

# Contents

<b>11 Halbleiter</b>	<b>2</b>
11.1 Niedrigdimensionale Elektronensysteme . . . . .	3

# Chapter 11

## Halbleiter

### Charakteristika:

- Metallischen Glanz aber kein Metall
- Negativer Temperatur Koeffizient  $\rho \uparrow \quad T \downarrow$
- Photoleitfähigkeit
- Eigenschaften können von Verunreinigungen empfindlich abhängen

Materialien: 4.hauptgruppe: Si,Se, Ga,Teller, P, B, Verbindungen III-V: GaAs, InSb II-VI: ZnS,CdS IV-IV: SiC  
Elektrischer Widerstand

Metall  $\rho = 10^{-7}$  bis  $10^{-8} \Omega m$  isolator  $\rho > 10^{12} \Omega m$  Halbleiter  $\rho = 10^{-4}$  bis  $10^7 \Omega m \ni$  Bandlücke, kleiner als bei Isolatoren bei  $T=0$  Halbleiter sind Isolatoren  $T \neq 0$  Wahrscheinlichkeit für eine Thermische Anregung  $E_g > 0, 1 \dots 2 eV \quad E \propto e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

Intrinsische Halbleiter: Eigenschaften werden durch Thermische anregung bestimmt Extrinsische Halbleiter: Eigenschaften werden durch Dotierung von Frembatomen bestimmt

#### 1) Intrinsische HL

- a) Bandlücke und optische Abstände Indirekter Übergang Impuls wird durch Phonon gewährleistet;  
Kristallimpulserhaltung Übergang hängt von Phononenspektrum ab und daher von der Temperatur abhängig. Photon: große Energie, kleiner Impuls; Phonon: kleine Energie, großer Impuls

#### Direkter Übergang

schwache Temperaturabhängigkeit (vgl  $1500 nm \approx 0,8 eV$ )

- b) Effektive Massen von Elektronen und Löchern

Bandkrümmung in der Nähe des Übergangs,; Parabolische Näherung:

$$E_n = E_L + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

mit n=Elektronen und p=Löcher. Elektronen im Leitungsband im

	Transversal	Longitudinal
Si	$\frac{m_t^*}{m_e} = 0,19$	$\frac{m_l^*}{m_e} = 0,19$
Ge	$\frac{m_t^*}{m_e} = 0,082$	$\frac{m_l^*}{m_e} = 1,57$

	Transversal	Longitudinal
Löcher im Valenzband	Si $0,16 m_e$	$0,49 m_e$
	leicht Loch	schweres Loch

	Transversal	Longitudinal
<i>GaAs</i> Löcher	$\frac{m_t^*}{m_e} = 0,12$	$\frac{m_l^*}{m_e} = 0,61$
	leicht	schwer
	leicht Loch	schweres Loch

- c) Metall-Halbleiter Übergang

Austrittsarbeit  $\phi$  zum Vakuum. Die Austrittsarbeit bestimmt die el. Eigenschaft.

n-Dotiert:  $\phi_{HL} > \phi_{ME}$  ohmscher Kontakt  $\phi_{HL} < \phi_{ME}$  blockierender Kontakt (Schottky-Kontakt).  
 An der Grenzfläche entsteht eine Hochohmige Verarmungszohne. Elektronen fließen ins Metall

p-Dotiert: genau andersherum

## 2) Dotierte HL

- a) Spezifischer Widerstand hängt stark von der Konzentration der Verunreinigung ab.
- b) Donatoren: liefern zusätzliche Elektronen ins Leitungsband: P, As, Sb; haben eine höhere Valenz  
 Akzeptoren: liefern zusätzliche Löcher in Valenzband. niedrigere Valenz als das Wirtsmaterial: B, Al, Ga, In
- Modell: Donator verhält sich wie ein positiv geladenes Ion mit zusätzlichen Elektronen. Bohr-Radius somit größer als beim H-Atom; Bindungsenergie  $\approx 10 \text{ meV}$

## 3) Inhomogene HL

- a) p-n Übergang
- Angleichung des chem. Potentials ( $E_F$ )
  - Verarmung freier Ladungsträger im Bereich des Übergangs durch Rekombination mit Ladungsträgern von anderen Typ.
  - Geladenen Störstellen bleiben zurück, es entwickelt sich eine Raumladungszone

## b) Schottky-Motell

Kastenförmiger Verlauf der Raumladungs-Zone;  $V(x)$  = Potentialverlauf, in y, z  $\infty$  ausgedehnt Poisson Gl:

$$\Delta V(x) = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_0}$$

Selbstkonsistenzproblem:  $\rho(x)$  hängt von  $V(x)$  und umgekehrt ab. Iterativ  $\rho(x) \rightarrow V(x) \rightarrow \rho(x)$

Dicke der Raumladungszone  $eV_D \simeq E_g \approx 1 \text{ eV}$ ,  $n = 10^{10}$  bis  $10^{24}$ ;  $d = 1 \mu\text{m}$  bis  $10 \text{ nm}$ ; vergl. Atom-Atom  $\epsilon \approx 10^{10} \frac{\text{V}}{\text{m}}$

## c) Ströme in Gleichgewicht

Diffusionsstrom. El aus dem n-HL rekombinieren mit Löchern p-HL  $\Rightarrow$  Ladungs

Feldstrom: Elektronen aus dem p-HL (Minoritätsladungsträger) werden durch das E-Feld in n-HL

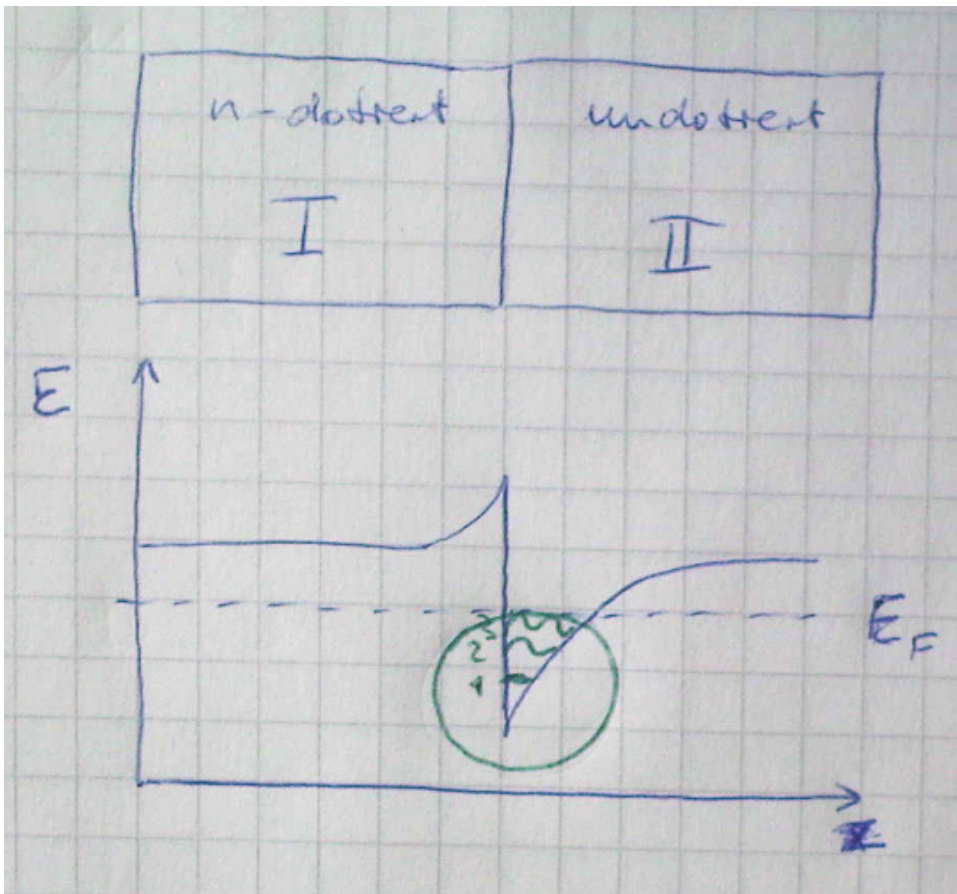
Im Gleichgewicht heben sie sich auf.

## Ph Übergang unter Spannung

- $E_F + eU$  muss ausgeglichen sein
- Durchlassrichtung U rec die Potentialdifferenz
- Sperrichtung Pot-Diff vergrößert
- Diode Durchlassrichtung große Leitfähigkeit; Sperrichtung kleine Leitfähigkeit

## 11.1 Niedrigdimensionale Elektronensysteme

z.B. Halbleiter- Heterostrukturen



'Modulation-doped heterostructure' (engl)

z.B. 3D Metalle:  $\frac{1}{k_F} \approx 1 \text{ \AA}$  2DEG  $\equiv$  '2-dimensionales elektron gas'

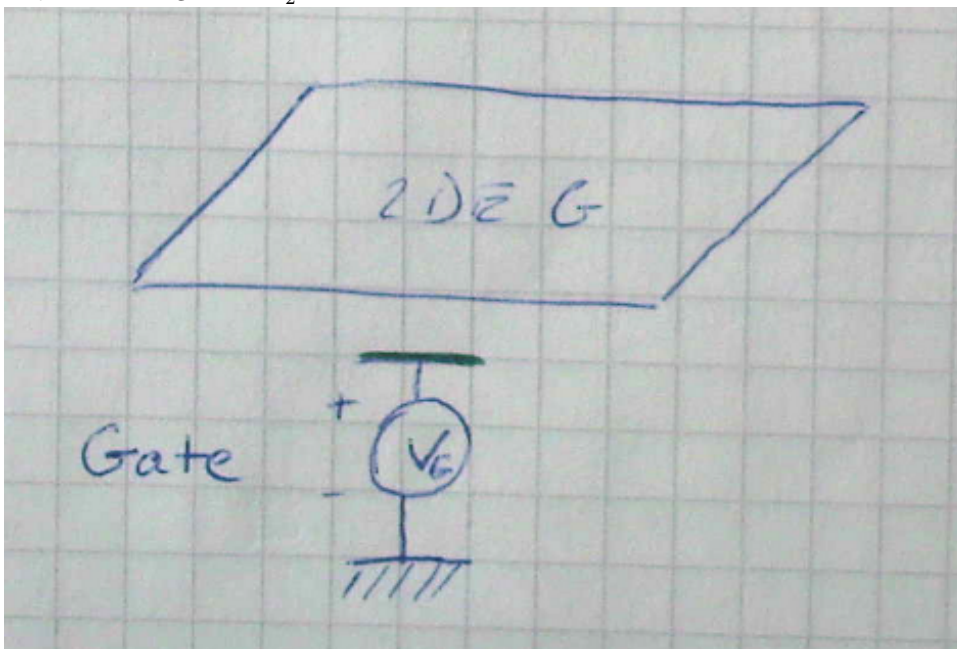
$$\frac{1}{k_F} \approx 2\pi n)^{-\frac{1}{2}}$$

mit  $n \approx 3,5 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2} \Rightarrow \frac{1}{k} \approx 100 \text{ \AA}$

!Die Gitterkonstante I und II möglichst wenig unterscheiden. z.B. AlGaAs/GaAs:

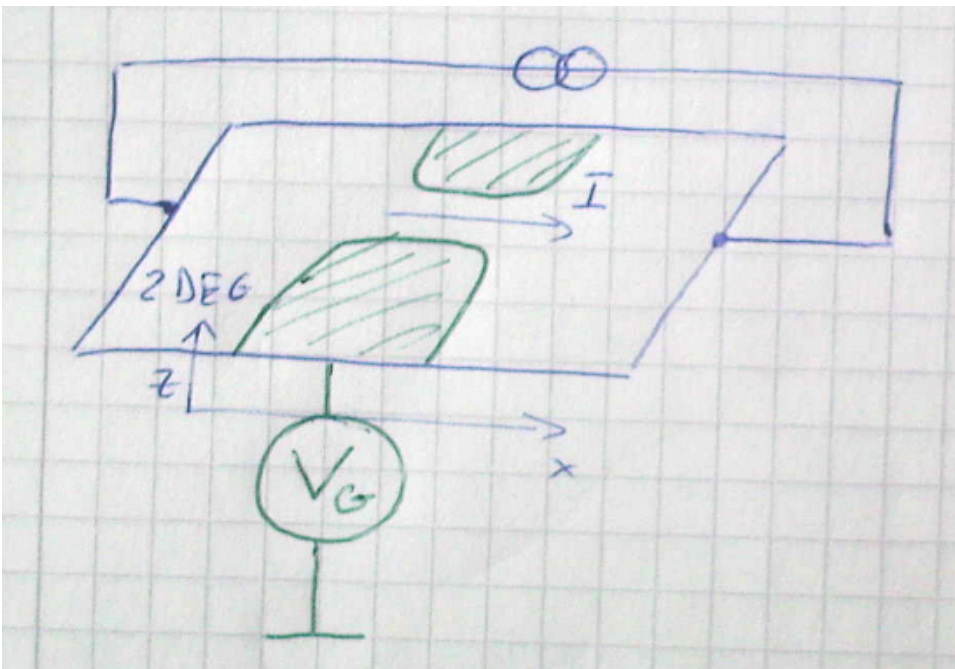
'mobility'  $[\mu]$  (engl) Beweglichkeit:  $u = \frac{|\vec{v}|}{\epsilon} = \frac{e\tau_D}{m^*} \rightarrow \text{bis zu } 10^7 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$

z-Quantisierung:  $L_z \approx \frac{\lambda_F}{2} \approx 100 \text{ \AA}$



$E_F$  tunable by Gate

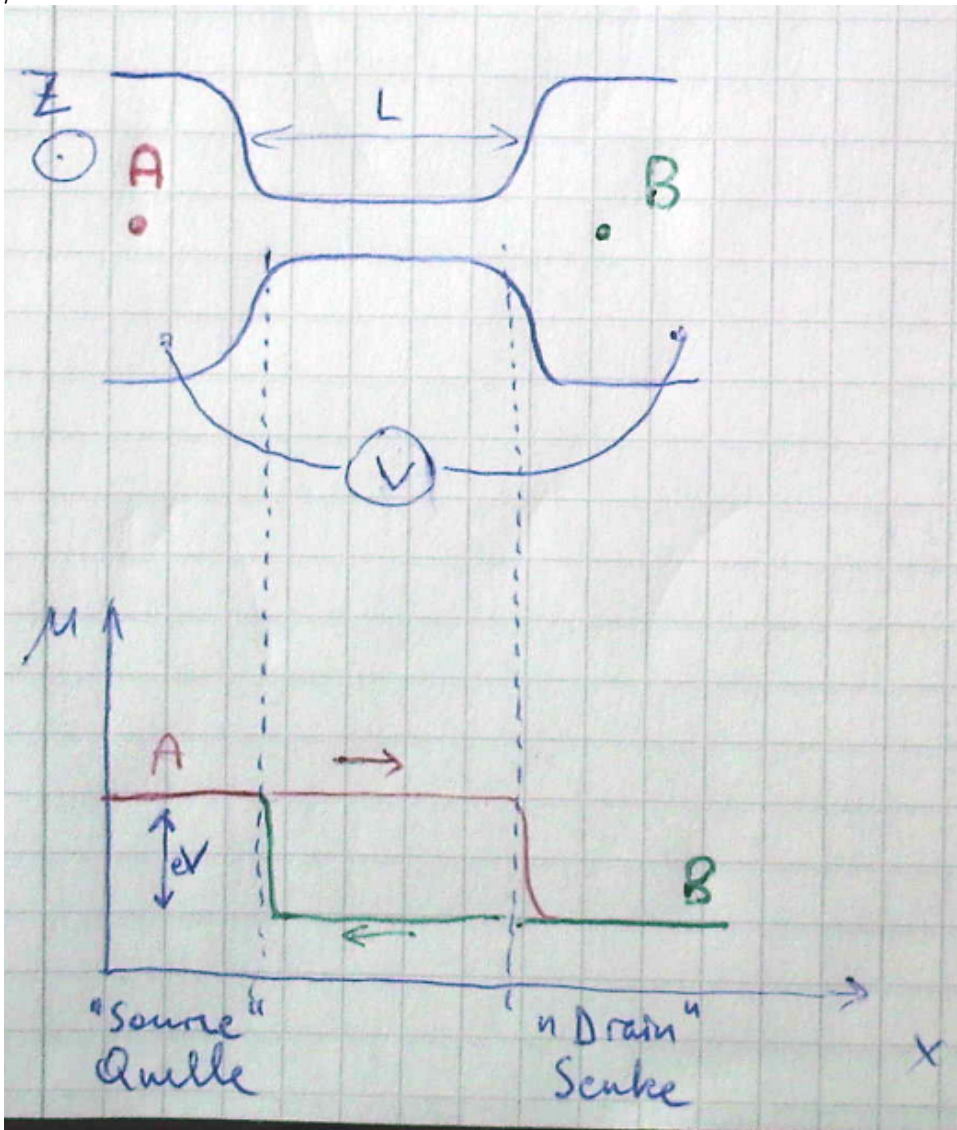
1D system: 1D Kanal  $\rightarrow$  Quantisierung in y-Richtung



'Ballistic quantum wire'  $\rightarrow$  1D Leiter

Im Dracht treten keine Streuprozesse auf und die Bewegung der e-nen erfolgt ballistisch (ohne Streuung ohne WW).

$\mu$ -Elektrochemisches Potential:



$$\Delta\mu = eV$$



Strom :

$$I = ne\langle v \rangle \quad (11.1)$$

$$= \frac{1}{L} \sum_k ev_k \quad (11.2)$$

$$= \frac{1}{L} \int_0^\infty \rho_k^{1D} ev_k \left[ f\left(E + \frac{eV}{2}\right) - f\left(E - \frac{eV}{2}\right) \right] dk \quad (11.3)$$

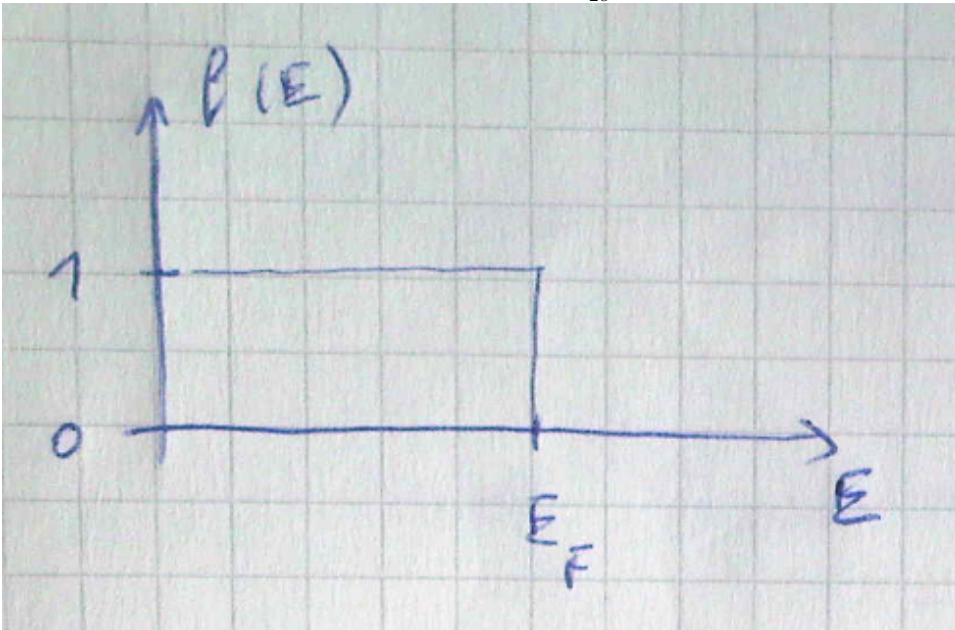
$$= \int_0^\infty \frac{e}{\pi} \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial k} dk \cdot eV \quad (11.4)$$

$$= \frac{2e^2}{h} V \quad (11.5)$$

mit  $\rho_k^{1D} = \frac{2L}{2\pi}$ ;  $v(k) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E(k)}{\partial k}$   
'conductance quantization'

$$\left. \frac{I}{V} \right|_{1 \text{ Kanal}} = \frac{2e^2}{h}$$

Leitwertquantum; Widerstandsquantum:  $R_Q = \frac{h}{2e^2} = 12,906 k\Omega$



für eine Spinrichtung:  $R_Q^\uparrow = R_Q^\downarrow = 25,812 k\Omega$