Name: .... Matr.-Nr.: ....

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 15

Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)

1) Kennzeichnen Sie die eingezeichnete Ebene und Richtung durch ihre Miller-Indizes (Klammerkonventionen beachten)!

2) Welche Bandstruktur weisen die folgenden Halbleiter auf? (insgesamt 4 Kreuze)

3) Welche Aussagen zum Durchbruchverhalten eines pn-Überganges sind richtig?

4) Gegeben ist eine Verstärker-Schaltung a) und das Kleinsignal-Ersatzschaltbild des FET b). Die Kapazitäten stellen im interessierenden Frequenzbereich Kurzschlüsse dar. Zeichnen Sie das Wechselstromersatzschaltbild der Schaltung, und tragen Sie die steuernde Größe u_{gs} ein. Um welche Grundschaltung handelt es sich hier?

5) Welche der Aussagen über die Schwellenspannung U_P bei einem idealen *n*-Kanal-Sperrschicht-Feldeffekttransistor sind richtig?

6) Zeichnen Sie das Bändermodell des gezeigten, üblichen *npn*-Bipolartransistors unter normalen Betriebsbedingungen. Achten Sie auf relative Zuordnungen. Beschriften Sie W_{Fn}, W_{Fp}, W_L und W_V.

7) Das Wechselstromverhalten eines in Sperrrichtung betriebenen *pn*-Übergangs

8) Welche Aussagen zum MOSFET sind richtig?

9) Welche Aussagen zu einer Laserdiode mit Fabry-Perot-Resonator sind richtig?

10) Welche der Aussagen zur Funktion einer Leuchtdiode sind zutreffend?

Name: .... Matr.-Nr.: ....

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 15

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

Konstanten: $q = 1{,}6\cdot10^{-19}$ As; $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ J/K $= 8{,}6\cdot10^{-5}$ eV/K; $m_0 = 9{,}1\cdot10^{-31}$ kg; $c = 3\cdot10^{8}$ m/s; $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ Js; $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ As/(Vm); $\mu_0 = 1{,}26\cdot10^{-6}$ Vs/(Am); $N_A = 6{,}02\cdot10^{23}$ Atome/mol

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

1) Ein homogen mit Donatoren dotierter Halbleiter weist folgende Daten auf:

   $W_G = 1{,}5$ eV; $W_L - W_D = 100$ meV; $N_L = N_V = 1\cdot10^{18}\ \mathrm{cm^{-3}}\cdot(T/T_0)^{3/2}$; $N_D = 1\cdot10^{14}\ \mathrm{cm^{-3}}$; zur Vereinfachung sei $W_V = 0$.

   Sein elektrisches Verhalten soll bei den beiden Temperaturen $T_0 = 300$ K und $T_1 = 100$ K untersucht werden. Gehen Sie von der Elektroneutralitätsbedingung aus:

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

$$N_L \exp\left(\frac{W_F - W_L}{kT}\right) + N_A\left[4\exp\left(\frac{W_A - W_F}{kT}\right) + 1\right]^{-1} = N_V \exp\left(\frac{W_V - W_F}{kT}\right) + N_D\left[2\exp\left(\frac{W_F - W_D}{kT}\right) + 1\right]^{-1}.$$

   a) Berechnen Sie bei T_0 und T_1 die effektiven Zustandsdichten N_L, N_V, Eigenleitungskonzentration n_i und -niveau W_i sowie $N_D^+(W_F = W_L)$ und zusätzlich $W_F(n = 10^5\ \mathrm{cm^{-3}}, T_1)$ und $W_F(p = 10^5\ \mathrm{cm^{-3}}, T_1)$.

   b) Zeichnen Sie für die beiden Temperaturen unter Verwendung obiger Daten die Konzentrationen der freien Ladungsträger n und p sowie asymptotisch der ionisierten Donatorenkonzentration N_D^+ in Abhängigkeit von W_F in die Shockley-Diagramme (Abb. 1). Markieren Sie alle wichtigen Größen (N_L, N_V, n_i, W_D, W_L, W_V, W_i, $W_{F0,F1}$). Lesen Sie für Ladungsneutralität die Lage des Fermi-Niveaus $W_{F0,F1}$ sowie die Elektronen- und Löcherkonzentrationen $n_{0,1}$ und $p_{0,1}$ ab, bzw. berechnen Sie die nicht direkt ablesbare Größe für beide Temperaturen, wobei Elektroneutralität zugrunde zulegen ist.

   c) Stellen Sie die Gleichung für die Elektroneutralität auf (in Abhängigkeit von Temperatur und Lage des Fermi-Niveaus) und vereinfachen Sie sie für beide Temperaturen durch Vernachlässigungen und Näherungen aufgrund der Informationen aus den Shockley-Diagrammen. Berechnen Sie daraus $W_F(T_0$ und $T_1)$ sowie $n(T_0$ und $T_1)$ und $p(T_0$ und $T_1)$. Diskutieren Sie die Ergebnisse kurz (Formeln und Werte).

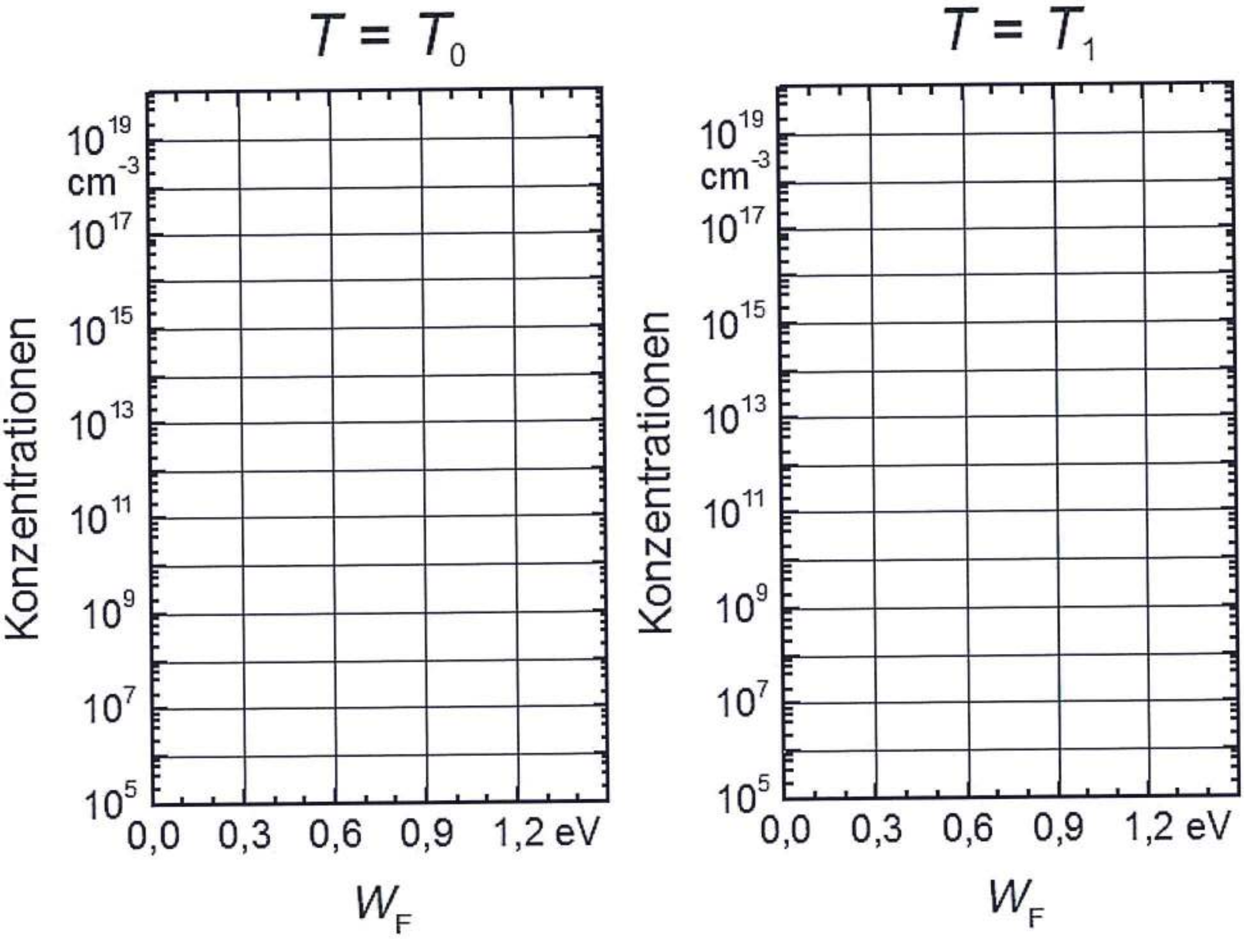


Abb. 1

2) Die Strom-Spannungs-Charakteristik $J_b(U_{cb})$ einer pn^+pn-Teststruktur mit zwei Kurzschlüssen in Abb. 2 soll beschrieben werden. Thermische Generation/Rekombination von Ladungsträgern in den Verarmungszonen und Spannungsabfälle über den Bahngebieten sind zu vernachlässigen. Es gibt keine optische Generation g. Die Kontakte sind ideal ohmsch. Folgende Daten sind bekannt: $n_i = 10^9\ \text{cm}^{-3}$ und $kT = 26$ meV sowie

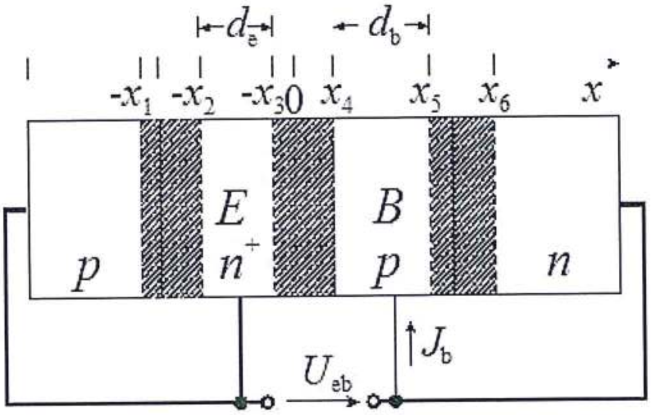


Abb. 2

Emitter	$N_{De} = 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$	$d_e = 10\ \mu\text{m}$	$L_{pe} = 0{,}2\ \mu\text{m}$	$\mu_{pe} = 80\ \text{cm}^2/\text{Vs}$
Basis	$N_{Ab} = 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$	$d_b = 1\ \mu\text{m}$	$L_{nb} = 100\ \mu\text{m}$	$\mu_{nb} = 1000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$

Es soll die Emitter-Ergiebigkeit γ bestimmt werden.

a) Berechnen Sie zunächst in den beiden neutralen Bahngebieten E und B die Ortsabhängigkeit der Minoritätsladungsträgerkonzentrationen $p_n(-x_2 \leq x \leq -x_3)$ und $n_p(x_4 \leq x \leq x_5)$ indem Sie die Stromgleichungen

$$J_p = J_{pF} + J_{pD} = \sigma_p E - qD_p \,\mathrm{grad}p \quad \text{mit } D_p = kT\mu_p/q$$
$$J_n = J_{nF} + J_{nD} = \sigma_n E + qD_n \,\mathrm{grad}n \quad \text{mit } D_n = kT\mu_n/q$$

und die Kontinuitätsgleichungen

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q}\mathrm{div}J_p - r + g \quad \text{mit } r = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \text{ und } L_p = \sqrt{D_p\tau_p}$$
$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q}\mathrm{div}J_n - r + g \quad \text{mit } r = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \text{ und } L_n = \sqrt{D_n\tau_n}$$

zu zwei Differentialgleichungen (DGLs) für $p_n(x)$ und $n_p(x)$ für den stationären Fall kombinieren.

b) Wie groß sind die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen $p_n(-x_2)$, $p_n(-x_3)$, $n_p(x_4)$ und $n_p(x_5)$ in Abhängigkeit von U_{cb} an den Rändern der neutralen Zonen allgemein (Formeln)?

c) Lösen Sie die DGLs mit den Randbedingungen aus b) in Abhängigkeit von U_{cb} und den Ansätzen

$$p_n(x) = A\cdot\sinh\left(\frac{-x_3 - x}{L_{pe}}\right) + B\cdot\sinh\left(\frac{x + x_2}{L_{pe}}\right) + p_{n0} \;;$$
$$n_p(x) = C\cdot\sinh\left(\frac{x_5 - x}{L_{nb}}\right) + D\cdot\sinh\left(\frac{x - x_4}{L_{nb}}\right) + n_{p0} \;.$$

d) Berechnen Sie die Minoritätsladungsträger-Stromdichten jeweils am Rand der Verarmungszonen $J_n(x_4)$ und $J_p(-x_3)$ (Formeln).

e) Wie groß ist die Emitter-Ergiebigkeit $\gamma = J_n(x_4)/[J_n(x_4)+J_p(-x_3)]$ (Formel und Wert)? Diskutieren Sie das Ergebnis. Nutzen Sie wenn möglich Näherungen zur Vereinfachung!

3) Betrachten Sie die Schaltung in Abb. 3a.

a) Um welche Grundschaltung handelt es sich? ______________________

Bezeichnen Sie die Art des verwendeten Transistors näher! ______________________

b) Der Arbeitspunkt wird durch die Widerstände $R_1 = 1\ \text{M}\Omega$, $R_D = 8\ \Omega$ und $U_B = 5$ V festgelegt. Zeichnen Sie in das Ausgangskennlinienfeld (Abb. 3c) des Transistors die Arbeitsgerade und den Arbeitspunkt ein.

c) Konstruieren Sie aus dem Ausgangskennlinienfeld (Abb. 3c) für die entsprechende Spannung U_{ds} die Transferkennlinie in Abb. 3d. Markieren Sie auch hier den Arbeitspunkt. Bestimmen Sie nun die y-Parameter in den beiden Arbeitspunkten y_{21t} und y_{22t} (Formeln und Werte); $y_{11t} = 0$ und $y_{12t} = 0$ sind bekannt.

d) Zeichnen Sie das entsprechende Wechselstrom-ESB unter Verwendung des y-Parameter-Ersatzschaltbildes (ESB) des Transistors (Abb. 3b). Die Kondensatoren C_K stellen im interessierenden Frequenzbereich der Wechselstromanalyse Kurzschlüsse dar.

e) Der Vierpol soll ebenfalls durch seine y-Parameter charakterisiert werden. Stellen Sie dazu zunächst die beiden Gleichungen $i_1 = f(u_1,u_2)$ und $i_2 = f(u_1,u_2)$ auf und bestimmen Sie dann die zugehörigen Parameter y_{11}, y_{12}, y_{21} und y_{22} der Schaltung (Formeln und Werte). Nutzen Sie wenn möglich Näherungen zur Vereinfachung!

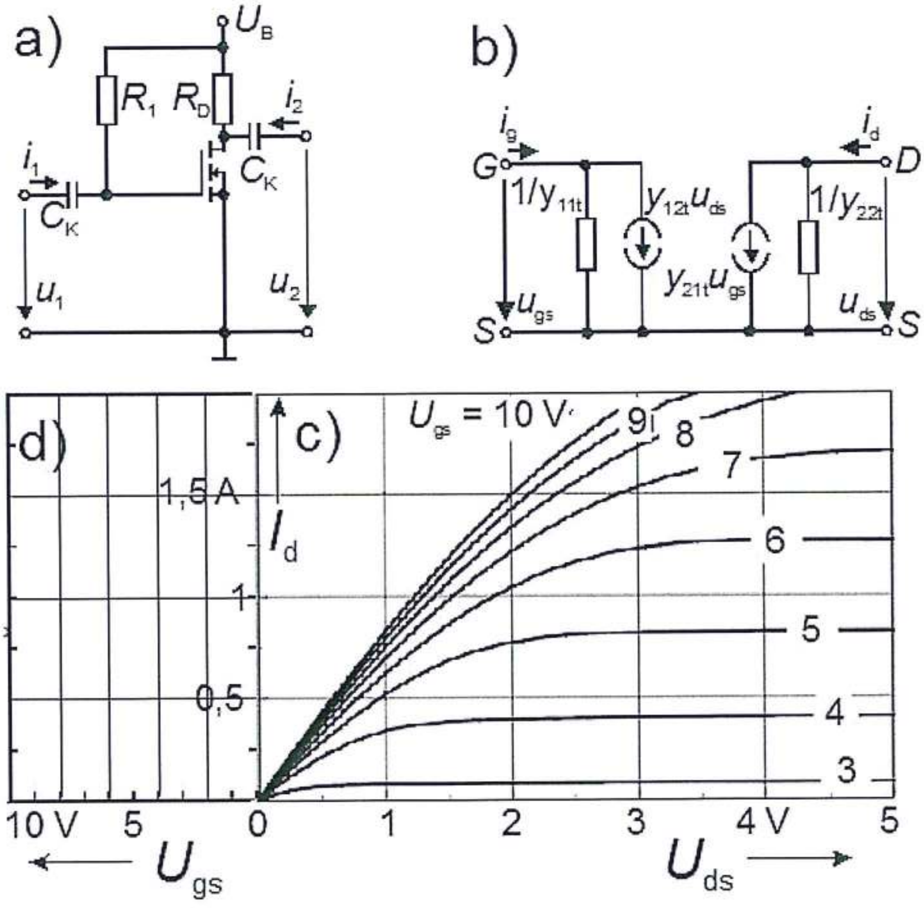
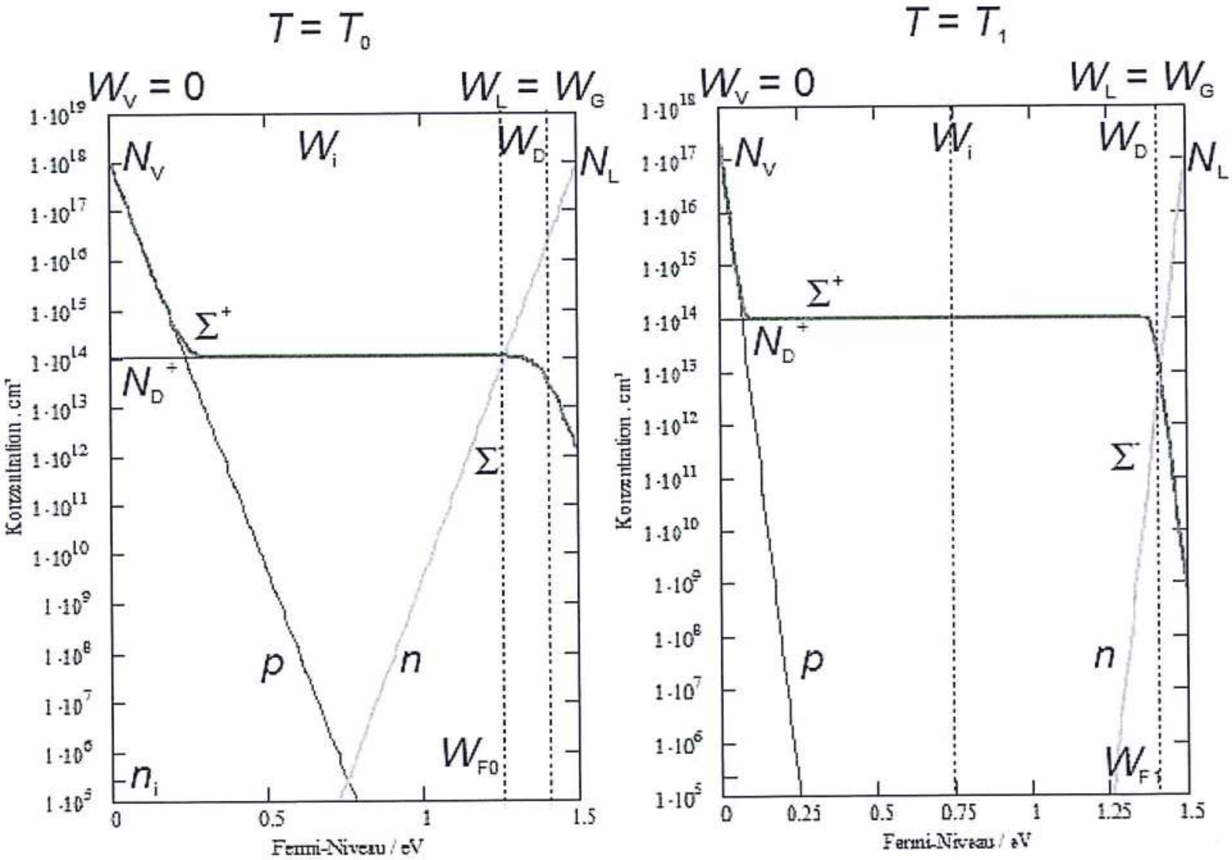


Abb. 3

Lösungen zu 1):

a) Die gesuchten Größen lassen sich aus den gegebenen Gleichungen berechnen zu $N_{L,V}(T_0) = 1\cdot10^{18}$ cm^{-3}; $N_{L,V}(T_1) = 1{,}9\cdot10^{17}$ cm^{-3}; $n_i(T_0) = [N_L(T_0)\cdot N_V(T_0)]^{0,5}\cdot\exp[-W_G/(2kT_0)] = 2{,}5\cdot10^5$ cm^{-3}; $n_i(T_1) = 3\cdot10^{-23}$ cm^{-3}; $W_i(T_0) = W_i(T_1) = 0{,}75$ eV; $N_D^+(W_F = W_L, T_0) = 1\cdot10^{12}$ cm^{-3}; $N_D^+(W_F = W_L, T_1) = 4{,}6\cdot10^8$ cm^{-3}.

b) Mit den Daten aus a) und $W_F(n = 10^5$ cm^{-3}, $T_1) = 1{,}26$ eV sowie $W_F(p = 10^5$ cm^{-3}, $T_1) = 0{,}24$ eV können die Shockley-Diagramme für beide Fälle konstruiert werden. Die fett gezeichneten Verläufe entsprechen den Summenkurven der positiven und negativen Ladungen. Für Neutralität ergibt sich $W_{F0} \approx 1{,}26$ eV also $n_0 \approx N_D = 1\cdot10^{14}$ cm^{-3} und $p_0 = n_i^2/n_0 = 6\cdot10^{-4}$ cm^{-3} bzw. $W_{F1} = 1{,}41$ eV und $n_1 \approx 2\cdot10^{13}$ cm^{-3} sowie $p_1 = n_i^2/n_1 = 5\cdot10^{-55}$ cm^{-3}.



c) Die Neutralitätsbedingung lautet in diesem Fall: $n = p + N_D^+$.

Zunächst betrachten wir T_0. Im Shockley-Diagramm (links) wird deutlich, dass die Löcherkonzentration vernachlässigbar ist und dass noch alle Donatoren ionisiert sind (Störstellenerschöpfung). Also folgt $n_0 \approx N_D = 1\cdot10^{14}$ cm^{-3} und $p_0 = n_i^2/n_0 = 6\cdot10^{-4}$ cm^{-3}. Die Lage des Fermi-Niveaus errechnet sich aus

$$n_0 = N_D = N_L \exp\left(\frac{W_{F0} - W_L}{kT_0}\right) \rightarrow W_{F0} = W_G + kT_0 \ln\frac{N_D}{N_L} = 1{,}26 \text{ eV}.$$

Bei T_1 kann man dem Shockley-Diagramm entnehmen, dass

$$n_1 = N_L \exp\left(\frac{W_{F1} - W_L}{kT_1}\right) = N_D^+ = N_D\left[2\exp\left(\frac{W_{F1} - W_D}{kT_1}\right) + 1\right]^{-1} \approx \frac{N_D}{2}\exp\left(\frac{W_D - W_{F1}}{kT_1}\right)$$

$$\rightarrow W_{F1} = \frac{W_D + W_G - kT_1 \ln\frac{2N_L}{N_D}}{2} = 1{,}41 \text{ eV und } n_1 = 9{,}4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3};\ p_1 = 10^{-54} \text{ cm}^{-3}.$$

In diesem Fall befindet sich der Halbleiter in der Störstellenreserve.

Lösungen zu 2):

a) In den Bahngebieten ist die elektrische Feldstärke vernachlässigbar klein, so dass für die Minoritätsladungsträgerstromdichten für den eindimensionalen Fall im stationären Zustand gilt:

$$J_p = 0 - qD_p\frac{dp_n}{dx} \text{ und } 0 = \frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dx} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + 0 \text{ für } -x_2 \le x \le -x_3$$

$$J_n = 0 + qD_n\frac{dn_p}{dx} \text{ und } 0 = \frac{dn}{dt} = \frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dx} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + 0 \text{ für } x_4 \le x \le x_5 .$$

Daraus ergeben sich die beiden DGLs:

$$0 = \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{L_{pe}^2} \text{ mit } L_{pe}^2 = \tau_{pe} D_{pe} \text{ für } -x_2 \le x \le -x_3$$

$$0 = \frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_{nb}^2} \text{ mit } L_{nb}^2 = \tau_{nb} D_{nb} \text{ für } x_4 \le x \le x_5 .$$

b) Die Randbedingungen ergeben sich aus (1.63) und den beiden Kurzschlüssen sowie der Sapnnungsrichtung zu

$$p_n(-x_2) = p_{n0};\ p_n(-x_3) = p_{n0}\exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right)$$

$$n_p(x_4) = n_{p0}\exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right);\ n_p(x_5) = n_{p0}.$$

c) Mit den Lösungsansätzen und den 4 Randbedingungen aus b) erhält man für die unbekannten Konstanten A bis D

$$p_n(-x_2) = p_{n0} = A \cdot \sinh\left(\frac{-x_3 + x_2}{L_{pe}}\right) + B \cdot 0 + p_{n0} \rightarrow A = 0;$$

$$p_n(-x_3) = p_{n0} \exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right) = B \cdot \sinh\left(\frac{-x_3 + x_2}{L_{pe}}\right) + p_{n0} \rightarrow B = \frac{p_{n0}\left[\exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right) - 1\right]}{\sinh\left(\frac{-x_3 + x_2}{L_{pe}}\right)};$$

$$n_p(x_5) = n_{p0} = C \cdot 0 + D \cdot \sinh\left(\frac{x_5 - x_4}{L_{nb}}\right) + n_{p0} \rightarrow D = 0;$$

$$n_p(x_4) = n_{p0} \exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right) = C \cdot \sinh\left(\frac{x_5 - x_4}{L_{nb}}\right) + n_{p0} \rightarrow C = \frac{n_{p0}\left[\exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right) - 1\right]}{\sinh\left(\frac{x_5 - x_4}{L_{nb}}\right)}.$$

Die Lösungen lauten daher

$$p_n(x) - p_{n0} = p_{n0}\left[\exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right) - 1\right] \cdot \frac{\sinh\left(\frac{x + x_2}{L_{pe}}\right)}{\sinh\left(\frac{d_e}{L_{pe}}\right)};$$

$$n_p(x) - n_{p0} = n_{p0}\left[\exp\left(\frac{-qU_{eb}}{kT}\right) - 1\right] \cdot \frac{\sinh\left(\frac{x_5 - x}{L_{nb}}\right)}{\sinh\left(\frac{d_b}{L_{nb}}\right)}.$$

d) Bei den Minoritätsladungsträgerströmen an den Rändern der Verarmungszone handelt es sich um reine Diffusionsströme. Daher folgt

$$J_{\mathrm{p}}(-x_3) = -\mathrm{q}D_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{n}}}{\mathrm{d}x}\bigg|_{-x_3} = -\mathrm{q}D_{\mathrm{p}}\cdot p_{\mathrm{n0}}\left[\exp\left(\frac{-\mathrm{q}U_{\mathrm{eb}}}{\mathrm{k}T}\right)-1\right]\cdot\frac{1}{L_{\mathrm{pe}}}\cdot\frac{1}{\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{e}}}{L_{\mathrm{pe}}}\right)}\;;$$

$$J_{\mathrm{n}}(x_4) = \mathrm{q}D_{\mathrm{n}}\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}x}\bigg|_{x_4} = \mathrm{q}D_{\mathrm{n}}\cdot n_{\mathrm{p0}}\left[\exp\left(\frac{-\mathrm{q}U_{\mathrm{eb}}}{\mathrm{k}T}\right)-1\right]\cdot\frac{-1}{L_{\mathrm{nb}}}\cdot\frac{1}{\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{b}}}{L_{\mathrm{nb}}}\right)}\;.$$

e) Für die Emitterergiebigkeit folgt

$$\gamma = \frac{J_{\mathrm{n}}(x_4)}{J_{\mathrm{n}}(x_4)+J_{\mathrm{p}}(-x_3)}$$

$$= -\frac{\dfrac{\mathrm{q}D_{\mathrm{n}}\cdot n_{\mathrm{p0}}}{-L_{\mathrm{nb}}\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{b}}}{L_{\mathrm{nb}}}\right)}\left[\exp\left(\frac{-\mathrm{q}U_{\mathrm{eb}}}{\mathrm{k}T}\right)-1\right]}{\dfrac{\mathrm{q}D_{\mathrm{n}}\cdot n_{\mathrm{p0}}}{-L_{\mathrm{nb}}\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{b}}}{L_{\mathrm{nb}}}\right)}\left[\exp\left(\frac{-\mathrm{q}U_{\mathrm{eb}}}{\mathrm{k}T}\right)-1\right]-\dfrac{\mathrm{q}D_{\mathrm{p}}\cdot p_{\mathrm{n0}}}{L_{\mathrm{pe}}\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{e}}}{L_{\mathrm{pe}}}\right)}\left[\exp\left(\frac{-\mathrm{q}U_{\mathrm{eb}}}{\mathrm{k}T}\right)-1\right]}\;;$$

$$= \frac{1}{1+\dfrac{D_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{n}}}\dfrac{N_{\mathrm{Ab}}}{N_{\mathrm{De}}}\dfrac{L_{\mathrm{nb}}}{L_{\mathrm{pe}}}\dfrac{\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{b}}}{L_{\mathrm{nb}}}\right)}{\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{e}}}{L_{\mathrm{pe}}}\right)}} \approx \frac{1}{1+\dfrac{D_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{n}}}\dfrac{N_{\mathrm{Ab}}}{N_{\mathrm{De}}}\dfrac{d_{\mathrm{b}}}{L_{\mathrm{pe}}\tanh\left(\frac{d_{\mathrm{e}}}{L_{\mathrm{pe}}}\right)}}\quad \text{mit } p_{\mathrm{n0}} = \frac{n_{\mathrm{i}}^2}{N_{\mathrm{De}}} \text{ und } n_{\mathrm{p0}} = \frac{n_{\mathrm{i}}^2}{N_{\mathrm{Ab}}}.$$

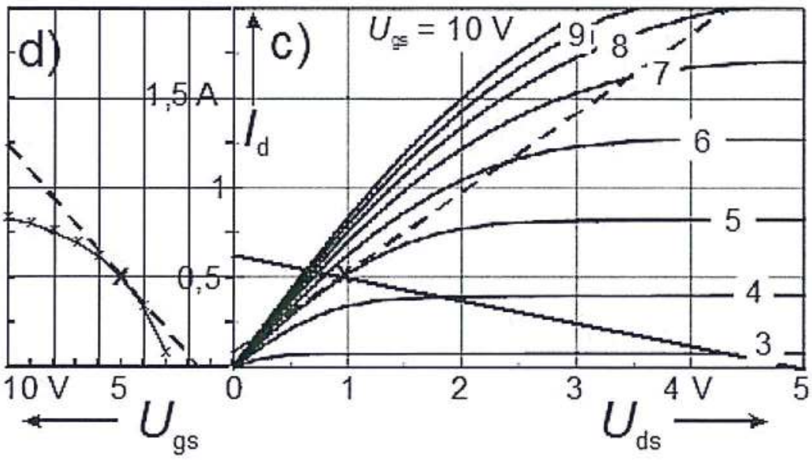
Einsetzen der Werte ergibt $\gamma = 0{,}996$. Um möglichst nahe an 1 zu kommen, muss also gelten $N_{\mathrm{Ab}} \ll N_{\mathrm{De}}$ (immer die hochdotierte Seite bestimmt den Stromfluss über den *pn*-Übergang) und $d_{\mathrm{b}} \ll L_{\mathrm{pe}} \lesssim d_{\mathrm{e}}$.

Lösungen zu 3):

a) Es handelt sich um einen *n*-Kanal MOSFET in Source-Schaltung (Source ist im Wechselstrom-ESB sowohl im Eingangs- als auch im Ausgangskreis enthalten).

b) Die Arbeitsgerade ergibt sich zwischen $U_{\mathrm{ds}}(I_{\mathrm{d}} = 0) = U_{\mathrm{B}}$ und $I_{\mathrm{d}}(U_{\mathrm{ds}} = 0) = U_{\mathrm{B}}/R_{\mathrm{D}} = 625$ mA. Der

Arbeitspunkt ergibt sich aus der Tatsache, dass das Gate über R_1 auf U_B gezogen wird, folgt $U_{gs} = 5$ V.

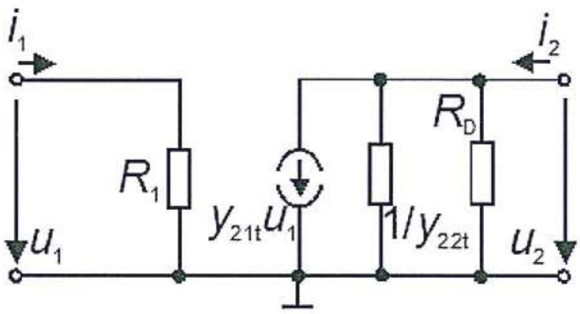


c) Der Arbeitspunkt liegt also bei $U_{ds} = 1$ V. Folglich müssen die Stromwerte I_d in dem linken Diagramm über U_{gs} aufgetragen werden. Aus der Steigung der Tangenten in den beiden Arbeitspunkten folgt

$$y_{11t} = \left.\frac{i_g}{u_{gs}}\right|_{u_{ds}=0} = 0;\ y_{12t} = \left.\frac{i_g}{u_{ds}}\right|_{u_{gs}=0} = 0;$$

$$y_{21t} = \left.\frac{i_d}{u_{gs}}\right|_{u_{ds}=0} \approx \frac{1{,}25\,\text{A}}{8{,}5\,\text{V}} = 147\,\text{mS};\ y_{22t} = \left.\frac{i_d}{u_{ds}}\right|_{u_{gs}=0} \approx \frac{1{,}9\,\text{A}}{4{,}3\,\text{V}} = 442\,\text{mS}.$$

d) Mit dem vereinfachten Transistor-ESB, den kurzgeschlossenen Kapazitäten und der auf Masse gelegten Versorgungsspannung ergibt sich das einfache Wechselstrom-ESB.



e) Die Vierpolgleichungen in y-Parameterdarstellung ergeben sich analog zu Abb. 3b

$$i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2 \text{ und } i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2.$$

Die entsprechenden Parameter ergeben sich durch direktes Ablesen (vgl. Abb. 3b) zu

$$y_{11} = \left.\frac{i_1}{u_1}\right|_{u_2=0} = \frac{1}{R_1} = 1\,\mu\text{S};\ y_{12} = \left.\frac{i_1}{u_2}\right|_{u_1=0} = 0;$$

$$y_{21} = \left.\frac{i_2}{u_1}\right|_{u_2=0} = y_{21\text{t}} = 147\,\text{mS};\ y_{22} = \left.\frac{i_2}{u_2}\right|_{u_1=0} = \frac{1}{R_\text{D}} + y_{22\text{t}} = 567\,\text{mS}.$$