

– Lösungen –  
**4. Halbleiter-und-HL-BE**

**- Elektronik für Informatiker -**  
von den Grundlagen bis zur Mikrocontroller-Applikation

Manfred Rost      Sandro Wefel

23. November 2021

<https://doi.org/10.1515/9783110609066>

Verlag: De Gruyter Oldenbourg

© 2021  
All Rights Reserved

**Anmerkung:** Bildnummern und Seitenzahlen beziehen sich auf die 2. Auflage des Buches.

# 4 Halbleiter und Halbleiterbauelemente

## 4.1

- Festkörper sind Stoffe, die im festen Aggregatzustand vorliegen; sie besitzen ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte Gestalt;
- Das Kristallgitter ist ein Modell zur Beschreibung kristalliner Festkörper; es beschreibt die regelmäßige, periodische Anordnung der Atome bzw. Moleküle im Festkörper;
- Im Gegensatz zum Idealkristall ist beim Realkristall der periodische Gitteraufbau durch punktförmige, linienhafte und flächenhafte Defekte gestört. Einkristalle sind hochrein und weitgehend frei von Gitterstörungen; sie bilden die Basis für die Herstellung von Halbleiterbauelementen.

## 4.2

- Ein Ladungsträger mit einer Elementarladung muss eine Potentialdifferenz von 1 V durchlaufen, um seine Energie um 1 eV zu verändern.
- $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ W s}$

## 4.3

- Das Bändermodell beschreibt die erlaubten und verbotenen Energiezustände von Elektronen im kristallinen Festkörper mit quantenmechanischen Mitteln.
- Energiebänder nennt man die erlaubten Energiebereiche, die Elektronen innerhalb des Modells einnehmen können; für die elektronischen Belange sind das außen (bei höherer Energie) liegende Leitungsband das darunter liegende Valenzband von Interesse.

### 4.3.1 Voraussetzung für eine elektrische, genauer eine elektronische Leitfähigkeit im Festkörper sind frei bewegliche Elektronen.

- Wenn sich Elektronen im Leitungsband befinden, ist der Festkörper leitfähig.

- Wenn das Leitungsband am absoluten Nullpunkt leer ist, aber der energetische Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband nicht zu groß ist, können Elektronen thermisch oder durch Strahlung aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt werden. Dabei entsteht eine Leitfähigkeit in beiden Bändern.
- Bei unbesetztem Leitungsband und großem energetischem Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband kommt es zu keiner Anregung und zu keiner Leitfähigkeit.

#### 4.3.2

- Leiter: Hier sind stets eine große Zahl Elektronen im Leitungsband (Größenordnung 1 Elektron/Atom), das Material ist leitfähig.
- Halbleiter: Bandabstand  $E_g \sim 1 \text{ eV}$ , Elektronen können thermisch oder durch Absorption von Licht ins Leitungsband angeregt werden und eine Leitfähigkeit hervorrufen;
- Isolatoren: Bandabstand sehr groß  $E_g \geq 3 \text{ eV}$ , Elektronen werden nicht ins Leitungsband angeregt.

#### 4.3.3

- Metalle: Elektronen,
- Halbleiter: Elektronen und Defektelektronen (Löcher).

#### 4.4

- Elementhalbleiter sind Germanium (Ge) und Silizium (Si); beide stehen in der IV. Hauptgruppe im PSE.
- Aus der großen Zahl von Verbindungshalbleitern nennen wir
  - Galliumarsenid (GaAs), die Elemente stehen in der III. und V. Hauptgruppe im PSE (III/V-Halbleiter)
  - Kadmiumtelurid (CdTe), die Elemente stehen in der II. und VI. Hauptgruppe im PSE (II/VI-Halbleiter).

#### 4.5

- durch Erhöhen der Temperatur (Eigenleitung),
- durch Einstrahlung von Licht geeigneter Wellenlänge (Fotoleitung),
- durch Einbau von Fremdatomen (Dotierung, Störstellenleitung).

#### 4.6

##### 4.6.1

- Eigenleitung tritt im reinen Halbleiter auf;
- bei n-Leitung wurde mit Donatoren dotiert (beim Si: 5-wertiger Stoff, z.B. As),
- bei p-Leitung wurde mit Akzeptoren dotiert (beim Si: 3-wertiger Stoff, z.B. Ga),

## 4.6.2

- Eigenleitung  $\sigma = e \cdot n_i \cdot (\mu^- + \mu^+)$
- bei Störstellenleitung muss zwischen n-Leitung und p-Leitung unterschieden werden
  - n-Leitung  $\sigma_n = e \cdot n_D^+ \cdot \mu^-$
  - p-Leitung  $\sigma_p = e \cdot n_A^- \cdot \mu^+$ .

## 4.6.3 Zur Diskussion ziehen wir Abb. 4.11 b heran; beim Dotierten Halbleiter spricht man

- von Störstellenreserve, wenn die Temperatur so niedrig ist, dass noch nicht alle Akzeptoren oder Donatoren ionisiert sind;
- von Störstellenerschöpfung, wenn die Temperatur in einem Bereich liegt, in dem alle Akzeptoren bzw. Donatoren ionisiert sind, aber die Eigenleitung noch vernachlässigbar ist; in diesem Bereich werden Halbleiterbauelemente betrieben, sie sind elektrisch steuerbar;
- von Eigenleitung, wenn die thermische Ladungsträgergeneration der allein bestimmende Prozess ist.

4.6.4 Wir benutzen die oben angegebene Gleichung  $\sigma = e \cdot n_i \cdot (\mu^- + \mu^+)$  und erhalten mit den Werten aus Tabelle 4.2

Si		Ge	
$\sigma$	$\rho$	$\sigma$	$\rho$
$4,398 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\Omega \text{ m}}$	$2,275 \cdot 10^3 \Omega \text{ m}$	$2,323 \frac{1}{\Omega \text{ m}}$	$0,430 \Omega \text{ m}$

## 4.6.5 Mit den oben angegebene Gleichungen und den Zahlenwerten aus Tabelle 4.2 erhält man

—	n-Leitung		n-Leitung	
$n_D, n_A$	$\sigma$	$\rho$	$\sigma$	$\rho$
$10^{14} \frac{1}{\text{cm}^3}$	$2,163 \frac{1}{\Omega \text{ m}}$	$0,642 \Omega \text{ m}$	$0,769 \frac{1}{\Omega \text{ m}}$	$1,3 \Omega \text{ m}$
$10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3}$	$216,3 \frac{1}{\Omega \text{ m}}$	$0,0046 \Omega \text{ m}$	$76,9 \frac{1}{\Omega \text{ m}}$	$0,013 \Omega \text{ m}$

Ein Vergleich mit der vorigen Teilaufgabe zeigt, dass die Leitfähigkeit dotierten Materials um mehrere Größenordnungen über der von eigenleitendem Material liegt. Die Leitfähigkeit wird bei Zimmertemperatur praktisch allein durch die Dotierung bestimmt.

## 4.7

- Wenn für die Energie des eingestrahnten Lichtes  $h\nu \geq E_g$  gilt, werden Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband angeregt (Photoeffekt).
- Photoleitung nennt man die durch Lichteinstrahlung generierte Leitfähigkeit; die Leitfähigkeit wächst mit der Intensität des Lichtes.

4.8 NTC-Widerstände und Fotowiderstände sind Sensoren, sie setzen jeweils eine nichtelektrische Größe in eine elektrische Größe (hier: Widerstandsänderung) um.

- NTC-Widerstand: Mit wachsender Temperatur werden zunehmend mehr frei bewegliche Ladungsträger erzeugt, so dass der NTC-Widerstand niederohmiger wird.
- Fotowiderstand: Eingestrahlt Licht erzeugt Photoleitung, der Fotowiderstand wird bei Belichtung niederohmiger.

## 4.9

- Hall-Effekt: An einem stromdurchflossenen Leiter oder Halbleiter, der sich in einem Magnetfeld befindet, tritt auf Grund der Lorentzkraft senkrecht zu Stromrichtung und Magnetfeld eine elektrische Spannung auf. Die Hall-Spannung ist von der Stromstärke  $I$ , der magnetischen Induktion  $\vec{B}$  und von Probeneigenschaften, die man in der Hallkonstanten  $R_H$  zusammenfasst, abhängig.
- Den Hall-Effekt kann man nutzen, um in Halbleiterproben die Trägerdichte und den Leitfähigkeitstyp zu bestimmen. Der Hall-Effekt liegt den Hall-Generatoren zugrunde.
- Hall-Generatoren nutzt man zur Messung von Magnetfeldern und zur galvanisch getrennten Messung von Strömen über das von ihnen erzeugte Magnetfeld.

4.10 Als pn-Übergang bezeichnet man eine im Halbleiter liegende Grenzfläche, an der n-leitendes und p-leitendes Halbleitermaterial zusammentreffen. An der Grenzfläche diffundieren frei bewegliche Ladungsträger (Elektronen, Defektelektronen) ins Nachbargebiet und rekombinieren dort. Dadurch entsteht eine hochohmige Sperrschicht. Die ortsfesten Ladungsträger,  $D^+$  und  $A^-$  bilden eine Raumladungszone. Folge der Raumladung sind ein elektrisches Feld und die Diffusionsspannung (siehe Abb. 4.12). Je nachdem ob und mit welcher Polarität eine Spannung anliegt, unterscheidet man

- thermisches Gleichgewicht: am pn-Übergang liegt keine Spannung; Diffusions- und Feldströme sind im Gleichgewicht;
- Sperrrichtung: am pn-Übergang liegt eine Spannung mit dem Pluspol am n-Gebiet und dem Minuspol am p-Gebiet, so dass die frei beweglichen Ladungsträger von der Sperrschicht abgezogen werden, die Ladungsträgergeneration an der Grenzschicht überwiegt und es fließt ein kleiner Sperrstrom;
- Durchlaßrichtung: am pn-Übergang liegt eine Spannung mit dem Minuspol am n-Gebiet und dem Pluspol am p-Gebiet, so dass die frei beweglichen Ladungsträger zur Sperrschicht beschleunigt werden, am Übergang rekombinieren die Elektronen und Defektelektronen und es fließt ein Durchlassstrom.

## 4.11

- Eine Diodenkennlinie ist in Abb. 4.14 (a) dargestellt; man unterscheidet die niederohmige Durchlassrichtung und die hochohmige Sperrrichtung.
- Wird die Spannung in Sperrrichtung erhöht, steigt der Sperrstrom und oberhalb der maximalen Sperrspannung kommt Durchbruch; Gleichrichterioden werden dabei zerstört.  
Bei Z-Dioden (siehe Abb. 4.20 (a)) ist der Durchbruch reversibel; dabei muss der Strom begrenzt werden.
- Das klassische Anwendungsgebiet einfacher Dioden ist die Gleichrichtung. Spezielle Ausführungsformen finden zur Spannungsstabilisierung (Z-Diode), für Signal- oder Beleuchtungszwecke (LED), zur Abstimmung von Schwingkreisen (Kapazitätsdioden) u.a Anwendung.

4.12 Leuchtdioden verwenden direkte Halbleiter. Sie werden in Durchlassrichtung betrieben. Am pn-Übergang rekombinieren Elektronen und Defektelektronen. Dabei wird Licht emittiert. Die Frequenz  $\nu$  des Lichtes, und damit die Farbe, hängt vom Bandabstand ab. Es gilt

$$\nu = \frac{E_g}{h}.$$

4.13 Bipolartransistoren sind Halbleiterbauelemente mit drei Elektroden (Emitter, Basis, Kollektor). Entsprechend Abb. 4.22 (a) hat ein npn-Transistor die Zonenfolge n-p-n und zwei eng benachbarten pn-Übergänge. Der Emitter-Basis-Übergang wird in Durchlassrichtung und der Basis-Kollektor-Übergang in Sperrrichtung betrieben (Abb. 4.23 (b)). Mit einem kleinen Basisstrom kann ein viel größerer Kollektorstrom gesteuert werden.

4.13.1 Die drei Grundsaltungen sind für einen npn-Transistor in Abb. 4.24 dargestellt. Der Name der Schaltung gibt an, welche der Elektroden vom Eingangs- und Ausgangskreis gemeinsam genutzt wird.

4.13.2 Um für einen Transistor in Emitterschaltung ein Kennlinienfeld zu erhalten, sind Strom- und Spannungsmessungen auf der Eingangs- und auf der Ausgangsseite notwendig. Im Einzelnen sind die

- auf der Eingangsseite
  - die Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$
  - der Basisstrom  $I_B$
- und auf der Ausgangsseite
  - die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$
  - der Kollektorstrom  $I_C$ .

Diese Messungen sind mit einer Schaltung nach Abb. 4.25a möglich, in der die Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  unabhängig voneinander veränderbar sein müssen. Eine Mikrocontroller-gesteuerte Lösung zur Kennlinienaufnahme wird in Aufgabe 11.9 und 11.10 behandelt.

4.13.3 Im Kennlinienfeld (siehe Abb. 4.25 b) sind die unten aufgelisteten Abhängigkeiten als Kurvenschar dargestellt. Die Anstiege der Kurven charakterisieren das Kleinsignalverhalten; sie entsprechen den h-Parametern und treten im Kleinsignal-Ersatzschaltbild (siehe Abb. 4.26) als Ersatzbauelement auf

- 1. Quadrant:  $I_C f(U_{CE})$  mit  $I_B$  als Parameter, die Tangente an einem Punkt der Kurve ist der Leerlaufausgangsleitwert in diesem Punkt

$$h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \Big|_{I_B = \text{const}}$$

- 2. Quadrant:  $I_C f(I_B)$  mit  $U_{CE}$  als Parameter, die Tangente an einem Punkt der Kurve ist hier der Kurzschlussstromverstärkung

$$h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE} = \text{const}}$$

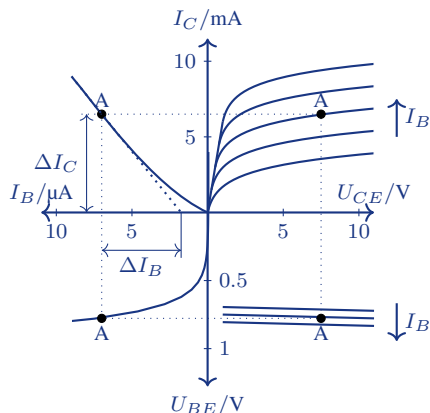
- 3. Quadrant:  $U_{BE} f(I_B)$  mit  $U_{CE}$  als Parameter, hier ist die Tangente der Kurzschlusseingangswiderstand

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE} = \text{const}}$$

- 4. Quadrant:  $U_{BE} f(U_{CE})$  mit  $I_B$  als Parameter, hier ist die Tangente der Leerlaufspannungsrückwirkung

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{CE}} \Big|_{I_B = \text{const}}$$

## 4.13.4



Kennlinienfeld eines Bipolartransistors, schematisch, mit Anstiegsdreieck

Zur Bestimmung der h-Parameter wird an die entsprechenden Kurven im Arbeitspunkt eine Tangente angelegt und deren Anstieg bestimmt. Im 2. Quadranten ist beispielhaft das Anstiegsdreieck eingetragen. Man erhält näherungsweise

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=A} = \frac{0,13 \text{ V}}{7 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 18,6 \text{ k}\Omega$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=A} = \frac{6,4 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-6}} = 1,16 \cdot 10^3$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_B=A} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{10 \text{ V}} = 0,12 \text{ mS}$$

## 4.14

4.14.1 Feldeffekt nennt man die Veränderung der Leitfähigkeit in oberflächennahen Bereichen von leitenden Stoffen durch ein senkrecht zur Oberfläche einwirkendes elektrisches Feld.

4.14.2 Der Aufbau einer MOS-Kapazität ist Abb. 4.15 zu entnehmen. Das Anlegen einer Spannung an die MOS-Struktur verändert durch Influenz das Ladungsträgergleichgewicht an der Grenzschicht. Wenn die angelegte Spannung hinreichend positiv ist, kommt es zur Ladungsträgerinversion, im ursprünglich p-leitenden Material entsteht eine n-Leitende Schicht, die Inversionsschicht.



4.14.3 Der Aufbau eines n-Kanal-MOSFET ist in Abb. 4.27 a schematisch dargestellt. In eine MOS-Struktur mit p-leitendem Silizium sind zwei n-leitende Inseln eingebaut, die die Elektroden Source und Drain bilden.

Zur Funktion

- Wenn am Gate gegenüber dem Rückseitenkontakt eine positive Spannung geeigneter Größe liegt, bildet sich ein n-leitender Inversionskanal zwischen Source und Drain aus (Abb. 4.27 b)
- Eine sich verändernde Gate-Source-Spannung  $U_{GS}$  verändert den Querschnitt und damit auch die Leitfähigkeit des Kanals.
- Wird auch am Drain eine gegenüber Source positive Spannung  $U_{DS}$  angelegt, fließt im Kanal ein mit  $U_{GS}$  steuerbarer Strom. Der Strom erzeugt einen Spannungsabfall über den Kanal; als Folge schnürt sich der Kanal ein.

4.14.4 Selbstleitende MOSFET führen bereits bei  $U_{GS} = 0$  einen Drainstrom  $I_D$ , selbstsperrende MOSFET nicht (siehe Abb. 4.28 a)

4.14.5

- a) keine
- b) eine geringe, die mit der Signalfrequenz anwächst.

4.14.6 Der Unterschied wird deutlich, wenn wir Abb. 4.31 (JFET) und Abb. 4.27 (MOSFET) vergleichen.

- JFET: nach Abb. 4.31 wird ein leitfähiger Kanal durch einen parallel zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger liegenden pn-Übergang ausgebildet; der pn-Übergang wird in Sperrrichtung gepolt und mit der anliegenden Spannung kann man die Leitfähigkeit des Kanals zu steuern;
- MOSFET: hier bildet sich beim Anlegen der Spannungen unter der Gateelektrode ein Inversionskanal aus dessen Leitfähigkeit mit  $U_{GS}$  gesteuert wird.

4.14.7 Der prinzipielle Aufbau eines n-Kanal-JFET ist aus Abb. 4.31 a ersichtlich. Der Querschnitt des n-Leitenden Materials wird durch den pn-Übergang, der parallel zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger angeordnet ist, eingeengt. Der pn-Übergang wird in Sperrrichtung betrieben. Mit wachsender Sperrspannung weitet sich das Raumladungsgebiet auf und der Kanal wird hochohmiger.