

Take-home exam: Grundlagen der Elektronik SS 21

Bearbeitungszeit: 2 Std.

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

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

- 1) Gegeben ist ein symmetrischer n -Kanal-JFET mit zwei Gate-Anschlüssen (Abb. 1, oben, grau: Verarmungszonen, hell: Kanal). Die Donatoren (Konzentration $N_D = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) und die Akzeptoren (Konzentration $N_A = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, schraffierte Bereiche) sind vollständig ionisiert. Die Randgebiete ($x < 0$ und $x > l$) sind zu vernachlässigen (Temperatur $T = T_0$; rel. Dielektrizitätskonstante $\epsilon_s = 11,3$; Eigenleitungskonzentration $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; $W_L(x, y_0)$; $d = 0,7 \text{ }\mu\text{m}$).

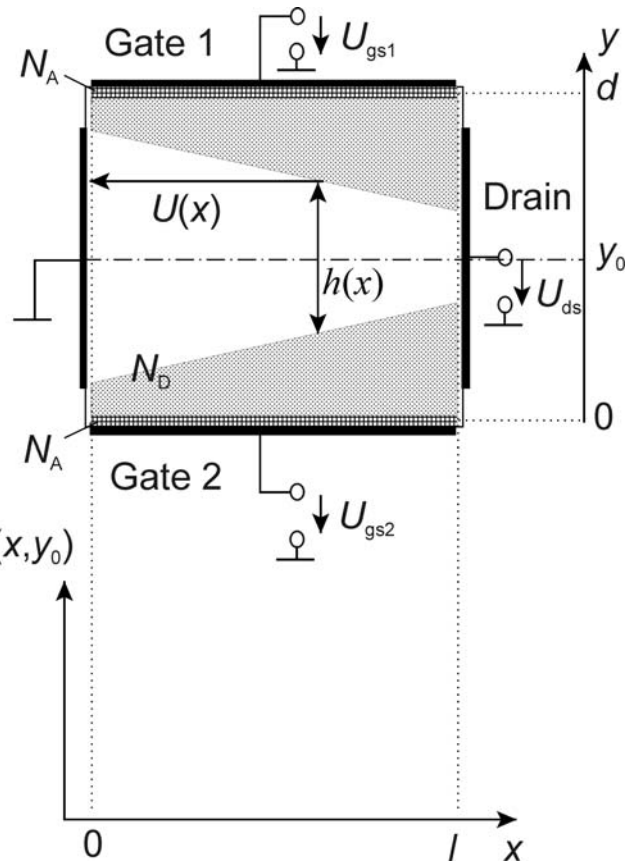


Abb. 1

- a) Skizzieren Sie (für $y = y_0$, siehe Abb. 1, oben) gemäß der Vorlage in Abb. 1, unten den Verlauf der Leitungsbandkante $W_L(x)$. Zeichnen Sie qU_{ds} ein, und geben Sie das Vorzeichen des Wertes von U_{ds} an.

- b) Berechnen Sie die Diffusionsspannung (n_{n0} , n_{p0} : Gleichgewichtskonzentration der Elektronen im n - bzw. p -Bereich; $n_{n0} \cdot p_{n0} = n_i^2$)

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}} \right)$$

- c) Bestimmen Sie die Ausdehnung $h[x, U_{gs1,2}, U(x)]$ des Kanals für den allgemeinen Fall (*gradual channel approximation*). Hinweis: Ausdehnung der Verarmungszone eines pn -Übergangs mit angelegter Spannung U_g von p nach n :

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (U_D - U_g)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = w_n + w_p$$

Vernachlässigen Sie die Beiträge der hochdotierten Bereiche (mit Herleitung).

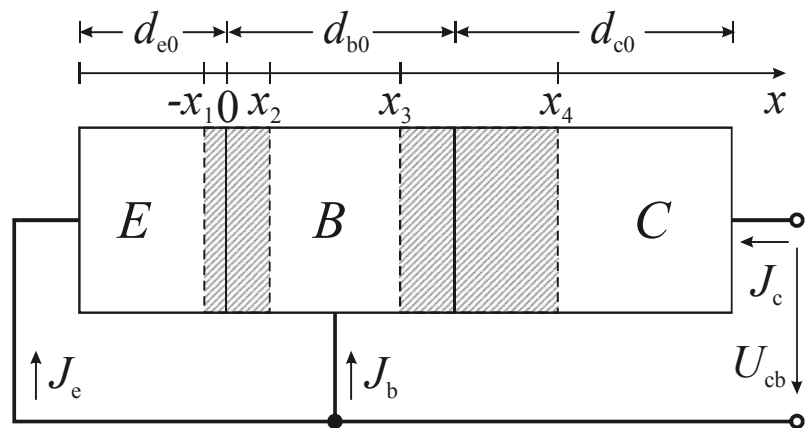
- d) Bestimmen Sie die Ausdehnung des Kanals h im spannungslosen Fall (Formel und Wert).
- e) Berechnen Sie für den Fall, dass Gate 1 und Gate 2 beide kurzgeschlossen an Massepotential sind, die Spannung U_p , bei der der Kanal am Drainende vollständig abgeschnürt wird.
- f) Wir betrachten den Fall, dass Gate 2 kurzgeschlossen ist. Welche Spannung U_{gs1} muss an Gate 1 angelegt werden, damit sich die Spannung U_p betragsmäßig um U_D auf U'_p verringert (formel- und zahlenmäßig)?

2) Der Bipolar-Transistor in

Abb. 2 soll analysiert werden. Thermische Generation/Rekombination von Ladungsträgern in den Verarmungszonen (schraffiert) und Spannungsabfälle über den Bahngebieten sind zu vernachlässigen. Die Kontakte sind ideal ohmsch. Weiter gelten: $T = T_0$; **Abb. 2**

$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $\epsilon_s = 11,3$,

$U_{cb} = -7,5 \text{ V}$ sowie folgende Daten:



	Emitter	Basis	Kollektor
Dotierungskonzentration	$N_{De} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ $\gg N_{Ac}$	$N_{Ab} = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ $\gg N_{Db}$	$N_{Dc} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $\gg N_{Ac}$
Ausdehnung Bahngebiete	$d_{e0} = 10 \text{ }\mu\text{m}$	$d_{b0} = 2 \text{ }\mu\text{m}$	$d_{c0} = 20 \text{ }\mu\text{m}$
Diffusionslänge	$L_{ne} = 20 \text{ }\mu\text{m}$	$L_{pb} = 40 \text{ }\mu\text{m}$	$L_{nc} = 100 \text{ }\mu\text{m}$
Beweglichkeit	$\mu_{ne} = 180 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_{pb} = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_{nc} = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Für die Ladungsträgerkonzentration an den n - und p -seitigen Rändern $x_0 + w_n$ und $x_0 - w_p$ der Verarmungszone eines pn -Übergangs bei $x = x_0$ mit angelegter Spannung U von p nach n gilt allgemein:

$$p(x_0 + w_n) = p_{n0} \exp\left(\frac{U}{kT}\right); \quad n(x_0 - w_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{U}{kT}\right)$$

mit den Gleichgewichtskonzentrationen n_{n0} und p_{n0} im n -Gebiet bzw. p_{p0} und n_{p0} im p -Gebiet ($n_{n0} \cdot p_{n0} = n_{p0} \cdot p_{p0} = n_i^2$). Weiterhin gilt für die Stromgleichung der Minoritätsladungsträger der Konzentration $y(x)$ in Abhängigkeit vom Ort x in einem Halbleiter allgemein:

$$J_y = \sigma_y E \pm kT\mu_y \frac{dy}{dx}$$

mit der elektrischen Leitfähigkeit σ_y und Feldstärke E . Für die Kontinuitätsgleichung gilt:

$$\frac{1}{kT\mu_y} \frac{dy}{dt} = \pm \frac{1}{kT\mu_y} \frac{dJ_y}{dx} - \frac{y - y_0}{L_y^2}$$

mit der Gleichgewichtskonzentration y_0 . Das Pluszeichen gilt jeweils für Elektronen, das Minuszeichen jeweils für Löcher.

Hinweis: Bestimmen Sie aus den Angaben der Tabelle zunächst den Minoritätsladungsträgertyp in der Basis (Elektronen oder Löcher) und ersetzen Sie dementsprechend im Folgenden y durch n bzw. p .

- Ermitteln Sie die Konzentrationen $y_b(x)$ der Minoritätsladungsträger (Abb. 2) an den Rändern der Basis x_2 und x_3 (Formeln).
- Stellen Sie eine Differentialgleichung (DGL) für $y_b(x)$ in der Basis für den stationären Zustand auf. Lösen Sie die DGL mit den Randbedingungen aus a) mit dem Ansatz:

$$y_b = A \cdot \sinh\left(\frac{x_3 - x}{L_{yb}}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x - x_2}{L_{yb}}\right) + y_{b0}.$$

Nähern Sie das Ergebnis sinnvoll für den gegebenen Anschluss von Emitter und Basis (Abb. 2) sowie den gegebenen Wert von U_{cb} .

- Nähern Sie das Ergebnis aus b) weiter unter der Annahme, dass $d_b \ll L_{yb}$ und skizzieren Sie den Verlauf. Markieren Sie x_2 , x_3 und die Gleichgewichtskonzentration y_{b0} .
- Berechnen Sie die Ausdehnung der neutralen Basis $d_b = x_3 - x_2$ und überprüfen Sie die Annahme $d_b \ll L_{yb}$. Bestimmen Sie hierfür die Ausdehnungen der Verarmungszonen in der Basis aus den Diffusionsspannungen U_{Dbe} und U_{Dbc} sowie der anliegenden Spannung U_{cb} (Formeln und Zahlenwerte). Für die Ausdehnung der Verarmungszone $w = w_n + w_p$ eines pn -Übergangs mit angelegter Spannung U von p nach n gilt allgemein:

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (U_D - U)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}; \quad N_A w_p = N_D w_n; \quad U_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}} \right); \quad n_{p0} p_{p0} = n_i^2$$

Hinweis: Ersetzen Sie zur Ermittlung von x_3 und x_2 die Parameter $w_{n,p}$ (Ausdehnung der Verarmungszone im n -Bahngebiet/ p -Bahngebiet) geeignet durch relevante zum Emitter-Basis- und Kollektor-Basis-Übergang des Transistors gehörige Parameter auf der x -Achse in Abb. 2.

- Berechnen Sie die Minoritätsladungsträger-Stromdichte in der Basis (Formel und Wert).

- 3) Analysieren Sie die Schaltung in **Abb. 3a**. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in **Abb. 3b** charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben: $U_B = 13\text{ V}$, $U_{ds} = 7\text{ V}$, $U_S = 4\text{ V}$, $I_g = -40\text{ }\mu\text{A}$, $U_g = 2\text{ V}$, $R_G = 10\text{ k}\Omega$, $R_L = 500\text{ }\Omega$.
- a) Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Ermitteln Sie den Arbeitspunkt (U_{gs} , I_d), die Widerstände R_1 , R_S und R_D und den Wert von I_d , der dem Achsenabschnitt der Arbeitsgerade bei $U_{ds} = 0$ entspricht.
 - b) 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 $r_d = 1,5\text{ k}\Omega$. Die Kondensatoren stellen im betrachteten Frequenzbereich Kurzschlüsse dar. Welcher Schaltungstyp liegt vor?
 - c) Bestimmen Sie aus b) mit Hilfe der in a) ermittelten Werte den Eingangswiderstand R_e , die Leerlaufspannungsverstärkung $v_{uL} = u_a/u_e$ ($i_a = 0$), den Ausgangswiderstand R_a ($u_G = 0$) und aus R_e , v_{uL} und R_a die Spannungsverstärkung $v_u = u_a/u_G$ ($i_a \neq 0$) der Schaltung formel- und zahlenmäßig. Geben Sie ein typisches Einsatzbeispiel für diese Schaltung an.

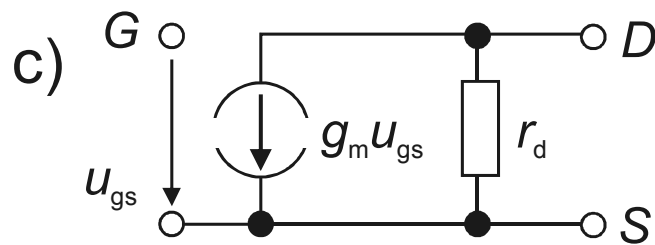
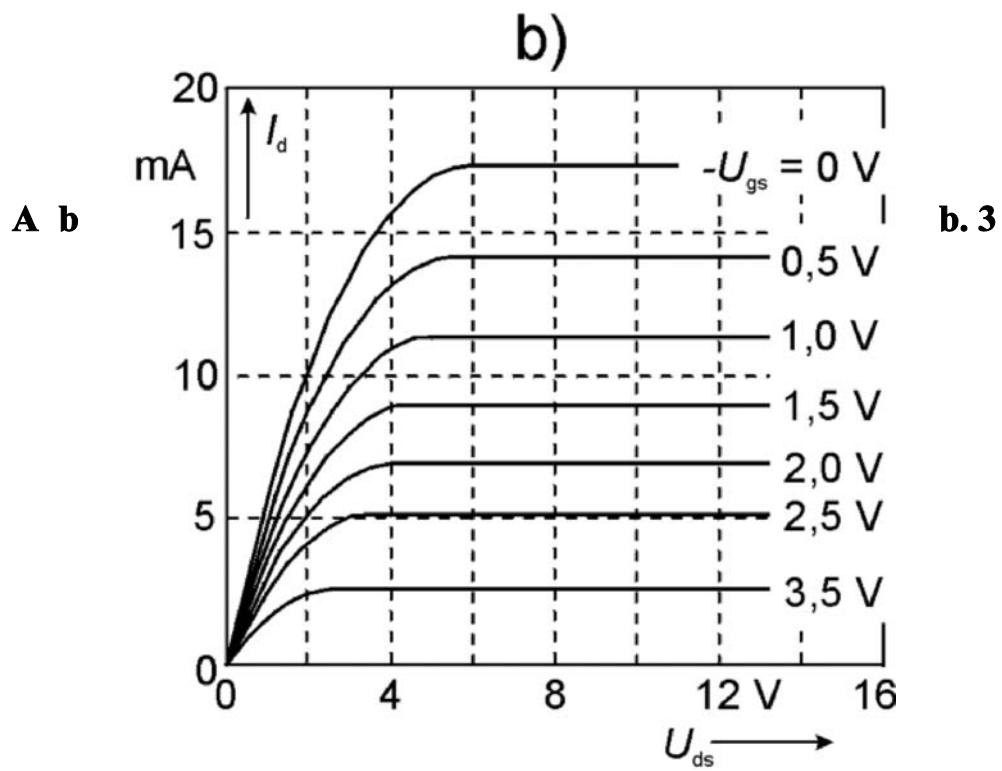
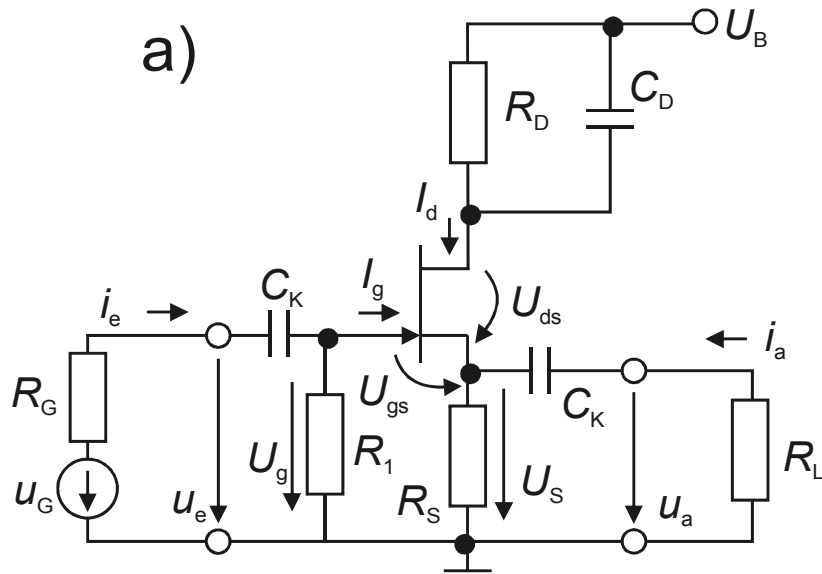


Abb. 3