

Nanoelektronik

• Skript (Maximas Eschig auf Festkörperlphysik ... 2016/17 SS)

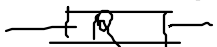
Inhalt

- 1) Einführung
- 2) Landauer-Theorie
- 3) Magnetfeld-Effekte, Quanten-Hall-Effekt
- 4) Inhomogenität-Effekte
- 5) Einzel-Elektronen-Effekte
- 6) Spin-Elektronik
- 7) Molekulare Elektronik

1.1 $1 \mu\text{m} = 10^{-9} \text{m} = 10^9 \text{\AA}$

makroskopisch

Festkörper, Gas, ...

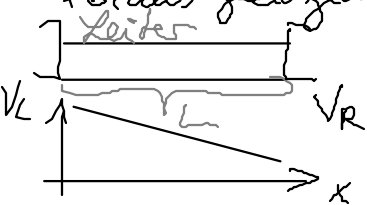


↑ Teilchenzahl
 $N \rightarrow \infty$
 $V \rightarrow \infty$
 $\left. \begin{array}{l} N \\ V \end{array} \right\} \frac{N}{V} = \text{const}$

↑ Volumen
 Ohm'sches Gesetz
 Leitfähigkeit σ

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

lokales Gleichgewicht



$$\vec{E} = -\text{grad } V(x)$$

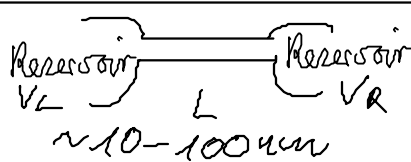
$$I = \frac{V}{R} = \sigma V$$

$$\text{Leitwert } \mathcal{G} = \frac{1}{R}$$

$$\mathcal{G} = \frac{A \sigma}{L} \quad \rho = \frac{1}{\sigma}$$

spezifischer Widerstand ρ

mesoskopisch



$$I = \mathcal{G} V$$

im Reservoir = makroskop.
 Kontakte
 Gleichgewicht im Reservoir

V_L und V_R sind definiert

Im mesoskopischen Leiter
 kein Gleichgewicht

Leitwert ist Eigenschaft
 der gesamten Probe

(keine Leitfähigkeit!)

mikroskopisch

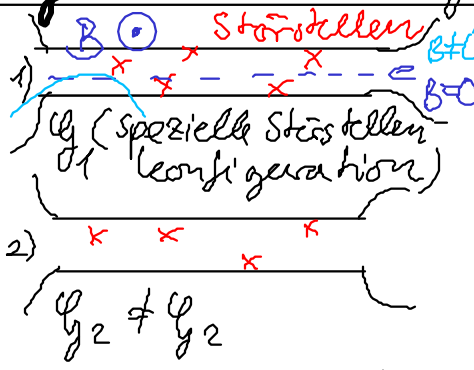


$$N=1$$

$$L \sim 1 \text{\AA}$$

Ensemble-Mittelung (Selbstmittelung)

relative Fluktuation
 $\frac{\Delta N}{N} \sim \frac{1}{\sqrt{N}} \rightarrow 0$

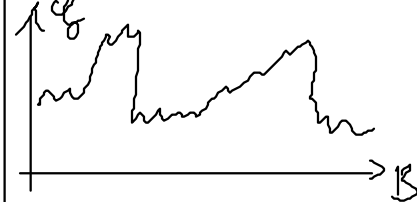


identisch

Probenspezifische Ergebnisse

keine Magnetfeld an \vec{B}

$\varphi(B_1) \neq \varphi(B_2)$



- Dieses Ergebnis ist Probenspezifisch
- \neq Fingerabdruck der Probe
- Reproduzierbar
- Rauschen

Def der Größe δ

$\delta \ll \dots$
 nicht auflösbar
 Coulombenergie $\frac{Q^2}{C}$
 Kapazität C

δ auflösbar
 $0 \leq \delta \leq \sim 1 \text{ eV}$
 $1 \text{ eV} = 10^4 \text{ K} \cdot k_B$
 Coulomb Wechselwirkung
 $\frac{e^2}{\epsilon}$ (nicht c klein)
 Elementarladung $e = \text{konst}$
 $C \sim 10^{-15} \text{ F} = \epsilon \epsilon_0 \frac{100 \text{ nm}^2}{10^8}$
 $= 1 \text{ fF} \cdot k$

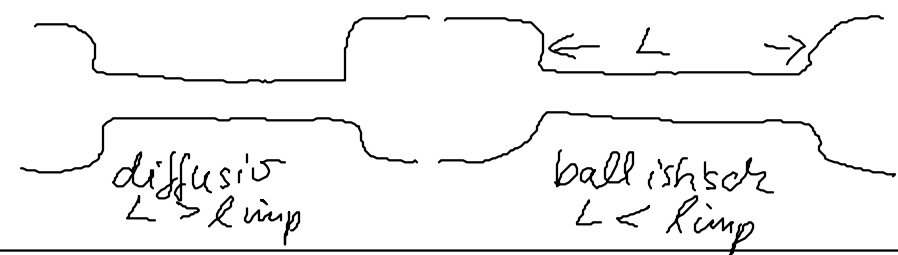
$\delta = E_{un} - E_n$
 Energieaufspaltung wichtig
 $\delta \propto 1 \text{ eV}$
 $\langle \frac{\delta^2}{T} \rangle \sim 1 \text{ eV}$

$L \gg L_\varphi$

Phasenkohärenzzeit τ_φ
 ist endlich
 $\tau_\varphi \sim \text{nsec} \dots \text{msec}$
 Phasenkohärenzlänge L_φ
 $L_\varphi \propto \tau_\varphi \sim \mu\text{m}$

QH Phasenkohärenz
 $\psi_n(t) = e^{-\frac{i E_n t}{\hbar}} \psi_n(0)$

Störstellenstrahlung $L_{imp} \sim \mu m \dots \mu m$ (impurity)

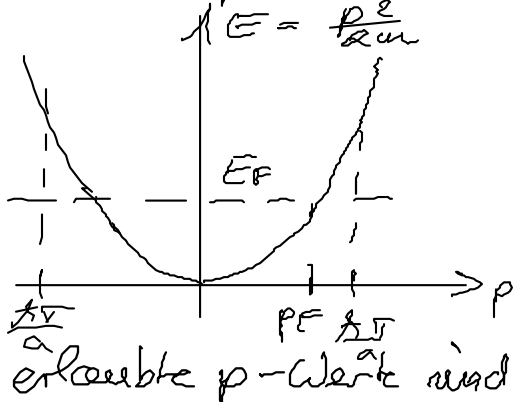


Kommerzielle moderne elektronische Bauelemente

$\geq 45 \mu m$
 $\{ 10 nm$

1.2 Systeme

Metalle $n \approx 10^{22} cm^{-3}$
 nahe an freie Elektronen



erlaubte p-Werte sind
 Vielfache von $\frac{\hbar 2\pi}{L_x} n_x$
 $n_x = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Pauli-Prinzip

besetzt alle Zustände $< E_F$
 $k_B T \ll E_F$

N Elektronen

$$\frac{4\pi}{3} p_F^3 \cdot \frac{L_x L_y L_z}{(2\pi \hbar)^3} = N$$

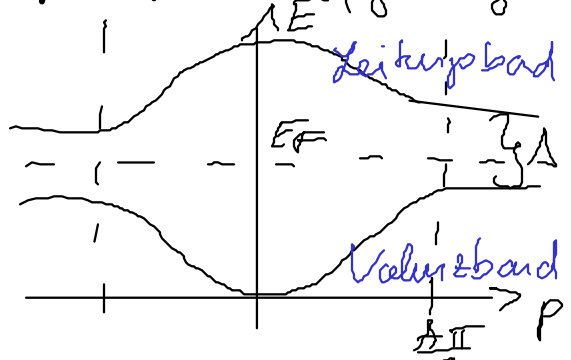
Volumen des Fermikugels $\frac{1}{\text{Volumen pro Zustand}} = \text{Dichte der Zustände im Impulsraum}$

$$p_F^3 = \frac{N}{V} 3\pi^2 \hbar^3$$

$\Rightarrow p_F = \hbar k_F = \frac{\hbar}{\lambda_F}$ Wellenzahl k_F
 Wellenlänge $\lambda_F \sim 3 \text{ \AA}$

$$E_F = \frac{p_F^2}{2m} \sim 1 \dots 10 \text{ eV}$$

Halbleiter (vgl. tight binding Modell)



$$\psi = \sum_i c_i \psi_i + \text{Hermitesche Konjugiert}$$

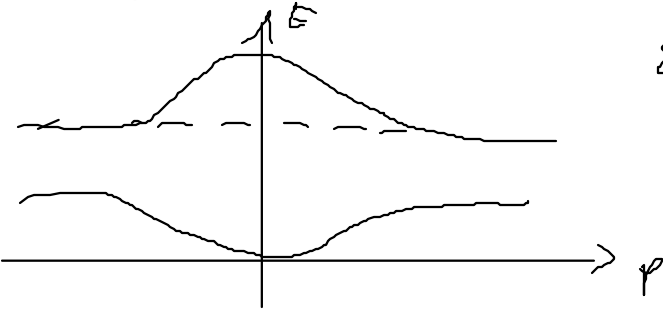
$$E_0 = -t \cos\left(\frac{pa}{\hbar}\right)$$

E_F liegt in der Lücke

$$\Delta \sim \text{eV}$$

Dotieren

Zusätzliche Atome \Rightarrow verschiebt E_F



z.B. zum Leitungsband (n-dotiert)

$$n \downarrow 10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$r_p \sim 10 \mu\text{m}$$