

5. Halbleiterphysik

5.1. Einführung

Halbleiter (HL)

= Grundmaterialien der modernen Elektronik

= Festkörper mit elektrischer **Leitfähigkeit** κ im Bereich

$$10^{-6} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1} \dots 10^3 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}, \text{ d. h.}$$

$$\kappa_{\text{Isolatoren}} < \kappa_{\text{HL}} < \kappa_{\text{Metalle}}$$

Charakteristikum:

Leitfähigkeit nimmt in der Regel mit wachsender Temperatur zu

(d. h. Widerstand nimmt ab) - im Gegensatz zu Metallen!

typische Vertreter: Si, Ge, GaAs

Halbleiter sind **Kristalle** *

= **regelmäßige Anordnung von Atomen über „große“ Volumina**

* Struktur wird aufgeklärt durch **Röntgenstrukturanalyse** (M. von Laue, 1912)

Maximale Intensität bei **Gangunterschied = $n \cdot \text{Wellenlänge}$**



Bragg-Gleichung

λ bekannt (z. B. K_{α} -Linie), θ meßbar \rightarrow d bestimmbar (vgl. Übungen 11/4+5)

Strukturanalyse ist auch mit Elektronen möglich!

5.2. Energiebändermodell

Atom	Molekül	Kristall
	2- 3- atomig	

„Aufspaltung“ der Niveaus durch Wechselwirkung

Verteilung der Elektronen auf die Zustände („Plausibilitätsbetrachtung“):

- Elektronen nehmen möglichst niedrigen Energiezustand ein, **aber**: Verbot, dass 2 Elektronen in allen 4 Quantenzahlen übereinstimmen (**Pauli-Prinzip**)
- „viele“ Elektronen → **Statistik** notwendig

Elektronen bewegen sich, da

$$T > 0 \rightarrow W_{\text{kin}} > 0$$

Vgl. mit Verteilung der Luftmoleküle in der Erdatmosphäre (Kap. 2.8.)

Theoretische Betrachtungen liefern die so genannte

Besetzungswahrscheinlichkeit:



Fermi-Dirac-Verteilung

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ (Boltzmann-Konstante) $\rightarrow k \cdot T$ ($T = 300 \text{ K}$) = 26 meV,

W_F - **Fermi-Energie**

Anmerkung: (2) gilt nur für Fermionen (Spin 1/2), Bosonen (Spin ganzzahlig) sind bei $T=0$ alle im Grundzustand.

Bedeutung der Fermi-Energie:

$T = 0$: alle Zustände $W < W_F$ besetzt

alle Zustände $W > W_F$ unbesetzt

$T > 0$: $f = 0,5$ bei W_F (d. h. die Verteilung wird bei Temperaturen $> 0 \text{ K}$ „aufgeweicht“)

Klassifikation der Festkörper:

Leiter

Halbleiter

Isolatoren

5.3. Eigenleitung

Si, Ge - 4. Hauptgruppe im PSE → 4 Außenelektronen (Valenzelektronen)
→ sog. Diamantgitter

Zufuhr von Energie (Wärme, Licht) → Elektron kann Bindung an Gitteratome verlieren und bewegt sich somit frei im Kristall (**Eigenleitung**):

Generation von **Elektron-Loch-Paaren**: → freie Elektronen im LB → Die Leitfähigkeit nimmt zu!

Anlegen einer Spannung an HL → Elektronen wandern unter Einfluss des elektrischen Feldes zum Plus-Pol

→ Loch „wandert“ in entgegengesetzte Richtung zum Minus-Pol (als ob es positiv geladen wäre!)

→ Für theoretische Betrachtung lässt sich annehmen:

Loch = positiver Ladungsträger

Elektronen im Leitungsband verlieren Energie durch thermische Stöße

→ Elektronen fällt nach endlicher Zeit τ (**= Lebensdauer**) wieder in Loch zurück

= Wiedervereinigung, **Rekombination**

T = konst. → Generationsrate = Rekombinationsrate

→ Die Anzahl der Elektron-Loch-Paare im therm. Gleichgewicht ist konstant!

Anwendung der Eigenleitung: Temperatursensoren

HL als Heißleiter (**Thermistor**), d. h.

Widerstand nimmt mit wachsender Temperatur stark ab = NTC-Widerstand (negative temperature coefficient)

Quantitative Beschreibung der T-Abhängigkeit des Widerstands:

Leitfähigkeit \sim **Ladungsträgerdichte** * = Zahl der Ladungsträger pro Volumen

* Elektronendichte n und Löcherdichte p

Im thermischen Gleichgewicht gilt:

n_i - intrinsische Ladungsträgerdichte (materialspezifisch, tabelliert)

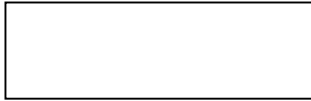
Gl. (4) ist hier trivial, aber nützlich bei dotiertem HL.

$n = p = ?$

$n \sim f$ (Besetzungswahrscheinlichkeit, Gl. (2))

$n \sim N_c$ (Zustandsdichte = Zahl der Energieniveaus [in den Bändern] pro Volumen)

→




Bandabstände W_g :

Si: 1,1 eV

Ge: 0,67 eV

GaAs: 1,43 eV



Beispiel: Silizium

Verallgemeinerung:



Für die Elektronendichte im Leitungsband gem. (5) gilt:



Illustrierendes Beispiel:

Messung liefert bei Ge die Elektronendichte $n = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Jedes wievielte Atom liefert ein Elektron-Loch-Paar?

Lösung: Vergleich mit der Anzahl der Ge-Atome pro cm^3

Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte

Leitfähigkeit

Definition:

allgemein: $\kappa \sim$ Ladungsträgerdichte
 $\kappa \sim$ Beweglichkeit μ



Bei Halbleiter gibt es Elektronen- + Löcherleitung!



μ_n - Beweglichkeit der Elektronen μ_p - Beweglichkeit der Löcher
I. A.: $\mu_n \gg \mu_p$ (Freie Bewegung im fast leeren Leitungsband geht leichter als „Elektronenspringen“ im fast vollgefüllten Valenzband!)

Bsp. Si:

Für Eigenleitung im therm. Gleichgewicht gilt:

T-Abhängigkeit der Leitfähigkeit führt zu einer T-Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes!

Starke T-Abhängigkeit → Anwendung: Heißleiter

5.4. Störstellenleitung

Die Leitfähigkeit von HL kann durch **Einlagerung von Fremdatomen** (= Störstellen) gesteigert werden

Dotierung

1. Bsp. Arsen (As) -> Ge-Kristall: Ge:As

As (5. Hauptgruppe im PSE) besitzt im Vergleich mit Ge ein Elektron mehr. Dieses ist an der Kristallbindung nicht beteiligt und kann somit leicht ins Leitungsband **abgegeben** werden. As wirkt daher als **Donator**.

Die Dotierung führt zu einem Elektronenüberschuß ($n \gg p$): **n-Leitung**
Die Elektronen sind hier die **Majoritätsladungsträger**, die Löcher die **Minoritätsladungsträger**.

2. Bsp. Indium(In) -> Ge-Kristall: Ge:In

In (3. Hauptgruppe im PSE) besitzt im Vergleich mit Ge ein Elektron weniger. Dieses fehlende Elektron kann im Kristall als Loch aufgefasst werden, das ein Elektron **aufnehmen** kann. In wirkt daher als **Akzeptor**.

Die Dotierung führt in diesem Falle zu einem Löcherüberschuß ($p \gg n$): **p-Leitung**
Die Löcher sind hier die Majoritätsladungsträger!

Energiezufuhr (z. B. Wärme) in Halbleitern

→ Störstellen werden (ionisiert), d. h. sie geben Elektronen bzw. Löcher ab.

Aktivierungsenergie « Bandabstand

$$(W_D, W_A \sim \text{meV}) \quad (W_g \sim \text{eV})$$

Das heißt: Freie Ladungsträger werden bei niedrigen und mittleren (= „normalen“) Temperaturen von Störstellen (und nicht aus dem Valenzband) geliefert =

Störstellenleitung

Verteilung der Ladungsträger entsprechend **Fermi-Dirac-Statistik** (vgl. Gl. (2))

→ Fermi-Niveau W_F verschiebt sich in Abhängigkeit von der Dotierung "in Richtung" der entsprechenden Störstelle bzw. des entspr. Bandes.

Bei tiefen Temperaturen liegt das Fermi-Niveau zwischen Störstelle und Band!

Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration bei dotierten Halbleitern


Wegen Gl. (8) zeigt die Leitfähigkeit von dotierten Halbleitern ein ähnliches Temperaturverhalten.

5.5. Innerer Fotoeffekt

= Erhöhung der Leitfähigkeit von Halbleitern bei Einstrahlung von Licht

Anwendung: Fotodetektoren

→ Grenzwellenlänge:



Fotodetektoren besitzen einen Empfindlichkeitsbereich, der bis zu einer Grenzwellenlänge λ_{Grenz} reicht!

Bsp: Material $\sim \lambda_{\text{Grenz}} / \mu\text{m}$

Si	1,1
Ge	1,8
GaAs	0,87

Anwendung:

- Fotowiderstand (robust aber langsam)

- Infrarotdetektor

Donatoren dürfen nicht thermisch ionisiert sein

(→ Kühlung notwendig, z. B. $T = 77 \text{ K}$ mit flüssigem Stickstoff)

5.6. Diffusion von Ladungsträgern

Bei inhomogener Verteilung von Ladungsträgern kommt es aufgrund der thermischen Bewegung der Teilchen im Laufe der Zeit zu einem Konzentrationsausgleich.

alltägliches Beispiel: Zucker im Kaffee

Diese Teilchenbewegung nennt man **Diffusion**. Sie erfolgt im Mittel **in Richtung des Konzentrationsgefälles**, d. h. von Orten hoher Konzentration zu Orten niedrigerer Konzentration.

Beispiel: örtlich begrenzte Generation von Ladungsträgern durch Fotoeffekt

Diffusionsstrom = Strom, der infolge des Konzentrationsgradienten von Ladungsträgern (und nicht infolge eines einwirkenden elektrischen Feldes) fließt.

Diffusionsstromdichte:



Hierbei ist $D_{n,p}$ die **Diffusionskonstante** für Elektronen bzw. für Löcher.



Beispiel: Si, 300 K

Ist der Halbleiter einem elektrischen Feld ausgesetzt, d. h. liegt eine Spannung an, dann setzt sich die Gesamtstromdichte aus Drift- und Diffusionsstromdichte zusammen:

Diffusionslänge

Generierte Ladungsträger diffundieren und rekombinieren nach Verstreichen ihrer Lebensdauer τ wieder.

Vereinfachte Darstellung:

Diffusionslänge:

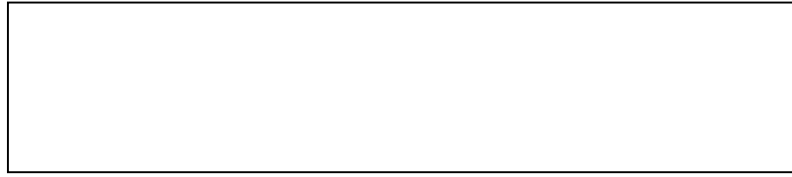


Ortsabhängigkeit der Konzentration generierter Ladungsträger:

Herleiten lässt sich die Ortsabhängigkeit mit Hilfe der

5.7. Kontinuitätsgleichung

Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen Ladungsträgerdichte, Stromdichte, Generations- und Rekombinationsrate in einem bestimmten Volumen ΔV und in einer bestimmten Zeit Δt .



Generationsrate G : Anzahl der durch Generation erzeugten Elektronen und Löcher im Volumen ΔV und in der Zeit Δt .

Rekombinationsrate R : Anzahl der durch Rekombination verschwundenen Elektronen und Löcher im Volumen ΔV und in der Zeit Δt .

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung kann z. B. die Zeitabhängigkeit von generierten Ladungsträgerkonzentrationen berechnet werden. Dies ist wichtig zur Beschreibung der Funktionsweise von Bauelementen.

Beispiel: Zeitlicher Verlauf der Minoritätsträgerdichte nach Abschalten der Lichtanregung



Die Überschussdichte sinkt exponentiell mit der Zeit.

5.8. Der pn-Übergang

= p- und n-leitendes Gebiet grenzen aneinander

= Grundstruktur von Dioden und Transistoren

a) Grundlagen

Idealisierung für vereinfachte Betrachtung:

symmetrischer [n (n-Gebiet) \approx p (p-Gebiet)] und abrupter Übergang

- Kontakt: → Es existiert ein Konzentrationsgefälle in beide Richtungen
- Majoritätsladungsträger diffundieren ins jeweils andere Gebiet ($- \rightarrow p$, $+ \rightarrow n$)
- **Diffusionsströme**

- dünne Randstreifen verarmen an Majoritätsladungsträgern

- In Verarmungszone bleiben **ortsfeste, ionisierte Störstellen** zurück:
Donator $^+$ auf n-Seite , Akzeptor $^-$ auf p-Seite

→ Zwischen den geladenen Störstellen baut sich ein elektrisches Feld auf, das der Diffusion entgegenwirkt (= "rücktreibendes" Feld; äußert sich im Bänderschema als Anwachsen der Energie, d. h. durch "schräge" Bänder)

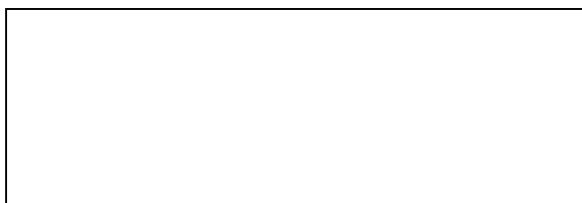
→ Ein Konzentrationsausgleich infolge der Diffusion findet nicht im gesamten Kristall statt, sondern aufgrund des rücktreibenden Feldes nur im schmalen Bereich $-d_n \dots +d_p$ ($< 1\mu\text{m}$)

• Gleichgewicht zwischen Diffusion und rücktreibende Drift:

→ „Stufe“ in den Bändern

→ Fermi-Niveaus gleichen sich im gesamten Kristall an: $W_{Fn} = W_{Fp} = W_F$

Potentialdifferenz = Diffusionsspannung U_D



Bsp. Si: $n_A \approx n_D \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $n_i(300 \text{ K}) \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \rightarrow U_D \approx 0,7 \text{ V}$

Elektronen können aufgrund ihrer thermischer Energie die "Diffusionsstufe" überwinden (Beschreibung entsprechend Gl. (2') - „Boltzmann-Faktor“)

→ Am pn-Übergang herrscht dynamisches Gleichgewicht:

$$\begin{array}{lcl} \text{Konzentrationsgefälle} & \leftrightarrow & \text{Potentialgefälle} \\ \text{Diffusionsstrom } I_{\text{Diff}} & = & \text{Driftstrom } I_{\text{Drift}} \end{array}$$

Störung des Gleichgewichts: Anlegen einer äußeren Spannung an den pn-Übergang:

b) Strom-Spannungs-Kennlinie

1. (+) an p-Gebiet, (-) an n-Gebiet (Durchlassrichtung)

Elektronen fließen unter „Zwang“ der äußeren Spannung von links nach rechts durch den Kristall

→ Die Verarmungszone wird von Elektronen überschwemmt und damit leitfähiger und schmaler (= **Ladungsträgerinjektion**)

→ **Höhe der Stufe in den Bändern nimmt ab**

→ Der Diffusionsstrom nimmt mit angelegter Spannung zu.

Der Driftstrom I_{Drift} bleibt konstant (Ionenrümpfe bleiben am Ort)

→ **Strom in Durchlassrichtung wächst stark (exponentiell) mit steigender Spannung**

2. (-) an p-Gebiet, (+) an n-Gebiet (**Sperrrichtung**)

- Elektronen werden aus Verarmungszone gezogen, die damit noch mehr verarmt und breiter wird

→ Potentialdifferenz nimmt zu ,d. h. **Stufenhöhe nimmt zu**

→ Diffusionsstrom I_{Diff} nimmt stark ab, der kleine Driftstrom bleibt aber konstant

→ **Mit steigender Sperrspannung nimmt der Gesamtstrom kaum mehr zu (= Sättigungsverhalten)**

Strombilanz

- I_{Diff} und I_{Drift} sind entgegengesetzt gerichtet

- Löcherströme verhalten sich analog zu Elektronenströmen

→



c) Reale Dioden

Kennlinienabweichungen

U_s = Schwellenspannung

U_{br} = Durchbruchspannung

Durchbruch: hohe Spannung → hohe Feldstärke → Elektronen werden stark beschleunigt → stoßen auf Gitter und können neue Elektronen freisetzen → Elektronen werden stark beschleunigt → stoßen auf Gitter usw. → **Lawineneffekt** (kann zur Spannungsstabilisierung ausgenutzt werden)

Tunneleffekt bei hochdotierten Halbleitern

Sperrichtung: $w < W_g$ → Elektronen nehmen den kürzesten Weg, d. h. sie "tunneln" horizontal (Tunneleffekt: siehe Kap. 4.3.) → Tunneldurchbruch (**Zener-Effekt**) - wird z. B. zur Stabilisierung des Lawinendurchbruchs genutzt

Auch in Durchlassrichtung ist Tunneleffekt möglich: **Tunnel-Diode** (Esaki)

Anwendung: schnelle Schalter, rauscharme Verstärker

Kapazität einer Diode

angelegte Sperrspannung verändert Breite der Raumladungszone:

Anwendung: elektrische Abstimmung von Schwingkreisen

d) Dioden und Licht

Fotodioden

Absorption in Raumladungszone:

Elektronen und Löcher werden generiert und durch elektrisches Feld räumlich getrennt → **Fotostrom**

Anwendung:

Lichtsensor: Diode wird in Sperrrichtung betrieben:

→ Sperrstrom ~ Beleuchtungsstärke

Solarzelle: großflächige Diode als Stromgenerator

Lichtemittierende Diode (LED)

pn-Übergang in Durchlassrichtung: Elektronen und Löcher werden aufeinander zu getrieben und rekombinieren in der Raumladungszone

→ Energieabgabe (Wärme + Licht)

hohe Dotierung → Besetzungsinversion

+ Resonator (durch Chipoberflächen): Laserdiode

Anwendung: optische Kommunikation, CD: schreiben und lesen