

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 16/17**Kurzfragen ohne Unterlagen** (Bearbeitungszeit: 30 min)

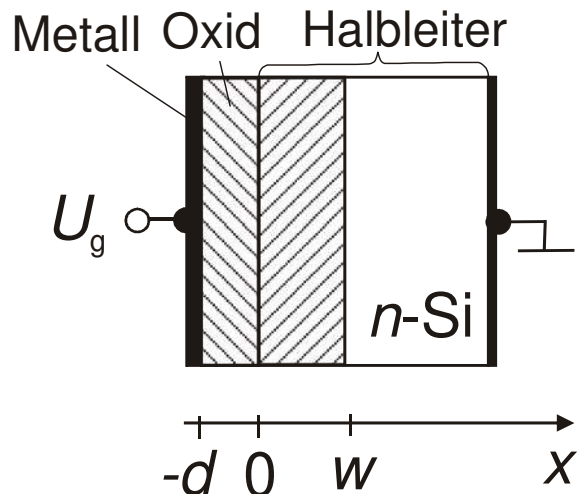
- 1) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man (richtige ankreuzen)
- 2) Welche der Aussagen zu einem Halbleiter im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
- 3) Um welche digitale Grundsaltung handelt es sich bei dem Bild rechts unten?
Um welche Transistoren handelt es sich bei M_1 und M_2 (Funktionsprinzip, Details)?
- 4) Betrachten Sie die nebenstehende Schaltung mit einem idealen Operationsverstärker. Bestimmen Sie die Ausgangsspannung u_a in Abhängigkeit von den Eingangsspannungen u_1 und u_2 sowie den Widerständen.
Wie lässt sich die Funktion der Schaltung beschreiben?
- 5) Welche der Aussagen zur Kapazität C einer pn -Diode mit abruptem Übergang, homogenen Dotierungen und Vorspannung U_0 zwischen p - und n -Bereich sind zutreffend?
- 6) Wie groß ist in einem Diamantgitter mit der Gitterkonstante a
der Abstand zweier nächstbenachbarter Gitteratome (Formel)?
die Konzentration der Gitteratome (Formel und Zahlenwert)?
- 7) Gegeben ist das Bändermodell $\mathcal{W}(x)$ von Si. Markieren Sie für den Fall der n -Dotierung das Ferminiveau \mathcal{W}_F . Skizzieren Sie die Zustandsdichten der Elektronen im Leitungsband und der Löcher im Valenzband $D(\mathcal{W})$ in parabolischer Näherung, sowie bei Raumtemperatur die Fermi-Verteilung $f(\mathcal{W})$ und die Elektronen- und Löcherkonzentrationen im Leitungs- bzw. Valenzband $n(\mathcal{W})$, $p(\mathcal{W})$ in den vorbereiteten Koordinatensystemen.
- 8) Welche der Aussagen zu dem gezeigten Bändermodell mit den Bandkanten \mathcal{W}_V und \mathcal{W}_L sind richtig? Markieren Sie an den Pfeilen das Quasi-Fermi-niveau \mathcal{W}_{Fn} für die Elektronen bzw. \mathcal{W}_{Fp} für die Löcher.
- 9) Wir betrachten die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration $n(T_0/T)$ von n -leitendem Silizium mit $\mathcal{W}_G = 1,11$ eV, $\mathcal{W}_L - \mathcal{W}_D = 0,06$ eV, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Skizzieren Sie diese einfach logarithmisch in die gegebene Vorlage. Ergänzen Sie die Achsenbeschriftung ($T_0 = 300$ K). Markieren Sie die drei charakteristischen Bereiche Eigenleitung (1), Störstellenreserve (2) und Störstellenerschöpfung (3). Ordnen Sie anhand der Ziffern (1), (2) bzw. (3) die jeweilige Temperaturabhängigkeit zu.
- 10) Ergänzen Sie die folgenden Aussagen zu den Eigenschaften zweier bis auf ihre effektive Elektronenmasse im Leitungsband ($m_{L,A}^* < m_{L,B}^*$) identischer Halbleiter A und B in den punktierten Bereichen durch " $>$ ", " $<$ " oder " $=$ ".

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 16/17

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

Konstanten: $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$; $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$;
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/(Am)}$;
 $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Atome/mol}$

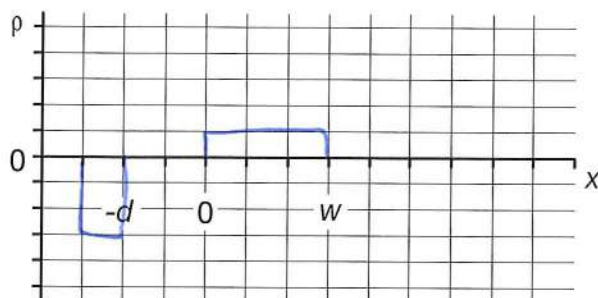
- 1) **Abb. 1** zeigt eine ideale Metall-Oxid-*n*-Halbleiter (MOS)-Struktur mit am metallartigen Poly-Silizium-Gate anliegender Spannung U_g . Gehen Sie, wie bei 300 K üblich, davon aus, dass die Dotierstoffe vollständig ionisiert sind ($N_D^+ = N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) und die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht ($0 \leq x \leq w$) keine Rolle spielen. Für den Kapazitätsbelag der 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 **Abb. 1** gegeben: $d = 20 \text{ nm}$; $\epsilon_{\text{ox}} = 3$; $\epsilon_s = 11,7$; $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.



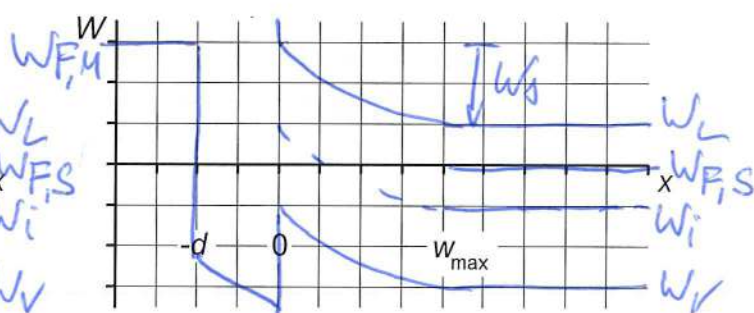
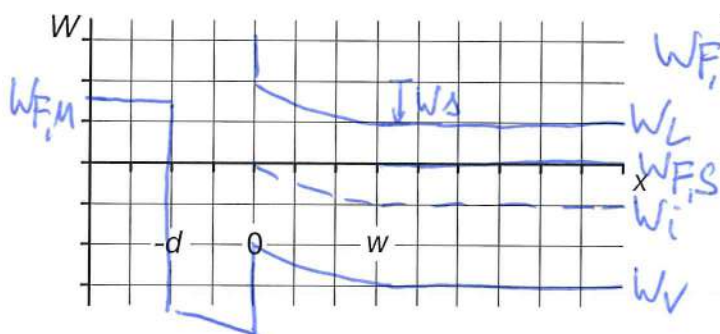
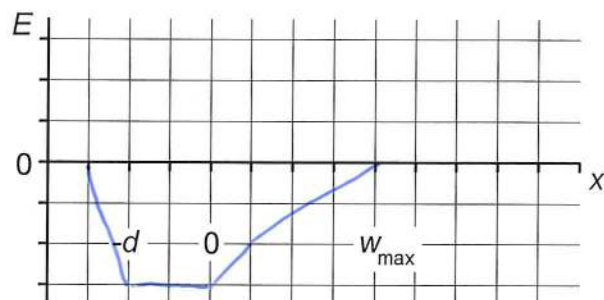
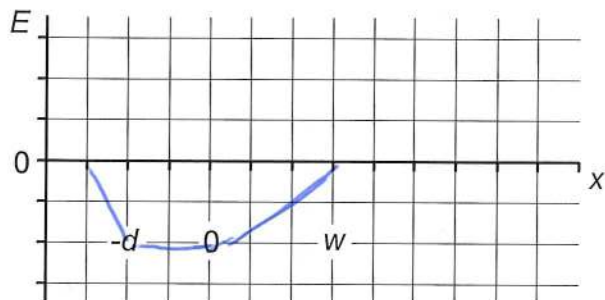
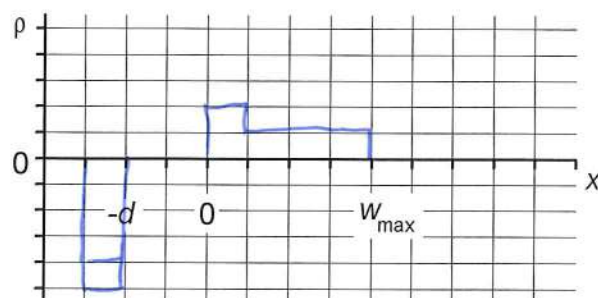
- a) Skizzieren Sie das vereinfachte Kapazitäts-Ersatzschaltbild der MOS-Struktur. Ermitteln Sie den Gesamtkapazitätsbelag der Struktur C bezogen auf C_{ox} in Abhängigkeit von der Sperrschichtausdehnung w . Skizzieren Sie für niedrige (gestrichelt) und hohe (durchgezogen) Frequenzen den Verlauf von 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 in der Vorlage die Verläufe der Raumladung, der elektrischen Feldstärke und der Bandkanten W_L und W_V für den Fall des Einsetzens der schwachen Inversion (1) mit $W_s = W_F - W_i$ und der starken Inversion (2) mit $W_s = 2(W_F - W_i)$. Markieren Sie W_s , W_i , W_L und W_V sowie die Fermienergien im Metall $W_{F,M}$ und im Halbleiter $W_{F,S}$.
- c) Bestimmen Sie die Bandaufwölbung W_s im Halbleiter in Abhängigkeit von der entsprechenden Dotierungskonzentration N , für die N_D bzw. N_A einzusetzen ist, und der Eigenleitungskonzentration n_i (Formel) mit:

$$n = N_L \exp\left(\frac{W_F - W_L}{kT}\right) ; \quad n_i = N_L \exp\left(\frac{W_i - W_L}{kT}\right)$$

(1) Einsetzen der schwachen Inversion



(2) Einsetzen der starken Inversion



d) Bestimmen Sie die bei (2) erreichte maximale Ausdehnung der Sperrschicht w_{\max} mit:

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

und daraus die minimale relative Kapazität $(C/C_{\text{ox}})_{\min}$ (Formeln und Zahlenwerte für beide Größen). Folgende Daten sind gegeben: $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $d = 20 \text{ nm}$; $\epsilon_{\text{ox}} = 3$; $\epsilon_s = 11,7$; $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Name:.....

- 2) Der Bipolar-Transistor in **Abb. 2** mit den unten gegebenen Daten soll bei $T = 300\text{ K}$ 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 gilt: $n_i = 10^{10}\text{ cm}^{-3}$, $\epsilon_s = 11,7$, $U_{cb} = -6,7\text{ V}$ sowie:

	Emitter	Basis	Kollektor
Dotierungskonzentration	$N_{Ae} = 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ $\gg N_{De}$	$N_{Db} = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ $\gg N_{Ab}$	$N_{Ac} = 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ $\gg N_{Dc}$
Ausdehnung Bahngebiete	$d_{e0} = 10\text{ }\mu\text{m}$	$d_{b0} = 3\text{ }\mu\text{m}$	$d_{c0} = 20\text{ }\mu\text{m}$
Diffusionslänge	$L_{ne} = 20\text{ }\mu\text{m}$	$L_{pb} = 50\text{ }\mu\text{m}$	$L_{nc} = 100\text{ }\mu\text{m}$
Beweglichkeit	$\mu_{ne} = 180\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_{pb} = 500\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_{nc} = 1000\text{ cm}^2/\text{Vs}$

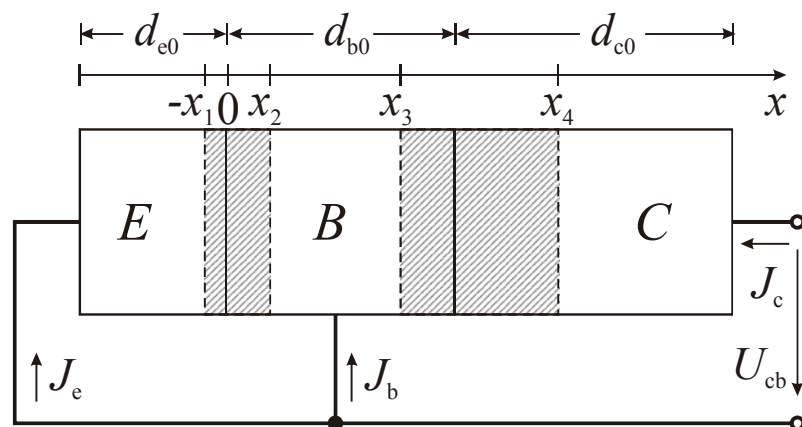


Abb. 2

Hinweis: An den pn -Übergängen (mit dem Spannungspfeil von p nach n) gilt allgemein:

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

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{p_{n0}} \right); \quad p_{n0} N_D = n_i^2; \quad p_n(x_n) = p_{n0} \exp \left(\frac{qU}{kT} \right) \cdot N$$

Ersetzen Sie im Folgenden die hier benutzten allgemeinen Parameter $w_{n,p}$ (Ausdehnung der Verarmungszone im n -Bahngebiet/ p -Bahngebiet) und x_n (Rand des n -Bahngebietes zur Verarmungszone) durch die zum Transistor gehörigen Parameter auf der x -Achse in Abb. 2.

- a) Berechnen Sie kT/q , die Diffusionsspannungen U_{Deb} und U_{Dcb} sowie die Ausdehnung der neutralen Basis $d_b = x_3 - x_2$ (Formeln) und zahlenmäßig.
- b) Ermitteln Sie die Minoritätsladungsträgerkonzentration $y_b(x)$ an den Rändern der neutralen Basis x_2 und x_3 und skizzieren Sie deren Verlauf in der neutralen Basis. Markieren Sie die Gleichgewichtskonzentration y_{b0} . Geben Sie zuvor den Typ der Minoritätsladungsträger an, der in der Basis vorliegt, d.h. ersetzen Sie hier und im Folgenden y durch n oder p .
- c) Für die Stromgleichung der Elektronen bzw. Löcher in einem Halbleiter gilt allgemein:

$$J_n = \sigma_n E + kT\mu_n \frac{dn}{dx} \text{ bzw. } J_p = \sigma_p E - kT\mu_p \frac{dp}{dx}$$

mit der elektrischen Leitfähigkeit $\sigma_{n,p}$ und Feldstärke E . Für die Kontinuitätsgleichung gilt:

$$\frac{1}{kT\mu_n} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{kT\mu_n} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{n-n_0}{L_n^2} \text{ bzw. } \frac{1}{kT\mu_p} \frac{dp}{dt} = -\frac{1}{kT\mu_p} \frac{dJ_p}{dx} - \frac{p-p_0}{L_p^2}$$

Stellen Sie hieraus eine Differentialgleichung (DGL) für $y_b(x)$ im stationären Zustand auf.

- d) Lösen Sie die DGL mit den Randbedingungen aus b) in Abhängigkeit von U_{cb} und dem Ansatz

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

- e) Berechnen Sie die Minoritätsladungsträger-Stromdichte an den Rändern der neutralen Basis $J_y(x_2)$ und $J_y(x_3)$ (Formeln und Werte) und den Basistransportfaktor $\beta_T = J_y(x_3)/J_y(x_2)$ (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:

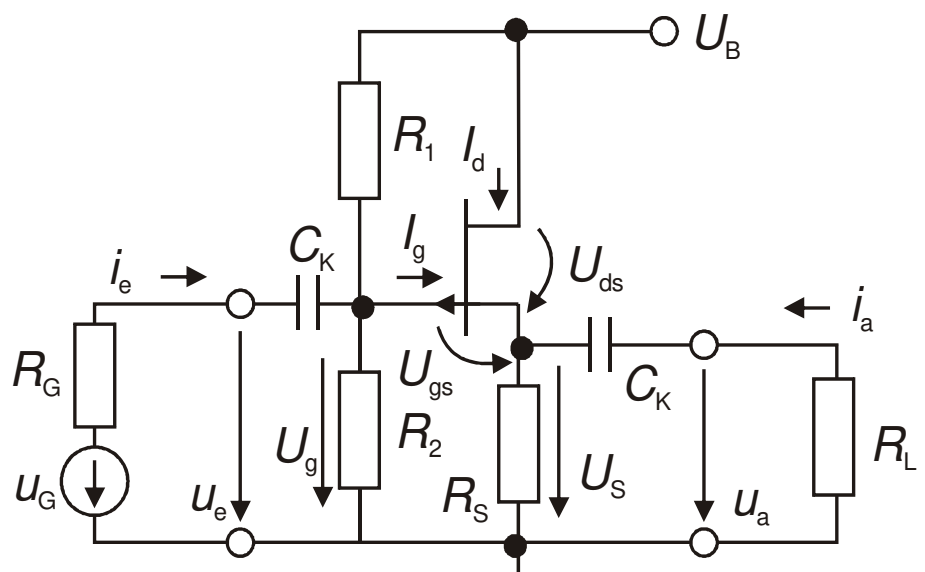
$$U_B = -8 \text{ V}, U_{ds} = -5,5 \text{ V},$$

$$I_d = -60 \text{ mA}, I_g \approx 0,$$

$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega,$$

$$R_G = 80 \text{ k}\Omega,$$

$$R_L = 2 \text{ k}\Omega.$$



Name:.....

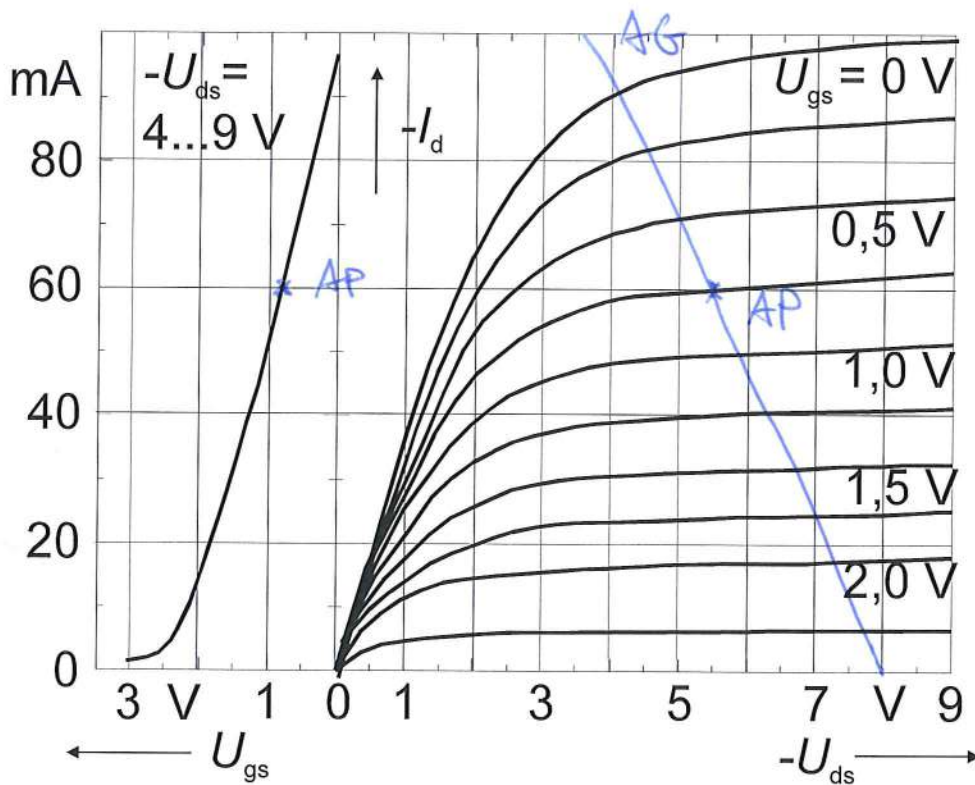


Abb. 3b

- a) Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Tragen Sie die Arbeitspunkte (AP) und die Arbeitsgerade (AG) in das Kennlinienfeld (Abb. 3b) ein. Lesen Sie U_{gs} im AP ab und ermitteln Sie U_s , U_g und die Widerstände R_2 und R_s .

- b) Führen Sie eine Wechselstromanalyse durch. Welcher Schaltungstyp liegt vor? Zeichnen Sie hierzu die Ersatzschaltung unter Verwendung des Kleinsignal-Ersatzschaltbildes für den Transistor (Abb. 3c). Die Kondensatoren stellen hierbei Kurzschlüsse dar.

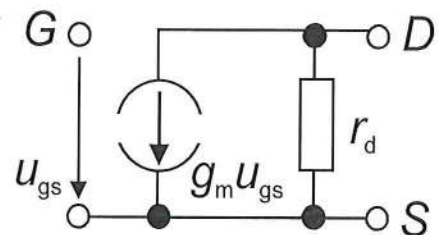
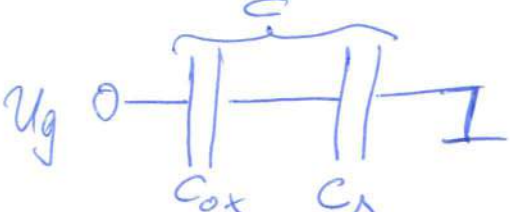


Abb. 3c

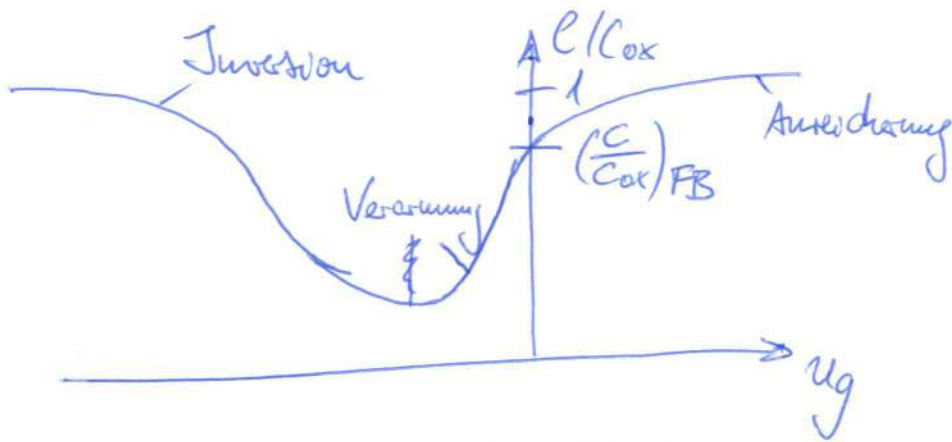
- c) Ermitteln Sie aus dem Kennlinienfeld (Abb. 3b) im AP die Ersatzschaltbild-Parameter $g_m = |\Delta I_d / \Delta U_{gs}|_{AP}$ und $r_d = |\Delta U_{ds} / \Delta I_d|_{AP}$. Bestimmen Sie aus b) mit Hilfe der in a) ermittelten Werte den Eingangswiderstand $R_e = u_e / i_e$, die Leerlaufspannungsverstärkung $v_{uL} = u_a / u_e$ ($i_a = 0$), die Spannungsverstärkung $v_u = u_a / u_G$ ($i_a \neq 0$) und den Ausgangswiderstand $R_a = u_a / i_a$ ($u_G = 0$) der Schaltung formel- und zahlenmäßig. Benennen Sie ein Anwendungsbeispiel.

1a)



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s}$$

$$\rightarrow C = \frac{C_{ox} C_s}{C_{ox} + C_s} \rightarrow \frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{1 + \frac{C_{ox}}{C_s}}$$



$$= \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox} \omega}{\epsilon_s d}}$$

c)

$$n = N_D = N_L \exp\left(\frac{W_F - W_L}{kT}\right)$$

$$n_i = N_L \exp\left(\frac{W_i - W_L}{kT}\right)$$

$$\left. \begin{array}{l} n = N_D = N_L \exp\left(\frac{W_F - W_L}{kT}\right) \\ n_i = N_L \exp\left(\frac{W_i - W_L}{kT}\right) \end{array} \right\} \frac{N_D}{n_i} = \exp\left(\frac{W_F - W_i}{kT}\right)$$

$$\rightarrow W_F - W_i = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

(1) $W_s = W_F - W_i = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$

(2) $W_s = 2(W_F - W_i) = 2kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$

d)

$$W_{max} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 W_s}{q^2 N_A}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 (W_F - W_i)}{q^2 N_D}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)}{q^2 N_D}} = 0,265 \mu m$$

$$\left(\frac{C}{C_{ox}}\right)_{min} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \frac{W_{max}}{d}} = 0,23$$

$$kT/q = 0,0258 \text{ eV}$$

$$2a) U_{deb} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{Ae}}{P_{b0}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{Ae} N_{Db}}{n_i^2}\right) = 0,13 \text{ V}$$

$$U_{dcb} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{Ac}}{n_{b0}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{Ac} N_{Ob}}{n_i^2}\right) = 0,59 \text{ V}$$

$$W_e = \frac{N_{Ae}}{N_{Ae} + N_{Ob}} \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (U_{deb} - U_{cb})}{q} \left(\frac{1}{N_{Db}} + \frac{1}{N_{Ae}}\right)} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 U_{deb}}{q N_{Db}}} = 0,33 \mu\text{m}$$

$N_{Db} \ll N_{Ae}$

$$W_c = \frac{N_{Ac}}{N_{Ac} + N_{Db}} \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (U_{dcb} - U_{cb})}{q} \left(\frac{1}{N_{Db}} + \frac{1}{N_{Ac}}\right)} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (U_{dcb} - U_{cb}) N_{Ac}}{q N_{Db}^2}} = 0,19 \mu\text{m}$$

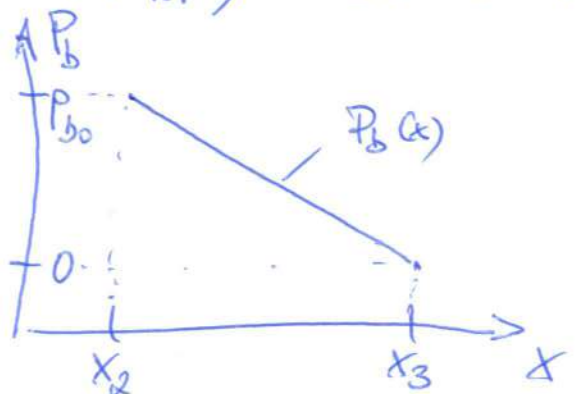
$N_{Db} \gg N_{Ac}$

$$\Rightarrow W = W_n + W_p = W_n \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) \Rightarrow W_n = \frac{W}{1 + \frac{N_D}{N_A}} = W \frac{N_A}{N_A + N_D}$$

$$d_b = x_3 - x_2 = d_{b0} - W_e - W_c = (3,00 - 0,33 - 0,10) \mu\text{m} = 2,57 \mu\text{m}$$

$$b) P_b(x_2) = P_{b0} \exp\left(\frac{qU_{deb}}{kT}\right) = P_{b0}; P_b(x_3) = P_{b0} \exp\left(\frac{U_{cb}}{kT}\right) \ll P_{b0}, U_{cb} = -6,7 \text{ V}$$

$$c) \ominus \frac{1}{q} \frac{dP_b}{dx} = \frac{d^2 P_b(x)}{dx^2} - \frac{P_b(x) - P_{b0}}{L_p^2}$$



$$d) P_b(x_2) = A \sinh\left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right) + P_{b0} = P_{b0} \Rightarrow A = 0$$

$$P_b(x_3) = B \sinh\left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right) + P_{b0} = P_{b0} \exp\left(\frac{qU_{cb}}{kT}\right)$$

$$\Rightarrow B = \frac{P_{b0}}{\sinh\left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right)} \left[\exp\left(\frac{qU_{cb}}{kT}\right) - 1 \right] \Rightarrow P_b(x) = \frac{P_{b0}}{\sinh\left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right)} \left[\exp\left(\frac{qU_{cb}}{kT}\right) - 1 \right] \sinh\left(\frac{x-x_2}{L_{pb}}\right) + P_{b0}$$

$\ll 1$

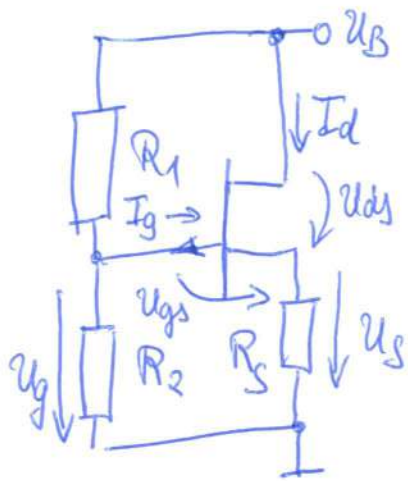
$$e) J_p(x_2) = -qT\mu_p \frac{dP_b}{dx} \Big|_{x_2} = \frac{kT\mu_p P_{b0}}{L_{pb} \sinh\left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right)} \approx \frac{kT\mu_p n_i^2}{d_b N_{Ab}} = 87,7 \frac{\text{pA}}{\text{cm}^2}$$

$$J_p(x_3) = -qT\mu_p \frac{dP_b}{dx} \Big|_{x_3} = \frac{kT\mu_p P_{b0}}{L_{pb} \tanh\left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right)} \approx \dots$$

$\ll 1$

$$\beta_r = \frac{J_p(x_3)}{J_p(x_2)} = \cosh\left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right) \approx 1 + \left(\frac{d_b}{L_{pb}}\right)^2 \approx 1,003 \approx 1$$

3a) p-Kanal-Sperrschicht-FET, aus Kennlinienfeld $U_{GS} = 0,75V$



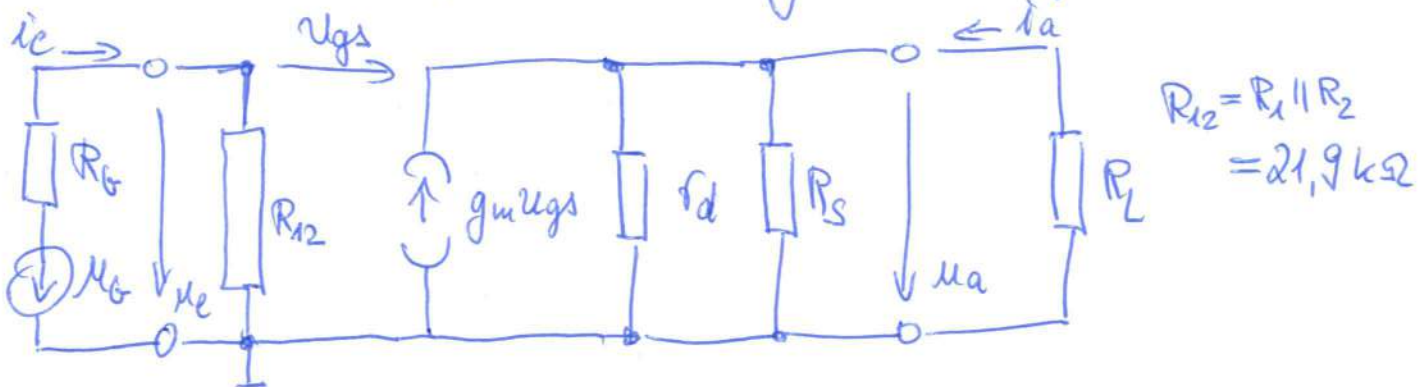
$$U_S = U_B - U_{DS} = (-8 + 5,5)V = -2,5V$$

$$U_G = U_{GS} + U_S = (0,75 + (-2,5))V = -1,75V$$

$$R_2 = R_1 \frac{U_G}{U_B - U_G} = 100k\Omega \cdot \frac{-1,75}{-8 + 1,75} = 28k\Omega$$

$$R_S = \frac{U_B - U_{DS}}{I_D} = \frac{U_S}{I_D} = \frac{-2,5V}{-30\mu A} = 83,3\Omega$$

b) Drain-Schaltung (Source-Follower)



$$R_{12} = R_1 \parallel R_2 = 21,9k\Omega$$

$$c) g_m = \left| \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right| = \frac{48\mu A}{2,15V} = 22,4\mu S; r_D = \left| \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \right| = \frac{9V}{4\mu A} = 2,25k\Omega$$

$$2,25k\Omega \gg 83,3\Omega$$

$$U_{GS} = U_G - U_a; U_a = g_m (r_D \parallel R_S) U_{GS} \approx g_m R_S U_{GS}$$

$$R_e = \frac{U_G}{i_e} = R_{12} = 21,9k\Omega; v_{uL} = \frac{U_a}{U_G} \Big|_{i_a=0} = \frac{g_m R_S U_G}{U_G} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S}$$

$$v_u = \frac{U_a}{U_G} \Big|_{i_2 \neq 0} \Rightarrow v_{uL} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = 0,65$$

$$= \frac{R_{12}}{R_{12} + R_G} \frac{g_m (r_D \parallel R_S \parallel R_L) U_{GS}}{U_G} \approx \frac{R_{12}}{R_{12} + R_G} \frac{g_m R_S U_{GS}}{U_G} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_G} v_{uL} = 0,14$$

Ausgangswiderstand: $U_G = 0 \rightarrow U_a = 0 \rightarrow U_{GS} = -U_a$

$$R_a = \frac{U_a}{i_a} \Big|_{U_G=0} = \frac{g_m U_{GS} (r_D \parallel R_S)}{i_a} \approx -g_m R_S \frac{U_a}{i_a} + R_S$$

$$\Rightarrow R_a = \frac{R_S}{1 + g_m R_S} = 29,1\Omega \rightarrow \text{Impedanzwandler}$$