

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 22/23**Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)**

- 1) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man
- 2) Welche der Aussagen zu einem idealen pn -Übergang mit angelegter Spannung U sind zutreffend?
- 3) Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen rechts die örtlichen Verläufe der Raumladungsdichte $\rho(x)$, des elektrischen Feldes $E(x)$ und des Bändermodells $W(x)$ in der angedeuteten, idealen Metall-Oxid- p -Halbleiterstruktur für den Fall der Inversion. Beschriften Sie im Bändermodell die Fermienergien im Metall (W_{FM}) und im Halbleiter (W_{FHL}), die Leitungs- und Valenzbandkantenenergie (W_L und W_V), die Eigenleitungsenergie (W_i) sowie qU (U : angelegte Spannung). Welches Vorzeichen muss U aufweisen?
- 4) Wir betrachten den Konzentrationsverlauf der Minoritätsladungsträger $n_p(x)$ in der neutralen Basis (x_2 bis x_3) eines npn -Transistors.
 - a) Geben Sie rechts oben die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen $n_p(x = x_2)$ in Abhängigkeit der Emitter-Basis-Spannung U_{eb} sowie $n_p(x = x_3)$ in Abhängigkeit der Kollektor-Basis-Spannung U_{cb} formelmäßig an:

Skizzieren Sie $n_p(x)$ in dem vorbereiteten Diagramm (rechts unten). Vernachlässigen Sie die Variation der Verarmungszonenbreiten mit der Spannung. Markieren Sie die Verläufe mit dem Buchstaben der Teilaufgaben (b) bzw. c):
- 5) Gegeben ist eine ideale Metall-Isolator-Halbleiter-Struktur (unten, Bild a) mit gleichen Austrittsarbeiten von Halbleiter und Metall sowie in den Bildern c) bis e) die zugehörigen Bändermodelle für drei Arbeitspunkte (Anreicherung, Verarmung, Inversion). Um welchen Halbleitertyp handelt es sich?

Zeichnen Sie für niedrige Frequenzen den $C(U_g)$ -Verlauf in das Diagramm (Bild b). Markieren Sie die jeweiligen Arbeitspunkte der drei angegebenen Bändermodelle mit dem zugehörigen Buchstaben c) bis e) in der $C/C_i(U_g)$ -Kennlinie.
- 6) Welche der Aussagen zu dem gezeigten Bändermodell mit den Bandkanten W_V und W_L sind richtig? Markieren Sie an den Pfeilen rechts die Quasi-Fermienergien W_{Fn} für die Elektronen bzw. W_{Fp} für die Löcher.
- 7) Wir betrachten die Temperaturabhängigkeit der Elektronenkonzentration $n(T_0/T)$ eines n -Halbleiters mit einer Donator-Ionisierungsenergie $W_L - W_D \ll W_G \approx 1 \text{ eV}$ (Bandlückenenergie) und einer Donatorkonzentration $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Skizzieren Sie diese

näherungsweise n logarithmisch als Funktion von T_0/T in die unten gegebene Vorlage. Ergänzen Sie die Ordinaten-/Abszissenbeschriftung um sinnvolle Zahlenwerte ($T_0 = 300$ K). Markieren Sie die drei charakteristischen Bereiche Eigenleitung mit (1), Störstellenreserve mit (2) und Störstellenerschöpfung mit (3). Ordnen Sie diese Ziffern zudem jeweils einer der unten rechts gegebenen Temperaturabhängigkeiten zu.

- 8) 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 rechts durch “>”, “<“ oder “=“.
- 9) 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?
- 10) Gegeben ist das Bändermodell $W(x)$ von dotiertem Silizium. Geben Sie den Dotierungstyp an. Skizzieren Sie die Zustandsdichten der Elektronen im Leitungsband und der Löcher im Valenzband $D(W)$ in parabolischer Näherung, sowie die Fermi-Verteilung $f(W)$ und die Elektronen- und Löcherkonzentrationen im Leitungs- bzw. Valenzband $n(W)$, $p(W)$ in den vorbereiteten Vorlagen unten.

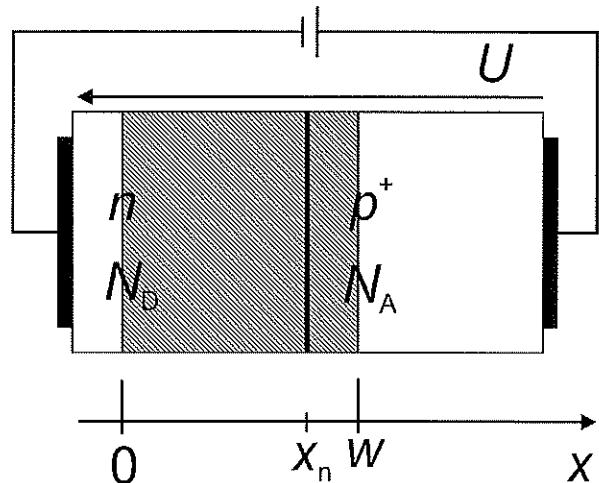
Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 22/23

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) Untersuchen Sie die Kapazität C_s einer np^+ -Diode unter Sperrbelastung (**Abb. 1**, Fläche $A_K = 1,5 \text{ mm}^2$) in Abhängigkeit von der homogenen Dotierstoffkonzentration im niedrig dotierten Bereich bei 300 K. Gehen Sie davon aus, dass die Störstellen vollständig ionisiert sind, die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht (schraffierter Bereich, pn -Übergang bei x_n) keine Rolle spielen und die Bahngebiete feldfrei sind.



- a) Skizzieren Sie (vorbereitete Vorlage, **Abb. 1**

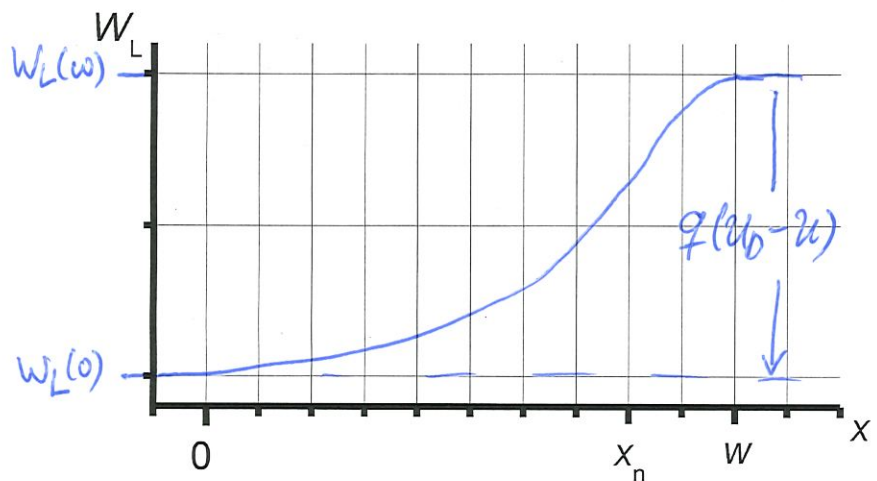
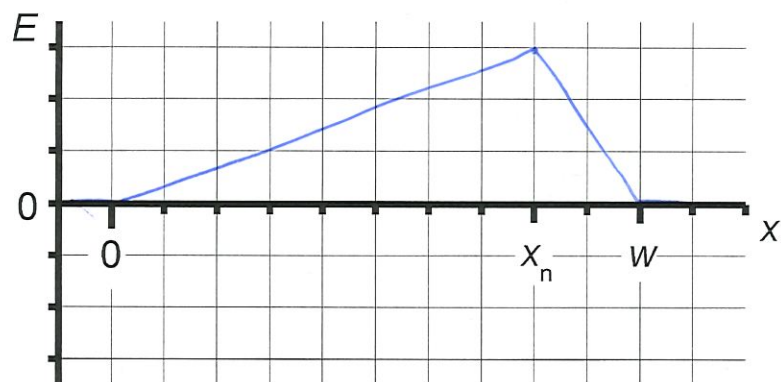
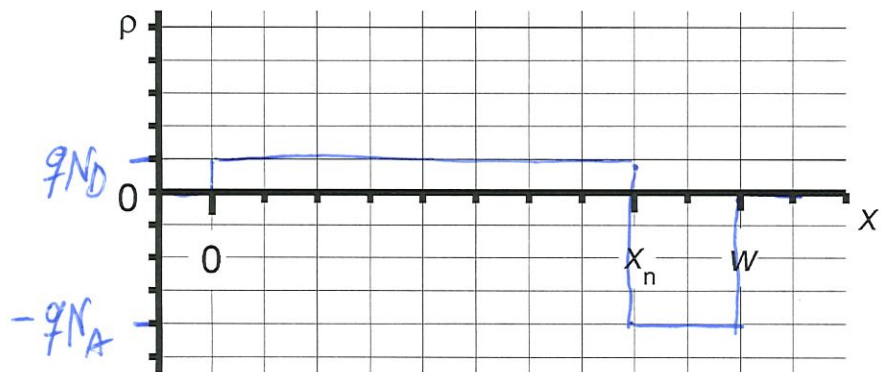
nächste Seite) den Verlauf der Raumladung ρ , der elektrischen Feldstärke E und der Leitungsbandkantenenergie W_L als Funktion von x . Markieren Sie charakteristische Parameter [qN_D , $-qN_A$, $q(U_D - U)$] (U_D bezeichnet die Diffusionsspannung).

- b) Ermitteln Sie in der Sperrschicht für n - und p -Bereiche getrennt ρ , E und $W_L(x) - W_L(0)$ formelmäßig

$$\frac{d^2 W_L(x)}{dx^2} = q \frac{dE(x)}{dx} = \frac{q}{\epsilon} \rho(x)$$

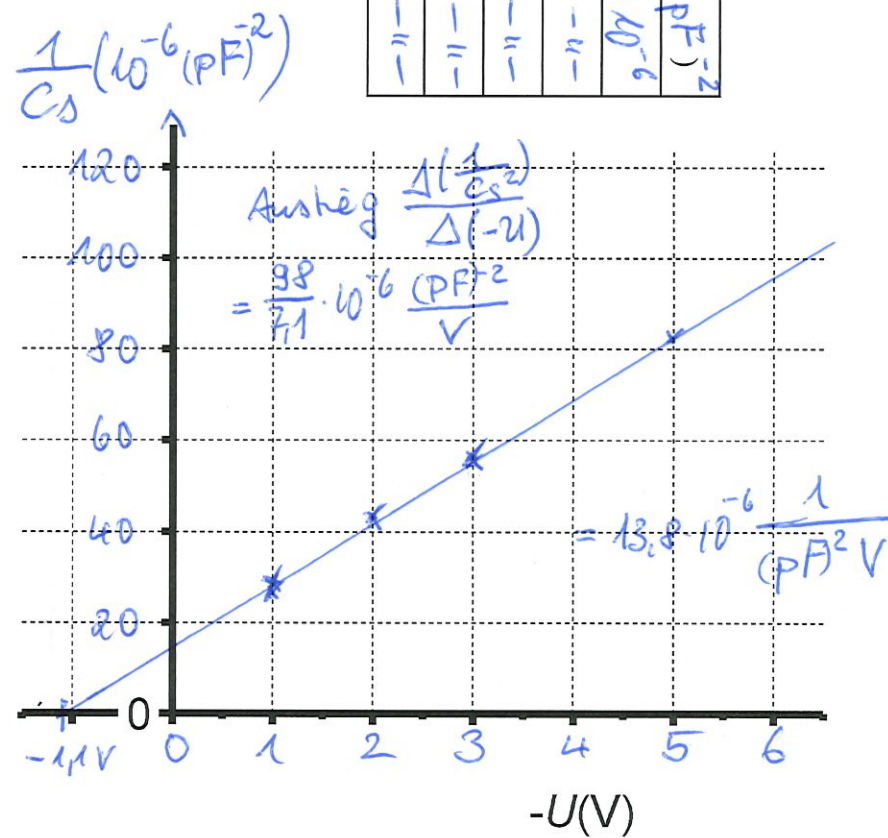
mit Hilfe der Poisson-Gleichung (rechts, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$):

- c) Ermitteln Sie $C_s(U)$ formelmäßig. Leiten Sie hierzu zunächst aus der Bandaufwölbung $q(U_D - U) = W_L(w) - W_L(0)$ die Abhängigkeit $x_n(U)$ und hieraus $1/C_s^2(U)$ näherungsweise ab, wobei Sie zur Vereinfachung nutzen, dass $N_A \gg N_D$. Eine Messung von $C_s(U)$ in Abhängigkeit von U ergibt die in **Tab. 1** (nächste Seite) gegebenen Werte. Berechnen Sie die Werte von $1/C_s^2$ und tragen Sie diese in **Tab. 1** sowie vorbereitete grafische Vorlage (nächste Seite, Achsenbeschriftung vervollständigen) geeignet ein. Bestimmen Sie hieraus mit Hilfe der ermittelten theoretischen Abhängigkeit $1/C_s^2(U)$ und $\epsilon_r = 11,9$ die Werte von N_D und U_D .



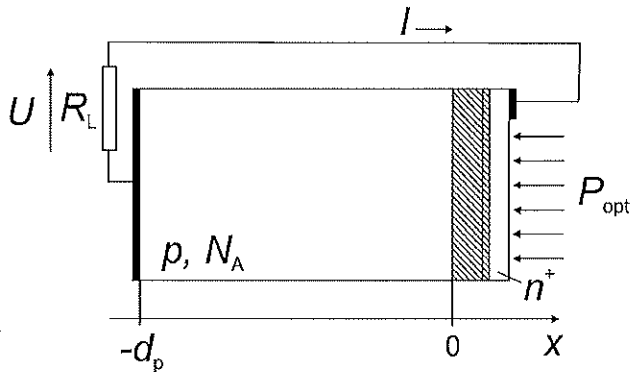
Tab. 1

$U(V)$	$C_s(pF)$	$1/C_s^2(pF^{-2})$
0	250	$16,0 \cdot 10^{-6}$
-1	180	$30,9 \cdot 10^{-6}$
-2	150	$44,4 \cdot 10^{-6}$
-3	133	$56,5 \cdot 10^{-6}$
-5	110	$82,6 \cdot 10^{-6}$



- 2) **Abb. 2** zeigt eine pn^+ -Diode ($n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$), die bei $T_0 = 300 \text{ K}$ als Fotoelement/Solarzelle betrieben wird. Homogene Bestrahlung durch das p -Gebiet ($N_A = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) führt zu einer ortsabhängigen Generation von Ladungsträgern im Bereich $-d_p \leq x \leq 0$ mit einer auf die bestrahlte Fläche A bezogenen Rate $g(x)$.

Optische Absorption im n -Gebiet und der Verarmungszone sowie thermische Generation von Ladungsträgern in der Verarmungszone (**Abb. 2**, schraffierter Bereich) und ein Spannungsabfall über den Bahngebieten können vernachlässigt werden. Der Lastwiderstand R_L ist auf einen Spannungsabfall von $U_{RL} = 0,35 \text{ V}$ dimensioniert.



- a) Ermitteln Sie die Elektronenkonzentration n_p an den Rändern des p -Bahngebietes ($x = -d_p$ bzw. $x = 0$; Formeln und Zahlenwerte). Im Bahngebiet sind Elektronen und Löcher im thermischen Gleichgewicht ($n_{p0}p_{p0} = n_i^2$). Am Rückkontakt ($x = -d_p$) liegt unendlich hohe Rekombinationsgeschwindigkeit vor. Hinweis: An den Rändern der Verarmungszone eines pn -Übergangs gilt bei einer von p nach n anliegenden Spannung U für die Minoritätsladungsträger-Konzentrationen allgemein:

$$p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right); \quad n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

- b) Berechnen Sie für die Elektronen im p -Bahngebiet den Diffusionskoeffizienten $D_n = \mu_n kT/q$ sowie die Diffusionslänge $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$ und überprüfen Sie unter Verwendung der Zahlenwerte: $\mu_n = 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\tau_n = 10 \text{ } \mu\text{s}$; $\bar{\alpha} = 6 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$; $d_p = 7 \text{ } \mu\text{m}$, dass $\bar{\alpha}^2 \gg 1/L_n^2$, $d_p \ll L_n$ und $\exp(-\bar{\alpha}d_p) \ll 1$.
- c) Stellen Sie die Differenzialgleichung auf, die im eingeschwungenen Zustand den Verlauf von $n_p(x) - n_{p0}$ im p -Bahngebiet beschreibt. Nutzen Sie die Kontinuitätsgleichung (1) mit der Diffusionsstromdichte-Gleichung (2) und lösen Sie nun die Differenzialgleichung

$$(1) \quad \frac{1}{D_n} \frac{dn_p}{dt} = \frac{1}{qD_n} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2} + \frac{g_0}{D_n} \exp(\bar{\alpha}x); \quad (2) \quad J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx}$$

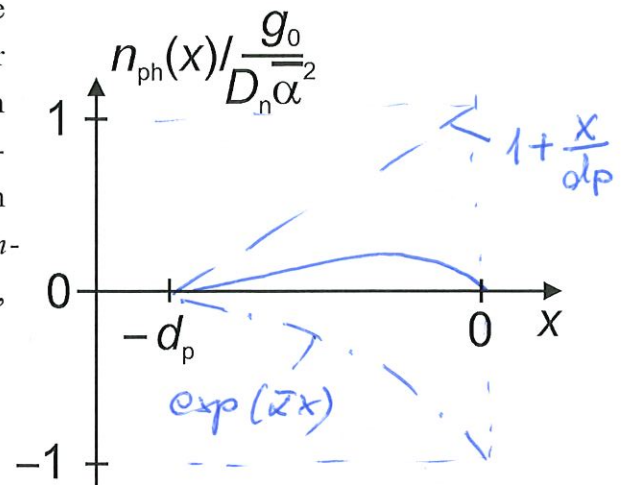
unter Verwendung des

Ansatzes:

$$n_p(x) - n_{p0} = A \sinh\left(\frac{x}{L_n}\right) + B \sinh\left(\frac{x + d_p}{L_n}\right) + C \exp(\bar{\alpha}x)$$

und den Randbedingungen aus a).

- d) Geben Sie getrennt die Anteile der ohne Bestrahlung vorliegenden $n_d(x)$ und der photogenerierten Elektronenkonzentration $n_{ph}(x)$ an. Nähern und skizzieren Sie qualitativ (nutzen Sie die Vorlage rechts) den Verlauf von $n_{ph}(x)(D_n \bar{\alpha}^2 / g_0)$ im n -Bahngebiet für den Fall dass $\bar{\alpha}^2 \gg 1/L_n^2$, $d_p \ll L_n$ und $\exp(-\bar{\alpha} d_p) \ll 1$.



- e) Bestimmen Sie mit n_{ph} aus Aufgabenteil d) die Photostromdichte J_{ph} und den Photostrom I_{ph} durch die Diode (Formel und Wert; $A = 100 \text{ mm}^2$, $g_0 = 5 \cdot 10^{19} / (\text{cm}^3 \text{s})$). Bestimmen Sie den Lastwiderstand R_L (Dunkelstrom vernachlässigbar) und die durch den Photostrom erzeugte elektrische Leistung P_{el} .

Matrikelnr.:

Name:

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

$$U_B = -12 \text{ V}, U_{ce} = -5 \text{ V}, U_{be} = -0,7 \text{ V}, V_5 = -2 \text{ V}, I_b = -2,5 \text{ } \mu\text{A}, I_q = 9 \times I_b, R_4 = 0,7 \text{ k}\Omega, \\ R_G = 4 \text{ k}\Omega, R_L = 22 \text{ k}\Omega.$$

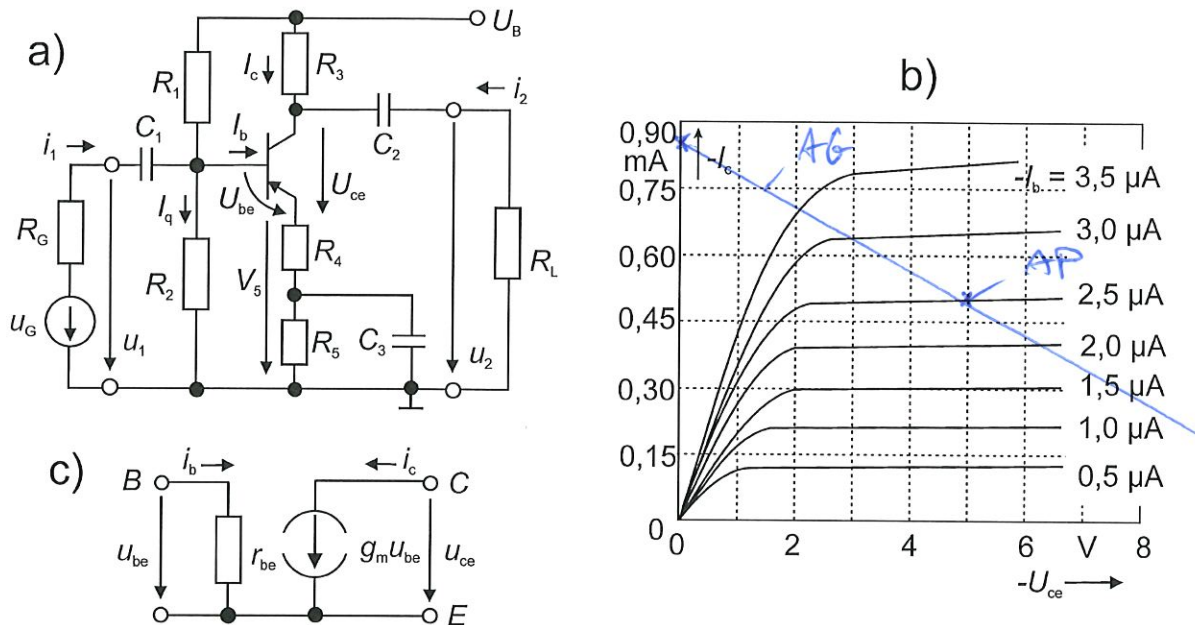


Abb. 3

- 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 ($U_{ce} = 0$)? Tragen Sie den Arbeitspunkt (AP) und die Arbeitsgerade (AG) in **Abb. 3b** ein.
- 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. Geben Sie den Schaltungstyp an.
- 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.

1b) Raumladung $\rho = q(-N_A + p + N_D^+ - n) = q(-N_A + N_D)$

$0 \leq x \leq x_n$

$x_n \leq x \leq W$

RL: $\rho = qN_D$

$-qN_A$

Feldstärke: $E(x) = \frac{1}{\epsilon} \int \rho(x') dx' + C_1$

$E(x) - E(0) = \frac{qN_D}{\epsilon} \int_0^x dx' = \frac{qN_D}{\epsilon} x \quad | \quad E(W) - E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon} \int_x^W dx' = -\frac{qN_A}{\epsilon} (W-x)$

$\Rightarrow E(x) = \frac{qN_A}{\epsilon} (W-x)$

Leitungsbandkante: $W_L(x) = q \int E(x') dx' + C_2$

$W_L(x) - W_L(0) = \frac{q^2 N_D}{\epsilon} \int_0^x x' dx' = \frac{q^2 N_D}{2\epsilon} x^2 \quad | \quad W_L(W) - W_L(x) = \frac{q^2 N_A}{\epsilon} \int_x^W (W-x') dx', \text{ setze } u = W-x', \text{ siehe } du = -dx'$

$= -\frac{q^2 N_A}{\epsilon} \int_{W-x}^0 u du = \frac{q^2 N_A}{2\epsilon} (W-x)^2$

c) Bandaufwölbung:

$q(\psi_0 - \psi) = W_L(W) - W_L(0) = W_L(W) - W_L(x_n) + W_L(x_n) - W_L(0) = \frac{q^2 N_A}{2\epsilon} (W-x_n)^2 + \frac{q^2 N_D}{2\epsilon} x_n^2$

$= \frac{q^2 N_D}{2\epsilon} x_n^2 \left[1 + \frac{N_A}{N_D} \left(\frac{W-x_n}{x_n} \right)^2 \right] = \frac{q^2 N_D}{2\epsilon} x_n \left[1 + \frac{N_A}{N_D} \left(\frac{N_D}{N_A} \right)^2 \right] \approx \frac{q^2 N_D}{2\epsilon} x_n$

Ladungsneutralität:

$qN_D x_n = qN_A (W-x_n) \Rightarrow \frac{W-x_n}{x_n} = \frac{N_D}{N_A}$

Sperrschichtkapazität: $C_{s,n} = \epsilon \frac{A_k}{x_n}$; $C_{s,p} = \epsilon \frac{A_k}{W-x_n}$

$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_{s,n}} + \frac{1}{C_{s,p}} = \frac{1}{C_{s,n}} \left(1 + \frac{C_{s,n}}{C_{s,p}} \right) = \frac{1}{C_{s,n}} \left(1 + \frac{W-x_n}{x_n} \right) = \frac{1}{C_{s,n}} \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right) \approx \frac{1}{C_{s,n}}$

$\Rightarrow C_s \approx C_{s,n} = \epsilon \frac{A_k}{x_n} \approx \frac{\epsilon A_k}{\sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_D} (\psi_0 - \psi)}} = \frac{1}{\left[\frac{2}{A_k^2 \epsilon q N_D} (\psi_0 - \psi) \right]^{1/2}}$

$\Rightarrow \frac{1}{C_s^2} = \frac{2}{A_k^2 \epsilon q N_D} (\psi_0 - \psi)$

aus dem Anstieg der Gerade $\frac{\Delta\left(\frac{1}{C_s^2}\right)}{\Delta(\psi)} = 1,38 \cdot 10^{-5} \frac{1}{(\text{pF})^2 \text{V}}$

$\Rightarrow N_D = \frac{2 \Delta\psi / \Delta\left(\frac{1}{C_s^2}\right)}{A_k^2 \epsilon q} = 3,8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

aus dem Achsenabschnitt

$\Rightarrow \psi_0 = 1,1 \text{ V}$

2a) Rollbed.: $n_p(-d_p) = n_{p0}$; $n_p(0) = n_{p0} \exp\left(\frac{q U_{RL}}{kT}\right) = n_{p0} \exp\left(\frac{q U_{RL}}{kT}\right)$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(10^{10})^2}{4 \cdot 10^{18}} \text{ cm}^{-3} = 2.5 \text{ cm}^{-3}; \quad n_p(0) = 1.9 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$$

b) $D_n = \frac{\mu_n kT}{q} = 5.2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}; L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 72.1 \mu\text{m}; \bar{\alpha}^2 = 3.6 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{cm}^2} > 1.9 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{cm}^2} = \frac{1}{L_n^2}$

$$\exp(-\bar{\alpha} d_p) = 0.015 \ll 1; \quad d_p = 7 \mu\text{m} \ll 72.1 \mu\text{m} = L_n$$

c) $0 = \frac{1}{D_n} \frac{d(n_p - n_{p0})}{dt} = \frac{1}{q D_n} \frac{d^2(n_p - n_{p0})}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2} + \frac{g_0}{D_n} \exp[\bar{\alpha} x]$

Rollbed. in Ansatz:

$$n_p(-d_p) - n_{p0} = 0 = A \sinh\left(-\frac{d_p}{L_n}\right) + B \sinh\left(-\frac{d_p + d_p}{L_n}\right) + C \exp[\bar{\alpha}(-d_p)] \rightarrow A = \frac{C \exp(-\bar{\alpha} d_p)}{\sinh\left(-\frac{d_p}{L_n}\right)}$$

$$n_p(0) - n_{p0} = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{q U_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] = A \sinh\left(\frac{0}{L_n}\right) + B \sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right) + C \exp(0) \rightarrow B = \frac{n_{p0} \left[\exp\left(\frac{q U_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] - C}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)}$$

Ansatz in DGL:

$$C \bar{\alpha}^2 \exp(\bar{\alpha} x) - \frac{C}{L_n^2} \exp(\bar{\alpha} x) + \frac{g_0}{D_n} \exp(\bar{\alpha} x) = 0 \rightarrow C = \frac{-g_0 / D_n}{\bar{\alpha}^2 - \frac{1}{L_n^2}}$$

→ Lösung: $n_p(x) - n_{p0} = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{q U_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] \frac{\sinh\left(\frac{x + d_p}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} + \frac{g_0 / D_n}{\bar{\alpha}^2 - \frac{1}{L_n^2}} \left\{ \frac{\sinh\left(\frac{x}{L_n}\right)}{\sinh\left(-\frac{d_p}{L_n}\right)} \exp(-\bar{\alpha} d_p) \right.$

$$\left. + \frac{\sinh\left(\frac{x + d_p}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} - \exp(\bar{\alpha} x) \right\}$$

$$\approx n_{p0} \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{q U_{RL}}{kT}\right) - 1 \right] \left(1 + \frac{x}{d_p} \right) \right\}$$

$$n_{ph}(x) = \frac{g_0 / D_n}{\bar{\alpha}^2 - \frac{1}{L_n^2}} \left\{ \frac{\sinh\left(\frac{x}{L_n}\right)}{\sinh\left(-\frac{d_p}{L_n}\right)} \exp(-\bar{\alpha} d_p) + \frac{\sinh\left(\frac{x + d_p}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} - \exp(\bar{\alpha} x) \right\} \ll 1$$

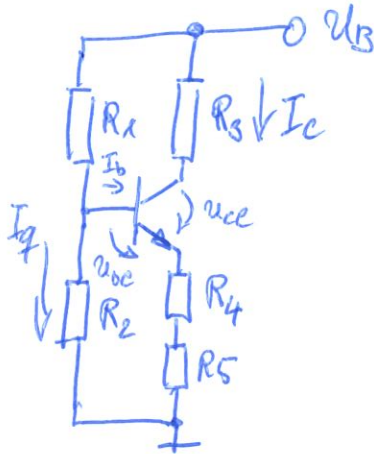
$$\approx \frac{g_0}{D_n \bar{\alpha}^2} \left\{ -\frac{x}{d_p} \exp(-\bar{\alpha} d_p) + 1 + \frac{x}{d_p} - \exp(\bar{\alpha} x) \right\} \approx \frac{g_0}{D_n \bar{\alpha}^2} \left\{ 1 + \frac{x}{d_p} [1 - \exp(-\bar{\alpha} d_p)] - \exp(\bar{\alpha} x) \right\}$$

$$\approx \frac{g_0}{D_n \bar{\alpha}^2} \left\{ 1 + \frac{x}{d_p} - \exp(\bar{\alpha} x) \right\}$$

d) $I_{ph} = q D_n \frac{dn_{ph}}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{q D_n g_0}{D_n \bar{\alpha}^2} \left\{ \frac{1}{d_p} - \bar{\alpha} \right\} = -1.0 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}; \quad I_{ph} = A I_{ph} = -1.0 \text{ mA}$

$$R_L = \frac{U_{RL}}{-I_{ph}} = \frac{0.35 \text{ V}}{1.0 \text{ mA}} = 350 \Omega, \quad P_{el} = I_{ph}^2 R_L = 0.36 \text{ mW}$$

3a) pnp-Transistor, aus Kennlinie $I_C = -0,5 \text{ mA}$



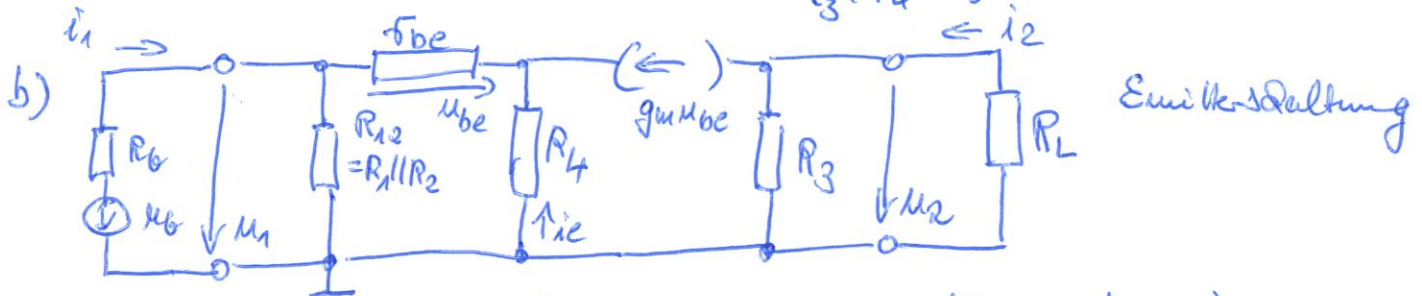
$$R_3 = \frac{U_B - U_{CE} - V_5}{I_C} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 + R_5 = \frac{V_5}{I_C + I_B} \approx \frac{V_5}{I_C} = 4 \text{ k}\Omega; R_5 = 4 \text{ k}\Omega - R_4 = 3,3 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_5 + U_{BE}}{9 I_B} = 120 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_B - (V_5 + U_{BE})}{10 I_B} = 372 \text{ k}\Omega$$

für AB: $I_C (U_{CE} = 0) = \frac{U_B}{R_3 + R_4 + R_5} = -0,86 \text{ mA}$



$$c) i_1 = \frac{U_1}{R_{12}} + \frac{U_{be}}{r_{be}} = \frac{U_1}{R_{12}} + \frac{U_1}{r_{be} g_m R_4} = U_1 \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{r_{be} g_m R_4} \right)$$

$$U_1 = U_{be} + \left(\frac{U_{be}}{r_{be}} + g_m U_{be} \right) R_4 = \left(1 + \underbrace{\frac{R_4}{r_{be}}}_{0,14} + \underbrace{g_m R_4}_{\ll 14} \right) U_{be} \approx g_m R_4 U_{be}$$

$$\Rightarrow R_e = \frac{U_1}{i_1} = \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{r_{be} g_m R_4} \right)^{-1} = 39,4 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{i_2}{g_m U_{be}} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \Rightarrow i_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} g_m \frac{1}{g_m R_4} U_1 = \frac{R_3}{(R_3 + R_4) R_4} R_e i_1$$

$$\Rightarrow \frac{i_2}{i_1} = \frac{R_3}{(R_3 + R_4) R_4} R_e = 17,7$$

$$U_2 (R_L = \infty) = -g_m U_{be} R_3 = -\frac{g_m R_3}{g_m R_4} U_1 \Rightarrow v_{uL} = -\frac{R_3}{R_4} = -14,3$$

$$U_2 = -g_m U_{be} (R_3 \parallel R_L) = -\frac{g_m (R_3 \parallel R_L)}{g_m R_4} U_1; \frac{U_1}{U_B} = \frac{R_e}{R_6 + R_e}$$

$$\Rightarrow v_u = \frac{U_2}{U_1} \frac{U_1}{U_B} = -\frac{R_3 \parallel R_L}{R_4} \frac{R_e}{R_6 + R_e} = -\frac{R_3 \parallel R_L}{R_4} R_e \left(\frac{1}{1 + R_6/R_e} \right) = -8,9$$