

Festkörperphysik, 2. Auflage

Siegfried Hunklinger

Lösungen der Übungsaufgaben

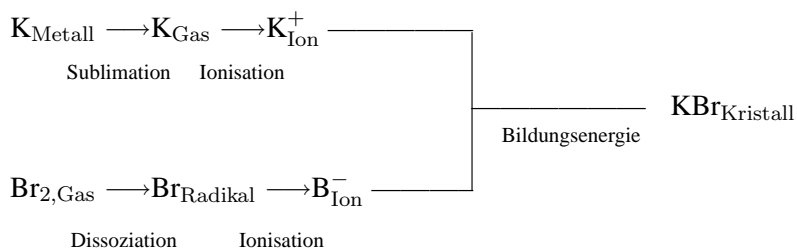
Kapitel 2

1. Bindungstypen

Tabelle 1: Bindungstypen

| | Van der Waals- Bindung | Ionische Bindung | Kovalente Bindung | Metallische Bindung | Wasserstoff- Bindung |
|-----------------|---------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
| Argon | x | | | | |
| Magnesium | | | | x | |
| Graphit | x | | x | | |
| Diamant | | | x | | |
| Quarzkristall | | x | x | | |
| Quarzglas | | x | x | | |
| Polyethylen | x | x | x | | |
| GaAs | | x | x | | |
| KBr | | x | | | |
| NH ₃ | | x | | | x |

2. Bindungsenergie



$$[E_{\text{sub}} + E_{\text{ion}}] + [E_{\text{diss}}/2 - E_{\text{aff}}] + E_{\text{reak}} = -E_{\text{bind}}$$

Mit den vorgegebenen Zahlen findet man $E_{\text{bind}} = -6,91 \text{ eV}$ pro KBr - Paar oder $E_{\text{bind}} = -15,4 \text{ kJ/cm}^3$.

3. Gleichgewichtsabstand

- (a) $r_0 = \left(\frac{nA}{mB} \right)^{\frac{1}{n-m}}$
- (b) $r < r_0$ Abstoßung
 $r > r_0$ Anziehung

Die Kraft ist maximal bei

$$r_{\max} = r_0 \left(\frac{n+1}{m+1} \right)^{\frac{1}{n+m}}.$$

Für das Lenard-Jones-Potential gilt

$$r_{\max} = r_0 \left(\frac{7}{13} \right)^{\frac{1}{6}} = 1,11 r_0.$$

4. Ionenkristalle

- (a) $R_0 = 3,20 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- (b) $zA = 1,21 \cdot 10^{-133} \text{ Ws} \cdot \text{m}^{12}$
- (c) $n = 1 + \frac{72\pi\epsilon_0 B R_0^4}{\alpha e^2} = 9,20$
- (d) Die Daten weisen auf KCl hin.

5. Bindungsenergie

Für Lithium findet man

$$\frac{r_s}{a_0} = 3,16, \quad \frac{R_c}{a_0} = 1,29$$

$$E_B = -6,50 \text{ eV/Atom}, \quad E_B - E_{2s} = -1,10 \text{ eV/Atom}$$

Kapitel 3

1. Ag-Cu-Legierungen

- (a) $c_\alpha \approx 11,5 \%$ bei $T = 1100 \text{ K}$
 $c_\alpha \approx 14,0 \%$ bei $T = 1050 \text{ K}$
- (b) Der Abbildung lässt sich Folgendes entnehmen:
- α) $T > 1150 \text{ K}$: flüssige Phase,
 - β) $1150 \text{ K} < T < 1150 \text{ K}$: flüssige und feste, kupferreiche Phase,
 - γ) $T < 1052 \text{ K}$: Die Zusammensetzung der festen α - und β -Phase hängt von der Temperatur ab.

- (c) Schreiben wir f_α und f_β für die relativen Anteile der Phasen, so gilt

$$c = f_\alpha c_\alpha + f_\beta c_\beta \quad \text{und} \quad f_\alpha + f_\beta = 1.$$

Für die Werte $c = 0,6$, $c_\alpha = 0,15$ und $c_\beta = 0,95$ folgt daraus:

$$\frac{f_\alpha}{f_\beta} = \frac{c_\beta - c}{c - c_\alpha} = 0,78.$$

Im thermischen Gleichgewicht ändert sich das Mischungsverhältnis mit abnehmender Temperatur. Bei den üblichen Kühlraten ist das Mischungsverhältnis jedoch praktisch eingefroren.

2. Hypothetisches zweidimensionales Gitter

- (a) Die Basisvektoren sind in Bild 1a eingezeichnet. Für sie gilt:

$$\mathbf{a}_1 = (a_x, -a_y) \quad \text{und} \quad \mathbf{a}_2 = (a_x, a_y)$$

mit

$$a_x = \sqrt{(r_A + r_B)^2 - r_B^2} = 2,68 \cdot 10^{-10} \text{ m},$$

$$a_y = r_A + 2r_B = 3,60 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

- (b) Die chemische Formel lautet AB_2 , die Flächendichte ist

$$\rho = \frac{m_A + 2m_B}{2a_x a_y} = 5,42 \cdot 10^{-8} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}.$$

- (c) Die Koordinaten der Atome in der Elementarzelle sind durch

$$A(0,0), \quad B_1(0, r_A + r_B), \quad \text{und} \quad B_2(0, -r_A - r_B)$$

bzw. durch

$$A(0,0), \quad B_1\left(-\frac{7}{18}, +\frac{7}{18}\right) \quad \text{und} \quad B_2\left(+\frac{7}{18}, -\frac{7}{18}\right)$$

gegeben.

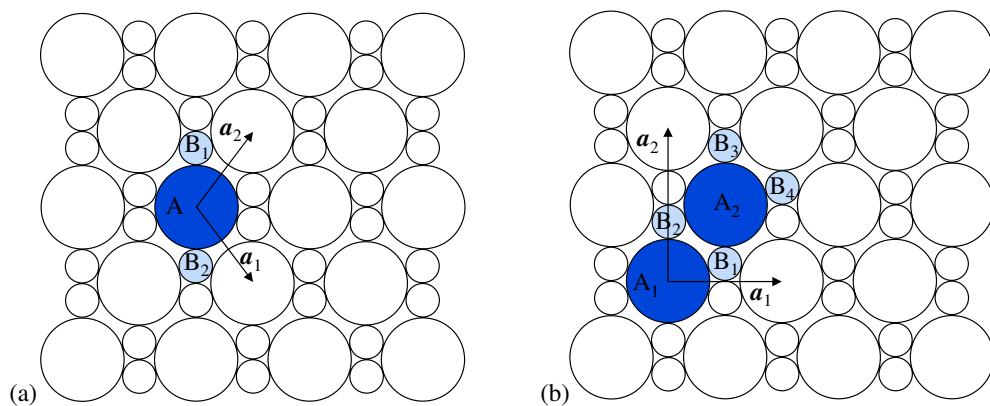


Bild 1: Hypothetischer zweidimensionaler Kristall.

- (d) Das Punktgitter besitzt eine zwei-zählige Achse und zwei Spiegelebenen.
 (e) Das orthogonale Gitter (siehe Bild 1b) weist zwei Gitterpunkte, also zwei A-Atome und vier B-Atome auf.

Eine mögliche Wahl der Gittervektoren ist

$$\mathbf{a}'_1 = (2a_x, 0) \quad \text{und} \quad \mathbf{a}'_2 = (0, 2a_y) .$$

Dann sind die Atomkoordinaten durch

$$\begin{aligned} A_1 &= (0, 0), A_2 = (1/2, 1/2), B_1 = (1/2, r_B/2a_y), B_2 = (0, (r_A + r_B)/2a_y), \\ B_3 &= (1/2, 2(r_A + r_B)/2a_y), B_4 = (1, (r_A + 3r_B)/2a_y), \end{aligned}$$

gegeben.

3. Kubisch raumzentrierte Gitter

- (a) $\mathbf{a}_1 = \frac{a}{2}(-\hat{x} + \hat{y} + \hat{z}), \mathbf{a}_2 = \frac{a}{2}(\hat{x} - \hat{y} + \hat{z}), \mathbf{a}_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y} - \hat{z})$
 (b) $\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{a}(\hat{y} + \hat{z}), \mathbf{b}_2 = \frac{2\pi}{a}(\hat{x} + \hat{z}), \mathbf{b}_3 = \frac{2\pi}{a}(\hat{x} + \hat{y})$
 (c) Die Elementarzelle des reziproken Gitters mit bcc-Struktur entspricht der Wigner-Seitz-Zelle des fcc-Gitters.

4. Allotropie von Eisen

$$V_{\text{Kugel}} = (4\pi/3)r^3 = 4,19 r^3$$

$$a_{\text{bcc}}\sqrt{3} = 4r, V_{\text{bcc}} = \frac{a^3}{2} = 6,16 r^3, \quad a_{\text{fcc}}\sqrt{2} = 4r, V_{\text{fcc}} = \frac{a^3}{4} = 5,67 r^3$$

$$\frac{V_{\text{bcc}}}{V_{\text{fcc}}} = 0,92$$

Die gemessene Änderung ist kleiner, weil sich auch der Abstand der nächsten Nachbarn ändert, den wir als fest vorausgesetzt haben.

5. Kubische Kristalle

(a) $a_{\text{bcc}} = \frac{4r}{\sqrt{3}}, \quad a_{\text{fcc}} = \frac{4r}{\sqrt{2}}$

(b) $V_{\text{bcc}} = \frac{32}{3\sqrt{3}}r^3, \quad V_{\text{fcc}} = \frac{8}{3\sqrt{2}}r^3$

(c) $a_{\text{Fe}} = \sqrt[3]{\frac{2m_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Fe}}}} = 2,87 \cdot 10^{-10} \text{ m}, \quad a_{\text{Cu}} = \sqrt[3]{\frac{2m_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{Cu}}}} = 3,61 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

Kapitel 4

1. Strukturfaktor von Diamant

$$(a) \quad \mathcal{S}_{hkl} = \begin{cases} 2, & h+k+l \text{ ist das Doppelte einer geraden Zahl.} \\ 1 \pm i, & h+k+l \text{ ist ungerade.} \\ 0, & h+k+l \text{ ist das Doppelte einer ungeraden Zahl.} \end{cases}$$

(b) Auslöschung tritt auf, falls $h+k+l$ das Doppelte einer ungeraden Zahl ist.

(c) Bei ZnS treten alle Reflexe auf.

2. Bragg-Reflexion

$$(a) \quad \frac{d_1}{d_2} = \frac{\sin 46,60^\circ}{\sin 47,75^\circ} = 0,982$$

$$(b) \quad \frac{d_2}{d_1} = 1 + \alpha \Delta T \implies \alpha = 1,88 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

3. Millersche Indizes

$$(a) \quad \alpha = 2,86^\circ,$$

$$(b) \quad d_{1200} = \frac{a}{\sqrt{401}} = 1,80 \cdot 10^{-11} \text{ m},$$

$$(c) \quad \lambda_{\max} = 2d_{hkl} = 3,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}, \quad E_{\max} = 34,4 \text{ keV}.$$

4. Pulverdiffraktometrie

(a) Übereinstimmung findet man mit der fcc-Struktur:

Tabelle 2: Vorgaben und Parameter

| 2θ | θ | $\sin \theta$ | $\sin^2 \theta$ | N_{exp}^2 | N | (hkl) |
|-------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|-----|---------|
| 28° | 14° | 0,242 | 0,0585 | 3,07 | 3 | (111) |
| 32° | 16° | 0,276 | 0,0760 | 3,99 | 4 | (200) |
| 46° | 23° | 0,391 | 0,153 | 8,03 | 8 | (220) |
| 54° | 27° | 0,454 | 0,206 | 10,82 | 11 | (113) |
| 57° | $28,5^\circ$ | 0,477 | 0,228 | 11,98 | 12 | (222) |
| 130° | 65° | 0,906 | 0,821 | 43,12 | 43 | (335) |
| 133° | $66,5^\circ$ | 0,917 | 0,841 | 44,17 | 44 | (226) |
| 146° | 73° | 0,956 | 0,915 | 48,05 | 48 | (444) |
| 160° | 80° | 0,985 | 0,970 | 50,94 | 51 | (155) |
| 168° | 84° | 0,995 | 0,990 | 51,99 | 52 | (046) |

$$(b) \quad a^2 = \frac{N^2 \lambda^2}{4 \sin^2 \theta} \implies a = 5,51 \text{ \AA}$$

$$(c) \quad a = 5,58 \text{ \AA}.$$

Aus den Daten folgt, dass vermutlich Calcium untersucht wurde.

Kapitel 5

1. Leerstellen und thermische Ausdehnung

(a) Die Leerstellenkonzentration ist $N_L/N = 6,7 \cdot 10^{-20}$ bei Zimmertemperatur und $N_L/N = 6,1 \cdot 10^{-5}$ bei 1 220 K.

$$(b) \quad \frac{\Delta V}{V} = \frac{N_L}{N}$$

(c) Die Leerstellen verursachen eine Ausdehnung, die durch $\alpha_{300 \text{ K}} = 3,4 \cdot 10^{-21} \text{ K}^{-1}$ bzw. $\alpha_{1220 \text{ K}} = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ gegeben ist.

(d) In Kapitel 4, Aufgabe 2 wurde der Wert $\alpha = 1,88 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ermittelt.

2. Diffusion von Leerstellen in Gold

(a) In fcc-Kristallen ist die elementare Sprungweite durch $a/\sqrt{2}$ gegeben.

(b) Mit $L = \sqrt{6Dt}$ und $D = \frac{1}{6}a^2\nu_0 e^{-E_D/k_B T}$ ergibt sich $t = 7,6 \cdot 10^{14} \text{ s}$ bei 300 K und $t = 7,5 \cdot 10^5 \text{ s} \approx 200 \text{ h}$ bei 960 K.

3. Farbzentren

$$(a) \quad E_{\text{Wa}} = E_2 - E_1 = \frac{10,2}{\epsilon_r^2} [\text{eV}]$$

$$(b) \quad E_{\text{Po}} = E_2 - E_1 = \frac{4,5 \cdot 10^{-38}}{R_0^2} [\text{J}]$$

(c) Vergleich der Ergebnisse:

Tabelle 3: Parameter und Ergebnisse

| | $R_0/\text{\AA}$ | n | E_{Wa}/eV | E_{Po}/eV | E_{Exp}/eV |
|------|------------------|------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| LiF | 2,01 | 1,41 | 2,58 | 6,98 | 5,0 |
| NaCl | 2,82 | 1,56 | 1,72 | 3,55 | 2,7 |
| RbJ | 3,67 | 1,65 | 1,38 | 2,09 | 1,6 |

1. Schwingender Aluminiumzylinder

2. Inelastische Neutronenstreuung

- (c) $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 + \mathbf{q} + \mathbf{G}$

Der Streuvektor ist durch $\mathbf{G} = (0, 4\pi/a, 0)$ gegeben.

- (e) Der errechnete Wert stimmt mit dem experimentellen Ergebnis überein.

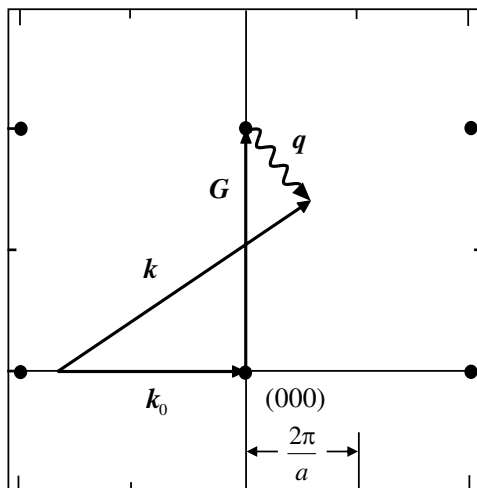


Bild 2: Neutronenstreuung an Kupfer.

3. Brillouin-Streuung

- (a) $v_\ell = 4539 \text{ m/s}, v_t = 2416 \text{ m/s}$
- (b) $\vartheta = 0^\circ \implies \Delta\nu \approx 0$
 $\vartheta = 180^\circ \implies \Delta\nu_\ell = 27,2 \text{ GHz}, \Delta\nu_t = 14,5 \text{ GHz}$

Es können Phononen bis etwa 10^{-3} der Brillouin-Zone untersucht werden.

4. Akustische und thermische Phononen

- (a) $N_{\text{ph}} = 3,0 \cdot 10^{16}$
- (b) $\Delta T = 50 \mu\text{K}$
- (c) Im vorgegebenen Frequenzintervall werden $1,6 \cdot 10^9$ Phononen angeregt.

Kapitel 7

1. Drei-Phononen-Prozesse

- (a) Bei geraden Dispersionskurven sind die Prozesse a) und b) verboten, die Prozesse e) und f) uneingeschränkt erlaubt. Bei c) und d) muss die Wechselwirkung kolinearer erfolgen.
- (b) Nun sind auch die Prozesse c) und d) untersagt.

2. Dämpfung durch Punktdefekte

Zur Abschätzung der Größenordnungen nehmen wir als Eingabedaten für den Atomradius den Wert $1,4 \text{ \AA}$ und 4500 m/s für die Schallgeschwindigkeit. Damit finden wir bei 1 THz und einer Defektkonzentration von $1,5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ die freie Weglänge $\ell \approx 1 \text{ m}$. Die angegebenen kleineren Defektkonzentrationen bewirken keinen messbaren Effekt.

3. Wärmeleitung von Germanium

Für die Wärmeleitung der Probe findet man $\Lambda \approx C_V v d \approx 0,3 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

4. Wärmeleitung bei tiefen Temperaturen

- (a) Man findet folgende Querschnittsflächen: $A_{\text{Si}} = 1 \text{ cm}^2$, $A_{\text{a-SiO}_2} = 200 \text{ cm}^2$ und $A_{\text{Cu}} = 0,25 \text{ mm}^2$,
- (b) Der Temperaturanstieg ist bei der Kupferprobe am größten, bei Silizium am kleinsten.
- (c) Die erforderlichen Heizleistungen sind $5 \cdot 10^{-12} \text{ W}$, $5 \cdot 10^{-10} \text{ W}$ und $5 \cdot 10^{-8} \text{ W}$ bei Silizium, Quarzglas und Kupfer.

Kapitel 8

1. Spezifische Wärme

Bei 300 K gilt

$$\frac{C_V^{\text{el}}}{C_V^{\text{ph}}} = \frac{\pi^2 T}{6 T_F} = 0,025 .$$

Elektronen und Phononen tragen bei der Temperatur

$$T = \sqrt{\frac{5\theta^3}{24\pi^2 T_F}}$$

gleich viel bei. Unter $T = 0,90 \text{ K}$ ist $C_V^{\text{el}} > C_V^{\text{ph}}$.

2. Fermi-Fläche und Brillouin-Zone

Für den Fermi-Impulswellenvektor findet man den Wert $k_F = 1,78 \pi/a$.

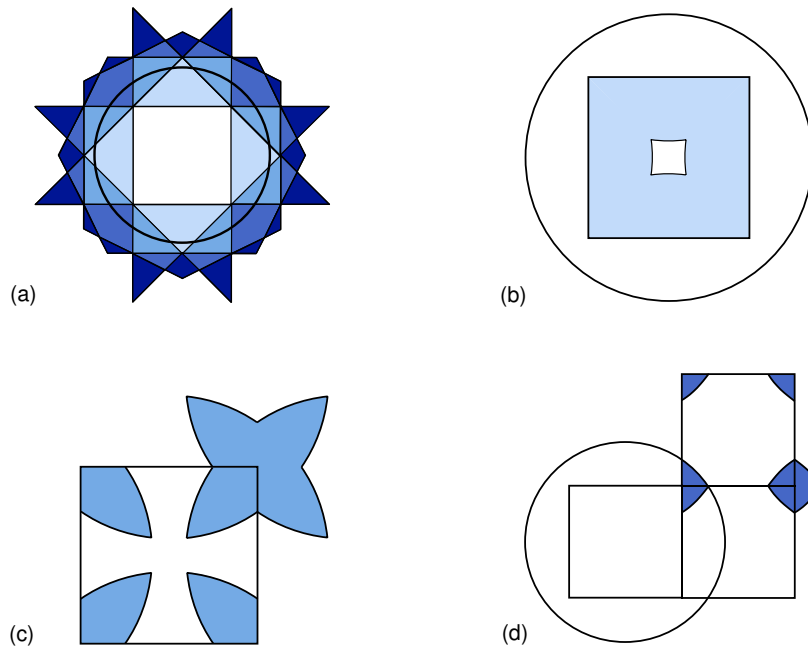


Bild 3: Fermi-Flächen und Brillouin-Zone. **a)** Die ersten fünf Brillouin-Zonen im erweiterten Zonenschema. **b)** 2. Brillouin-Zone. **c)** 3. Brillouin-Zone. **d)** 4. Brillouin-Zone.

Bei schwachem Potential werden die Ecken gerundet.

2. Flüssiges ^3He

$$E_F = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ eV} = 1,77 \text{ K}$$

$$v_F = 59 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{und} \quad T_F = 1,76 \text{ K}$$

$$C_V(^3\text{He}) = 6,22 \cdot 10^5 T \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{K}} \right]$$

Bei 50 mK findet man für ^3He den Wert $C_V(^3\text{He}) = 3,10 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3 \text{K}$, für Kupfer nur $C_V(\text{Cu}) = 4,88 \text{ J/m}^3 \text{K}$.

Kapitel 9

1. Stark gebundene Elektronen

(a) Dispersionskurve

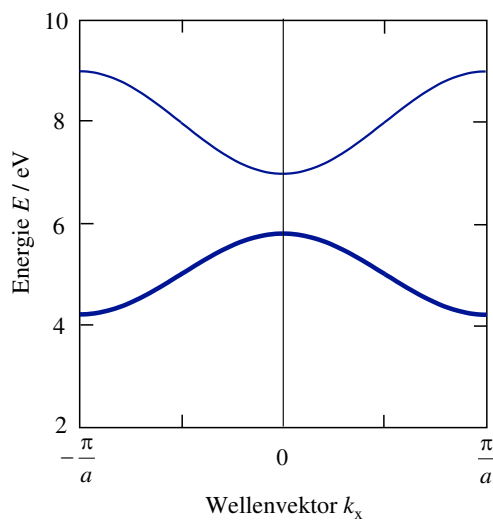


Bild 4: Energiedispersionskurve. Die besetzten Zustände sind dick gezeichnet.

(b) Effektive Massen

$$m_n^* = 2,17 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,24 m_e, \quad m_p^* = 2,71 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,30 m_e$$

(c) Geschwindigkeiten

$$v_n = 4,86 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad v_p = 3,89 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(d) Beschleunigung

$$\dot{v}_n = -7,38 \cdot 10^{11} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \quad \dot{v}_p = 5,89 \cdot 10^{11} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

2. Streuung an Punktdefekten

Aus der Bedingung $\tau_{\text{ph}} = \tau_{\text{L}}$ folgt mit

$$\varrho_{\text{ph}} = \frac{m^*}{n_{\text{e}} e^2 \tau_{\text{ph}}} \quad \text{und} \quad \ell_{\text{L}} = \frac{16}{3\pi a^2 n_{\text{L}}}$$

der Zusammenhang

$$\frac{e^{E_{\text{L}}/k_{\text{B}}T}}{T_{300}/T} = \frac{3\pi a^2 m^* v_{\text{F}} e^{S_{\text{L}}/k_{\text{B}}}}{16e^2 \varrho_{300}}.$$

Die beiden Streuraten sind bei $T \approx 484 \text{ K}$ gleich groß. Natrium schmilzt jedoch bereits bei tieferer Temperatur.

3. Elektrische und thermische Leitfähigkeit

- (a) Probe A: Getemperter Golddraht
 Probe B: Unbehandelter Golddraht
 Probe C: Legierung

(b) Probe A : $\frac{\varrho_{300}}{\varrho_5} = 2800$, Probe B : $\frac{\varrho_{300}}{\varrho_5} = 100$

$T = 300 \text{ K} : \ell_{\text{A}} = \ell_{\text{B}} = 3,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}$

$T = 5 \text{ K} : \ell_{\text{A}} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}, \ell_{\text{B}} = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

- (c) In der Probe A dominiert bei Raumtemperatur die Streuung an Phononen, bei 5 K die Streuung an Defekten. In der Probe C überwiegt die Defektstreuung bei allen Temperaturen.

- (d) Mit dem Wiedemann-Franz-Gesetz ergibt sich bei 1 K:

$$\Lambda_{\text{A}} = 3100 \frac{\text{W}}{\text{m K}}, \Lambda_{\text{B}} = 110 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad \text{und} \quad \Lambda_{\text{A}} = 0,11 \frac{\text{W}}{\text{m K}}.$$

4. Freie Elektronen im Magnetfeld

(a) $R_{\text{H}} = -4,65 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/\text{As}$

(b) $p \approx 22\,000$

(c) $r_{\text{F}} = 6 \mu\text{m}$

(d) $\tau > 9 \mu\text{m}$

Kapitel 10

1. Intrinsischer Halbleiter

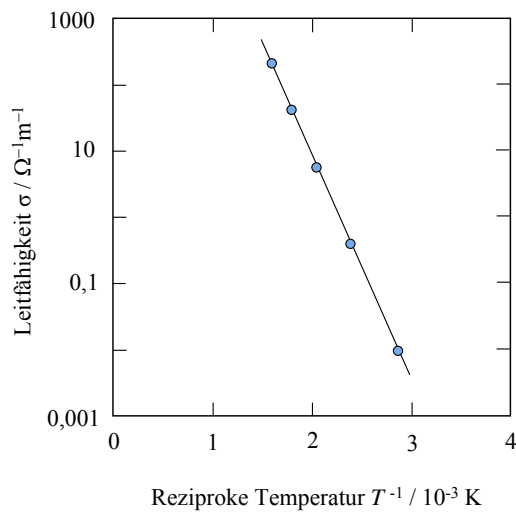


Bild 5: Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit einer Halbleiterprobe.

Da man für die Energielücke den Wert $E_g = 1,35 \text{ eV}$ findet, könnte es sich um Indiumphosphid handeln. Die Energielücke entspricht einer Wellenlänge von $0,92 \mu\text{m}$, so dass dieser Halbleiter für die vorgesehene Anwendung geeignet ist.

2. Silizium

- (a) $E_F = 0,547 \text{ eV}$
- (b) $f(E) \approx 7 \cdot 10^{-10}$
- (c) $n_i = p_i = 3,88 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$
- (d) $\varrho = 6720 \Omega\text{m}$
- (e) $\varrho = 1,30 \cdot 10^{-3} \Omega\text{m}$
- (f) $T = 775 \text{ K}$

3. p-n-Übergang

$$C = 162 \text{ pF}$$

4. Solarzelle

- (a) $I_L = 0,68 \text{ A}$
- (b) $U = 0,50 \text{ V}$
- (c) $U_{\text{opt}} = 0,43 \text{ V}$

Kapitel 11**1. Spezifische Wärme**

$$(a) \quad C_s - C_n = \frac{2VB_c^2}{\mu_0 T_c^2} \left(\frac{3T^3}{T_c^2} - T \right)$$

- (b) Bei $T = T_c/\sqrt{3} = 4,15 \text{ K}$ ist $C_s = C_n$, d.h. im Bereich $4,15 \text{ K} < T < 7,19 \text{ K}$ ist die spezifische Wärme im supraleitenden Zustand größer als im Normalzustand.

2. Kritische Stromstärke

$$(a) \quad T_c = 7,19 \text{ K}$$

$$(b) \quad I_c = 397 \text{ A}$$

$$(c) \quad j_c = 1,01 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

3. Magnetfeld in einer supraleitenden Platte

$$(a) \quad B_z(x) = B_0 \frac{\cosh(x/\lambda_L)}{\cosh(d/2\lambda_L)}$$

$$(b) \quad j_{s,y}(x) = -\frac{B_0}{\mu_0 \lambda_L} \frac{\sinh(x/\lambda_L)}{\cosh(d/2\lambda_L)}$$

- (c) Das kritische Feld erhöht sich um den Faktor $2\lambda_L/d$.

4. Flussschläuche

$$(a) \quad \Phi = 4\pi \cdot 10^{-6} \text{ Tm}^2$$

$$(b) \quad N = \frac{\Phi}{\Phi_0} = 6,1 \cdot 10^9$$

Kapitel 12**1. Dipolwechselwirkung**

Für die Wechselwirkungsenergie findet man $U = 4,0 \cdot 10^{-24} \text{ J}$. Daraus folgt mit $U \approx 3k_B T$, dass die Dipolwechselwirkung über 100 mK vernachlässigt werden kann.

2. Magnetisierung von NiFe_2O_4

Zahl der Nickel-Ionen in Nickel bzw. in NiFe_2O_4 :

$$N_{\text{Ni}} = 9,14 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}, \quad N_{\text{NiFe}_2\text{O}_4} = 2,40 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}.$$

$$M_s(\text{NiFe}_2\text{O}_4) = 0,26 M_s(\text{Ni}) = 1,34 \cdot 10^5 \text{ A/m}.$$

3. Ferromagnetische Eigenschaften

Wir nehmen an, dass die beiden Materialien die gleichen Austauschkoefizienten \mathcal{J} aufweisen und der Bahndrehimpuls verschwindet. Dann gilt:

$$\lambda_1 = \lambda_2, \quad 3C_1 = C_2, \quad T_{c,1} = T_{c,2}, \quad 2M_{s,1}(T=0) = M_{s,2}(T=0)$$

4. Spinwellen in Nickel

Mit $\mathcal{J} = 1,03 \cdot 10^{-20} \text{ J}$ findet man

$$C_V^{\text{Mag}} = 4,96 T^{3/2} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{K}} \right]$$

$$C_V^{\text{Mag}} = C_V^{\text{Pho}} \text{ bei } T = 3,3 \text{ K.}$$

Kapitel 13

1. Optische Phononen

Man findet $\omega_t = 3,28 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ und $\omega_\ell = 5,16 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$.

2. Hagen-Rubens-Gesetz

$$(a) \quad \varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{i\sigma_0}{\varepsilon\omega} \frac{1}{1 - i\omega\tau} \approx \frac{i\sigma_0}{\varepsilon_0\omega}$$

$$(b) \quad n' + i\kappa = \sqrt{\frac{\sigma_0}{2\varepsilon_0\omega}} + i\sqrt{\frac{\sigma_0}{2\varepsilon_0\omega}}$$

$$R \approx 1 - \frac{2}{n'} = 1 - \sqrt{\frac{8\varepsilon_0\omega}{\sigma_0}}$$

$$(c) \quad R_{\text{Ag}} = 0,9937, \quad R_{\text{Hg}} = 0,9494.$$

Die Bedingung $\sigma_0 \gg \varepsilon_0\omega$ ist in beiden Fällen erfüllt.

Silber: $\omega\tau = 1,6$, Quecksilber: $\omega\tau = 0,02$.

3. Plasmakante

(a) Die Grenze liegt bei $\lambda_p = 1,03 \mu\text{m}$.

(b) Minimale Reflexion tritt bei $\lambda_p = 890 \text{ nm}$ auf.

