ERKLÄRBÄR

Serie Elektronik · Folge 6 · Advanced

ADVANCED

LEHRERINFO ZUM VIDEO · GYMNASIUM / MATURA / ABITUR

Halbleiter und die Diode – Advanced

FACH	STUFE	DAUER	VIDEO
Physik	Gymnasium, Sek II	13:47 min	youtube.com/@Erklaerbaer

01 Lernziele

Nach dem Video können die Schülerinnen und Schüler …

- Leiter, Halbleiter und Isolatoren mit dem Bändermodell (Valenzband, Leitungsband, Bandlücke) unterscheiden und die Eigenleitung samt Temperaturabhängigkeit erklären,
- die Störstellenleitung mit Donator- und Akzeptorniveaus begründen,
- die Entstehung von Raumladungszone und Diffusionsspannung erklären und die Sperrschicht als Kondensator deuten (Kapazitätsdiode),
- die Diodengleichung $I = I_S \cdot (e^{U/U_T} - 1)$ anwenden: Faustregel × 10 pro 60 mV, $r_d = U_T/I$, ≈ −2 mV/K,
- die Farbe einer LED aus der Bandlücke berechnen ($\lambda = h \cdot c/E$, $\lambda/\text{nm} \approx 1240/(E/\text{eV})$),
- einen LED-Vorwiderstand mit Toleranzen für den ungünstigsten Fall (Strom und Verlustleistung) auslegen.

02 Voraussetzungen

Dotierung, pn-Übergang und LED-Vorwiderstand (Folge 6 Grundlagen), Kondensator $C = \varepsilon \cdot A/d$ (Folge 4), Belastbarkeit $P = I^2 \cdot R$ (Folge 3), Exponentialfunktion und natürlicher Logarithmus; hilfreich: Photonenenergie $E = h \cdot f$.

03 Ablauf des Videos

ZEIT	KAPITEL	INHALT
0:00	Einstieg	Rote LED ≈ 1,8 V, blaue ≈ 3 V PAUSE-FRAGE · Photonenenergie und Energielücke · Ident · Serien-Fahrplan
1:02	Was du brauchst	Dotierung (n, p) · pn-Übergang, Durchlass ab ≈ 0,7 V · Leitfragen
1:33	Das Bändermodell	Energiestufen → Bänder · Valenz- und Leitungsband · Bandlücke: Metall keine, Glas ≈ 9 eV, Si 1,12 eV · Eigenleitung · Ge, GaAs, Heissleiter
2:54	Störstellenleitung	Donatorniveau ≈ 0,045 eV unter dem Leitungsband · Akzeptor knapp über dem Valenzband · ≈ 10^6-mal mehr Ladungsträger

3:44	Die Raumladungszone	Diffusion, Rekombination, ortsfeste Rümpfe · Feld und Diffusionsspannung ≈ 0,7 V · Sperrspannung PAUSE-FRAGE · Kapazitätsdiode
5:02	Die Diodengleichung	$I = I_S \cdot (e^{U/U_T} - 1)$, $U_T \approx 26$ mV · 0,64/0,70/0,76 V → 0,5/5/50 mA · × 10 pro 60 mV · $r_d = 2{,}6\ \Omega$ bei 10 mA · −2 mV/K
6:27	Die Farbe der LED	λ/nm ≈ 1240/(E/eV) · rot 650, grün 540, blau 460 nm · weisse LED · Si: indirekt, 1100 nm · UV-LED
7:55	Vorwiderstand mit Toleranzen	Rote LED 1,8–2,2 V an 12 V ± 5 %, 470 Ω ± 5 % · I = 19 … 24 mA · $P_R \approx 0{,}26$ W → ½ W
9:06	Projekt-Baustein Netzteil	Diode als Ventil nach dem Trafo · Sperrspannung bis ≈ 35 V → 1N4001 (50 V) · ≈ 0,4 W pro Diode · Schottky · Ausblick Brücke
10:04	Prüfungsfallen	Fünf Prüfungsfallen
10:50	Zusammenfassung	Das Wichtigste in sechs Punkten
11:31	Quiz	4 Fragen, 3 zum Rechnen

04 Typische Prüfungsfallen

- **$U_T \approx 26$ mV** mit der Durchlassspannung ≈ 0,7 V verwechselt.
- **Diode als ohmscher Widerstand** behandelt – $r_d = U_T/I$ hängt stark vom Strom ab.
- **Einheiten bei der Wellenlänge:** 1240/E gilt nur mit eV und nm; sonst $E = h \cdot c/\lambda$ in SI-Einheiten.
- **Vorzeichen der Temperatur:** Bei gleichem Strom sinkt U_F um ≈ 2 mV/K.
- **Toleranzen ignoriert:** Strom und Leistung immer im ungünstigsten Fall rechnen.

05 Einsatz im Unterricht

Kennlinie: 1N4148 mit 1 kΩ und Netzgerät; I halblogarithmisch über U auftragen – eine Gerade, deren Steigung den Spannungsschritt pro Dekade liefert.

Planck-Konstante: Schwellenspannung von LEDs verschiedener Farben messen und $h = e \cdot U \cdot \lambda/c$ bestimmen (Aufgabe 7).

Dioden-Thermometer: Diode mit konstantem Strom (≈ 1 mA) in Wasser verschiedener Temperatur, U_F messen – ≈ −2 mV/K.

Worst Case: Eine Charge 5-%-Widerstände ausmessen und die Streuung mit der Toleranzangabe vergleichen.

06 Hinweise und Quellen

- Bandlücken bei 300 K: Si 1,12 eV, Ge 0,66 eV, GaAs 1,42 eV, SiO_2 ≈ 9 eV. Eigenleitungsdichte Si ≈ 10^{10} cm^{-3} bei $5 \cdot 10^{22}$ Atomen pro cm^3. Donator- bzw. Akzeptorniveau von P und B je ≈ 0,045 eV vom Band entfernt. $h \cdot c \approx 1239{,}8$ eV·nm.
- Die Diodengleichung im Video ist das ideale Shockley-Modell mit $I_S = 10^{-14}$ A als Modellwert. Reale Dioden haben einen Emissionskoeffizienten n ≈ 1–2 (also 60–120 mV pro Dekade) und einen Bahnwiderstand; die Diffusionsspannung (≈ 0,6–0,8 V je nach Dotierung) lässt sich nicht direkt mit einem Voltmeter messen.

NAME _____ KLASSE _____ DATUM _____

Bändermodell, Diodengleichung, LED

1 Bändermodell ●○○

a) Skizziere die Bänder für ein Metall, einen Halbleiter und einen Isolator. b) Begründe, warum der Widerstand eines Halbleiters mit steigender Temperatur sinkt, der eines Metalls dagegen steigt.

2 Donator und Akzeptor ●●○

Silizium wird einmal mit Arsen (5 Aussenelektronen) und einmal mit Gallium (3 Aussenelektronen) dotiert. a) Welches ist Donator, welches Akzeptor, und wo liegen die Niveaus? b) Warum sind bei Raumtemperatur praktisch alle Donatoren ionisiert? Vergleiche ≈ 0,05 eV mit k·T ≈ 0,026 eV und der Bandlücke.

3 Raumladungszone ●●○

a) Erkläre, wie die Raumladungszone entsteht und in welche Richtung ihr elektrisches Feld zeigt. b) Begründe mit C = ε·A/d, warum die Kapazität einer Kapazitätsdiode mit steigender Sperrspannung sinkt.

4 Diodengleichung ●●○

Eine Diode hat $I_S = 2{\cdot}10^{-14}$ A, $U_T = 26$ mV. a) Berechne den Strom bei 0,65 V. b) Bei welcher Spannung fliessen 20 mA? c) Wie gross ist der differentielle Widerstand bei 20 mA?

5 Faustregel ●●○

Bei 0,60 V fliessen 0,2 mA. a) Schätze den Strom bei 0,72 V und bei 0,54 V. b) Welche Spannungserhöhung verdoppelt den Strom? Leite die 60 mV pro Dekade aus $U_T \cdot \ln 10$ her.

6 Farbe der LED ●●○

a) Berechne die Wellenlängen für Bandlücken von 1,9 eV, 2,6 eV und 3,4 eV (GaN) und ordne die Farben zu. b) Die IR-LED einer Fernbedienung sendet bei 940 nm. Wie gross ist die Photonenenergie? c) Warum braucht eine blaue LED mindestens rund 2,7 V?

7 Planck-Konstante aus LEDs ●●●

Schwellenspannungen: rot 630 nm 1,95 V · gelb 590 nm 2,10 V · grün 525 nm 2,35 V · blau 470 nm 2,62 V. Bestimme $h = e \cdot U \cdot \lambda / c$ für jede LED, bilde den Mittelwert und vergleiche mit $6{,}63{\cdot}10^{-34}$ J·s.

8 Vorwiderstand mit Toleranzen ●●●

Blaue LED U_F = 2,8 … 3,2 V, höchstens 25 mA, an USB mit 5 V ± 5 %, R = 100 Ω ± 5 %. a) Berechne den kleinsten und den grössten Strom. b) Ist die LED sicher? Falls nicht: nächsten E12-Wert wählen (… 100 · 120 · 150 …) und I_{max} neu rechnen. c) Reicht ein ¼-W-Widerstand?

9 Quiz aus dem Video ●○○

a) Bandlücke 2,1 eV. Wellenlänge?

☐ 410 nm ☐ 590 nm ☐ 870 nm

b) Bei 0,62 V fliesst 1 mA. Strom bei 0,68 V?

☐ 2 mA ☐ 10 mA ☐ 100 mA

c) Differentieller Widerstand bei 26 mA?

☐ 1 Ω ☐ 26 Ω ☐ 1000 Ω

d) Die Diode wird wärmer, der Strom bleibt gleich. Die Durchlassspannung …

☐ steigt ☐ sinkt ☐ bleibt gleich

Lösungen

1 Bändermodell

a) Metall: Bänder **überlappen** bzw. Leitungsband teilweise besetzt · Halbleiter: **kleine Bandlücke** (≈ 1 eV) · Isolator: **grosse Bandlücke** (> 5 eV). b) Im Halbleiter hebt Wärme **mehr Elektronen** ins Leitungsband – mehr Ladungsträger, kleinerer Widerstand. Im Metall bleibt die Zahl der Ladungsträger gleich, die stärkeren **Gitterschwingungen** bremsen sie – grösserer Widerstand.

2 Donator und Akzeptor

a) Arsen: **Donator**, Niveau knapp **unter dem Leitungsband**. Gallium: **Akzeptor**, Niveau knapp **über dem Valenzband**. b) Die Stufe ist nur ≈ 2·kT, aber rund 25-mal kleiner als die Bandlücke – die Wärme reicht, um **fast jedes Donatorelektron** zu lösen, während kaum Elektronen über die ganze Lücke springen.

3 Raumladungszone

a) Elektronen diffundieren in die p-Seite, Löcher in die n-Seite und rekombinieren; zurück bleiben **positive Donatorrümpfe** (n-Seite) und **negative Akzeptorrümpfe** (p-Seite). Das Feld zeigt **von n nach p** und bremst die weitere Diffusion. b) Mit wachsender Sperrspannung wird die Zone, also **d, breiter** – C = ε·A/d **sinkt**.

4 Diodengleichung

a) $I = 2{\cdot}10^{-14}\ A \cdot e^{0{,}65/0{,}026} = 2{\cdot}10^{-14}\ A \cdot e^{25} \approx$ **1,4 mA**. b) $U = U_T{\cdot}\ln(I/I_S) = 26\ mV \cdot \ln(10^{12}) \approx$ **0,72 V**. c) $r_d = 26\ mV / 20\ mA =$ **1,3 Ω**.

5 Faustregel

a) +120 mV = zwei Dekaden: **20 mA**; −60 mV: **0,02 mA**. b) $\Delta U = U_T{\cdot}\ln 2 \approx$ **18 mV**; für den Faktor 10: $U_T{\cdot}\ln 10 = 26\ mV \cdot 2{,}30 \approx$ **60 mV**.

6 Farbe der LED

a) 1240/1,9 ≈ **650 nm (rot)**; 1240/2,6 ≈ **480 nm (blau)**; 1240/3,4 ≈ **365 nm (UV)**. b) E = 1240/940 ≈ **1,3 eV**. c) Jedes Elektron muss mindestens die Photonenenergie mitbringen: e·U ≥ E ≈ 2,7 eV ⇒ **U ≥ 2,7 V**.

7 Planck-Konstante

h = e·U·λ/c: rot **6,56**, gelb **6,62**, grün **6,59**, blau **6,58** (je $\cdot 10^{-34}$ J·s). Mittelwert **≈ $6{,}6{\cdot}10^{-34}$ J·s**, Abweichung unter 1 %.

8 Vorwiderstand mit Toleranzen

a) R = 95 … 105 Ω. I_{min} = (4,75 V − 3,2 V)/105 Ω ≈ **14,8 mA**; I_{max} = (5,25 V − 2,8 V)/95 Ω ≈ **25,8 mA**. b) Über 25 mA – **nicht sicher**. Mit **120 Ω** (114 … 126 Ω): I_{max} = 2,45 V/114 Ω ≈ **21,5 mA** ✓, I_{min} ≈ 12,3 mA. c) P = $(21{,}5\ mA)^2 \cdot 114\ \Omega \approx$ **0,05 W** – ¼ W **reicht**.

9 Quiz

a) **590 nm** · b) **10 mA** · c) **1 Ω** · d) **sinkt**