

Lichttechnisches Institut

**Institut für Angewandte Materialien -
Elektrochemische Technologien**

Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer
Engesserstraße 13
76131 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer
Adenauerring 20b
76131 Karlsruhe

Name, Vorname:

Matrikelnummer:

E-Mail-Adresse:

Erreichte Punktzahl:

Note:

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	Σ
Punkte							
Max	8	8	8	8	8	8	48

Bitte beachten Sie:

- Zugelassene Hilfsmittel: Nicht-programmierbarer Taschenrechner, 1 Blatt (2 DIN A4 Seiten) eigene handschriftliche Notizen, ausgeteiltes Blatt (letzte Seite Ihrer Klausur) mit Konstanten-, Formel- und Integralsammlung.
- Maximal erreichbare Punktzahl: 48, zum Bestehen hinreichende Punktzahl: 24.
- Eckige Klammern am Aufgabenende geben die maximal erreichbaren Punkte je (Teil-)Aufgabe an.
- Prüfungsdauer: 120 min.
- Schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer. Blätter ohne Namen und Matrikelnummer können bei der Korrektur **keine** Berücksichtigung finden!
- Legen Sie Ihren Studierendenausweis während der Klausur bereit.
- Es werden nur Aufgaben gewertet, die auf vom KIT bereitgestelltem Papier bearbeitet wurden. Sollte Ihnen das ausgehändigte Papier nicht ausreichen, wenden Sie sich an die Betreuer.
- Es sind nur dokumentenechte Stifte zum Schreiben erlaubt (kein Bleistift und kein Rotstift!).

Fortsetzung auf der Rückseite!

-
- Versehen Sie jede Aufgabe, die Sie auf einem Zusatzblatt (weiter) bearbeiten, mit einem Hinweis. Sie erleichtern damit die Korrektur.
 - Begründungen, Erklärungen und ähnliches können in Stichworten verfasst werden.
 - Sofern nicht anders angegeben, ist der Rechenweg nachvollziehbar darzustellen.
 - Bei allen Rechnungen ist das Ergebnis bis auf die zweite signifikante Nachkommastelle anzugeben.
 - Skizzen sind grundsätzlich mit den notwendigen Beschriftungen zu versehen.

1. Grundlagen der Festkörperelektronik [8P]**Teil I: Wellenfunktionen und das freie Elektron [5P]**

- a) Die Wellenfunktion zur Beschreibung eines quantenmechanischen Teilchens darf komplexe Werte annehmen. Steht das im Widerspruch zu der physikalischen Tatsache, dass in der Natur nur reelle Messgrößen beobachtet werden können? (Begründung!) [1P]

- b) Was versteht man unter dem Superpositionsprinzip der Quantenmechanik? [1P]

c) Für das freie Elektron gilt:

$$\psi(x,t) = A \cdot e^{j(kx-\omega t)}$$

$$V(x,t) = 0$$

Leiten Sie die Dispersionsrelation für freie Elektronen aus der Schrödingergleichung her. [1,5P]

- d) Leiten Sie die Phasengeschwindigkeit v_p für ein freies Elektron im Vakuum her! Beginnen Sie mit der Betrachtung eines Punktes zeitlich konstanter Phase und setzen Sie am Ende das Ergebnis aus Aufgabenteil c) ein. [1,5P]

Teil II: Unschärfe [3P]

- e) Wie viele ebene Wellen müssen Sie mindestens überlagern, um eine exakt im Ortsraum lokalisierte Wellenfunktion zu erhalten? [1P]
- f) Berechnen Sie mit Hilfe des Impulsoperators den Impulserwartungswert $\langle \hat{p}(t) \rangle$ und das Impulserwartungswertquadrat $\langle \hat{p}^2(t) \rangle$ für ein freies Elektron. Bestimmen Sie damit die Unschärfe des Impulses $\Delta p = \sqrt{\langle \hat{p}^2(t) \rangle - \langle \hat{p}(t) \rangle^2}$. Bestimmen sie die Ortsunschärfe Δx mit Hilfe der Unschärferelation. [2P]

2. Elektronen in Potentialen [8P]**Teil I: Unendlicher Potentialtopf [4P]**

Ein dünner Halbleiterfilm der Dicke L ist zwischen zwei unendlich ausgedehnten, perfekten Isolatorschichten eingebracht. Betrachten Sie ein Elektron im Halbleiterfilm. Das Potential kann als Potentialtopf $V(x)$ mit

$$V(x) = \begin{cases} 0 & , 0 < x < L \\ \infty & , \text{sonst} \end{cases}$$

angenähert werden. Die Schichten seien in y - und z -Richtung unendlich ausgedehnt.

- a) Die Grundzustandsenergie des Elektrons beträgt $W_1 = 2,39 \text{ meV}$. Zeigen sie, dass der Halbleiter $12,5 \text{ nm}$ dick ist. Geben sie die Formel in der Form $L(W)$ an! [1,5P]
(Hinweis: Rechnen Sie mit der freien Elektronenmasse m_e .)

b) Das Elektron in diesem Potentialtopf soll durch Photonen vom Grundzustand in den 30. angeregten Zustand angeregt werden. Berechnen sie die Wellenlänge λ_{ph} der Photonen. In welchem spektralen Bereich sind diese einzuordnen (ultraviolettes, sichtbares, infrarotes Spektrum)? [1,5P]

c) Zeichnen Sie die Wellenfunktionen $\Psi_n(x)$ des Grundzustandes und des **zweiten angeregten Zustandes** und geben sie den jeweiligen Energieeigenwert an. [1P]

Teil II: Delta-Potential [4P]

Wir betrachten ein zeitunabhängiges Delta-Potential $V(x) = V_0 \cdot \delta(x)$. V_0 sei negativ, so dass sich die folgende skizzierte Situation ergibt. Es wird der gebundene Zustand mit $W < 0$ gesucht.

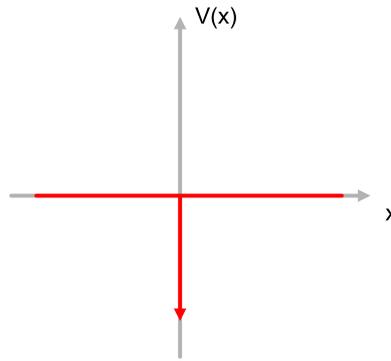


Abbildung 1: Delta-Potential

- d) Nehmen Sie für die Energie $W < 0$ an. Stellen Sie zunächst die Lösungsansätze der Schrödingergleichung und die Randbedingungen für $x \rightarrow \pm\infty$ auf. [1,5P]

-
- e) Nehmen sie an, dass Stetigkeit bei $x = 0$ vorliegt. Eine Annäherung des Delta-Potentials erfolgt durch $x = -\epsilon$ bis $x = \epsilon$ mit $\epsilon > 0$, wobei $\epsilon \rightarrow 0$. Es kann damit folgende Stetigkeitsbedingung abgeleitet werden:

$$\psi'(\epsilon) - \psi'(-\epsilon) = \frac{2m}{\hbar^2} \cdot V_0 \cdot \psi(0) \quad (1)$$

Bestimmen Sie die Wellenfunktion für $W < 0$. [2,5 P]

3. Intrinsische Halbleiterkristalle [8P]**Teil I: Kristalle [3,5P]**

- a) Wie viele Atome befinden sich in der Einheitszelle eines kubisch-flächenzentrierten (fcc) Kristallgitters mit zweiatomiger Basis? Zeichnen Sie die Gitterpunkte inklusive Basis eines solchen Kristallgitters in die vorgegebene Zeichnung in Abbildung 2 ein! Die Basis besteht aus zwei Atomen an den Stellen $\{(0,0,0), (\frac{1}{4}a, \frac{1}{4}a, \frac{1}{4}a)\}$ (Diamantgitter). [1,5P]

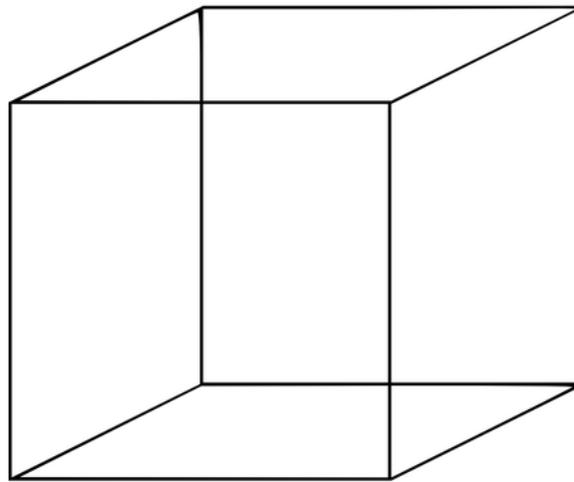


Abbildung 2: Vorlage für fcc-Gitter

- b) Wir betrachten einen Germanium-Halbleiter entsprechend Aufgabe a), der in einem fcc-Gitter mit zweiatomiger Basis kristallisiert. Er hat eine Dichte von $\rho = 5,323 \frac{g}{cm^3}$ und eine molare Masse von $M = 72,61 \frac{g}{mol}$. Berechnen Sie die Gitterkonstante a ! [1P]

-
- c) Nennen Sie mindestens zwei charakteristische, elektrische Eigenschaften eines Halbleiters! [1P]

Teil II: Zustandsdichten und Absorption [4,5P]

- d) Betrachten wir nun eine intrinsischen, dreidimensionalen Halbleiter mit identischen effektiven Massen für Elektronen und Löcher bei Raumtemperatur. Zeichnen Sie folgende Zusammenhänge in die dafür vorgesehenen Schaubilder in Abbildung 3: [1,5P]

- Energie über der Zustandsdichte für Elektronen und Löcher $g_L(W)$ und $g_V(W)$
- Energie über Fermi-Dirac-Verteilung $f_{FD}(W)$
- Energie über Ladungsträgerdichte $n(W)$ und $p(W)$

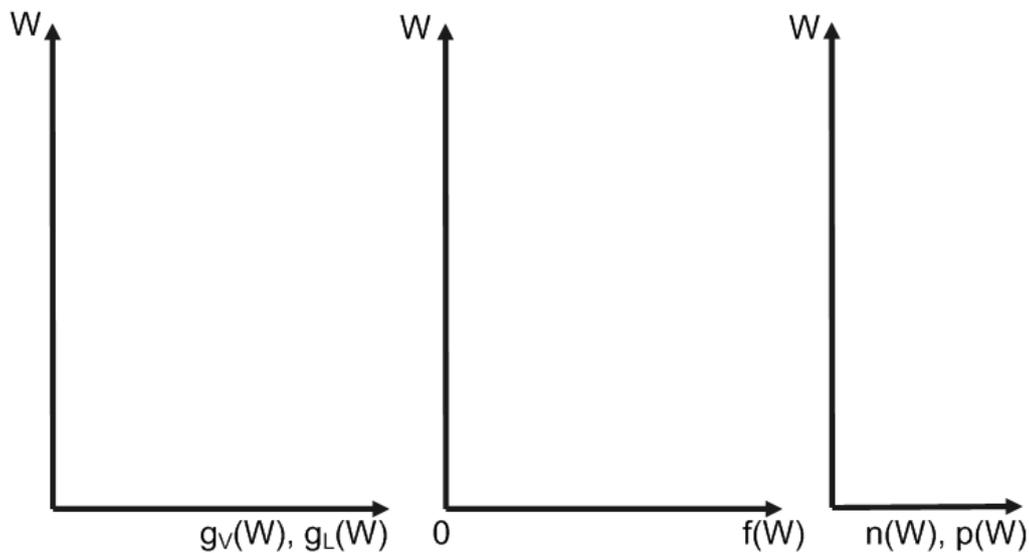


Abbildung 3: Energie über Zustandsdichte, Fermi-Dirac-Verteilung und Ladungsträgerdichte

- e) Berechnen Sie für den gleichen Halbleiter die Ladungsträgerdichte n eines Energieniveaus W_0 , welches 0.5 eV oberhalb des Fermi-Niveaus W_F liegt. Die Leitungsbandkante W_L liegt 0.11 eV oberhalb des Fermi-Niveaus. Gehen Sie von einer effektiven Zustandsdichte von $N_L = 8.87 \cdot 10^{24} \frac{1}{\text{m}^3}$ aus. [2P]

- f) Sie wollen nun einen Germanium-Detektor bauen, der 82,3 Prozent der einfallenden Strahlung mit der Wellenlänge 1248,82 nm absorbiert. In Abbildung 4 ist der Absorptions-Koeffizient verschiedener Halbleiter dargestellt in Abhängigkeit der Wellenlänge. Wie dick muss der Detektor sein? (Hinweis: Für die Absorption im Halbleiter gilt das Lambert-Beersche Gesetz: $I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot x}$) [1P]

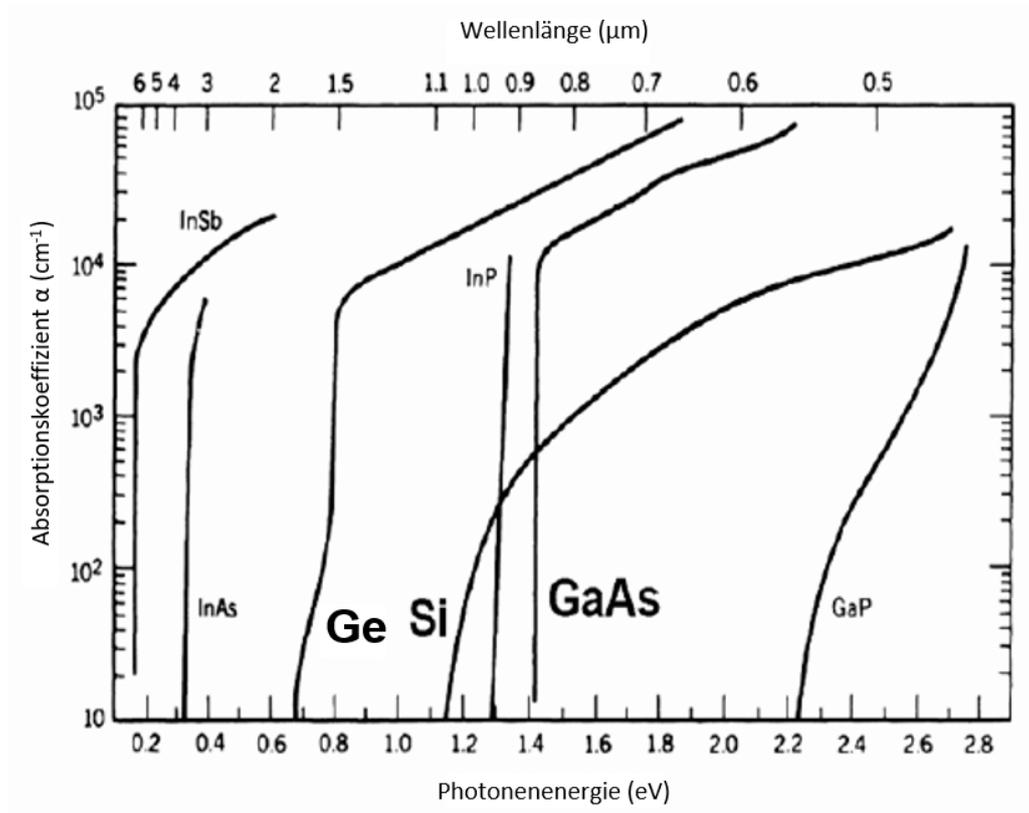


Abbildung 4: Absorptionskoeffizienten verschiedener Halbleiter

4. Dotierte Halbleiter und der pn-Übergang [8P]

Teil I: Dotierte Halbleiter [5P]

- a) Was versteht man unter Dotierung? Welchen Einfluss hat das auf einen Halbleiter und dessen Eigenschaften? [1P]
- b) Geben Sie die Formel für die Leitfähigkeit σ in Abhängigkeit der Ladungsträgerdichten n und p an. [0,5P]
- c) Gegeben sei der Graph in Abbildung 5, in dem die Ladungsträgerkonzentration eines Halbleiters in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt ist. Handelt es sich hierbei um einen intrinsischen oder dotierten Halbleiter? Unterteilen Sie den Graphen in Bereiche und beschriften Sie diese. [1,5P]

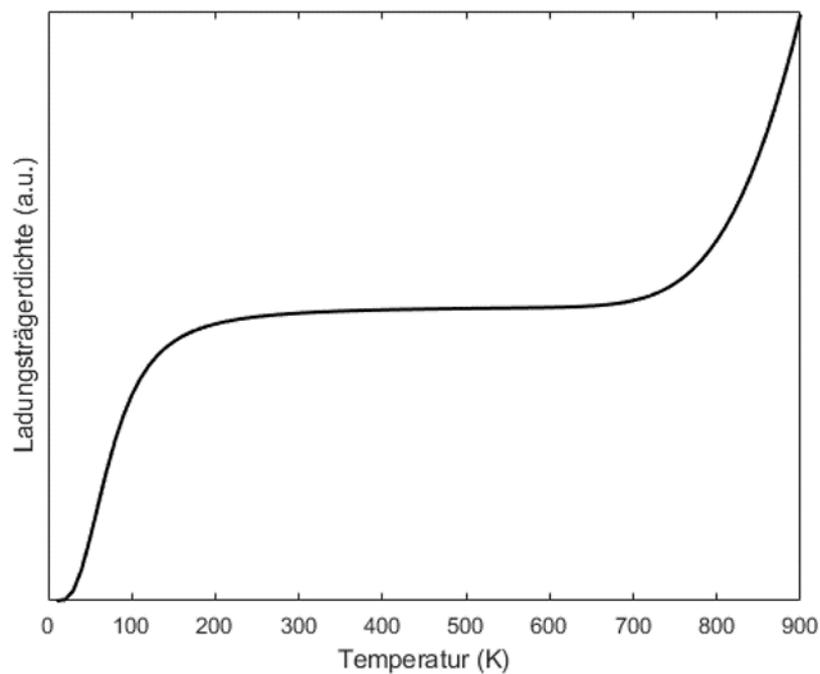


Abbildung 5: Ladungsträgerkonzentration im Halbleiter in Abhängigkeit von der Temperatur.

d) Die Fermi-Dirac-Verteilung ist durch die folgende Formel $f(W,T)$ gegeben:

$$f(W,T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W-W_F}{k_B T}\right)}$$

In einem intrinsischen Halbleiter liegt das Fermi-Level W_F genau mittig zwischen Valenz- und Leitungsband. Dies ist für $T = 300K$ dargestellt in Abbildung 6. Dabei gehen wir davon aus, dass in Valenz- und Leitungsband die effektiven Massen der Ladungsträger identisch sind.

Wie verändert sich die Funktion, wenn ein n-dotierter Halbleiter betrachtet wird? Skizzieren Sie die neue Kurve in das bestehende Diagramm in Abbildung 6. [0,5P].

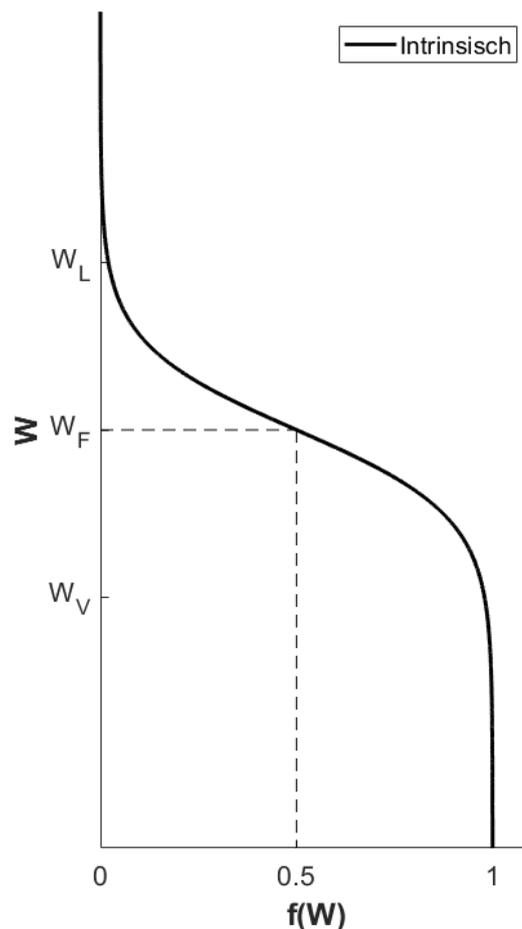


Abbildung 6: Fermi-Dirac Funktion für $T = 300 K$ im Falle eines intrinsischen Halbleiters

- e) Die Ionisierungsenergie eines Akzeptors im Germanium liege 20 meV oberhalb des Valenzbandes. Berechnen Sie die Lage des Fermi-niveaus W_F relativ zum Akzeptorniveau W_A ($W_F - W_A$) und zum Valenzband W_V ($W_F - W_V$) und geben Sie diese jeweils in eV an. Gehen Sie von $T = 300\text{ K}$, $n_A = 5 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ und $N_V = 9,3 \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ aus. (Hinweis: Es gilt Störstellenerschöpfung.) [1,5P]

Teil II: Der pn-Übergang [3P]

Es werden ein p-dotiertes und ein n-dotiertes Stück Silizium in Kontakt gebracht, welche einen pn-Übergang formen. Die Dotierungen der einzelnen Gebiete sind aus Abbildung 7 ersichtlich. Für die Raumladungszone (RLZ) gelte die Schottky-Näherung.

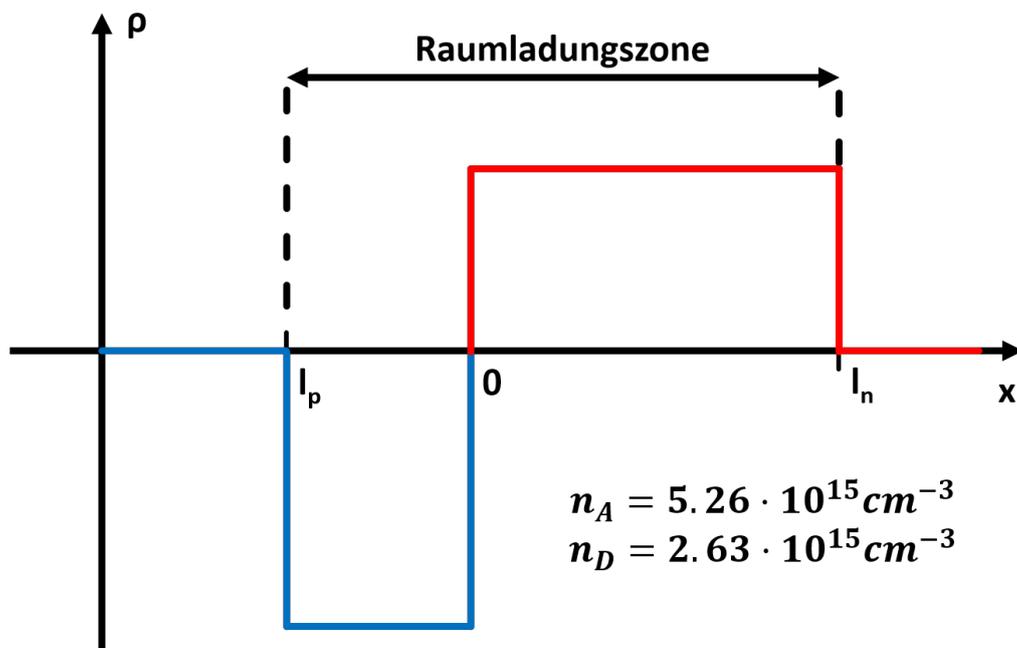


Abbildung 7: Raumladungen am pn-Übergang mit den zugehörigen Dotierstärken.

- f) Es wird nun eine externe Vorspannung U an den pn-Übergang (Diode) angelegt. Skizzieren Sie die Banddiagramme für den Fall
- einer Spannung in Durchlassrichtung und
 - einer Spannung in Sperrichtung. [1P]

Name:

Matrikel-Nr.:

-
- g) Bestimmen Sie den Wert der Diffusionsspannung U_D , die sich im pn-Übergang ausgebildet, sobald die Halbleiter im Kontakt sind. Die bekannten Werte bei Raumtemperatur für diesen Fall sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Beschreibung	Phy. Größe	Wert	Einheit
Ausdehnung RLZ im p-Bereich	l_p	231,76	nm
Akzeptordichte	n_A	$5,26 \cdot 10^{15}$	cm^{-3}
Donatordichte	n_D	$2,63 \cdot 10^{15}$	cm^{-3}
Bandlücke	W_G	1,1	eV
Relative Permittivität	ϵ_r	11,9	

Tabelle 1: Bekannte physikalische Größen

Nutzen Sie die für die Lösung des Problems die Stetigkeit des Potentials $\Phi(x)$ an der Stelle $x = 0$. [1,5P]

-
- h) Berechnen Sie die Ausdehnung l_{tot} der gesamten Raumladungszone im p und n Bereich. Sollten Sie die vorherige Teilaufgabe nicht gelöst haben, so können Sie von $U_D = 0,7V$ ausgehen. [0,5P]



5. Dielektrika [8P]

a) Prüfen Sie jede der folgenden Aussagen einzeln. Kreuzen Sie alle korrekten Aussagen an. [2P]

- In Edelgasen tritt ausschließlich Elektronenpolarisation auf.
- Temperaturänderungen haben keinen Einfluss auf die Polarisation in Ferroelektrika.
- Elektronenpolarisation und Ionenpolarisation weisen im Wechselfeld Resonanzverhalten auf.
- Bei permanenten Dipolen tritt generell keine Orientierungspolarisation auf.

b) Zur Bestimmung der Dielektrizitätszahl ϵ_r einer Polyesterprobe wird die in Abbildung 8 dargestellte Schaltung (Sawyer-Tower-Schaltung) realisiert: Zwei baugleiche Plattenkondensatoren werden dazu in Reihe geschaltet. In einen davon wird die Polyesterprobe eingebracht. Der zweite Kondensator dient als Referenz und ist luftleer. Berechnen Sie die Dielektrizitätszahlen ϵ_r und die elektrischen Suszeptibilitäten χ_e des Dielektrikums für beide angegebenen Temperaturen $T_1 = 298 \text{ K}$ und $T_2 = 498 \text{ K}$ und tragen Sie diese in Tabelle 2 ein. [2P]

Hinweis: In Tabelle 2 ist die am Referenzkondensator gemessene Spannung U_{Mess} für zwei verschiedene Temperaturen bei einer angelegten Gleichspannung von $U_0 = 7 \text{ V}$ gegeben.

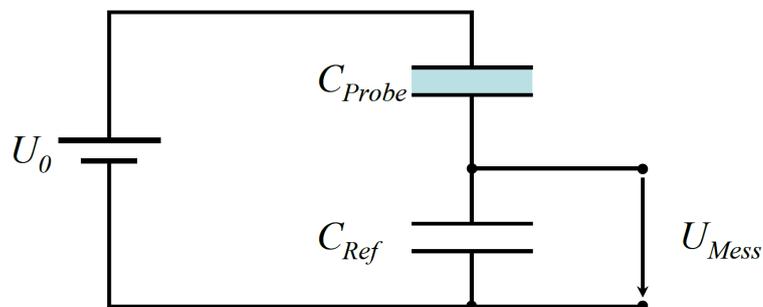


Abbildung 8: Sawyer-Tower-Schaltung

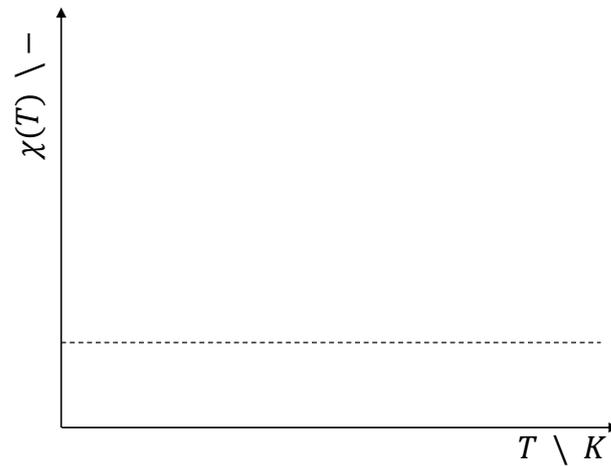
i	T / K	U_{Mess} / V	$\epsilon_r / -$	$\chi_e / -$
1	298	5,5		
2	498	5,0		

Tabelle 2: U_{Mess} bei unterschiedlichen Temperaturen.



- c) Das Dielektrikum aus Aufgabe b) wird nun durch einen Quarzkristall mit piezoelektrischen Eigenschaften ersetzt. Im unbelasteten Zustand ($F = 0$) wird eine Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 4$ gemessen. Der Kondensator C_{Probe} wird nun aus dem Aufbau ausgebaut. Im Leerlauf ($D=0$) wird eine Kraft $F = 70$ N auf den Quarzkristall ausgeübt und eine Spannung von -3 V gemessen. Bestimmen Sie die piezoelektrische Ladungskonstante d_p , des Kristalls. Der Abstand der Kondensatorplatten beträgt 5 mm, die Fläche des Kondensators 20 cm². Nehmen Sie an, dass die Dielektrizitätszahl konstant bleibt. [1 P]

-
- d) Statt der Polyester-Probe wird in den Aufbau aus Aufgabe b) der Probenkondensator mit einem polaren Gas gefüllt. Es sollen nur Elektronenpolarisation und Orientierungspolarisation betrachtet werden. Zeichnen sie qualitativ den Verlauf der Suszeptibilität $\chi(T)$ über die Temperatur in das unten abgebildete Diagramm. Markieren und benennen Sie mögliche Grenzwerte. [1,5P]



- e) Sie vermessen ein Dielektrikum mit einer hohen Suszeptibilität ($\chi_e \gg 3$). Was müssen Sie hierbei beachten? Erklären Sie den Begriff Fernfeld (Lorentzfeld) anhand einer Zeichnung oder in Worten. Welche Beziehung besteht zwischen der Polarisierbarkeit α und der Suszeptibilität χ ? [1,5P]



6. Ionenleitung und Grenzflächen [8P]

a) Prüfen Sie jede der folgenden Aussagen einzeln. Kreuzen Sie an falls die entsprechende Aussage korrekt ist. [2P]

- Die Ionenleitfähigkeit von Flüssigelektrolyten steigt mit sinkender Viskosität.
- In Polymerelektrolyten findet Ionenleitung ausschließlich über den Vehikel-Mechanismus statt.
- Eine Temperaturerhöhung führt in kristallinen Festkörpern zu einer Verbesserung der Ionenleitfähigkeit.
- Die Anzahl an Defekten in kristallinen Festkörpern hat keinen Einfluss auf deren Ionenleitfähigkeit.

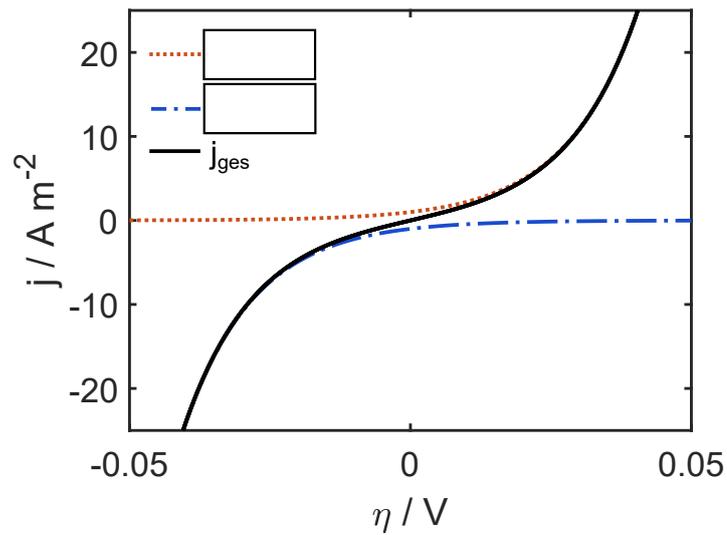
b) Eine ausschließlich für Kationen durchlässige Membran der Dicke $x = 200 \mu\text{m}$ trennt zwei wässrige Lösungen A und B. In der linken Lösung A befindet sich nur 2 mol/L dissoziierte Salpetersäure (HNO_3) in der rechten Lösung B nur 1 mol/L dissoziiertes Calciumchlorid (CaCl_2). Berechnen Sie die Diffusionsstromdichte der Protonen unter der Annahme, dass Stofftransport in der Membran ausschließlich entlang eines konstanten Konzentrationsgradienten stattfindet. Der Diffusionskoeffizient $D_{\text{H}^+} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ sei für $T = 300 \text{ K}$ gegeben. Wie viele Ca^{2+} -Ionen werden im Vergleich zu den H^+ auf die andere Seite transportiert und wie ist das Verhältnis der Gesamtstromdichten (Migration und Diffusion) der beiden Kationen-Typen? [2P]

Hinweis: Die Dissoziationsreaktionen lauten:



-
- c) Materialdefekte in kristallinen Festkörpern ermöglichen die Leitung von Sauerstoffionen O^{2-} . Die Mobilität sei für eine Temperatur von $T = 800 \text{ °C}$ mit $\mu_{ion} = 8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{V s}$ gegeben. Berechnen Sie den Diffusionskoeffizienten der Ionen. [1,5P]

- d) Ordnen Sie die bei den unten gezeigten Reaktionen zu, ob es sich um eine Oxidation oder Reduktion handelt. Ordnen Sie zudem im Diagramm der Stromdichte nach Butler-Volmer die Anteile der Oxidation und der Reduktion zu. Welche der beiden Reaktionen findet dabei an der Anode statt? [2,5P]



Konstanten

Planck'sches Wirkungsquantum	h	$= 6,63 \cdot 10^{-34}$	J _s
	\hbar	$= \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$	J _s
Avogadro-Konstante	N_A	$= 6,02 \cdot 10^{23}$	mol ⁻¹
Bohr'scher Radius	a_0	$= 5,29 \cdot 10^{-11}$	m
Elementarladung	e	$= 1,6 \cdot 10^{-19}$	As
Atomare Masseneinheit	u	$= 1,66 \cdot 10^{-27}$	kg
Elektronenmasse	m_e	$= 9,11 \cdot 10^{-31}$	kg
Protonenmasse	m_p	$= 1,67 \cdot 10^{-27}$	kg
Neutronenmasse	m_n	$= 1,67 \cdot 10^{-27}$	kg
Dielektrizitätskonstante	ϵ_0	$= 8,85 \cdot 10^{-12}$	As/Vm
Permeabilitätskonstante	μ_0	$= 4\pi \cdot 10^{-7}$	Vs/Am
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c	$= 3,0 \cdot 10^8$	m/s
Boltzmann-Konstante	k_B	$= 1,38 \cdot 10^{-23}$	J/K
Gaskonstante	R	$= 8,314$	J/(mol K)
Faraday-Konstante	F	$= 96485$	As/mol
Kreiszahl	π	$= 3,14$	
Euler'sche Zahl	e	$= 2,72$	
Imaginäre Einheit	j	$= \sqrt{-1}$	

Konversion von Einheiten

Atomare Masseneinheit → Kilogramm	$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Elektronenvolt → Joule	$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Fortsetzung auf der Rückseite!

Formeln und Integrale

$$\exp\{jkx\} + \exp\{-jkx\} = 2 \cos(kx)$$

$$\exp\{jkx\} - \exp\{-jkx\} = 2j \sin(kx)$$

$$\int (\sin ax)^2 dx = \frac{1}{2}x - \frac{1}{4a} \sin 2ax$$

$$\int (\cos ax)^2 dx = \frac{1}{2}x + \frac{1}{4a} \sin 2ax$$

$$\int \sin ax \cos ax dx = \frac{1}{2a} (\sin ax)^2$$

$$\int x (\sin ax)^2 dx = \frac{1}{4}x^2 - \frac{1}{4a}x \sin 2ax - \frac{1}{8a^2} \cos 2ax$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x e^{-ax^2} dx = 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^3 e^{-ax^2} dx = 0$$

$$\int x^2 e^{ax} dx = e^{ax} \left(\frac{x^2}{a} - \frac{2x}{a^2} + \frac{2}{a^3} \right)$$

$$\int_0^{\infty} e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

$$\int_0^{\infty} x e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a}$$

$$\int_0^{\infty} x^2 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{4a} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

$$\int_0^{\infty} x^3 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a^2}$$

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}} \quad (a > 0, n = 0, 1, 2, \dots)$$

Formeln pn-Übergang:

$$n(W,T) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{N_L}{k_B T} \sqrt{\frac{W - W_L}{k_B T}} e^{-\frac{W - W_F}{k_B T}}$$

$$p(W,T) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{N_V}{k_B T} \sqrt{\frac{W_V - W}{k_B T}} e^{-\frac{W_F - W}{k_B T}}$$

$$n_{th} = N_L \cdot e^{-\frac{W_L - W_F}{k_B T}}$$

$$p_{th} = N_V \cdot e^{-\frac{W_F - W_V}{k_B T}}$$

$$N_{L,V} = 2 \left(\frac{2\pi m_{e,h} k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Raumladungszone *p* - Bereich

$$\rho = \frac{en_A}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$\Phi(x) = \frac{en_A}{2\epsilon\epsilon_0} (x + l_p)^2$$

$$E(x) = -\frac{en_A}{\epsilon_r \epsilon_0} (x + l_p)$$

Raumladungszone *n* - Bereich

$$\rho = -\frac{en_D}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$\Phi(x) = -\frac{en_D}{2\epsilon\epsilon_0} (l_n - x)^2 + U_D$$

$$E(x) = \frac{en_D}{\epsilon_r \epsilon_0} (x - l_n)$$

13 III. Hauptgruppe	14 IV. Hauptgruppe	15 V. Hauptgruppe
5 10,81 2,0 B Bor	6 12,01 2,5 C Kohlenstoff	7 14,007 3,0 N Stickstoff
13 26,98 1,5 Al Aluminium	14 28,09 1,8 Si Silicium	15 30,97 2,1 P Phosphor
31 69,72 1,6 Ga Gallium	32 72,59 1,8 Ge Germanium	33 74,92 2,0 As Arsen
49 114,82 1,7 In Indium	50 118,69 1,8 Sn Zinn	51 121,75 1,9 Sb Antimon
81 204,38 1,8 Tl Thallium	82 207,2 1,8 Pb Blei	83 208,98 1,9 Bi Bismut