

**Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 23/24****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 mit der Eigenleitungskonzentration  $n_i$  im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
- 3) Wir betrachten den Konzentrationsverlauf der Minoritätsladungsträger  $p_n(x)$  in der neutralen Basis ( $x_2$  bis  $x_3$ ) eines  $pnp$ -Transistors.
  - a) Geben Sie rechts oben die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen  $p_n(x = x_2)$  in Abhängigkeit der Emitter-Basis-Spannung  $U_{eb}$  sowie  $p_n(x = x_3)$  in Abhängigkeit der Kollektor-Basis-Spannung  $U_{cb}$  formelmäßig an:  
  
Skizzieren Sie  $p_n(x)$  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)):
- 4) Welche der Aussagen zur Kapazität  $C$  einer  $pn$ -Diode mit abruptem Übergang sind zutreffend?
- 5) Ergänzen Sie in dem Diagramm (rechts) den Verlauf der Leitungs- und Valenzbandkanten eines homogenen Halbleiters mit angelegter Spannung  $U < 0$ . Beachten Sie die Pfeilrichtung und beschriften Sie die Bandkanten. Randeffekte sollen vernachlässigt werden.
- 6) Gegeben ist das Bändermodell  $W(x)$  von Si. Markieren Sie für den Fall der  $n$ -Dotierung das Ferminiveau  $W_F$ . Skizzieren Sie die Zustandsdichten der Elektronen im Leitungsband und der Löcher im Valenzband  $D(W)$  in parabolischer Näherung, sowie bei Raumtemperatur die Fermi-Verteilung  $f(W)$  und die Elektronen- und Löcherkonzentrationen im Leitungs- bzw. Valenzband  $n(W), p(W)$  in den vorbereiteten Koordinatensystemen.
- 7) 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 “=“.
- 8) Welche der Aussagen zu dem gezeigten Bändermodell mit den Bandkanten  $W_V$  und  $W_L$  sind richtig? Markieren Sie an den Pfeilen das Quasi-Fermi-niveau  $W_{Fn}$  für die Elektronen bzw.  $W_{Fp}$  für die Löcher.
- 9) Wir betrachten die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration  $n(T_0/T)$  eines Halbleiters mit einer Donator-Ionisierungsenergie  $W_L - W_D \ll W_G \approx 1$  eV und einer Dotierkonzentration  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Skizzieren Sie diese einfach logarithmisch in die

gegebene Vorlage. Ergänzen Sie die Achsenbeschriftung ( $T_0 = 300 \text{ K}$ ). Markieren Sie die drei charakteristischen Bereiche Eigenleitung mit (1), Störstellenreserve mit (2) und Störstellenerschöpfung (vollständige Ionisierung) mit (3). Ordnen Sie diese Ziffern zudem jeweils einer der unten gegebenen Temperaturabhängigkeiten zu.

10) Wie groß ist die Gitterkonstante von Silizium (Größenordnung)?

Geben Sie für das Diamantgitter mit der Gitterkonstante  $a$  formelmäßig an

- den Abstand zweier nächstbenachbarter Gitteratome:
- und die Konzentration der Gitteratome:

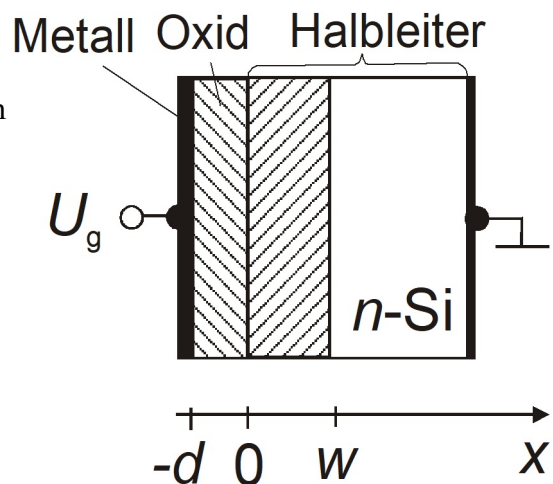
**Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 23/24**

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

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

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

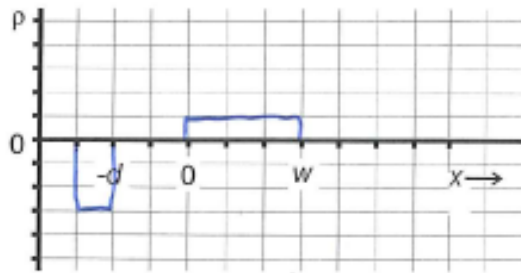
- 1) **Abb. 1** zeigt eine ideale Metall-Oxid-n-Halbleiter (MOS)-Struktur mit am Gate anliegender Spannung  $U_g$ . Wie bei 300 K üblich, sind die Dotierstoffe vollständig ionisiert ( $N_D^+ = N_D = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) und die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht ( $0 \leq x \leq w$ ) spielen keine Rolle. Für den Kapazitätsbelag der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Oxidschicht  $C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}} \epsilon_0 / d$  und der Sperrschicht im Halbleiter  $C_s = \epsilon_s \epsilon_0 / w$  mit den relativen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_s$  und  $\epsilon_{\text{ox}}$  sowie den Dicken  $d$  und  $w$  sind folgende Daten gegeben:  $d = 2 \text{ nm}$ ;  $\epsilon_{\text{ox}} = 9,3$ ;  $\epsilon_s = 11,7$ ;  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

**Abb. 1**

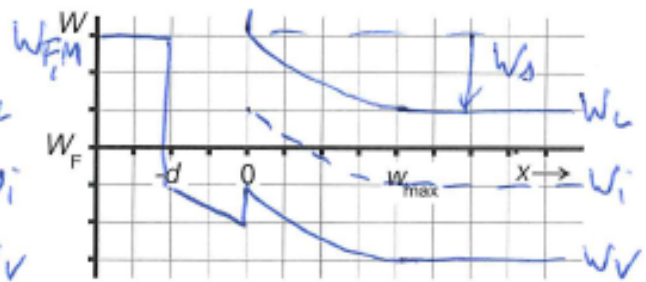
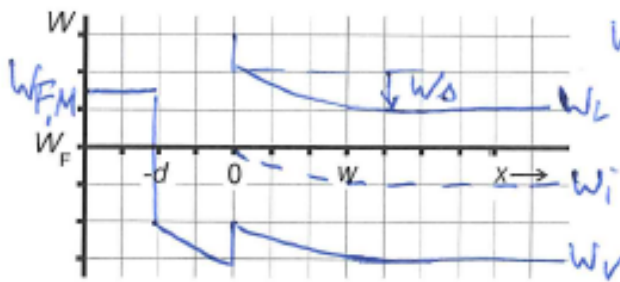
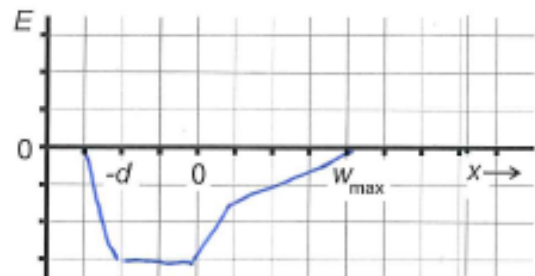
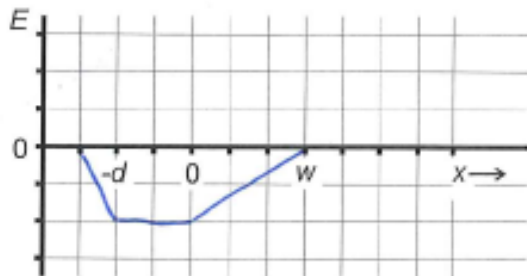
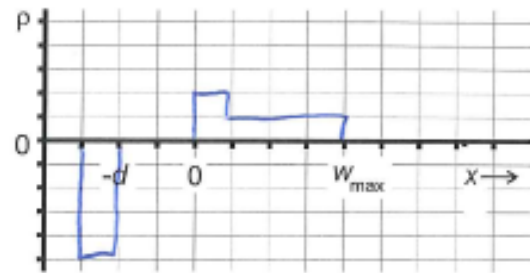
- a) Skizzieren Sie das vereinfachte Kapazitäts-Ersatzschaltbild der MOS-Struktur. Ermitteln Sie formelmäßig den Gesamtkapazitätsbelag der Struktur  $C$  bezogen auf  $C_{\text{ox}}$  in Abhängigkeit von der Sperrschichtausdehnung  $w$ . Skizzieren Sie für niedrige (gestrichelt) und hohe (durchgezogen) Frequenzen den Verlauf von  $C/C_{\text{ox}}$  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 (auf der nächsten Seite) die Verläufe der Raumladung  $\rho$ , der elektrischen Feldstärke  $E$  und der Bandkantenenergien  $W_L$  und  $W_V$  für den Fall des Einsetzens der
- schwachen Inversion (1) mit der Bandaufwölbung  $W_s = W_F - W_i$  ( $W_F$ : Fermienergie im Halbleiter,  $W_i$ : Eigenleitungsniveau) und
  - starken Inversion (2) mit  $W_s = 2(W_F - W_i)$ .

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  $N_D$  und  $n_i$  (Formel) unter Annahme der Boltzmann-Näherung für die Elektronenkonzentration:

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

- d) Für die Ausdehnung der Sperrschicht gilt bei  $W_s > 0$ :

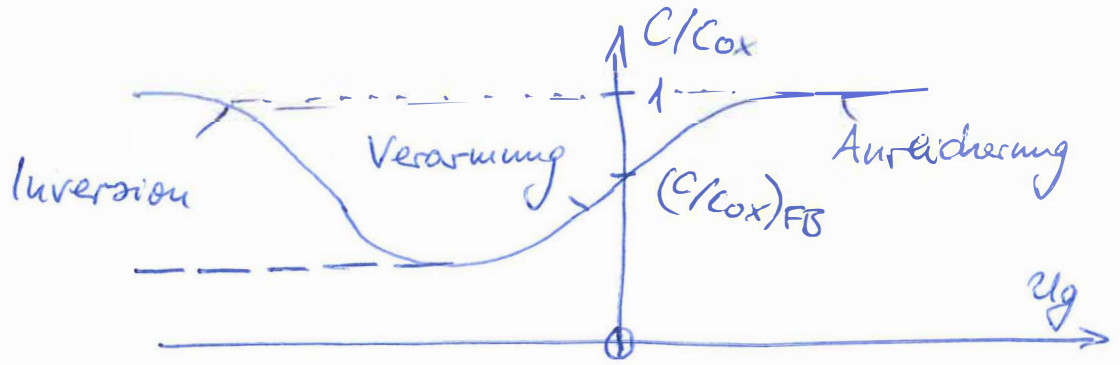
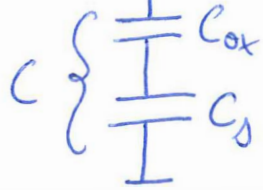
$$w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 W_s}{q^2 N_D}}$$

und für den Flachbandfall (FB) mit  $W_s \rightarrow 0$ :

$$w = L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{q^2 N_D}}$$

Bestimmen Sie den maximalen Wert  $w = w_{\max}$  und hieraus den minimalen Kapazitätsbelag  $(C/C_{\text{ox}})_{\min}$  sowie  $L_D$  und hieraus die Flachbandkapazität  $(C/C_{\text{ox}})_{\text{FB}}$ . Geben Sie jeweils Formeln und Zahlenwerte an.

2a)  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \Rightarrow \frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{1 + \frac{C_{ox}}{C_d}} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox} W}{\epsilon_s d}}$



c)  $n = N_D = N_L \exp\left(\frac{W_F - W_L}{kT}\right)$   
 $n_i = N_L \exp\left(\frac{W_i - W_L}{kT}\right) \Rightarrow \frac{N_D}{n_i} = \exp\left(\frac{W_F - W_i}{kT}\right)$   
 $\Rightarrow W_F - W_i = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$

$\Rightarrow$  (1)  $W_D = W_F - W_i = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$   
 (2)  $W_D = 2(W_F - W_i) = 2kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$

d)  $W_{max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 W_D}{q^2 N_D}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 (W_F - W_i)}{q^2 N_D}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)}{q^2 N_D}}$   
 $= 48,7 \text{ nm}$

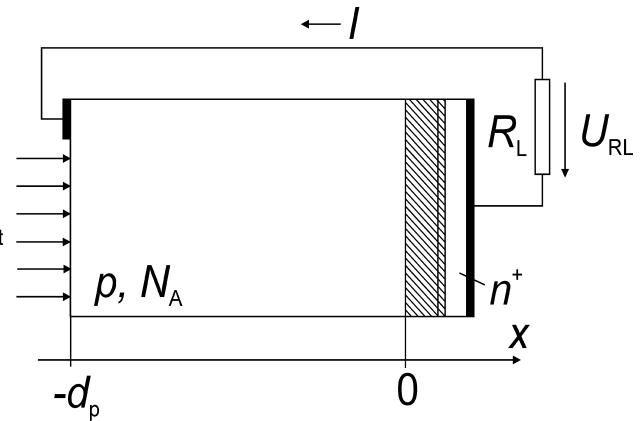
$\left(\frac{C}{C_{ox}}\right)_{min} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \frac{W_{max}}{d}} = 0,049$

$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{q^2 N_D}} = \cancel{12,9 \text{ nm}} \quad 5,8 \text{ nm}$

$\left(\frac{C}{C_{ox}}\right)_{FB} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \frac{L_D}{d}} = \cancel{0,098} \quad 0,30$

- 2) **Abb. 2** zeigt eine  $pn^+$ -Diode, die bei  $T_0 = 300$  K als Solarzelle betrieben wird, d. h. Bestrahlung der Fläche  $A$  mit Sonnenlicht durch das  $p$ -Gebiet führt zu einer Photostromdichte  $J_{ph}$ . Thermische Generation von Ladungsträgern in der Verarmungszone (**Abb. 2**, schraffierter Bereich) und ein Spannungsabfall über den Bahngebieten können vernachlässigt werden. Die Stromdichte  $I/A = J$  ist nahezu  $P_{opt}$  vollständig durch die Elektronen bestimmt. Die Elektronenkonzentration  $n_p(x)$  bei  $x = 0$  ist gegeben durch:

$$n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{q U_{RL}}{k T}\right)$$

**Abb. 2**

Der Kontakt zum  $n^+$ -Bahngebiet ist ideal ohmsch. Am Frontkontakt ( $x = -d_p$ ) der Diode liegt ebenfalls ein idealer Rekombinationskontakt vor, d. h.:

$$n_p(-d_p) - n_{p0} = 0.$$

Ermitteln Sie die Solarzellenparameter der Diode in Abhängigkeit von den gegebenen Größen.

- Berechnen Sie für die Elektronen im  $p$ -Bahngebiet den Diffusionskoeffizienten  $D_n = \mu_n k T / q$  sowie die Diffusionslänge  $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$  und überprüfen Sie unter Verwendung der Zahlenwerte:  $\mu_n = 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ;  $\tau_n = 10 \text{ }\mu\text{s}$ ;  $d_p = 7 \text{ }\mu\text{m}$ , dass  $d_p \ll L_n$ .
- Stellen Sie die Differenzialgleichung auf, die im eingeschwungenen Zustand und ohne Bestrahlung ( $P_{opt} = 0$ ) den Verlauf von  $n_p(x) - n_{p0}$  im  $p$ -Bahngebiet beschreibt. Nutzen Sie die Kontinuitätsgleichung (1) mit der Diffusionsstromdichte-Gleichung (2):

$$(1) \quad \frac{1}{D_n} \frac{dn_p}{dx} = \frac{1}{q D_n} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2}; \quad (2) \quad J_n = q D_n \frac{dn_p}{dx}$$

Lösen Sie die Differenzialgleichung unter Verwendung des Ansatzes:

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

und den Randbedingungen bei  $x = -d_p$  und  $x = 0$ . Ermitteln Sie hierfür  $A$  und  $B$  formelmäßig. (Hinweis:  $\sinh'(y) = \cosh(y)$ ;  $\cosh'(y) = \sinh(y)$ ;  $\sinh(0) = 0$ ;  $\cosh(0) = 1$ )

- c) Für die Dunkelstromdichte  $J_d$  ergibt sich aus dem Verlauf der Elektronenkonzentration aus b) eine Diodenkennlinie der Form  $J_d = J_0 \{ \exp[qU_{RL}/(kT)] - 1 \}$ . Ermitteln Sie  $J_0$  formel- und zahlenmäßig. Nähern Sie hierbei mit der unter a) gefundenen Abschätzung für  $d_p/L_n$  gemäß  $\sinh(y) \approx y$ ,  $\cosh(y) \approx 1$  für  $y \ll 1$ . Nutzen Sie, dass im Bahngebiet Elektronen und Löcher im thermischen Gleichgewicht sind ( $n_{p0}p_{p0} = n_i^2$ ) und die Zahlenwerte:  $n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ;  $N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .
- d) Bestimmen Sie bei einer Photostromdichte von  $J_{ph} = -10 \text{ mA cm}^{-2}$  die Stromdichte  $J_{sc}$  bei Kurzschluss ( $U_{RL} = 0$ ) und den Spannungsabfall  $U_{RL} = U_{oc}$  bei Leerlauf ( $I = 0$ ) formel und zahlenmäßig. Ermitteln Sie anschließend die für das Maximum der elektrischen Leistung  $P = U_{RL} \cdot J$  einzustellenden Arbeitspunkt mit der Spannung  $U_m$  und der Stromdichte  $J_m$  formel und zahlenmäßig mit Hilfe der Extremwert-Bedingung:

$$\frac{dP}{dU_{RL}}|_{U_m} = 0.$$

Nutzen Sie bei der Herleitung von  $U_m$  die Näherung:

$$\exp\left(\frac{qU_m}{kT}\right) \left[1 + \frac{qU_m}{kT}\right] \approx \exp\left(\frac{qU_m}{kT}\right) \left[1 + \frac{qU_{oc}}{kT}\right].$$

Bestimmen Sie den hierfür einzustellenden flächenbezogenen spezifischen Lastwiderstand  $R_L \cdot A$  im Arbeitspunkt sowie den Füllfaktor  $U_m \cdot J_m / (U_{oc} \cdot J_{sc})$  und den Wirkungsgrad  $U_m \cdot J_m / P_{opt}$  der Solarzelle bei AM1.5G (d. h., einer Sonnenleistungsdichte von  $P_{opt} = 100 \text{ mW cm}^{-2}$ ).



$$2a) D_n = \frac{\mu_n kT}{q} = 5,2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}; L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 72,1 \mu\text{m} \gg d = 7 \mu\text{m}$$

$$b) J_d = J_n|_{x=0} = q D_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{x=0} = \frac{q D_n}{L_n} \left\{ A \cosh(0) + B \cosh\left(\frac{dp}{L_n}\right) \right\}$$

$$\text{DGL: } 0 = \frac{1}{D_n} \frac{d(n_p - n_{p0})}{dt} = \frac{d^2(n_p - n_{p0})}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2}$$

$$b) \underbrace{n_p(-dp) - n_{p0}}_{n_{p0} - n_{p0} = 0} = A \sinh\left(-\frac{dp}{L_n}\right) + B \sinh\left(\frac{0}{L_n}\right) \rightarrow A = 0$$

$$\underbrace{n_p(0) - n_{p0}}_{n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{RT}\right) - 1 \right\}} = B \sinh\left(\frac{dp}{L_n}\right) \rightarrow B = \frac{n_{p0}}{\sinh\left(\frac{dp}{L_n}\right)} \left\{ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{RT}\right) - 1 \right\}$$

$$c) J_d = \frac{q D_n n_{p0} L_n}{L_n dp} \left\{ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{RT}\right) - 1 \right\} = \frac{q D_n n_i^2}{N_A dp} \left\{ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{RT}\right) - 1 \right\} \underbrace{\cosh\left(\frac{dp}{L_n}\right)}_{\approx 1}$$

$$J_{d0} = 2,1 \cdot 10^{-10} \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

$$J_{sc} = 10 \text{ mA/cm}^2$$

$$d) J(u) = J_d(u) + J_{ph}; J(U_{oc}) = 0 \rightarrow J_d(U_{oc}) = -J_{ph} = J_{d0} \left\{ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{RT}\right) - 1 \right\}$$

$$\rightarrow U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 - \frac{J_{ph}}{J_{d0}}\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(-\frac{J_{ph}}{J_{d0}}\right) = 0,636 \text{ V} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_{d0}}\right)$$

$$P = U_{oc} J = U_{oc} J_{d0} \left\{ \exp\left(\frac{qU_{oc}}{RT}\right) - 1 \right\} \approx U_{oc} J_{sc}; \left. \frac{dP}{dU_{oc}} \right|_{U_m} = 0$$

$$\rightarrow J_{d0} \left\{ \exp\left(\frac{qU_m}{RT}\right) - 1 \right\} + U_m J_{d0} \frac{q}{RT} \exp\left(\frac{qU_m}{RT}\right) - J_{sc} = 0$$

$$\rightarrow \exp\left(\frac{qU_m}{RT}\right) \left\{ 1 + \frac{qU_m}{RT} \right\} = 1 + \frac{J_{sc}}{J_{d0}} \rightarrow \frac{qU_m}{RT} + \ln\left\{ 1 + \frac{qU_m}{RT} \right\} = \ln\left\{ 1 + \frac{J_{sc}}{J_{d0}} \right\}$$

$$\rightarrow 1) U_m = \frac{kT}{q} \left\{ \ln\left(1 + \frac{J_{sc}}{J_{d0}}\right) - \ln\left(1 + \frac{qU_m}{RT}\right) \right\} \approx \frac{kT}{q} \left\{ \ln\left(1 + \frac{J_{sc}}{J_{d0}}\right) - \ln\left(1 + \frac{qU_{oc}}{RT}\right) \right\}$$

$$= U_{oc} - \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{qU_{oc}}{RT}\right) = 0,552 \text{ V}$$

$$\rightarrow 2) \cancel{J_{d0} J_{sc}} J_d(U_m) - J_{sc} = J(U_m) = J_{d0} \frac{qU_m}{RT} \exp\left(\frac{qU_m}{RT}\right) = 8,35 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

$$R_L = \frac{U_m}{I_m} = 66,3 \Omega \text{ cm}^2$$

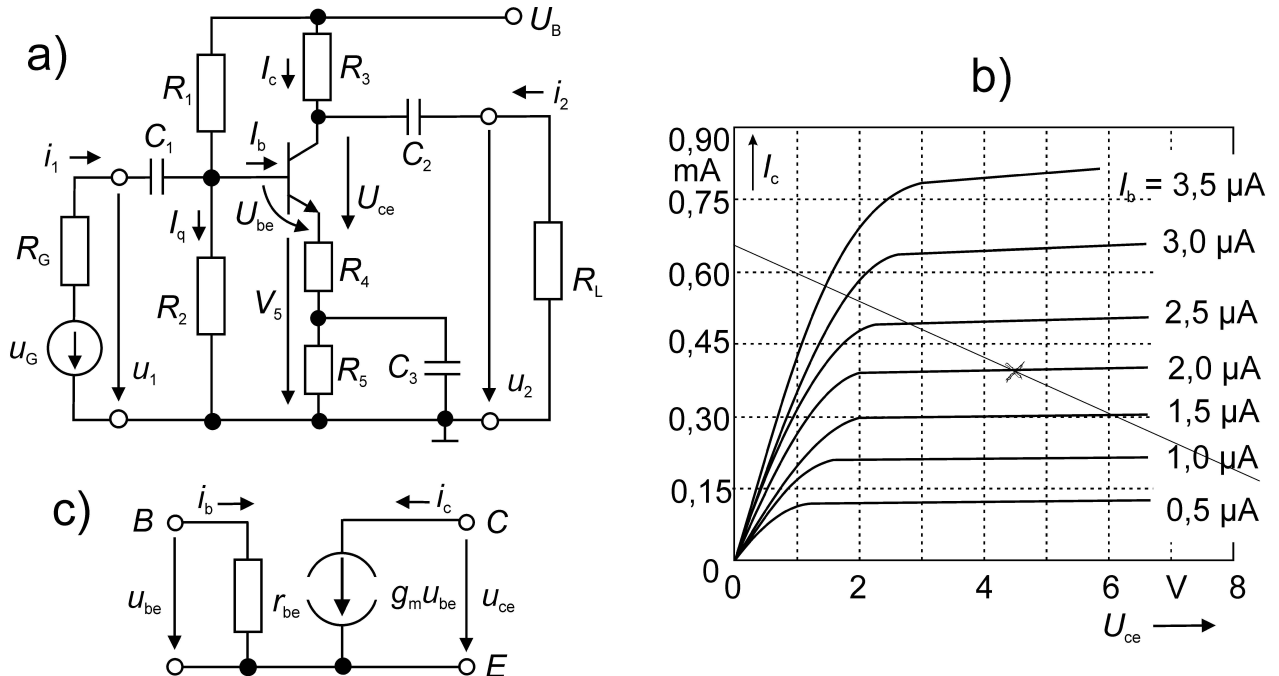
$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} J_{sc}} = 72,4 \%$$

$$\eta = \frac{U_m I_m}{P_{\text{opt}}} = \frac{4,61 \text{ mW/cm}^2}{100 \text{ mW/cm}^2} = 4,61 \%$$



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

$$U_B = 12 \text{ V}, U_{ce} = 4,5 \text{ V}, U_{be} = 0,75 \text{ V}, V_5 = 2 \text{ V}, I_b = 2,0 \mu\text{A}, I_q = 9 \times I_b, R_4 = 0,7 \text{ k}\Omega, R_G = 4 \text{ k}\Omega, R_L = 20 \text{ k}\Omega.$$

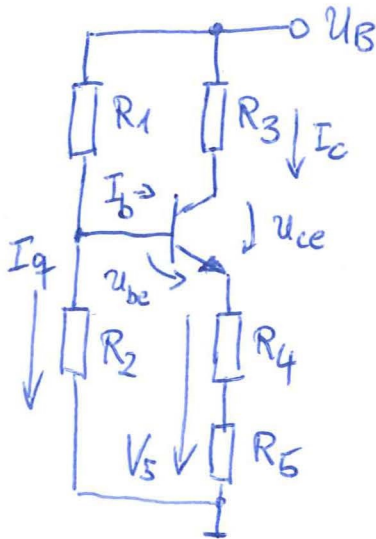


**Abb. 3**

- 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  $I_c$  ( $U_{ce} = 0$ )? Tragen Sie Arbeitspunkt und -gerade in das Kennlinienfeld 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  $g_m = 25 \text{ mS}$  und  $r_{be} = 6 \text{ k}\Omega$ . Die Kondensatoren  $C_1, C_2$  und  $C_3$  sind im betrachteten Frequenzbereich kurzgeschlossen. Welcher Schaltungstyp liegt vor?
- Bestimmen Sie aus b) mit Hilfe der in a) ermittelten Werte den Eingangswiderstand  $R_e = u_1/i_1$ , 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.

3a) npn-Transistor

aus Kennlinie:  $I_C = 0,5 \text{ mA}$



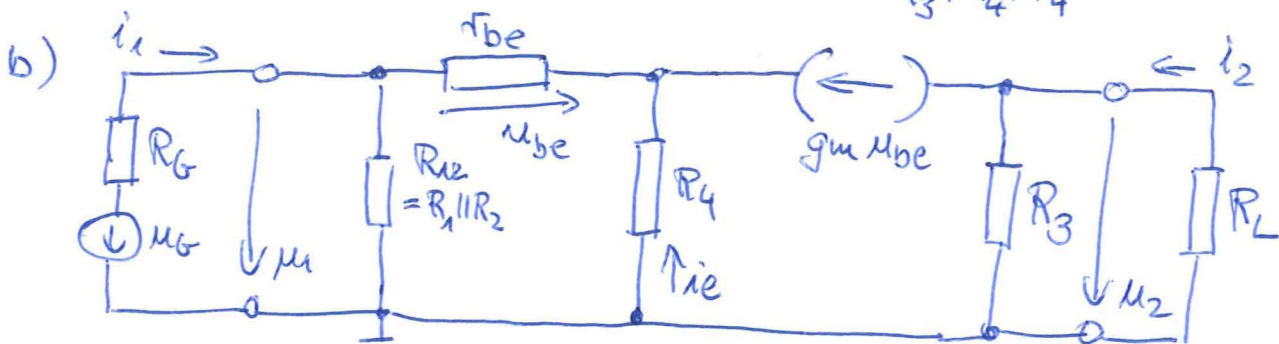
$$R_3 = \frac{U_B - U_{ce} - V_5}{I_C} = 13,75 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 + R_5 = \frac{V_5}{I_C + I_B} \approx \frac{V_5}{I_C} = 5 \text{ k}\Omega, R_5 = 5 \text{ k}\Omega - R_4 = 4,3 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_5 + U_{be}}{9 I_B} = 152,8 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_B - (V_5 + U_{be})}{10 I_B} = 462,5 \text{ k}\Omega$$

$$\rightarrow \text{AG: } I_C (U_{ce}=0) = \frac{U_B}{R_3 + R_4 + R_5} = 0,64 \text{ mA}$$



$$c) i_1 = \frac{u_1}{R_{12}} + \frac{u_{be}}{r_{be}} = \frac{u_1}{R_{12}} + \frac{u_1}{r_{be} g_m R_4}$$

Emitterschaltung

$$u_1 = u_{be} + \left( \frac{u_{be}}{r_{be}} + g_m u_{be} \right) R_4 = \left( 1 + \frac{R_4}{r_{be}} + g_m R_4 \right) u_{be} \approx g_m R_4 u_{be}$$

$$\rightarrow R_e = \frac{u_1}{i_1} = \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{r_{be} g_m R_4} \right)^{-1} = 54,9 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{i_2}{g_m u_{be}} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \rightarrow i_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} g_m \frac{1}{g_m R_4} u_1 = \frac{R_3}{(R_3 + R_4) R_4} \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{r_{be} g_m R_4} \right)^{-1} i_1$$

$$\rightarrow \frac{i_2}{i_1} = \frac{R_3}{(R_3 + R_4) R_4} \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{r_{be} g_m R_4} \right)^{-1} = 32,0$$

$$u_2 (R_L = \infty) = -g_m u_{be} R_3 = -\frac{g_m R_3}{g_m R_4} u_1 \rightarrow v_{uL} = -\frac{R_3}{R_4} = -19,6$$

$$u_2 = -g_m u_{be} (R_3 || R_L) = -\frac{g_m (R_3 || R_L)}{g_m R_4} u_1 \Rightarrow \frac{u_1}{u_G} = \frac{R_e}{R_G + R_e}$$

$$\rightarrow v_{uL} = -\frac{R_3 || R_L}{R_4} \cdot \frac{R_e}{R_G + R_e} = -\frac{R_3 || R_L}{R_4} \cdot \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{r_{be} g_m R_4} \right) R_G}$$

$$= -10,8$$