

**Lichttechnisches Institut**

Karlsruher Institut für Technologie  
Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer  
Engesserstraße 13  
76131 Karlsruhe

**Festkörperelektronik**

Klausur  
25. Februar 2010

Name, Vorname: .....

Matrikelnummer: .....

E-Mail-Adresse: .....

Erreichte Punktzahl: .....

Note: .....

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	$\Sigma$
Punkte								
Max	8	18	8	8	9	7	7	65

Bitte beachten Sie:

- Zugelassene Hilfsmittel: Nicht-programmierbarer Taschenrechner, 1 Blatt (2 Seiten) eigene handschriftliche Notizen, ausgeteilte Formelsammlung.
- Maximal erreichbare Punktzahl: 65, zum Bestehen hinreichende Punktzahl: 35.
- In Klammern angegebene Zahlen am Aufgabenende sind die erreichbaren Punkte je (Teil-)Aufgabe.
- Prüfungsdauer: 120 min.
- Bitte schreiben Sie auf **jedes** Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer. Blätter ohne Namen und Matrikelnummer können bei der Korrektur **keine** Berücksichtigung finden!
- Es werden nur Aufgaben gewertet, die auf von der Universität gestelltem Papier bearbeitet wurden. Sollte Ihnen das ausgehändigte Papier nicht ausreichen, wenden Sie sich an die Betreuer.
- Versehen Sie bitte jede Aufgabe, die Sie auf einem Zusatzblatt (weiter) bearbeiten, mit einem Hinweis. Sie erleichtern damit die Korrektur.
- Bitte legen Sie Ihren Studierendenausweis und Ihre Immatrikulationsbescheinigung während der Klausur bereit.
- Bitte nur mit dokumentenechten Stiften schreiben. Verwenden Sie insbesondere keinen Bleistift und schreiben Sie nicht in roter Farbe.
- Bei allen Rechnungen ist das Ergebnis bis auf die zweite signifikante Nachkommastelle und mit den entsprechenden Einheiten anzugeben.
- Skizzen sind grundsätzlich mit den notwendigen Beschriftungen zu versehen.

---

## 1. Das freie Elektron

- a) In einem Elektronenmikroskop werden Elektronen mit einer de-Broglie Wellenlänge von  $\lambda = 10^{-11}$  m verwendet. Welche kinetische Energie besitzt ein einzelnes Elektron? Die nicht-relativistische Näherung sei gültig! [2P]

$$W = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2}{2m_e} = 2.41 \text{ fJ} = 15.04 \text{ keV}$$

- b) Freie Elektronen können beschrieben werden als ebene Welle,

$$\psi(x, t) = A \exp(j(kx - \omega t)). \quad (1)$$

Berechnen Sie mit Hilfe des Impulsoperators den Impulserwartungswert  $\langle \hat{p}(t) \rangle$  für ein freies Elektron. [3P]

$$\begin{aligned} \langle \hat{p}(t) \rangle &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \hat{p} \psi(x, t) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx} \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) (-j\hbar \frac{\partial}{\partial x}) \psi(x, t) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx} \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) (-j^2 \hbar k) \psi(x, t) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx} \\ &= \hbar k \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx} \\ &= \hbar k \end{aligned}$$

- c) Für den Erwartungswert des Impulsoperatorquadrats gilt beim freien Elektron  $\langle \hat{p}^2(t) \rangle = \hbar^2 k^2$ . Berechnen Sie die Unschärfe des Impulses,  $\Delta p = \sqrt{\langle \hat{p}^2(t) \rangle - \langle \hat{p}(t) \rangle^2}$ . Falls Sie Aufgabe 1b) nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $\langle \hat{p}(t) \rangle = \hbar k$ . Was folgt daraus für die Ortsunschärfe  $\Delta x$ ? [3P]

Mit den angegebenen Werten folgt unmittelbar:

$$\Delta p = \sqrt{\langle \hat{p}^2(t) \rangle - \langle \hat{p}(t) \rangle^2} = 0$$

Es gilt die Unschärferelation:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Damit folgt

$$\Delta x \rightarrow \infty$$

Da der Impuls exakt bestimmt ist, ist der Ort also maximal unbestimmt.

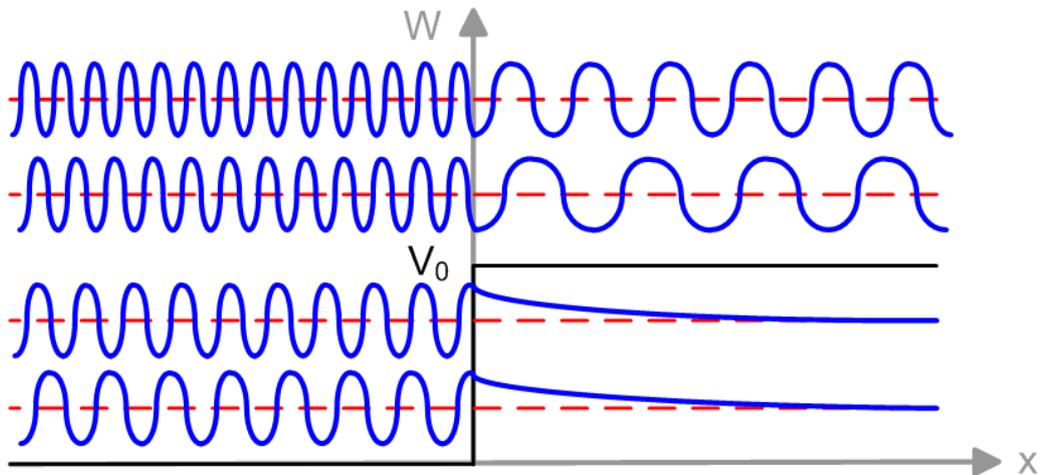
## 2. Endliche Potentialstufe

Gegeben sei das Potential

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ V_0 & \text{für } x > 0 \end{cases} \quad (2)$$

einer endlichen Potentialstufe der Höhe  $V_0 > 0$ .

- a) Skizzieren Sie  $V(x)$ . [2P]



- b) Zeichnen sie zwei Eigenfunktionen für  $W < V_0$  und zwei Eigenfunktionen für  $W > V_0$  ein. Worin unterscheiden sich die Wellenfunktionen für  $W < V_0$  und  $W > V_0$  qualitativ? [3P]

*Die Lösungen mit  $W > V_0$  haben die Form von ebenen Wellen und sind daher unendlich ausgedehnt. Außerdem gibt es hier zu jeder Energie eine Lösung. Die Lösungen für  $W < V_0$  dagegen fallen in der Barriere exponentiell ab.*

- c) Welche Gleichung liefert die Lösung für die elektronischen Zustände in einem solchen System mit  $W < V_0$ ? Machen Sie Lösungsansätze für die zwei Bereiche mit konstantem Potential und stellen Sie die zur Lösung nötigen Rand- und Nebenbedingungen auf. Setzen Sie die Ansätze in die erhaltenen Bedingungen ein und lösen Sie das Gleichungssystem! [9P]

*Die stationäre Schroedingergleichung liefert die Energieeigenwerte dieses Problems. In unserem Fall zerfällt das Problem in zwei Einzelprobleme mit jeweils konstantem Potential. Damit ergibt sich:*

$$\text{Gebiet 1: } \psi_1(x) = A \exp(-jk_1x) + B \exp(jk_1x)$$

$$\text{Gebiet 2: } \psi_2(x) = C \exp(-\kappa_2x) + D \exp(\kappa_2x)$$

*Hier wurde schon ausgenutzt, dass die Wellenzahlen in der Barriere für  $W < V_0$  imaginär sind und so die oszillierenden komplexen Exponentialfunktionen in reelle*

Exponentialfunktionen verwandeln. Daran knüpft die Forderung an, dass im Gebiet 2 die Lösungen exponentiell abfallen müssen, weil sonst die Wellenfunktion weit weg von der Barriere divergiert. Wir folgern  $D = 0$ . Die restlichen drei Variablen können wir mit Hilfe der Stetigkeitsbedingung am Übergang bestimmen.

$$\text{Nebenbedingung 1: } \psi_1(x=0) = \psi_2(x=0)$$

$$\text{Nebenbedingung 2: } \psi_1'(x=0) = \psi_2'(x=0)$$

Damit haben wir zwei unabhängige Nebenbedingungen, um zwei Konstanten zu bestimmen. Einsetzen liefert:

$$1: A + B = C$$

$$2: A(-jk_1) + B(jk_1) = C(-\kappa_2)$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ in } 2: B &= \frac{jk_1 A - \kappa_2 C}{jk_1} \\ &= A - \frac{\kappa_2}{jk_1}(A + B) \\ &= A \frac{jk_1 - \kappa_2}{jk_1 + \kappa_2} \end{aligned}$$

Es folgt also für die Wellenfunktion

$$\text{Gebiet 1: } \psi_1(x) = A \exp(-jk_1 x) + A \frac{jk_1 - \kappa_2}{jk_1 + \kappa_2} \exp(jk_1 x)$$

$$\text{Gebiet 2: } \psi_2(x) = A \frac{2jk_1}{jk_1 + \kappa_2} \exp(-\kappa_2 x)$$

- d) Erklären Sie in einem Satz, wie sich das Aussehen der Lösungen verändert, wenn  $V_0 \rightarrow \infty$ . [1P]

Mit unendlich hohen Wänden wird die endliche Barriere zur unendlichen Barriere. Dann ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit in der Barriere Null, die Wellenfunktion hat an der Grenze einen Knoten.

- e) Es sei nun

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ V_0 & \text{für } 0 < x < L \\ 0 & \text{für } L < x \end{cases} \quad (3)$$

Berechnen Sie den Wert der Wellenfunktion  $\psi(x)$  am Endpunkt  $x = L$  der Barriere mit Hilfe der WKB Näherung

$$\psi(L) = \psi(0) \exp\left(-\int_0^L \frac{\sqrt{(2m^*(V(x) - W))}}{\hbar} dx\right). \quad (4)$$

---

Es gelte  $\psi(0) = 1$ ,  $m^* = m_e$ ,  $L = 1$  nm,  $V_0 = 2,0$  eV,  $W = 1,9$  eV.[3P]

Einsetzen des Potentials liefert:

$$\begin{aligned}\psi(L) &= \psi(0) \exp\left(-\int_0^L \frac{\sqrt{(2m^*(V_0 - W))}}{\hbar} dx\right) \\ &= \exp\left(-\frac{\sqrt{(2m^*(V_0 - W))}}{\hbar} L\right) \\ &\approx 0.2\end{aligned}$$

### 3. Zustandsdichte

- a) Beschreiben Sie, was man unter dem Begriff „Zustandsdichte“ versteht! [2P]

Der Begriff Zustandsdichte bezieht sich auf eine Dichte pro Energieintervall. Das heißt, die Zustandsdichte gibt an, wie viele erlaubte Zustände in einem System in einem infinitesimalen Gebiet zwischen  $W$  und  $W + dW$  auftreten. Meist wird die Zustandsdichte auf das Volumen des Systems normiert, d.h. wir haben es mit einer Größe der Einheit «Zustände pro Energie und pro Volumen» zu tun. Wir werden im Rahmen dieser Vorlesung stets von der Zustandsdichte für Elektronen sprechen, man kann aber auch für andere (Quasi-)Teilchen Zustandsdichten bestimmen, z.B. für die Quanten der Gitterschwingungen, die sogenannten Phononen.

- b) Berechnen Sie die Zustandsdichte  $g(W)$  für einen zweidimensionalen Halbleiter in parabolischer Näherung. Gehen Sie dazu von einem zweidimensionalen  $k$ -Raum aus! [6P]

Wie in drei Dimensionen betrachten wir die Zustände im  $k$ -Raum. Periodische Randbedingungen liefern erlaubte Wellenzahlen der Art  $k_i = 2n_i\pi/L$ , wobei  $L$  die Länge und Breite des Kristalls ist. Der Abstand zwischen zwei Punkten im  $k$ -Raum ist also  $2\pi/L$ . In Abbildung 1 sind die Zustände im zweidimensionalen  $k$ -Raum durch Kreuze markiert, exemplarisch ist ein erlaubter Gitterpunkt herausgegriffen. Nun

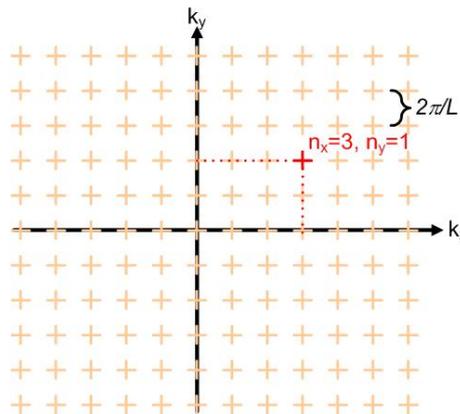


Abbildung 1: Karte möglicher Zustände eines 2D-Systems im  $k$ -Raum

betrachten wir die Dispersionsrelation. In Parabelnäherung gilt erneut:

$$W = \frac{\hbar^2 |\vec{k}|^2}{2m} = \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m} \quad (5)$$

Durch Umstellen erhalten wir daraus:

$$k_x^2 + k_y^2 = \frac{2mW}{\hbar^2} \quad (6)$$

Diese Gleichung beschreibt einen Kreis im  $k$ -Raum, der den Radius  $k_R = \sqrt{\frac{2mW}{\hbar^2}}$  hat. Wir können diesen Kreis also in unseren  $k$ -Raum einzeichnen. Alle Punkte, die

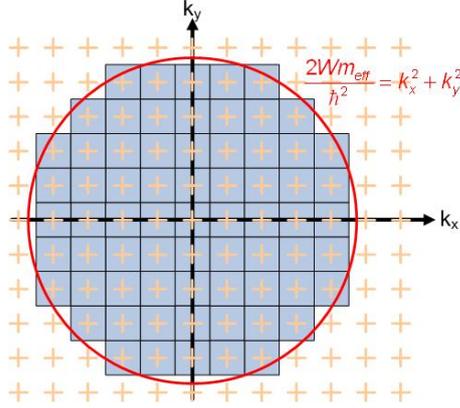


Abbildung 2: Karte möglicher Zustände eines 2D-Systems im  $k$ -Raum: Zustände mit einer Energie  $W_k < W$  sind durch blaue Quadrate markiert und befinden sich innerhalb eines Kreises mit dem Radius  $k_R = \sqrt{\frac{2mW}{\hbar^2}}$ .

auf seinem Umfang liegen, bezeichnen Zustände mit gleicher Energie, somit haben alle Zustände innerhalb des Kreises eine kleinere Energie als diese.

Um zur gesuchten Zustandsdichte zu kommen, zählen wir nun die Zustände mit einer Energie kleiner  $W$ . Das kann man tun, indem man die Fläche des Kreises zur Energie  $W$  im  $k$ -Raum mit der Fläche eines Zustands vergleicht. Da zwischen zwei Zuständen immer der gleiche Abstand liegt, beträgt die  $k$ -Fläche eines Zustands

$$F_{\text{Zustand}} = \frac{4\pi^2}{L^2}, \quad (7)$$

wobei  $L$  die Länge des quadratischen Kristalls ist. Nun schauen wir, wie in Abbildung 2 gezeigt, wie viele Zustände  $N$  in den Kreis zur Energie  $W$  passen.

$$N(W) = \frac{F_{\text{Kreis}}}{F_{\text{Zustand}}} = \frac{\pi k_R^2}{\frac{4\pi^2}{L^2}} = \frac{\pi 2mWL^2}{4\hbar^2\pi^2} = \frac{mWL^2}{2\hbar^2\pi} \quad (8)$$

Wir haben nun einen Ausdruck für die Anzahl der Zustände bis zu einer Energie  $W$  gefunden. Der gesuchte Ausdruck soll jedoch die Anzahl der Zustände in einem Energieintervall, nicht die Zustände mit einer Energie kleiner als  $W$  angeben. Diese Information können wir erhalten, indem wir den Zuwachs des Ausdrucks für  $N$  mit der Energie betrachten. Mathematisch erhalten wir diesen als Ableitung von  $N$  nach  $W$ :

$$D(W) = \frac{dN(W)}{dW} = \frac{mL^2}{2\hbar^2\pi} \quad (9)$$

$D(W)$  beschreibt die Anzahl an Zuständen pro Energieintervall. Zu guter Letzt müssen wir diese nun noch auf die Fläche des Kristalls ( $L^2$ ) normieren. Außerdem sollten wir beachten, dass wir bisher den Spin nicht in die Überlegungen einbezogen haben.

Somit kann jeder Zustand von zwei Elektronen besetzt werden. Letztlich kommen wir zu:

$$g(W)_{2D} = 2 \frac{1}{F} D(W) = \frac{m}{\hbar^2 \pi} \quad (10)$$

Die Zustandsdichte ist also **konstant**.

#### 4. Bandstruktur

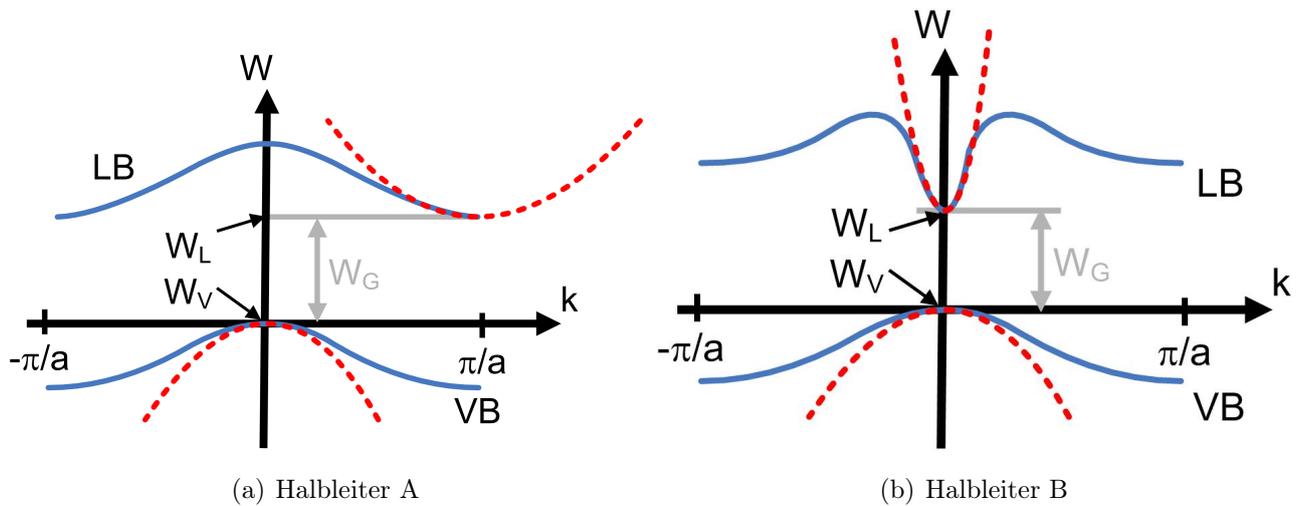


Abbildung 3: Eindimensionale schematische Darstellung der Bandstrukturen zweier Halbleiter.

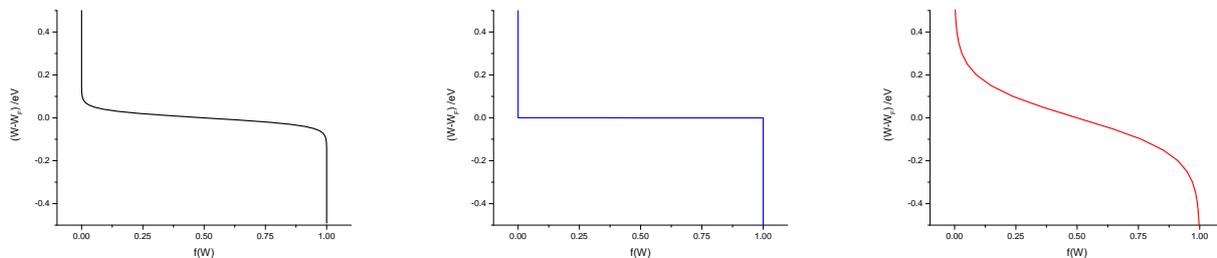
In Abbildung 3 sind idealisierte Bandstrukturen zweier Halbleiter gegeben.

- Beschriften Sie in den Abbildungen 3(a) und 3(b) jeweils Valenzband und Leitungsband. [2P]
- Tragen Sie in die Abbildungen 3(a) und 3(b) jeweils die Energie der Bandlücke  $W_g$  ein. Bei welchem der Halbleiter handelt es sich um einen direkten, bei welchem um einen indirekten? [2P]
- Skizzieren Sie in den Abbildungen 3(a) und 3(b) jeweils parabolische Näherungen im Valenzbandmaximum und im Leitungsbandminimum. [2P]
- Die parabolische Näherung für das Leitungsband sei gegeben als  $W_L(k) = +A \cdot k^2$ , wobei  $A = \frac{\hbar^2}{0,2m_e}$ . Berechnen Sie die effektive Masse der Elektronen im Leitungsband. [2P]

$$m_{\text{eff}} = \hbar^2 \frac{1}{\partial^2 W / \partial k^2} = \hbar^2 \frac{1}{2A} = 0,1 m_e = 9,1 \cdot 10^{-32} \text{ kg}$$

## 5. Leitfähigkeit

- a) In Abbildung 4 ist die Fermi-Dirac-Funktion für Temperaturen von  $T = 0$  K,  $T = 200$  K und  $T = 1000$  K aufgetragen. Ordnen Sie die Temperaturen den Verteilungen zu! [2P]



(a)  $T = \dots\dots\dots$

(b)  $T = \dots\dots\dots$

(c)  $T = \dots\dots\dots$

Abbildung 4: Fermi-Dirac-Verteilung für verschiedene Temperaturen

(a)  $T = 200$  K, (b)  $T = 0$  K, (c)  $T = 1000$  K

- b) In einem Indium-Arsenid Kristall (InAs) wird eine intrinsische Ladungsträgerdichte von  $n_i = 8,15 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  gemessen. Die effektive Masse der Elektronen und der Löcher entspreche  $0,02m_e$ . Bestimmen Sie die Bandlücke von Indium-Arsenid bei Raumtemperatur  $T = 300$  K. [4P]

Das Massenwirkungsgesetz lautet:

$$n \cdot p = N_{\text{eff}}^V N_{\text{eff}}^L \cdot e^{-\frac{W_L - W_V}{k_B T}}$$

Für einen intrinsischen Halbleiter wie Indium-Arsenid mit  $n=p$  gilt bei  $T=300$  K:

$$\begin{aligned} n_i = \sqrt{np} &= \sqrt{N_{\text{eff}}^V N_{\text{eff}}^L} \cdot e^{-\frac{W_L - W_V}{2k_B T}} \\ &= (m_e^* m_p^*)^{\frac{3}{4}} \cdot 2 \cdot \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{W_g}{2k_B T}} \end{aligned}$$

Umstellen und Logarithmieren liefert:

$$W_g = -2k_B T \ln \left( \frac{n_i}{(m_e^* m_p^*)^{\frac{3}{4}} \cdot 2 \cdot \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}}} \right) = 0,35 \text{ eV}$$

- c) Die spezifische Leitfähigkeit eines Indium-Arsenid-Kristalls betrage  $\sigma = 10^{-2} \frac{1}{\Omega \text{cm}}$ . Bestimmen Sie die Ladungsträgerbeweglichkeiten unter der Annahme, dass  $\mu_n = 40\mu_p$  gelte. Verwenden Sie zur Berechnung die Ladungsträgerdichte aus dem vorherigen Aufgabenteil. [3P]

---

Die Leitfähigkeit berechnet sich aus:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) = 41en\mu_p$$

$$\mu_p = \frac{\sigma}{41en_i} = 18,7 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$\mu_n = 40\mu_p = 747,2 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

## 6. Halbleitergrundgleichungen

- a) Durch Bestrahlung ist zu einem Zeitpunkt  $t_0 = 0$  in einem Halbleiter ein Profil von Elektron-Loch-Paaren der Form

$$n(x) = p(x) = g_0 \sin^2 \left( \frac{2\pi}{L} x \right) \quad (11)$$

erzeugt worden. Für die Diffusionskonstanten gelte  $D_n = 2D_p$ . Berechnen Sie die Diffusionsstromdichte  $J_x(x_0)$  an der Stelle  $x_0 = \frac{L}{8}$  in diesem Moment. [4P]

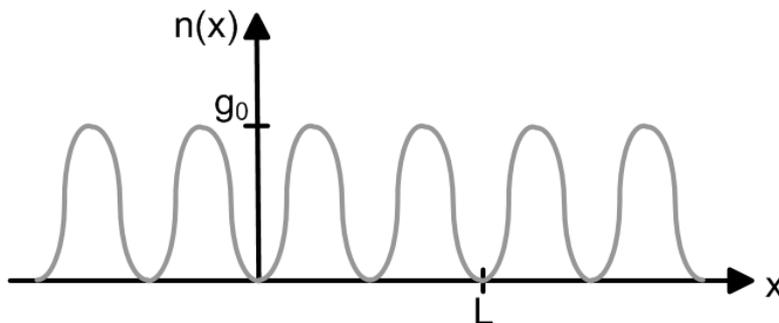


Abbildung 5: Durch Bestrahlung erzeugtes Ladungsträgerdichteprofil  $n(x)$

Der Diffusionsstrom ergibt sich zu:

$$J(x) = eD_n \frac{\partial n}{\partial x} - eD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

Führt man die partiellen Ableitungen aus und setzt ein, erhält man:

$$J(x) = g_0 \frac{2\pi}{L} 2 \sin \left( \frac{2\pi}{L} x \right) \cos \left( \frac{2\pi}{L} x \right) (+eD_n - eD_p)$$

und damit

$$\begin{aligned} J(x_0) &= g_0 \frac{2\pi}{L} 2 \sin \left( \frac{\pi}{4} \right) \cos \left( \frac{\pi}{4} \right) (+e2D_p - eD_p) \\ &= g_0 \frac{2\pi}{L} 2 \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 eD_p = g_0 e D_p \frac{2\pi}{L} \end{aligned}$$

- b) Geben Sie die Kontinuitätsgleichung zur Beschreibung der Entwicklung der freien Elektronendichte in drei Dimensionen an. Welche physikalische Bedeutung haben die einzelnen Terme der Gleichung? [3P]

Zur Berechnung der Entwicklung der Elektronendichte benutzen wir die Kontinuitätsgleichung für Elektronen:

$$\frac{\partial n(\vec{x}, t)}{\partial t} = \frac{1}{e} \nabla \cdot \vec{J}(\vec{x}, t) + g_n(\vec{x}, t) - r_n(\vec{x}, t)$$

Sie beschreibt die zeitliche Änderung der Elektronendichte (linke Seite), welche sich zusammensetzt aus der Divergenz der Stromdichte, also einer Stromdichtenquellendichte (erster Summand), sowie der Generationsrate (2. Summand) und der subtrahierten Rekombinationsrate.

## 7. pin-Diode

- a) Das Raumladungsprofil in einer *pin*-Diode ohne angelegte Spannung betrage:

$$\rho(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq -l_p \\ -en_A & \text{für } -l_p < x \leq 0 \\ 0 & \text{für } 0 < x \leq l_i \\ +en_D & \text{für } l_i < x \leq l_i + l_n \\ 0 & \text{für } l_i + l_n < x \end{cases} \quad (12)$$

Skizzieren Sie das Ladungsprofil und markieren Sie alle relevanten Längen. [2P]

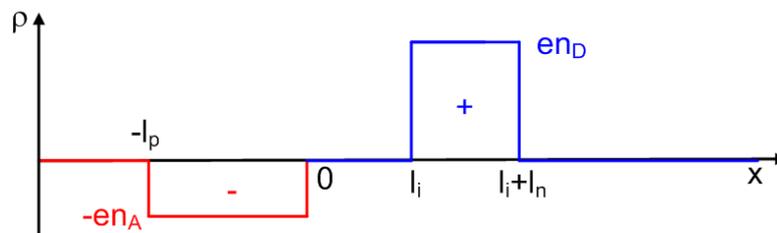


Abbildung 6: Raumladungsprofil einer *pin*-Diode

- b) Leiten Sie einen Ausdruck für das elektrische Feld in der *pin*-Diode ohne angelegte Spannung her. [5P]

Um das Potential herzuleiten, müssen wir, ausgehend von den bekannten Raumladungen, die Poisson-Gleichung lösen. Das Raumladungsprofil sieht wie folgt aus:

$$\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2} = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq -l_p \\ -en_A & \text{für } -l_p < x \leq 0 \\ 0 & \text{für } 0 < x \leq l_i \\ +en_D & \text{für } l_i < x \leq l_i + l_n \\ 0 & \text{für } l_i + l_n < x \end{cases}$$

Wir können die Gleichungen durch Integrieren lösen. Einmaliges Integrieren führt auf einen Ausdruck, der die erste Ableitung des elektrischen Potentials enthält. Dies ist aber gerade die Feldstärke im Halbleiter ( $\vec{E} = -\nabla\phi$ ), wobei der Übergang zwischen den unterschiedlich dotierten Gebieten stetig sein muss und das Feld außerhalb der Raumladungszone Null ist. Aus der konstanten zweiten Ableitung des Potentials erhalten wir erhalten eine lineare Abhängigkeit der Feldstärke vom Ort:

$$E(x) = \begin{cases} -\frac{en_A}{\epsilon_r \epsilon_0} (x + l_p) & \text{für } -l_p < x < 0 \\ -\frac{en_A}{\epsilon_r \epsilon_0} l_p & \text{für } 0 < x < l_i \\ \frac{en_D}{\epsilon_r \epsilon_0} (x - (l_n + l_i)) & \text{für } l_i < x < l_i + l_n \end{cases}$$

**Konstanten**

Planck'sches Wirkungsquantum	$h$	$=$	$6.63 \cdot 10^{-34}$	Js
	$\hbar$	$=$	$\frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34}$	Js
Avogadro-Konstante	$N_A$	$=$	$6.02 \cdot 10^{23}$	mol <sup>-1</sup>
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	$\epsilon_0$	$=$	$8.85 \cdot 10^{-12}$	As/Vm
Permeabilitätskonstante	$\mu_0$	$=$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Vs/Am
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c$	$=$	$3.0 \cdot 10^8$	m/s
Boltzmann-Konstante	$k_B$	$=$	$1.38 \cdot 10^{-23}$	J/K
Kreiszahl	$\pi$	$=$	3.14	
Euler'sche Zahl	$e$	$=$	2.72	

**Konversion von Einheiten**

Atomare Masseneinheit → Kilogramm	$1 \text{ u} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Elektronenvolt → Joule	$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$