F / e}$$

$$= \frac{e^2 \cdot (N_D \cdot F \cdot d_{RLZ})}{\Delta E_F}$$

$$d_{RLZ} = \left(\frac{2 \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta E_F}{e^2 \cdot N_D} \right)^{1/2}$$

■ Legt man zusätzlich zu der "eingebauten" Spannung oder **Kontaktspannung** $\Delta E_F/e$ noch eine externe Spannung **U_{ext}** an, muß die Gesamtspannung **U** in die Formel eingesetzt werden. (Auf Vorzeichen aufpassen!)

- Falls jetzt Strom fließt, haben wir **kein** Gleichgewicht mehr!
- Falls **kein** (oder nur vernachlässigbarer kleiner) Strom fließt, haben wir jetzt ⇒

$$U = \frac{\Delta E_F}{-e} + U_{ext}$$

$$d_{RLZ} = \left(\frac{2 \epsilon_{Si} \epsilon_0 (\Delta E_F + e U_{ext})}{e^2 \cdot N_D} \right)^{1/2}$$

$$\frac{C_{RLZ}}{F} = \left(\frac{2 \epsilon_{Si} \epsilon_0 e^2 N_D}{\Delta E_F + e U_{ext}} \right)^{1/2}$$

Formal-mathematisch wird die **Poisson-Gleichung** gelöst (Grundgleichung der Elektrostatik).

- Die Poisson-Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Ladungsdichte ρ , elektr. Feld $\mathbf{E}$ und elektr. Potential V .

$$\Delta V(x, y, z) = - \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}$$

$$\nabla V(x, y, z) = - \mathbf{E}(x, y, z)$$

Lösungsweg eindimensional:

- Ladungsdichte** $\rho = N_{\text{Dot}}$ in $d_{\text{RLZ}} = \text{const.}$
- Feld** $\mathbf{E}$ = einmal integrieren = Gerade. Randbedingung: $E(x = d_{\text{SCR}}) = 0 \text{ V/cm}$
- Potential** V = zweimal integrieren = Parabel. Randbedingung $V(d_{\text{SCR}}) = 0 \text{ eV}$; Potentialdifferenz = $\Delta E_F / e$

