

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 19**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 Bereich der Eigenleitung mit der Eigenleitungskonzentration n_i im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
- 3) Um welche digitale Grundsaltung handelt es sich bei dem Bild rechts unten? Um welchen Transistortyp handelt es sich bei M_1 und M_2 (Funktionsprinzip, Details)? Stellen Sie die Wahrheitstabelle zur Schaltung auf:
- 4) Skizzieren Sie in dem vorbereiteten Diagramm (rechts) den Konzentrationsverlauf der Minoritätsladungsträger in der neutralen Basis (x_2 bis x_3) eines $n p n$ -Transistors (Diffusionsdreieck). Vernachlässigen Sie die Variation der Verarmungszonenbreiten mit der Spannung. Markieren Sie die Verläufe mit dem Buchstaben der Teilaufgaben; U_{eb} : Emitter-Basis-Spannung und U_{cb} : Kollektor-Basis-Spannung. Geben Sie die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen $n_p(x = x_2)$ in Abhängigkeit von U_{eb} sowie $n_p(x = x_3)$ in Abhängigkeit von U_{cb} formelmäßig an.
- 5) Welche der Aussagen zur Kapazität C einer $p n$ -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 $a = 0,356$ nm
der Abstand zweier nächstbenachbarter Gitteratome (Formel und Zahlenwert)?
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 “=”.

Matrikelnr.:

Name:.....

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 19

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

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

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

- 1) Abb. 1 zeigt eine Diode, die bei 300 K als Fotoelement/Solarzelle betrieben wird. Bestrahlung durch das n -Gebiet führt zu einer ortsabhängigen Generation im Bereich $-d_n \leq x \leq 0$ mit einer auf die Fläche A bezogenen Rate $g(x)$. Thermische Generation von Ladungsträgern in der Verarmungszone (Abb. 2, schraffierter Bereich) und ein

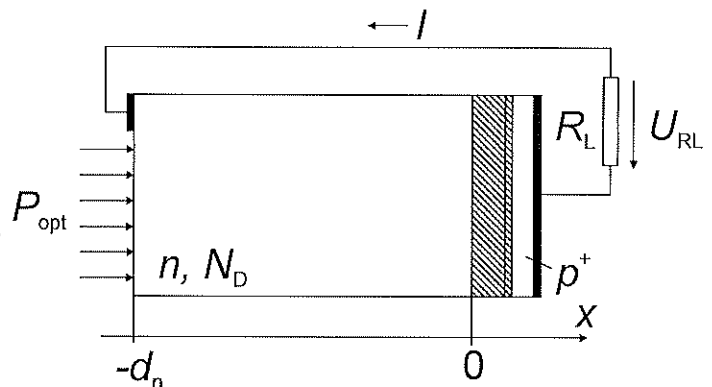


Abb. 1

Spannungsabfall über den Bahngebieten können vernachlässigt werden. Der Lastwiderstand ist so dimensioniert, dass sich ein Spannungsabfall $U_{RL} = -0,4 \text{ V}$ ergibt.

- a) Ermitteln Sie die Löcherkonzentration p_n an den Rändern des n -Bahngebietes (Formel und Zahlenwerte, für die Gleichgewichtskonzentration der Elektronen n_{n0} und der Löcher p_{n0} , gilt $n_{n0}p_{n0} = n_i^2$ mit $n_i = 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ und $N_D = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; Hinweis: an der Oberfläche gilt (1) und am Rand der Verarmungszone gilt allgemein (2) für eine beliebige Spannung U von p nach n .

$$(1) \quad p_n(x = -d_n) = p_{n0}; \quad (2) \quad p_n(x = 0) = p_{n0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

- b) Berechnen Sie

den Diffusionskoeffizienten $D_p = \mu_p kT/q$ sowie die Diffusionslänge $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$ und überprüfen Sie unter Verwendung der Zahlenwerte: $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $T = 300 \text{ K}$; $\tau_p = 25 \text{ } \mu\text{s}$; $\bar{\alpha} = 3 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $d_n = 8 \text{ } \mu\text{m}$, dass $\bar{\alpha}^2 \gg 1/L_p^2$, $d_n \ll L_p$ und $\exp(-\bar{\alpha}d_n) \ll 1$.

- c) Stellen Sie die Differenzialgleichung auf, die im eingeschwungenen Zustand den Verlauf von $p_n(x)$ im n -Bahngebiet beschreibt. Nutzen Sie die Kontinuitätsgleichung mit der Diffusionsstromdichte-Gleichung:

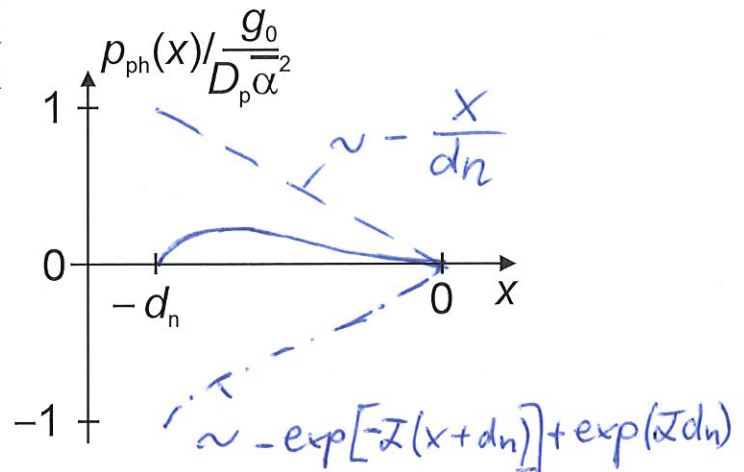
$$\frac{1}{D_p} \frac{dp_n}{dt} = -\frac{1}{qD_p} \frac{dJ_p}{dx} - \frac{p_n - p_{n0}}{L_p^2} + \frac{g_0}{D_p} \exp[-\bar{\alpha}(x + d_n)]; \quad J_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx}$$

Lösen Sie nun die Differenzialgleichung unter Verwendung des Ansatzes:

$$p_n(x) - p_{n0} = A \sinh\left(\frac{x + d_n}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) + C \exp[-\bar{\alpha}(x + d_n)].$$

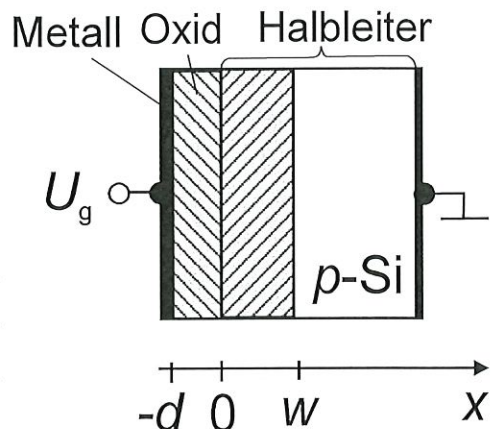
- d) Geben Sie getrennt die Anteile der ohne Bestrahlung vorliegenden $p_d(x)$ und der photogenerierten Löcherkonzentrationen $p_{ph}(x)$ an. Nähern und skizzieren Sie qualitativ (nutzen Sie die folgende Vorlage) den Verlauf von

$p_{ph}(x)(D_p \bar{\alpha}^2 / g_0)$ im n -Bahngebiet für den Fall dass $\bar{\alpha}^2 \gg 1/L_p^2$, $d_n \ll L_p$ und $\exp(-\bar{\alpha}d_n) \ll 1$.



- e) Bestimmen Sie mit p_{ph} aus Aufgabenteil d) den Photostrom $|I_{ph}|$ durch die Diode (Formel und Wert; $A = 1,2 \text{ mm}^2$, $g_0 = 5 \cdot 10^{19} / (\text{cm}^3 \text{s})$). Bestimmen Sie den Lastwiderstand R_L (Dunkelstrom vernachlässigbar).

- 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 ($N_A^- = N_A = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) und die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht ($0 \leq x \leq w$) keine Rolle spielen. Für den Kapazitätsbelag der HfO_2 -Oxidschicht $C_{ox} = \epsilon_{ox} \epsilon_0 / d$ 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: $d = 10 \text{ nm}$; $\epsilon_{ox} = 25$; $\epsilon_s = 11,7$; $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. **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 $(C/C_{ox})_{FB}$.

Matrikelnr.:

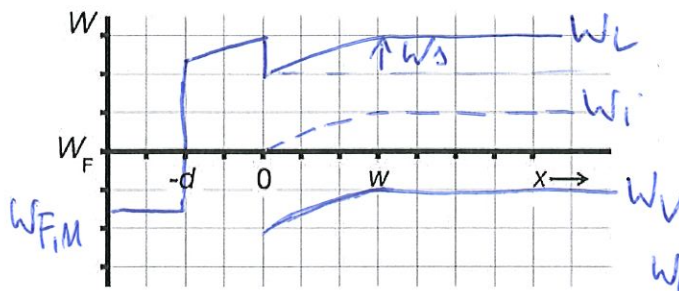
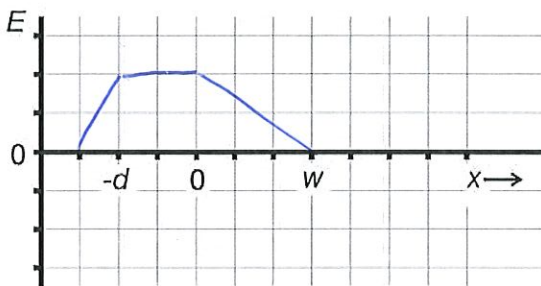
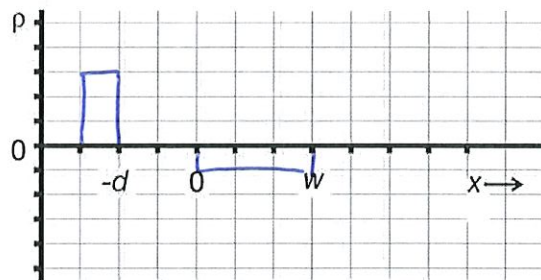
Name:

b) Skizzieren Sie in der Vorlage die Verläufe der Raumladung ρ , der elektrischen Feldstärke E und der Bandkantenenergien W_L und W_V für den Fall des Einsetzens der

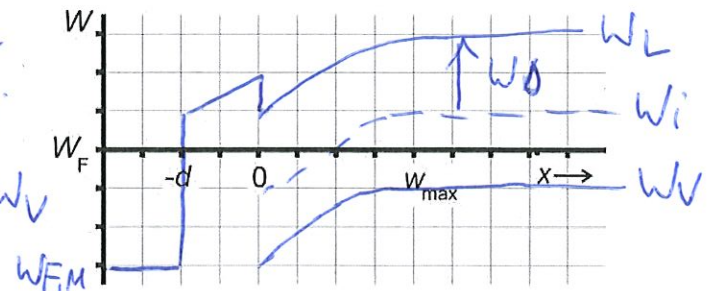
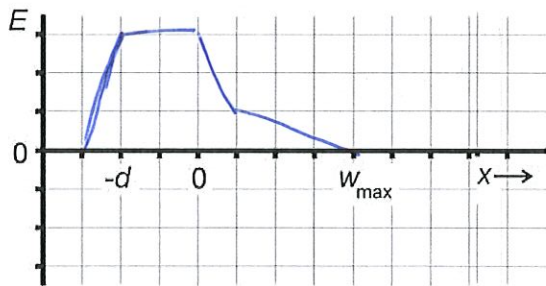
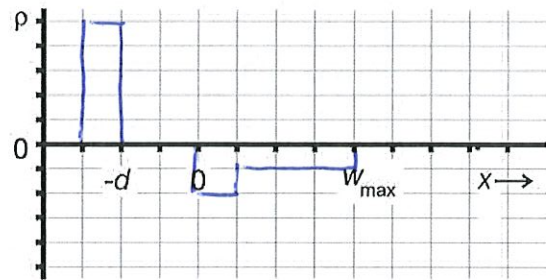
- schwachen Inversion (1) mit der Bandaufwölbung $W_s = W_i - W_F$ (W_F : Fermienergie im Halbleiter, W_i : Eigenleitungsniveau) und
- starken Inversion (2) mit $W_s = 2(W_i - W_F)$.

Markieren Sie W_s , W_i , W_L und W_V sowie die Fermienergie im Metall $W_{F,M}$.

(1) Einsetzen der schwachen Inversion



(2) Einsetzen der starken Inversion



c) Bestimmen Sie W_s in Abhängigkeit von N_A und n_i (Formel) unter Annahme der Boltzmann-Näherung für die Löcherkonzentration:

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

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

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

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

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

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.

- 3) Analysieren Sie die Schaltung in **Abb. 3a**. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in **Abb. 3b** charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben:

$$U_B = -8,5 \text{ V}, U_{\text{ds}} = -6 \text{ V}, I_d = -50 \text{ mA}, I_g \approx 0,$$

$$R_1 = 90 \text{ k}\Omega,$$

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

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

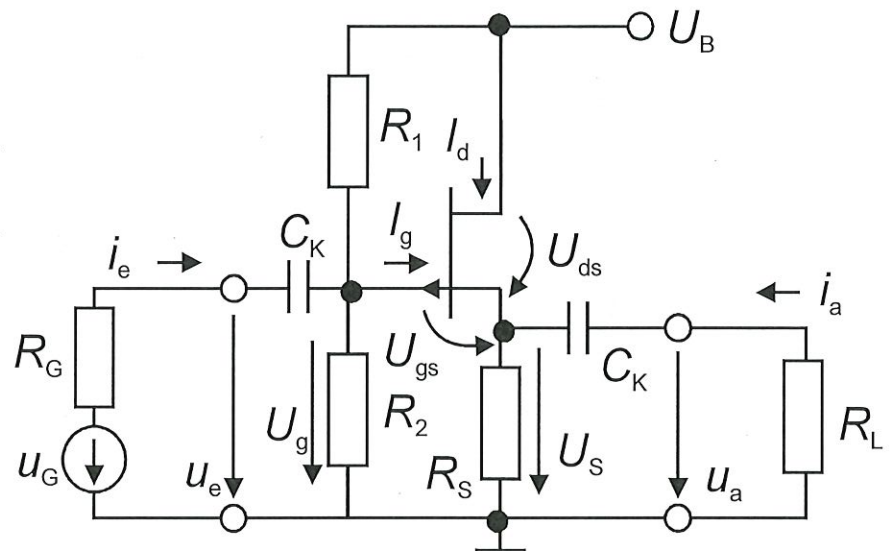


Abb. 3a

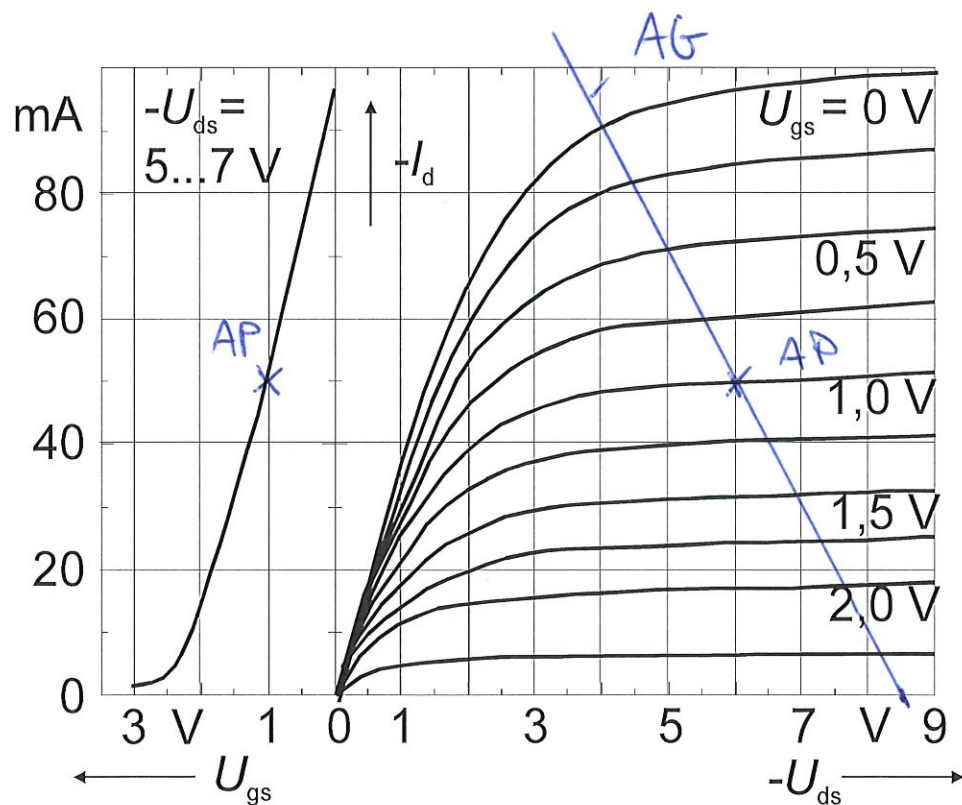


Abb. 3b

Matrikelnr.:

Name:.....

- 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_3 .

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

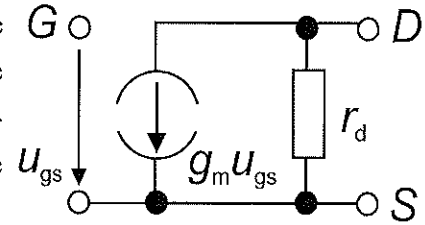


Abb. 3c

- 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.

$$1a) x = -d_n: P_n(x = -d_n) = P_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{n_i^2}{N_D} = 3,4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$x = 0: P_n(x=0) = P_{n0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(-\frac{qU_{RL}}{kT}\right) = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

$$b) D_p = \mu_p \frac{kT}{q} = 10,3 \frac{\text{cm}^2}{s}, L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 161 \mu\text{m}$$

$$\bar{x}^2 = 9 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \gg 3,9 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} = \frac{1}{L_p^2}; d_n = 8 \mu\text{m} \ll 161 \mu\text{m} = L_p$$

$$\exp(-\bar{x} d_n) = 0,09 \ll 1$$

$$c) 0 = \frac{1}{D_p} \frac{dP_n}{dx} = \frac{1}{q D_p} \frac{d^2 P_n}{dx^2} - \frac{P_n - P_{n0}}{L_p^2} + \frac{g_0}{D_p} \exp[-\bar{x}(x+d_n)]$$

Ausatz: Einsetzen der Randbedingungen

$$P_n(-d_n) - P_{n0} = A \underbrace{\sinh(0)}_{=0} + B \sinh\left(-\frac{d_n}{L_p}\right) + C \underbrace{\exp(-\bar{x} \cdot 0)}_{=1}$$

$$\Rightarrow B = -\frac{C}{\sinh\left(-\frac{d_n}{L_p}\right)}$$

$$P_n(0) - P_{n0} = A \sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right) + B \underbrace{\sinh(0)}_{=0} + C \exp(-\bar{x} d_n)$$

$$= P_{n0} \left[\exp\left(-\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] \Rightarrow A = \frac{P_{n0} \left[\exp\left(-\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] - C \exp(-\bar{x} d_n)}{\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right)}$$

Ausatz: Einsetzen in DGL

$$C \bar{x}^2 \exp[-\bar{x}(x+d_n)] + \frac{g_0}{D_p} \exp[-\bar{x}(x+d_n)] - \frac{C}{L_p^2} \exp[-\bar{x}(x+d_n)] = 0$$

$$\Rightarrow \underbrace{\left[\bar{x}^2 - \frac{1}{L_p^2} \right]}_{\approx \bar{x}^2} = -\frac{g_0}{D_p} \Rightarrow C = -\frac{g_0}{D_p \bar{x}^2}$$

Lösung der DGL:

$$P_n(x) - P_{n0} = \frac{P_{n0} \left[\exp\left(-\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] - C \exp(-\bar{x} d_n)}{\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} \sinh\left(\frac{x+d_n}{L_p}\right) - \frac{C}{\sinh\left(-\frac{d_n}{L_p}\right)} \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right)$$

$$d) P_n(x) = P_{n0} + P_n \left[\exp\left(-\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] \frac{\sinh\left(\frac{x+d_n}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} + C \exp[-\bar{x}(x+d_n)]$$

$$\approx \frac{x+d_n}{d_n} = 1 + \frac{x}{d_n}$$

$$P_{ph}(x) = C \left\{ -\exp(-\bar{x} d_n) \left(1 + \frac{x}{d_n} \right) + \frac{x}{d_n} + \exp[-\bar{x}(x+d_n)] \right\}$$

$$\Rightarrow \frac{P_{ph}(x)}{g_0/(D_p \bar{x}^2)} = -\frac{x}{d_n} - \exp[-\bar{x}(x+d_n)] + \exp(-\bar{x} d_n)$$

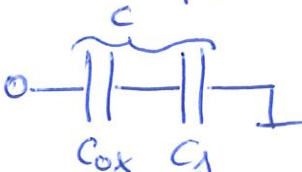
$$= -\frac{x}{d_n} + \exp(\bar{x} d_n) [1 - \exp(-\bar{x} x)]$$

$$e) I_{ph} = \left| A q D_p \frac{d p_{ph}}{dx} \right|_{x=0} = \left| \frac{A q D_p g_0}{D_p \bar{x}^2} \left\{ -\bar{x} \exp(-\bar{x} d_n) + \frac{1}{d_n} \right\} \right|$$

$$= \left| \frac{A q g_0}{\bar{x}^2 d_n} \left\{ -\bar{x} d_n \exp(-\bar{x} d_n) + 1 \right\} \right| = 1,04 \cdot 10^{-4} A \approx 0,1 \text{ mA}$$

$$R_L = -\frac{U_{RL}}{I_{ph}} = \frac{-0,4 \text{ V}}{0,1 \text{ mA}} = 4 \text{ k}\Omega$$

2a)



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

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

Diagram showing the relationship between the gate voltage U_g and the normalized capacitance $\frac{C}{C_{ox}}$. The curve starts at $\frac{C}{C_{ox}} = 1$ for $U_g = 0$ (labeled 'Anreicherung') and decreases as U_g increases, passing through a minimum (labeled 'Verarmung') and then increasing (labeled 'Inversion').

c)

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

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

$$\Rightarrow W_i - W_F = kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \rightarrow \begin{cases} (1) W_D = kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \\ (2) W_D = 2kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \end{cases}$$

d)

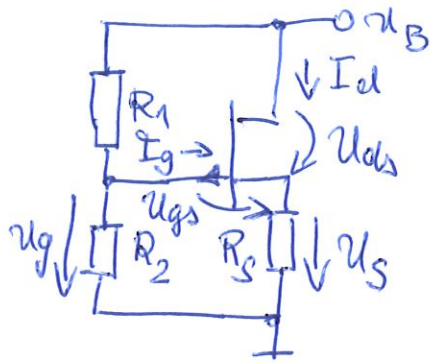
$$W_{max} = \sqrt{\frac{4 \epsilon_s \epsilon_0 (W_i - W_F)}{q^2 N_A}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A}} = 75 \text{ nm}$$

$$\left(\frac{C}{C_{ox}}\right)_{min} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_0 W_{max}}{\epsilon_s d}} = 0,059$$

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{q N_A}} = 9,2 \text{ nm}$$

$$\left(\frac{C}{C_{ox}}\right)_{FB} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_0 L_D}{\epsilon_s d}} = 0,34$$

3a) p-Kanal-Sperrschicht-FET, aus Kennlinienfeld $\rightarrow U_{gs} = 1,0 \text{ V}$



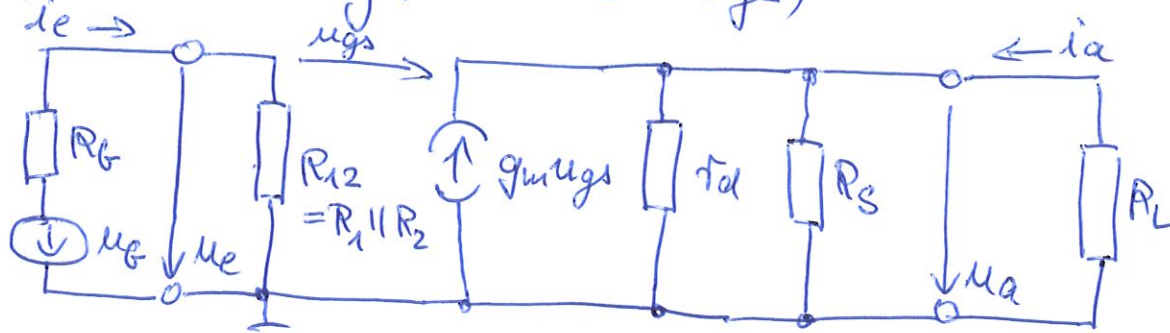
$$U_s = U_B - U_{ds} = (-8,5 + 6) \text{ V} = -2,5 \text{ V}$$

$$U_g = U_{gs} + U_s = (1,0 + (-2,5)) \text{ V} = -1,5 \text{ V}$$

$$R_2 = R_1 \frac{U_g}{U_B - U_g} = 90 \text{ k}\Omega \frac{-1,5}{-8,5 + 1,5} = 19,3 \text{ k}\Omega$$

$$R_s = \frac{U_B - U_{ds}}{I_d} = \frac{U_s}{I_d} = \frac{-2,5 \text{ V}}{-50 \text{ mA}} = 50 \Omega$$

b) Drainerschaltung ($\hat{=}$ Source-Follower)



$$R_{12} = R_1 \parallel R_2 = 15,9 \text{ k}\Omega$$

c) aus Transferringekennlinie: $g_m = \left| \frac{\Delta I_d}{\Delta U_{gs}} \right| = \frac{100 \mu\text{A}}{2,2 \text{ V}} = 45,5 \text{ mS}$

aus Ausgangskennlinie: $r_d = \left| \frac{\Delta U_{ds}}{\Delta I_d} \right| = \frac{6 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 2 \text{ k}\Omega$

$$U_{gs} = U_e - U_a; U_a = g_m (r_d \parallel R_s) U_{gs} \approx g_m R_s U_{gs}$$

$$R_e = \frac{U_e}{i_e} = R_{12} = 15,9 \text{ k}\Omega; v_{ul} = \frac{U_a}{U_e} \Big|_{i_a=0} = \frac{g_m R_s U_e}{U_e} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s}$$

$$\hookrightarrow v_{ul} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} = 0,70$$

$$v_u = \frac{U_a}{U_g} \Big|_{i_2 \neq 0} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_g} \frac{g_m (r_d \parallel R_s \parallel R_L) U_{gs}}{U_e} \approx \frac{R_{12}}{R_{12} + R_g} \frac{g_m R_s U_{gs}}{U_e} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_g} v_{ul} = 0,12$$

Ausgangswiderstand: $U_g = 0 \rightarrow U_e = 0 \rightarrow U_{gs} = -U_a$

$$R_a = \frac{U_a}{i_a} \Big|_{U_g=0} = \frac{g_m U_{gs} (r_d \parallel R_s)}{i_a} + r_d \parallel R_s \approx -g_m R_s \frac{U_a}{i_a} + R_s$$

$$\hookrightarrow R_a = \frac{R_s}{1 + g_m R_s} = 15,3 \Omega$$

\rightarrow Anwendung: Impedanzwandler