

Take-home exam: Grundlagen der Elektronik WS 20/21

Bearbeitungszeit: 2 Std.

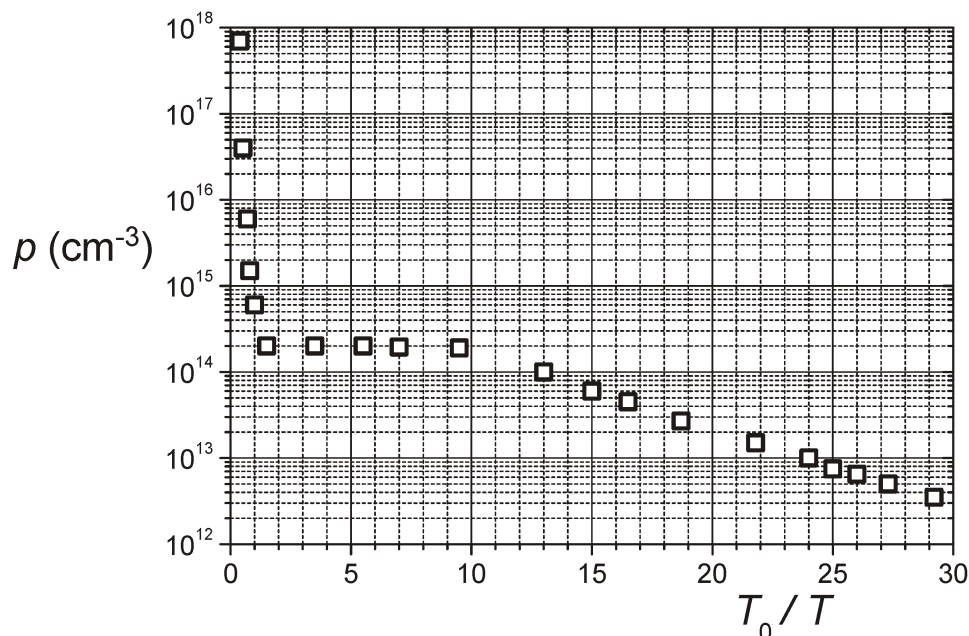
Bemerkung: Bei Berechnungen ist grundsätzlich auch der Rechenweg nachvollziehbar anzugeben.

Konstanten: Raumtemperatur $T_0 = 300$ K; Elementarladung $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ As; Boltzmann-Konstante $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K = $8,6 \cdot 10^{-5}$ eV/K; Vakuum-Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ As/(Vm).

$$N = N_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}; \quad n_i^2 = np = N_L N_V \exp \left(-\frac{W_G}{kT} \right); \quad n + N_A^- = p + N_D^+$$

$$N_A^- = N_A \left(\frac{p_1}{p + p_1} \right); \quad p_c = N_c \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{W_A - W_V}{kT} \right); \quad T_0 = 300 \text{ K}.$$

- 1) Ein Halbleiter ist homogen mit Akzeptoren der Konzentration N_A dotiert ($N_D = 0$) und die effektiven Zustandsdichten der freien Ladungsträger (p, n) sind gleich groß, also $N_V = N_L = N$ mit $N_0 = 8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Werte der Löcherkonzentration $p(T_0/T)$ sind in Abb. 1 dargestellt.



- a) Geben Sie die Temperaturbereiche an (in Werten von T_0/T), in denen die Akzeptoren vollständig ($N_A^- = N_A$) oder unvollständig ($N_A^- \ll N_A$) ionisiert sind, bzw. der Halbleiter eigenleitend ist ($p = n_i$).

- b) Geben Sie im Bereich der Eigenleitung die Abhängigkeit der Löcherkonzentration $p(T_0/T)$ explizit an. Bestimmen Sie aus dem Bandabstand $W_G = 0,5$ eV Werte von p für $T_0/T = 0,46$ und $T_0/T = 0,96$.
- c) Ermitteln Sie nun p für den Bereich $T_0/T > 1,5$. Nutzen Sie hierfür die oben gegebene Elektroneutralitätsgleichung. Vereinfachen Sie diese mit Hilfe der gegebenen Annahmen sowie einer größenordnungsmäßigen Abschätzung der Elektronenkonzentration n im Vergleich mit p . Berechnen Sie hierfür beispielhaft n für $T_0/T = 1,5$.
- d) Nutzen Sie die oben angegebene Gleichung für N_A^- , um für den Bereich $T_0/T > 1,5$ aus c) eine quadratische Gleichung für p aufzustellen und lösen Sie diese anschließend (Formel).
- e) Im Bereich mittlerer Temperaturen gilt $4N_A \ll p_c$. Vereinfachen Sie mit dieser Annahme die Lösung für p aus d) (Hinweis: $[1+\delta]^{0,5} \approx 1+0,5\delta$ mit $\delta \ll 1$). Bestimmen Sie hiermit aus Abb. 1, links im Bereich $1,5 < T_0/T < 6$ den Zahlenwert von p .
- f) Im Bereich niedriger Temperaturen gilt $2(N_A)^{1/2} \gg (p_c)^{1/2}$. Vereinfachen Sie mit dieser Annahme die Lösung für p aus d) und geben Sie $p(T_0/T)$ explizit in Abhängigkeit von der Akzeptor-Ionisierungsenergie $W_A - W_V$ an. Bestimmen Sie aus Abb. 1, links im Bereich $15 < T_0/T < 30$ den Zahlenwert von $W_A - W_V$.

2) **Abb. 2** zeigt eine ideale Metall-Oxid-*p*-Halbleiter (MOS)-Struktur mit am Gate anliegender Spannung U_g . Gehen Sie, wie bei 300 K üblich, davon aus, dass die Dotierstoffe vollständig ionisiert sind (d. h.: $N_A^- = N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) und die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht ($0 \leq x \leq w$) keine Rolle spielen. Für den Kapazitätsbelag der HfO_2 -Oxidschicht $C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}} \epsilon_0 / d$ und der Sperrschicht $C_s = \epsilon_s \epsilon_0 / w$ mit den relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_s und ϵ_{ox} sowie den Dicken d und w sind folgende Daten gegeben: $d = 8 \text{ nm}$; $\epsilon_{\text{ox}} = 22$; $\epsilon_s = 11,7$; $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

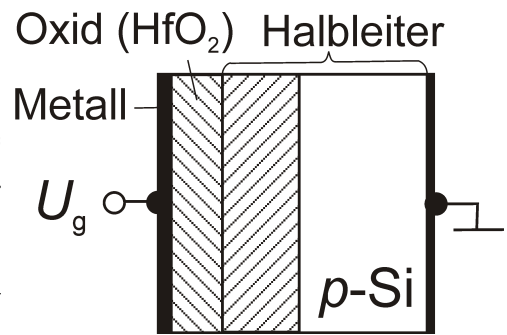


Abb. 2

- a) Skizzieren Sie das vereinfachte Kapazitäts-Ersatzschaltbild der MOS-Struktur. Ermitteln Sie den Gesamtkapazitätsbelag der Struktur C bezogen auf C_{ox} in Abhängigkeit von der Sperrschichtausdehnung w . Skizzieren Sie für niedrige (durchgezogen) und hohe (gestrichelt) Frequenzen den Verlauf von C/C_{ox} in Abhängigkeit von U_g . Markieren Sie die Bereiche der Anreicherung, Verarmung und Inversion sowie den Flachbandfall $(C/C_{\text{ox}})_{\text{FB}}$.
- b) Skizzieren Sie (nach Übertragen der Vorlage unten auf Ihr eigenes Papier) die Verläufe der Raumladung $\rho(x)$, der elektrischen Feldstärke $E(x)$ und der Bandkantenenergien $W_L(x)$ und $W_V(x)$ für den Fall des Einsetzens
- (1) der schwachen Inversion mit der Bandaufwölbung $W_s = W_i - W_F$ und
 - (2) der starken Inversion mit $W_s = 2(W_i - W_F)$.
- (W_F : Fermienergie im Halbleiter, W_i : Eigenleitungsniveau). Markieren Sie W_s , W_i , W_L und W_V sowie die Fermienergie im Metall $W_{F,M}$.
- c) Bestimmen Sie W_s in Abhängigkeit von N_A und n_i (Formel) unter Annahme der Boltzmann-Näherung für die Löcherkonzentration p mit:

$$p = N_V \exp\left(\frac{W_V - W_F}{kT}\right)$$

- d) Bei starker Inversion (2) gilt für die maximale Ausdehnung der Sperrschicht $w = w_{\text{max}}$ mit:

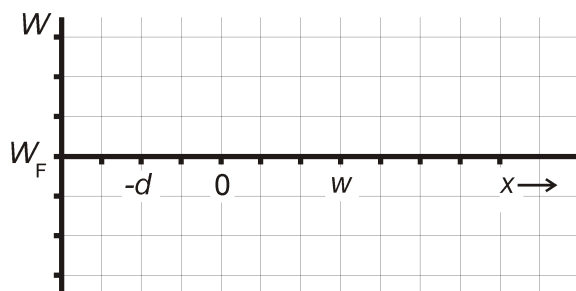
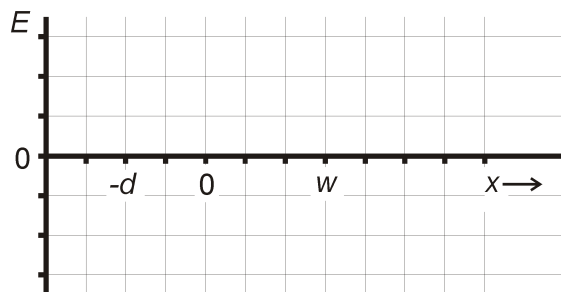
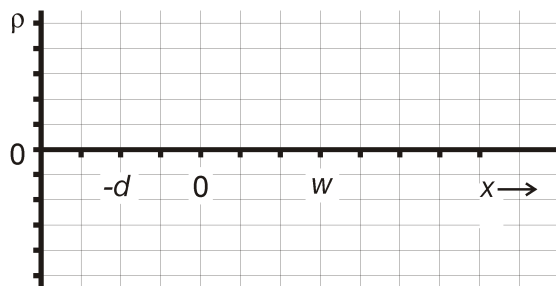
$$w_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 W_s}{q^2 N_A}}$$

und für die Ausdehnung im Flachbandfall (FB) $w = L_D$ mit:

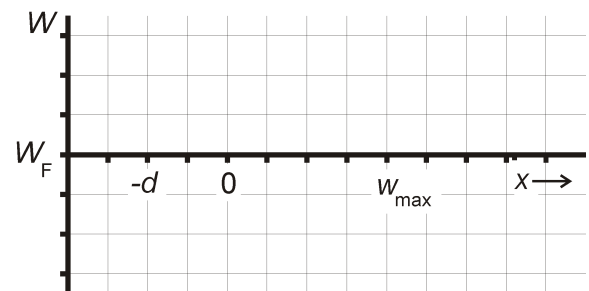
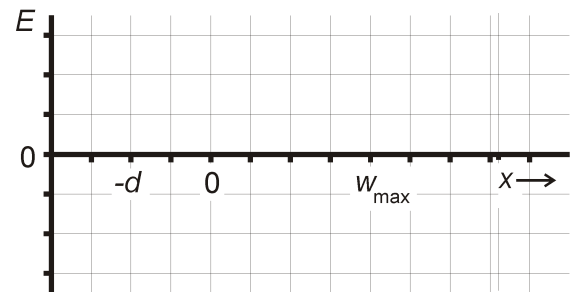
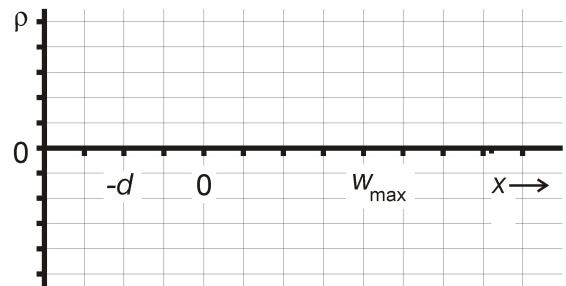
$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{q^2 N_A}}$$

Bestimmen Sie für die MOS-Struktur in Abb. 2 w_{\max} und L_D und hieraus die minimale Kapazität $(C/C_{\text{ox}})_{\min}$ bzw. die Flachbandkapazität $(C/C_{\text{ox}})_{\text{FB}}$. Geben Sie jeweils Formeln und Zahlenwerte an.

(1) Einsetzen der schwachen Inversion



(2) Einsetzen der starken Inversion



- 3) Analysieren Sie die Schaltung in Abb. 3a. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in Abb. 3b charakterisiert. Im Arbeitspunkt sind folgende Betriebsparameter gegeben: $U_B = -12\text{ V}$, $U_{ce} = -5\text{ V}$, $U_{be} = -0,7\text{ V}$, $V_5 = -2\text{ V}$, $I_b = -2,5\text{ }\mu\text{A}$, $I_q = 9 \times I_b$, $R_4 = 0,7\text{ k}\Omega$, $R_G = 4\text{ k}\Omega$, $R_L = 22\text{ k}\Omega$.

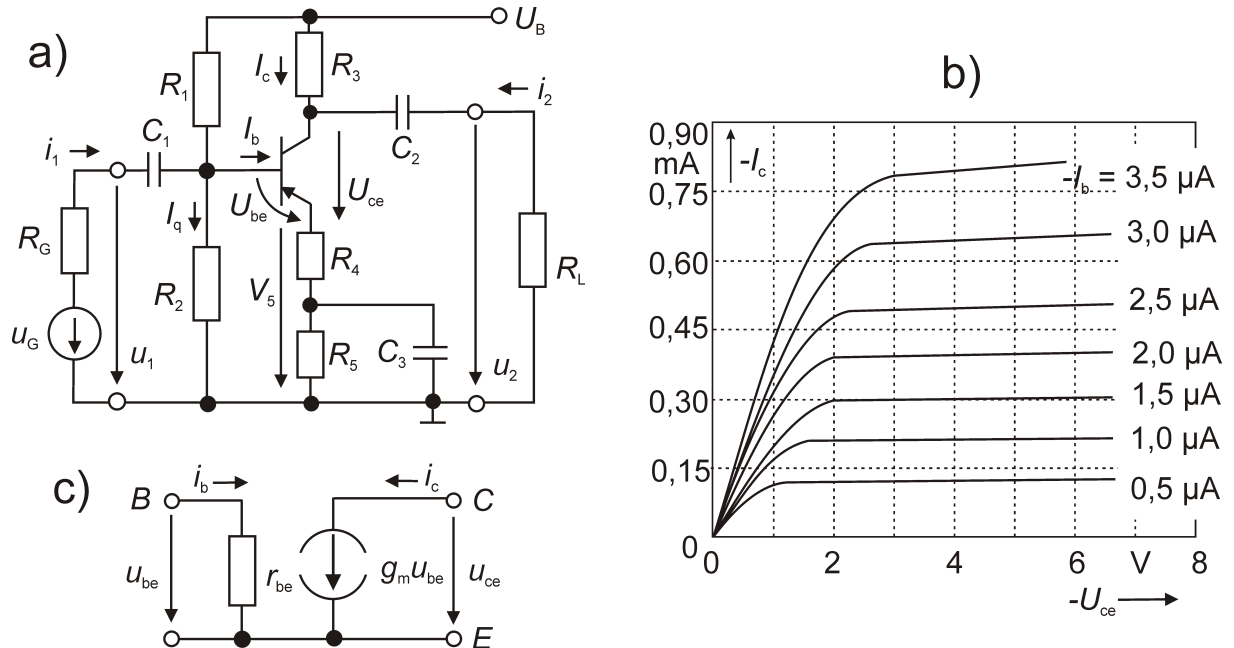


Abb. 3

- Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Ermitteln Sie den Arbeitspunkt (U_{ce} , I_c) und die Widerstände R_1 , R_2 , R_3 und R_5 . Wie groß ist I_c für Kollektor-Emitter-Kurzschluss ($U_{ce} = 0$)?
- Führen Sie eine Wechselstromanalyse durch. Zeichnen Sie hierzu die Ersatzschaltung unter Verwendung des vereinfachten Kleinsignal-Ersatzschaltbildes für den Transistor (Abb. 3c) mit den Parametern $g_m = 20\text{ mS}$ und $r_{be} = 5\text{ k}\Omega$. Die Kondensatoren C_1 , C_2 und C_3 sind im betrachteten Frequenzbereich kurzgeschlossen.
- Bestimmen Sie aus b) mit Hilfe der in a) ermittelten Werte den Eingangswiderstand $R_e = u_1/i_1$ (Hinweis: Ermitteln Sie zunächst u_1/u_{be}), die Stromverstärkung $v_i = i_2/i_1$, die Leerlaufspannungsverstärkung $v_{uL} = u_2/u_1$ ($i_2 = 0$) und die Spannungsverstärkung $v_u = u_2/u_G$ ($i_2 \neq 0$) der Schaltung formel- und zahlenmäßig. Nutzen Sie bei der Herleitung der Formeln sich entsprechend der genannten Zahlenwerte ergebende, sinnvolle Näherungen.