

Festkörperphysik Prüfungsfragen

Tobias Morf

Simon Wood

1. Warum ist der Boden einer guten Bratpfanne aus Kupfer und nicht aus rostfreiem Stahl hergestellt?

Weil Kupfer bei Zimmertemperatur ein viel besserer Wärmeleiter ist als rostfreier Stahl.

2. Warum leitet bei Zimmertemperatur Kupfer die Wärme besser als rostfreier Stahl?

Kupfer ist ein 1-elementiger Kristall (fcc) mit sehr geringem elektrischem Widerstand, Wärme kann also sowohl durch Elektronen wie auch Erschütterungen (Phononen) gut übertragen werden.

Rostfreier Stahl ist hingegen eine Legierung in der die einzelnen Elemente zu "Phasen" zusammenklumpen. Rostfreier Stahl ist also nicht annähernd so regelmässig aufgebaut wie Kupfer, somit können sich die wärme übertragenden Elektronen und Phononen nicht so gut ausbreiten.

3. Was beschreibt das "Wiedemann-Franz Gesetz", und welches sind die Annahmen?

Das Wiedemann-Franzsche Gesetz sagt aus, dass das Verhältnis zwischen thermischer Leitfähigkeit λ und elektrischer Leitfähigkeit σ in einem Metall proportional zur Temperatur ist, unabhängig von dem betrachteten Metall:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 T.$$

Das Wiedemann-Franzsche Gesetz zeugt von der Tatsache, dass in Metallen die Träger von Wärmeenergie gleichzeitig Ladungsträger sind. Abweichungen ergeben sich erst bei sehr tiefen Temperaturen durch ballistische Wärmeleitung und Beiträge von Atomschwingungen (Phononen), die zwar Wärme aber keine Ladung transportieren. [Wikipedia]

4. Warum ist Diamant bei Zimmertemperatur ein guter Wärmeleiter?

Diamant hat eine enorm hohe Schallgeschwindigkeit.

$$\lambda_{\text{Phonon}} = \frac{1}{3} \cdot C_v v \cdot \Lambda_p \quad \Lambda_p := v \cdot \tau$$

Die Wärme kann somit (trotz fehlender elektrischer Leitfähigkeit) sehr schnell von den Phononen transportiert werden.

5. Was bezeichnet man als "Phonon?"

Ein Phonon ist ein Quasiteilchen, das in der Festkörperphysik angenommen wird, um die Eigenschaften der quantenmechanisch beschriebenen Gitterschwingungen in einem Kristall besser beschreiben zu können. Phononen sind delokalisiert, das heißt ein Phonon existiert im ganzen Kristallgitter und lässt sich keinem bestimmten Ort zuordnen. [Wikipedia]

6. Welche Statistik beschreibt die Besetzung von Phononzuständen?

Es können beliebig viele Phononen mit gleichen Quantenzahlen existieren. Phononen müssen somit Bosonen sein und werden durch die Bose-Einstein Verteilung beschrieben

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

7. Was sind akustische und optische Phononen?

Akustische Phononen (auch als Schallquanten bezeichnet) entsprechen weitestgehend den Schallwellen, die sich durch das Kristallgitter fortpflanzen. Hierbei bewegen sich alle Atome einer Einheitszelle in Phase.

Bei optischen Phononen bewegen sich die Atome einer Einheitszelle gegenphasig. Sind die gegenphasig schwingenden Atome geladen, so existieren Schwingungsmoden, bei denen entgegengesetzt geladene Untergitter gegeneinander schwingen. Die dabei oszillierenden Dipolmomente können mit Photonen wechselwirken (daher die Bezeichnung optisches Phonon). Solche Kopplungen finden in der Regel im Infrarotbereich statt, also bei Wärmebewegungen innerhalb von Festkörpern. Man nennt solche Kristalle dann infrarot-aktiv. Beispiele für solche Gitter sind Ionengitter, zum Beispiel in Kochsalzkristallen. [Wikipedia]

8. Wie kann man aus dem Experiment Information über Phononen ableiten?

Experimentell lassen sich die optischen Phononen mittels Raman-Spektroskopie oder Infrarot-Spektroskopie bestimmen. Zur Ermittlung des Gesamtspektrums der Phononen wird sowohl die Information über die Energie als auch über den Impuls der Gitterschwingungen benötigt. Diese Forderung wird durch die Neutronenstreuung und die Röntgenstreuung erfüllt. [Wikipedia]

9. Was ist eine Phonon-Dispersionsbeziehung, und wie kann man sie messen?

Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenvektor ist durch die Phononendispersion gegeben. Die Energiezustände E_n der Phononen berechnen sich aus denen des harmonischen Oszillators nach

$$E_n(\mathbf{k}) = \hbar\omega(\mathbf{k}) \left(n + \frac{1}{2} \right).$$

10. Was bedeutet die "Debye Temperatur?" In welchem Modell hat sie eine bestimmte Bedeutung?

Die "Debye Temperatur" wird über die "Debye Frequenz" definiert

$$\Theta = \frac{\hbar\omega_D}{k_B}.$$

Die "Debye Frequenz" ist diejenige Frequenz bei der das Integral der Frequenzdichte gleich der Dichte Atome im Gitter mal die Anzahl möglicher Polarisierungen ist. (Gleich viele Schwingungsmoden wie Atome mal Anzahl Polarisierungen.)

Im "Debye" Modell wird davon ausgegangen, dass sich Phononen im Festkörper verhalten wie Photonen in einer Box.

11. Was bedeutet "Einstein-Frequenz", und in welchem Modell hat sie eine bestimmte Bedeutung?

Das "Einstein-Modell" geht davon aus, dass der Festkörper aus nicht wechselwirkenden harmonischen Oszillatoren besteht.

Die "Einstein-Frequenz" ist die Frequenz der harmonischen Oszillatoren. Laut dem "Einstein-Modell" wächst die spezifische Wärme unterhalb der "Einstein-Temperatur" exponentiell und ist oberhalb konstant.

12. Skizzieren Sie die Phonon-Zustandsdichte im Debye Modell, und im Einstein Modell für den Festkörper.

Debye: Quadratisch ansteigende Funktion welche bei ω_D abgeschnitten wird.

Einstein: Deltafunktion um ω_E .

13. Skizzieren Sie die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme von Blei und von Diamant. Wie kann man die Grenzbereiche einfach verstehen?

$$T \ll \Theta_D : C_V \propto \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 \quad T \gg \Theta_D : C_V = 3k_B N$$

Verschiedene Materialien unterscheiden sich nur in der Debye-Temperatur. Diese ist für harte, leichte Materialien (z.B. Diamant) sehr hoch, für weiche, schwere (z.B. Blei) dagegen recht niedrig.

Blei hat eine viel tiefere Debeyetemperatur als Diamant und strebt deshalb viel schneller zum Dulong-Petit-Wert $3k_B N$.

14. Welche vereinfachten Modelle sind zur Beschreibung der spezifischen Wärme von Festkörpern entwickelt worden? Muss man zwischen Isolatoren und Metallen unterscheiden?

Einstein-Modell, Debye-Modell

Metalle haben — im Gegensatz zum Isolator — noch die T -proportionale Wärmekapazität des Elektronengases.

15. Was kann man aus der Schallgeschwindigkeit über die chemische Bindung eines Festkörpers aussagen?

Die Schallgeschwindigkeit ist proportional zur Debye-Temperatur welche wiederum mit der Härte und der inversen Dichte zunimmt.

16. Welche Bindungstypen von Festkörpern kann man unterscheiden?

Kovalent, Ionisch, Metallisch, Wasserstoff, Van der Waals.

Bindungsenergien sind: $5 - 10 \text{ eV}$ (kovalent), $5 - 7 \text{ eV}$ (ionisch), $\sim 1 \text{ eV}$ (metallisch), $\sim 0.1 \text{ eV}$ (H-Brücken), $0.05 - 0.2 \text{ eV}$ (Van der Waals)

17. Wie unterscheiden sich die verschiedenen Bindungstypen bezüglich der Elektronenverteilung zwischen den Atomkernen?

Für ionische Bindungen sind die Elektronen eher bei den Atomen.

Für kovalente und metallische Bindungen eher zwischen den Atomen. (In der kovalenten insbesondere auf deren Verbindungslinien)

Diejenigen der H-Brücken sind weit weg vom Wasserstoff-Atom, sodass dieses weitere Elektronen "binden" kann.

Elektronen der Van der Waals-Bindung sind nahe am Kern, bilden mit diesem jedoch einen Dipol, welcher weitere Moleküle polarisiert und so bindet.

18. Was bedeutet die Madelung-Konstante, und in welchem Zusammenhang wird sie verwendet?

Die Madelung-Konstante ist ein einheitenloser Faktor, der als das Verhältnis der durchschnittlichen Bindungsenergie pro Ion im Kristallgitter zur durchschnittlichen Bindungsenergie pro Ion bei einem einzelnen Ionenpaar definiert ist. Sie hängt dabei nur vom Strukturtyp ab und ist unabhängig von der Ionenladung und den Zellparametern. [Wikipedia]

19. Wie würden Sie vorgehen, um die Kristallstruktur einer neu synthetisierten Verbindung zu bestimmen? Was tun Sie, wenn die Verbindung nur in Form eines feinen kristallinen Pulvers vorliegt? Was könnte man hingegen mit einem cm-grossen Einkristall machen?

Mit Hilfe von Beugungsexperimenten. Beim Kristallpulver können sogar alle Einfallswinkel gleichzeitig gemessen werden.

20. Welches sind die 14 Translationsgitter des 3-dimensionalen Raumes (Bravais- Gitter)?

triklin, monoklin (primitiv, basizentriert), orthorombisch (primitiv, basiszentriert, raumzentriert, flächenzentriert), hexagonal, rhomboedrisch, tetragonal (primitiv, raumzentriert), kubisch (primitive, raumzentriert, flächenzentriert).

21. Was bedeutet: einfach kubisch, kubisch flächenzentriert, kubisch raumzentriert?

Würfel mit Atomen an den Ecken, Würfel mit Atomen und den Ecken und Flächenzentren, Würfel mit Atomen an den Ecken und einem Atom in jeder Flächenmitte.

22. In welcher Struktur kristallisieren Si und Ge, und welcher dominante Bindungstyp liegt vor?

Beide kristallisieren in der Diamantstruktur und binden kovalent. (sp^3 -Hybrid)

23. Kennen Sie einige Kristallstrukturen?

Alle Bravaisgitter.

24. Was ist der Unterschied zwischen einer primitiven und einer allgemein gewählten Einheitszelle?

Mit Hilfe einer gewöhnlichen Einheitszelle kann der ganze Kristall aufgebaut werden indem die Einheitszelle entlang drei Translationsvektoren verschoben wird.

Die primitive Einheitszelle ist die kleinste mögliche Einheitszelle. **Für Kristallstrukturen mit nur einem Atom enthält die primitive Einheitszelle nur einen Gitterpunkt. Die primitive Zelle muss nicht unbedingt die Symmetrie des Gitters tragen.**

25. Was sind Gitter und Basis?

Das Gitter ist die Struktur an die die Atome angeheftet werden.

Die Basis sind die einzelnen Atome, Atomgruppen oder Moleküle welche an die Gitterpunkte geheftet werden.

26. Was sind die Symmetrieelemente typisch für die kubische Struktur?

Spiegelungen, Rotationen und Translationen. Charakteristisch sind die **vier** dreizähligen Drehachsen (**Raumdiagonalen**).

27. Wie ist das reziproke Gitter definiert? Welche physikalischen Vorgänge sind mit Hilfe des reziproken Gitters besonders effizient beschreibbar?

$$g_i = 2\pi \frac{a_j \times a_k}{a_i(a_j \times a_k)}$$

Bragg-Reflexion lässt sich am besten mit dem reziproken Gitter beschreiben. Reflexion geschieht nur für $k_0 - k = G$.

28. Wie sieht die Dispersionsrelation für Wellen in einer linearen zweiatomigen Kette aus?

$$\omega(k) = \sqrt{f \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \pm f \left[\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^2 - \frac{4}{M_1 M_2} \sin^2 \frac{ka}{2} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

29. Sie erhalten einen kleinen Kristall einer neu hergestellten Substanz. Welche Messungen führen Sie durch, um möglichst viel über diese Substanz aussagen zu können? Über die Struktur, und über physikalische Eigenschaften.

Beugungsexperimente für Kristallstruktur. Spezifische Wärme messen. Elektrische Leitfähigkeit.

30. Wie bestimmt man die spezifische Wärme eines Festkörpers?

Messen wie sich die Temperatur ändert verändert bei Energiezufuhr. Die Messung kann entweder bei konstantem Druck c_V oder konstantem Volumen c_p durchgeführt werden.

Volumenausdehnungskoeffizient $\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$
isotherme Kompressibilität $\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_t$

$$c_p - c_v = \frac{\beta^2}{\kappa} VT$$

31. Bei Umgebungsbedingungen ist Natrium ein weiches, silberglänzendes Metall. Chlor ist ein Gas. Weshalb ist NaCl ein farblos durchsichtiger Isolator (Steinsalz)?

NaCl ist ein Isolator und der Bandgap ist grösser als die Energie von sichtbarem Licht. Weshalb sicherbares Licht nicht mit NaCl interagieren kann.

Hinzu kommt, dass die optischen Zweige der Phononen nicht im Energiebereich des optischen Lichts liegen.

Ein Isolator ist es weil die Ionen im NaCl gefüllt Schalen haben, im Gegensatz zu atomarem Natrium.

32. Kann man intuitiv verstehen was passiert, wenn NaCl Kristalle in eine Flüssigkeit mit sehr grosser rel. Dielektrizitätskonstante gelegt wird? (Wie gross ist die statische rel. Dielektrizitätskonstante von Wasser?)

Bei hohen Dielektrizitätskonstanten wird die elektrische Bindungsenergie verringert, weshalb sich die Ionen dann trennen. $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 80.4$

33. Welche Prozesse beeinflussen den elektrischen Widerstand in einem Metall? Bei tiefen Temperaturen, bei Zimmertemperatur? Was ist der typische spez. Widerstand eines guten Metalles bei Zimmertemperatur, z.B. Kupfer oder Aluminium?

Bei tiefen Temperaturen streuen die Elektronen an einander (schwach) und an statischen Gitterdefekten. Bei hohen Temperaturen können Elektronen auch noch an Phononen streuen. Der Widerstand von Metall nimmt also bei abnehmender Temperatur ab.

Spez. Widerstand Kupfer: $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ Aluminium $2.82 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$

34. Was bedeutet das Konzept des freien Elektronengases?

Beim freien Elektronengas geht man davon aus, dass die Elektronen nicht mit einander wechselwirken, sondern "nur" einem zeitunabhängigen gemittelten Potential aller Elektronen und Atomrümpfe ausgesetzt sind.

35. Was bedeutet die $E(k)$ Relation von Elektronen in einem Kristall?

Die Dispersionsrelation $E(k)$ weist jedem Kristall Impuls seine Energie zu.

$E(k)$ kann für Elektronen nicht mehr beliebige Werte annehmen, sondern ist auf Bänder beschränkt und ist periodisch in den reziproken Gittervektoren.

36. Wie hängt die Energie E für quasi-freie Elektronen vom Kristallimpuls k ab?

Die Energie ist periodisch in den reziproken Gittervektoren.

37. Wie sind die Elektronenzustände bei $T=0$ besetzt, wie bei erhöhter Temperatur?

Die Elektronen verteilen sich entsprechend der Fermistatistik

$$f(E, T) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}.$$

Bei $T = 0$ sind also alle Zustände unterhalb der Fermienergie besetzt. Bei höheren Temperaturen werden Zustände unterhalb der Fermienergie in solche darüber angeregt. Dies geschieht innerhalb von $\sim 2k_B T$ um E_F .

38. Was sind die typische Fermi Energie, die Fermi Geschwindigkeit und der Fermi Wellenvektor für Metalle mit einem Elektron pro Atom?

Na: $E_f = 3.14\text{eV}$, $v_f = 1.05 \cdot 10^8\text{cm/s}$, $k_f = 0.91 \cdot 10^8\text{cm}^{-1}$

Li: $E_f = 4.70\text{eV}$, $v_f = 1.29 \cdot 10^8\text{cm/s}$, $k_f = 1.11 \cdot 10^8\text{cm}^{-1}$

39. Welches sind die bekannten Konzepte, um die elektronischen Zustände in einem Kristall zu beschreiben? Welches sind die essentiellen Annahmen in den verschiedenen Methoden?

"Quasi-frei" Elektronen werden in einem Kastenpotential mit periodischem Ansatz approximiert. Mit periodischem Potential (schwach, Störungstheorie) findet man die Bloch-Wellenfunktionen (Superposition ebener Wellen), im "tight-binding"-Modell werden die Elektronen durch Superposition der Wasserstoff-Wellenfunktionen und schwache Störung durch das Potential der nächsten Nachbarn beschrieben.

40. Was verstehen wir unter "elektronischer Bandstruktur?"

Die Energiebänder sind quasikontinuierliche Bereiche erlaubter Energien für Elektronen im Kristall.

41. Wann sind, im Allgemeinen, Energiebänder breit und wann sind sie schmal? Was bedeutet das für die Zustandsdichte ?

Im tight binding Modell ist die Breite der Bänder proportional zum Überlapp der Wellenfunktionen. Jedes Band muss gleich viele Zustände ($2N$) beinhalten, also ist die Zustandsdichte grösser je schmaler ein Band ist ("Viele Zustände in kleinem Energiebereich")

Alternative Argumentation: Schmale Energiebänder sind eher flach weshalb der Gradient $\nabla_{\mathbf{k}}E(\mathbf{k})$ verschwindet und die Zustandsdichte

$$\int_{E(\mathbf{k})=\text{const}} \frac{df_E}{|\nabla_{\mathbf{k}}E(\mathbf{k})|}$$

sehr gross wird.

42. Welches sind typische Bandbreiten in Kristallen (in eV Einheiten)?

1-2 Stellige eV.

43. Wie kann man das Zustandekommen von "Bandlücken" an der Grenze der Brillouin Zone verstehen?

In erster Näherung kann man die Blochwellenfunktionen folgendermassen ansetzen (Einlaufende Welle + Bragg-gestretete Welle):

$$\begin{aligned}\psi_+ &\sim (e^{iGx/2} + e^{-iGx/2}) \sim \cos xG/2 \\ \psi_- &\sim (e^{iGx/2} - e^{-iGx/2}) \sim \sin xG/2.\end{aligned}$$

ψ_+ häuft die Elektronen nahe bei den Atomrümpfen und senkt deshalb die Energie, ψ_- häuft die Elektronen zwischen den Atomrümpfen und erhöht somit die Energie.

44. Was bedeutet der Begriff der "effektiven Masse" für Elektronen im Kristall, und wie ist sie mathematisch definiert?

Die "effektive Masse" eines Kristalls ist im wesentlichen ein Mass für den Energieaufwand ein Elektron zu beschleunigen wenn die Wechselwirkung mit dem Gitter miteinbezogen wird. Die inverse effektive Masse ist proportional zur Hessematrix (2te Ableitung) der Energie:

$$\left(\frac{1}{m^*}\right)_{ij} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E(\mathbf{k})}{\partial k_i \partial k_j}.$$

Die effektive Masse ist proportional zur inversen Krümmung der Dispersionsparabel.

45. Definition und Bedeutung der Brillouin Zonen?

Die Brillouin Zone ist die elementare Einheitszelle des reziproken Gitters. Sie nach dem gleichen Schema konstruiert wie die Wigner-Seitz Zelle im gewöhnlichen Gitter.

46. Wie beeinflusst sich das periodische Kristallpotential die Dispersionsrelation $E(k)$ für Elektronen?

Die Energie-Parabel des freien Elektrons wird in \mathbf{G} -periodische Energiebänder aufgespalten. Ursache ist die Entartung an den Rändern der Brillouin-Zonen.

47. Erwarten wir, im Allgemeinen, dass ein Kristall mit einem Valenzelektron pro Atom (und einem Atom pro Einheitszelle) ein Metall oder ein Nichtmetall ist?

Für Isolatoren wird eine gerade Anzahl Elektronen pro primitive Einheitszelle benötigt um ein Band zu füllen.

48. Wann spricht man von einem "s-Band", von einem "p-Band", einem "d-Band" etc?

Die Bänder erhalten ihren Namen vom Orbital aus dem sie in der LCAO-Approximation stammen.

49. Was bedeutet das Fermi-niveau?

Das Fermi-niveau ist die minimale Energie bis zu der alle Zustände besetzt sein müssen, damit das Pauli-Prinzip nicht verletzt wird. Bei $T = 0 K$.

50. Die Lage des Fermi-niveau ($T=0$) wird durch welche Faktoren bestimmt?

Die Dichte der Elektronen und ihrer effektiven Masse.

Für das freie Elektronengas gilt:

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m} (3N\pi^2)^{2/3}$$

51. Wie kann man die elektronische Zustandsdichte am Fermi-niveau in einem Metall messen?

Messung der Wärmekapazität und aufzeichnen von C_V/T vs. T^2 . Der Achsenabschnitt entspricht

$$\gamma = \frac{\pi^2}{3} k_B D(E_F)$$

52. Was bedeutet der ‘Sommerfeld’-Koeffizient ‘ γ ’, und wie kann man ihn messen?

Er ist ein Mass für den Beitrag der Elektronen zur Wärmekapazität. Messung siehe oben.

53. Welchen Zusammenhang gibt es zwischen dem Sommerfeldkoeffizienten γ und einem der den elektrischen Widerstand bestimmenden Streuprozesse in einem Metall (bei tiefen Temperaturen) ? Dieser Zusammenhang ist empirisch im Kadowaki-Woods Diagramm gesammelt. (Dies ist eine ‘anspruchsvollere’ Frage).

Der Sommerfeldkoeffizient bestimmt den elektrischen Widerstand der Elektron-Elektron-Streuung ($\rho(T) - \rho_0 \propto \gamma^2 T^2$)

54. Welchen Beitrag zur magnetischen Suszeptibilität leisten ‘freie’ Elektronen?

Sie führen zur Pauli-Suszeptibilität, welche einen kleinen Beitrag zum Paramagnetismus leistet.

Diamagnetischer Beitrag, falls in vollen Bändern und genügend weit weg von der Fermikante.

Landau Diamagnetismus

55. Welche Streuprozesse für Elektronen in einem Metall kennen Sie? Wie kann man diese Prozesse im Temperaturverlauf des el. Widerstandes erkennen?

Elektronen können an Gitterdefekten, anderen Elektronen und Phononen streuen. Die Phononenstreuung ist stark Temperatur abhängig, die andere weniger. Die Streuung an Phononen ist inelastisch (da Zeitabhängig).

56. Was ist der Peltier Effekt?

Der Peltier Effekt beschreibt eine Wechselwirkung zwischen wärme und elektrischem Strom.

Ein Stromfluss durch zwei verschiedenen Materialien führt zu Wärmetransport. Umkehrung des Seebeck-Effektes.

57. Welches sind die makroskopischen typischen Eigenschaften eines Supraleiters? Wie würden Sie sie messen? Ist ein idealer Leiter (mit 0 Widerstand) ein Supraleiter?

Verschwindender elektrischer Widerstand und Verdrängung äußerer Magnetfelder (falls unterhalb kritischer Temperatur und Feldstärke). Dies entspricht einer neuen Phase! Ein idealer Leiter und Diamagnet ist nur ein Supraleiter, falls er diese Eigenschaften bei allen Temperaturen zeigt. Anderenfalls kann oberhalb T_C das Feld eindringen und bleibt nach dem Abkühlen erhalten.

58. In einem konventionellen Supraleiter, z.B in Blei, bilden sich die Elektronenpaare (Cooper Paare) durch Elektron-Phonon Wechselwirkung. Wie stellt man sich diese Wechselwirkung vor? Welche Eigenschaften der Elektronen und der Phononen bestimmen demnach, qualitativ, die Übergangstemperatur T_C ?

Zwei spin antiparallele Elektronen können ein virtuelles Phonon austauschen und somit attraktiv wechselwirken. Essentiell ist, dass die Phononen über lange Distanzen propagieren können. Somit ist eine lange mittlere freie Weglänge wichtig (also reiner Kristall und tiefe Temperatur). Die Temperaturabhängigkeit der mittleren freien Weglänge ist gegeben durch:

$$\Lambda_{\text{phonon}} \propto e^{\Theta/2T}$$

Weitere erwähnenswerte Stichworte: **zusammengezogenes Kristallgitter, Isotopen Effekt**

59. Welches sind typische Übergangstemperaturen für Supraleiter? Und für Kupfer-Oxyd Supraleiter?

Für 1-element Supraleiter ein paar Kelvin. Kupfer-Oxyd Supraleiter können Übergangstemperaturen von bis zu **120 Kelvin und mehr haben.**

60. Wissen Sie von Anwendungen von Supraleitern, denen man (beinahe im Alltag) begegnen kann?

Beschleuniger in der medizinischen Technik. NMR, MRI, und (nicht für jedermann alltäglich) Detektoren und Beschleuniger in der Teilchenforschung.

61. Welches sind die fundamentalen Gründe für die Existenz einer "Austauschwechselwirkung?"

Da Elektronen dem Pauli-Prinzip gehorchen, müssen ihre Wellenfunktionen antisymmetrisch sein. Wenn sie im Ortsanteil antisymmetrisch sind (und somit spin parallel), sind sie eher von einander getrennt, was ihre Coulomb Energie verringert.

62. Wann spricht man von "ferromagnetischer", wann von "antiferromagnetischer" Austauschwechselwirkung?

Für $J := E_s - E_t > 0$ haben wir ferromagnetischen (spin parallel bevorzugt) und für $J < 0$ antiferromagnetischen (spin antiparallel bevorzugt) Austausch. (E_s Singlett-, E_t Triplettenergie)

63. Kennen Sie Beispiele von Ferromagneten, von Antiferromagneten?

Ferromagneten: Fe, Ni, Co, **Gadolinium, Dysprosium und Erbium**
Antiferromagneten: Oxide von Fe, Ni, Co

64. Wie kann man in einem Neutronenstreuexperiment das Auftreten von Antiferromagnetismus nachweisen?

Bei einem Antiferromagneten ist die elementare magnetische Einheitszelle doppelt so gross wie die chemische **was die Länge der reziproken Gittervectoren halbiert und es treten somit mehr Bragg-Reflexe auf.**

65. Kennen Sie Beispiele von Kristallen, in denen man von wechselwirkenden "lokalisierten" magnetischen Momenten spricht?

Lokalisierte magnetische Momente können in den partiell gefüllten f -Schalen der Lanthanoide auftreten. Z.B. Europium (Eu).

66. In welchen Metallionen findet man typischerweise "lokalisierte" magnetische Momente, und warum?

Bei Lanthanoiden, sie besitzen nur partiell gefüllte f -Schalen (führen zu Nettomoment wegen den Hund'schen Regeln), welche nah beim Atomrumpf lokalisiert sind.

67. Wie kann man das Auftreten von Ferromagnetismus bei itineranten Elektronen modellieren?

68. Was bedeutet "Austausch"- Wechselwirkung unter itineranten Elektronen? Wie hängt sie, im Allgemeinen, von der magn. Suszeptibilität, bzw. von der elektronischen Zustandsdichte am Fermi-niveau ab?

Minimierung der Coulomb-Energie durch asymmetrische Wellenfunktion bei parallelem Spin. Austausch-WW ist gross mit grosser Suszeptibilität und grosser Zustandsdichte am Fermi-niveau.

69. Skizzieren Sie den Temperaturverlauf des elektrischen Widerstandes eines guten Metalles, z.B. von Kupfer, und eines typischen Halbleiters, z.B. Silizium.

Im Halbleiter steigt die Ladungsträgerdichte exponentiell für $T \rightarrow 0$. Die Beweglichkeit verhält sich wie $T^{-3/2}$ für $T > \Theta$ und $T^{3/2}$ für $T < \Theta$.

Im Metall linear in T für $T > \Theta_D$ (im Drude-Modell) darunter T^5 bis zum Beitrag der Phononen-Streuung bei $T = 0 K$

70. Welches sind die zwei dominanten Faktoren, die den Temperaturverlauf des elektrischen Widerstandes (oder der el. Leitfähigkeit) bestimmen? In Metallen, in Halbleitern?

In Metallen sind dies Störstellen (konstanter Beitrag) und Phononen (mit Temperatur abnehmender Beitrag). In Halbleitern dominiert die Ladungsträgerkonzentration (exponentielle Zunahme mit T), die Phononen haben denselben Effekt wie in Metallen. **Wichtig ist auch noch die Ladungsträgerbeweglichkeit.**

71. Weshalb geht der el. Widerstand in einem (nichtsупraleitenden) Metall bei $T=0$ nicht auf 0?

Weil die Elektronen immer noch an einander streuen und es noch Störstellen gibt.

72. Wie sieht der Temperaturverlauf der el. Leitfähigkeit (des el. Widerstandes) für einen reinen, undotierten Halbleiter aus? Welche graphische Darstellung ist besonders gut geeignet, und warum?

Die Leitfähigkeit eines Halbleiters hängt sehr stark von seiner Ladungsträgerkonzentration ab. Bei tiefen Temperaturen ist der Halbleiter ein Isolator und hat eine sehr geringe Leitfähigkeit. Sobald genügend thermische Energie vorhanden ist um Elektronen ins Leitungsband anzuheben nimmt die Zahl der Ladungsträger exponentiell zu und somit auch die Leitfähigkeit.

Die geeignete graphische Darstellung ist \log (Leitfähigkeit) gegen inverse Temperatur. Dadurch kann man an der Steigung die Energielücke ablesen.

73. Was bedeutet Dotieren eines Halbleiters, und wie wird es gemacht? Weshalb werden Halbleiter dotiert?

Beim Dotieren werden bewusst Fremdatome dem Halbleiter beigelegt, z.B. durch Difundieren oder Beschuss. Mit dem Dotieren kann der Widerstand eines Halbleiters extrem stark verändert werden.

74. Welche Fremdatome sollen in Silizium oder in Germanium eingebaut werden, um n- oder p- Dotierung zu erreichen?

n: Phosphor Atom mit 5 Valenzelektronen auch Arsen und Antimon
 p: Bor Atom mit 3 Valenzelektronen ebenso Aluminium, Gallium, Indium

75. Aus welchem Halbleitmaterial sind die meisten ICs in unseren Computern hergestellt? (Wissen Sie vielleicht auch warum? Aber das ist hier nicht so wichtig).

Silizium, da Silizium auf der Erde in sehr grossen Mengen vorkommt.

76. Was bedeutet die Aktivierungsenergie von Donatoren bzw. Akzeptoren? Wie kann man sie recht gut in einem einfachen Modell abschätzen? Wie kann man sie experimentell bestimmen?

Die Aktivierungsenergie ist die Energie mit welcher ein Donator oder ein Akzeptor ionisiert wird.

Abschätzung mit Hilfe des Wasserstoffmodells modifiziert durch Dielektrizitätskonstante des Bulk-Materials und die effektive Masse der Elektronen. Experimentelle Bestimmung durch Temperaturverlauf der Leitfähigkeit: Übergang von der Störstellenreseve in der Erschöpfungszustand.

77. Wie sieht der Temperaturverlauf des el. Widerstandes (el. Leitfähigkeit) eines dotierten Halbleiters aus. Welche Temperaturbereiche unterscheidet man?

Da die Ladungsträgerkonzentration die Phononstreuung dominiert unterscheidet man zwischen Störstellenreseve (zunehmende Leitfähigkeit), Erschöpfungszustand (leichte Abnahme durch Phononen) und intrinsischem Bereich (stark ansteigende Leitfähigkeit).

78. Was bedeuten "Erschöpfungsbereich" und "intrinsischer Bereich" im Zusammenhang von dotierten Halbleitern?

Im "Erschöpfungsbereich" sind alle Donatoren ionisiert, aber noch fast keine Valenzelektronen im Leitungsband.

Im "intrinsischen Bereich" wechseln auch viele Valenzelektronen ins Leitungsband.

79. Was sind Majoritätsladungsträger, was sind Minoritätsladungsträger?

	Majoritäts Ladungsträger	Minoritätsladungs Träger
n-dotiert:	Elektronen	Löcher
p-dotiert:	Löcher	Elektronen

80. Beschreiben Sie einen p-n Halbleiterkontakt.

Der p-n Halbleiterkontakt ist ein abrupter Übergang von einer n-Region zu einer p-Region

Erwähnenswerte Stichworte: band bending, Diffusions-/Feldstrom, Gleichrichter/Diode.

81. Wie sieht die Strom-Spannungs Charakteristik eines p-n Kontaktes aus, und wie kommt sie zustande?

Exponentielle Abnahme in Sperrrichtung, exponentielle Zunahme in Flussrichtung. Der Sperrstrom ist < 0 und asymptotisch konstant.

82. Welche wichtigen Aspekte sind zu beachten, wenn man einen p-n Kontakt beschreibt?

Nur ein Fermi-niveau, band bending, lokales Feld, Diffusion und Feldstrom.

83. Wie hängen die Konzentration von Elektronen, Löchern, Dotanden von einander ab?

$n \cdot p = n_i^2$ (intrinsische Ladungsträgerkonzentration) und — da Elektronen nur aus dem Valenband oder von Störstellen kommen können: $n + N_A^+ = N_D^+ + p$ (analog für Löcher)

84. Wie gross ist die Bandlücke (bandgap) in Si, Ge, GaAs bei Zimmertemperatur?

ca. 1 eV:

T	Si	Ge	GaAs
0 K	1.17 eV	.75 eV	1.52 eV
300 K	1.12 eV	0.67 eV	1.43 eV

Und noch einige Fragen zu Grössenordnungen:

1. Welcher Energie in eV entspricht die thermische Energie bei Zimmertemperatur?

$300^\circ\text{K} \doteq 0.026\text{eV}$

2. Ein Photon der Energie von 1 eV hat etwa welche Wellenlänge?

Infrarotlicht ca. $1\mu\text{m}$

3. Welche Energie haben Photonen im sichtbaren Bereich des Spektrums?

Ca. 2 – 4 eV

4. Bei welcher Temperatur T entspricht $k_B T$ einem eV ?
 11603°K
5. Was sind typische Energien der Röntgenstrahlen, mit denen die Kristallstruktur bestimmt wird? Und warum wählt man diese Energie?
 Ca. 12400 eV denn dies entspricht einer Wellenlänge von 1\AA dem Gitterabstand von Atomen im Festkörper.
6. Was ist eine typische Fermigeschwindigkeit von Elektronen in einem Metall?
 Cu $1.57 \cdot 10^8 \text{cm/s}$
7. Was sind typische Schallgeschwindigkeiten in Festkörpern?
- | | | |
|--------------------|---------|-----------|
| | Diamant | 12000 m/s |
| Ca. 1000-10000 m/s | Eisen | 5130 m/s |
| | Kupfer | 3560 m/s |