

Name:

Matr.-Nr.:

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 13/14**Kurzfragen ohne Unterlagen** (Bearbeitungszeit: 30 min)

- 1) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man
- 2) Um welche digitale Grundsaltung handelt es sich bei dem Bild rechts unten?
- 3) Welche der Aussagen zum Bipolartransistor sind richtig?
- 4) Welche Aussagen zur Funktion einer Solarzelle (zur Konvention der Beschaltung siehe Bild) sind zutreffend?
- 5) Der schematische Querschnitt rechts zeigt zwei Transistoren einer CMOS-Schaltung. Ergänzen Sie jeweils den Kanaltyp und beschriften Sie in dem unteren Feld die markierte Schicht, bzw. das Material.

CMOS ist die Abkürzung für:

- 6) Welche der Aussagen zu einem Halbleiter im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
- 7) Skizzieren Sie in dem vorbereiteten Diagramm den Verlauf der Bandkanten eines intrinsischen homogenen Halbleiters mit gleichförmigem elektrischen Feld. Markieren Sie W_L , W_V und W_i sowie Plus- und Minuspol der äußeren Spannungsquelle (in den Quadranten) und die positive Stromrichtung I .
- 8) Welche der Aussagen zum Stromfluss durch einen idealen pn -Übergang sind zutreffend?
- 9) Welche der Aussagen zu einer MOS-Kapazität sind zutreffend?
- 10) Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen die örtlichen Verläufe der Raumladungsdichte $\rho(x)$, des elektrischen Feldes $E(x)$ und das Bändermodell $W(x)$ in der angedeuteten, idealen Metall-Oxid- p -Halbleiterstruktur für den Fall der Anreicherung. Beschriften Sie W_F , W_L , W_V sowie die angelegte Spannung U . Welches Vorzeichen muss dann die Spannung U zwischen Metall und Halbleiter aufweisen?

Name:

Matr.-Nr.:

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 13/14**Bemerkung:** Bei Berechnungen ist grundsätzlich auch der Rechenweg nachvollziehbar anzugeben.

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

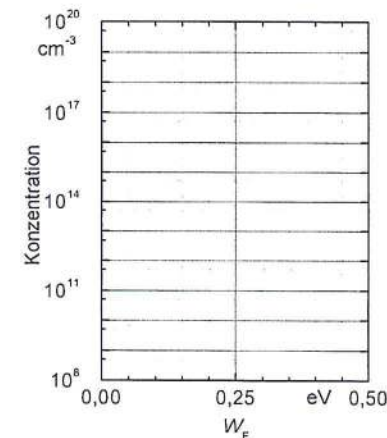
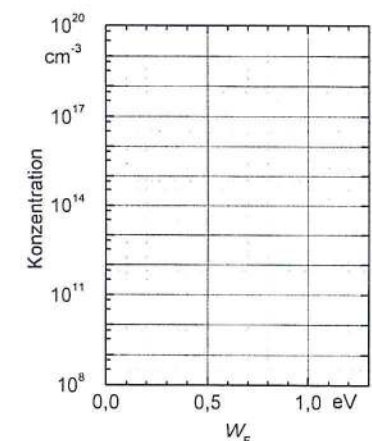
Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

- 1) Zwei homogen dotierte Halbleiter (A und B) sollen bezüglich ihrer elektronischen Eigenschaften bei Raumtemperatur $T_0 = 300$ K untersucht werden. In folgenden Daten stimmen beide Materialien überein: $m_L^* = 1,6$; $m_V^* = 1,6$; $N_A = 1 \cdot 10^{13}$ cm $^{-3}$; $N_D = 5 \cdot 10^{13}$ cm $^{-3}$; $W_A - W_V = W_L - W_D = 170$ meV. Unterschiedlich sind dagegen die Bandabstände von $W_{GA} = 0,5$ eV und $W_{GB} = 1,3$ eV; zur Vereinfachung sei $W_V = 0$. Es gilt:

$$N_{L,V} = 2 \left(\frac{m_{L,V}^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}; \quad n_i^2 = np; \quad W_i = \frac{W_G}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_L} \right);$$

$$N_D^+ = N_D \left(2 \exp \left(\frac{W_F - W_D}{kT} \right) + 1 \right)^{-1}; \quad N_A^- = N_A \left(4 \exp \left(\frac{W_A - W_F}{kT} \right) + 1 \right)^{-1};$$

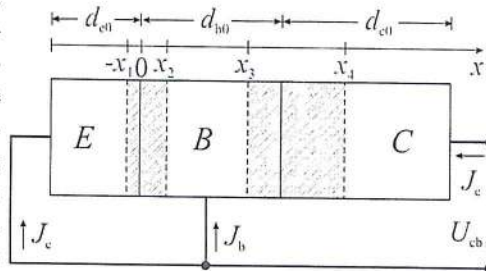
$$n = N_L \exp \left(\frac{W_F - W_L}{kT} \right); \quad p = N_V \exp \left(\frac{W_V - W_F}{kT} \right).$$

Halbleiter A**Halbleiter B**

- a) Berechnen Sie für beide Halbleiter die effektiven Zustandsdichten N_L und N_V , Eigenleitungskonzentration n_i und -niveau W_i sowie die Konzentration ionisierter Akzeptoren N_A^+ für $W_F = 0$ und die ionisierter Donatoren N_D^+ für $W_F = W_G$.
- b) Bestimmen Sie die Lage des Fermi-Niveaus. Skizzieren Sie dazu unter Verwendung obiger Daten für beide Halbleiter die Konzentrationen der freien Ladungsträger n und p sowie der ionisierten Störstellen N_D^+ und N_A^+ in Abhängigkeit von W_F in den vorbereiteten Shockley-Diagrammen (Vorderseite). Markieren Sie jeweils alle wichtigen Größen ($N_L, N_V, n_i, W_D, W_A, W_L, W_V, W_i$). Lesen Sie für Ladungsneutralität die Lage des Fermi-Niveaus für beide Fälle sowie die Majoritätsladungsträgerkonzentrationen ab.
- c) Stellen Sie die Gleichung für die Ladungsneutralität auf, und vereinfachen Sie sie für beide Halbleiter durch Vernachlässigungen aufgrund der Informationen aus den Shockley-Diagrammen. Berechnen Sie daraus $W_{FA,B}$ sowie $n_{A,B}$ und $p_{A,B}$. Diskutieren Sie das Ergebnis kurz.

- 2) Die Strom-Spannungs-Charakteristik $J_c(U_{cb})$ des npn -Transistors mit Emitter-Basis-Kurzschluss (s. Abb.) 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 und Emitter- und Kollektor-Bahngebiete lang gegenüber den



Minoritätsladungsträger-Diffusionslängen. Folgende Daten sind bekannt: $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $kT = 26 \text{ meV}$ und $\varepsilon = 10^{-12} \text{ As/Vcm}$ sowie

Emitter	Basis	Kollektor
$N_{De} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$N_{Ab} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$N_{Dc} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
$d_{e0} = 4 \text{ }\mu\text{m}$	$d_{b0} = 5 \text{ }\mu\text{m}$	$d_{c0} = 350 \text{ }\mu\text{m}$
$L_{pe} = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$	$L_{nb} = 100 \text{ }\mu\text{m}$	$L_{pc} = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$
$\mu_{pe} = 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_{nb} = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_{pc} = 150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

- a) Berechnen Sie die Diffusionsspannungen U_{Deb} und U_{Dcb} sowie die Ausdehnung der neutralen Basis $d_b = x_3 - x_2$ für den allgemeinen Fall (Formeln) sowie für $U_{cb} = 6,7 \text{ V}$ (Werte). Allgemein gelten am pn -Übergang (mit der Spannung U von p nach n)

Name:

Matr.-Nr.:

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}} \right) \text{ und}$$

$$w = \sqrt{\frac{2q(U_D - U)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = w_n + w_p \text{ und } N_A w_p = N_D w_n.$$

- b) Wie groß sind die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen n_p an den Rändern der neutralen Basis x_2 und x_3 allgemein (Formeln) und für $U_{cb} = 6,7 \text{ V}$ (Werte)? Skizzieren Sie für diesen Fall den Verlauf von n_p in der neutralen Basis. Markieren Sie die Gleichgewichtskonzentration n_{p0} .

- c) Kombinieren Sie für die Minoritätsladungsträger in der neutralen Basis die Stromgleichung

$$J_n = J_{nF} + J_{nD} = \sigma_n E + q D_n \text{grad} n_p \text{ mit } D_n = kT \mu_n / q$$

und die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dn_p}{dt} = \frac{1}{q} \text{div} J_n - r + g \text{ mit } r = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \text{ und } L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

für den stationären Zustand zu einer eindimensionalen Differenzialgleichung (DGL) für $n_p(x)$.

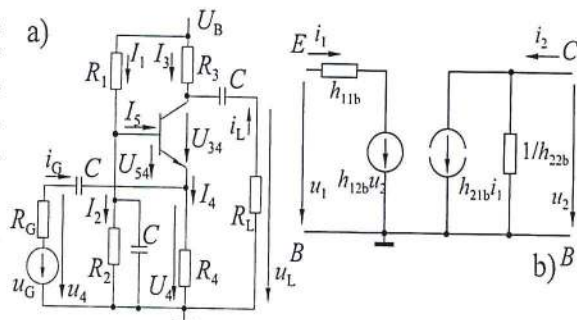
- d) Lösen Sie die DGL mit den Randbedingungen aus b) in Abhängigkeit von U_{cb} und dem Ansatz

$$n_p - n_{p0} = A \cdot \sinh \left(\frac{x - x_2}{L_{nb}} \right) + B \cdot \sinh \left(\frac{x_3 - x}{L_{nb}} \right).$$

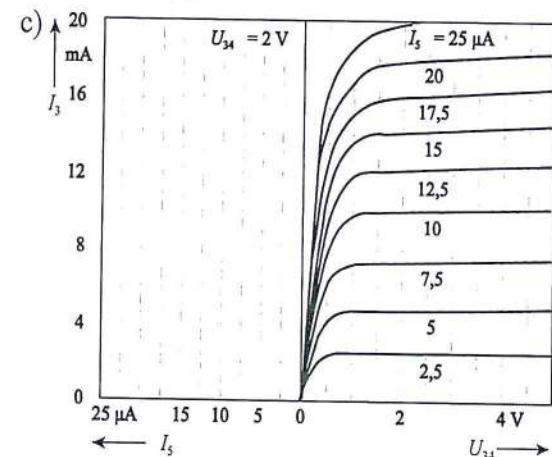
- e) Berechnen Sie die Minoritätsladungsträger-Stromdichten jeweils am Rand der Verarmungszonen $J_{ne}(x_2)$ und $J_{nc}(x_3)$ (Formeln und Werte).

- f) Wie groß ist der Basistransportfaktor β_T (Formel und Wert)? Diskutieren Sie das Ergebnis.

- 3) Gegeben ist die Schaltung in Abb. a), die mit $U_B = 17\text{ V}$ betrieben wird. Der Transistor wird durch sein Ausgangskennlinienfeld (c) in Emitterschaltung beschrieben.



- a) Zunächst soll der Arbeitspunkt (AP: $I_5 = 10\text{ }\mu\text{A}$, $U_{34} = 2\text{ V}$) eingestellt werden. Zeichnen Sie dazu das Gleichstrom-Ersatzschaltbild. Bestimmen Sie den Arbeitsstrom I_3 . Berechnen Sie R_3 und R_4 für $R_3/R_4 = 5$. Tragen Sie ferner den Arbeitspunkt und die Arbeitsgerade in das Ausgangskennlinienfeld ein, und konstruieren Sie die Stromübertragungskennlinie $I_3 = f(I_5)$ für $U_{34} = 2\text{ V}$ im linken Teil von Abb. 3b. Für den Strom I_5 ist eine Spannung $U_{54} = 0,5\text{ V}$ notwendig.



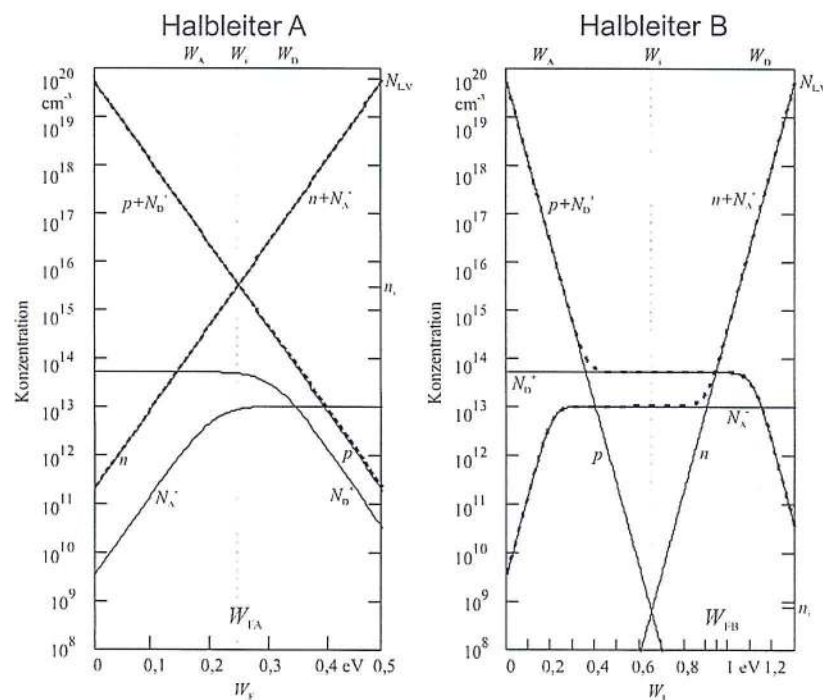
- Berechnen Sie den Spannungsteiler R_1, R_2 so, dass gilt $I_1 \approx I_2 = 20 \cdot I_5$.
- b) Nun soll das Wechselstromverhalten der Schaltung mit $R_G = 50\text{ }\Omega$ und $R_L = 1,5\text{ k}\Omega$ analysiert werden. Die Kapazitäten C sind so dimensioniert, dass sie als Kurzschlüsse betrachtet werden können. Der Transistor soll durch sein h -Parameter-Ersatzschaltbild (b) für die Basischaltung charakterisiert sein. Zeichnen Sie damit das Wechselstrom-Ersatzschaltbild der Gesamtschaltung. Um welche Transistor-Grundschialtung handelt es sich?
- c) Bestimmen Sie aus der Stromübertragungskennlinie den Wert der Stromverstärkung in Emitterschaltung β und daraus den Wert von $h_{21b} = -\beta/(1+\beta)$ im Transistor-Ersatzschaltbild. Gegeben sind außerdem die Werte $h_{11b} = 30\text{ }\Omega$, $h_{12b} = 0$ und $h_{22b} = 0,5\text{ }\mu\text{S}$. Berechnen Sie damit für die Gesamtschaltung die Stromverstärkung $v_i = i_L/i_G$, die Spannungsverstärkung $v_u = u_L/u_G$ und die Leistungsverstärkung $v_p = i_L u_L / i_G u_G$ (Formeln und Werte, nutzen Sie sinnvolle Vernachlässigungen).

Name:

Matr.-Nr.:

Lösungen zu 1):

- a) Die gesuchten Größen lassen sich aus den gegebenen Gleichungen berechnen zu $N_{LA} = N_{LB} = N_{VA} = N_{VB} = 5 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$; $n_{iA} = 3,2 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}$; $n_{iB} = 6,1 \cdot 10^8\text{ cm}^{-3}$; $W_{iA} = 0,25\text{ eV}$; $W_{iB} = 0,65\text{ eV}$; $N_{AA}^- = N_{AB}^- = 3,5 \cdot 10^9\text{ cm}^{-3}$; $N_{DA}^+ = N_{DB}^+ = 3,5 \cdot 10^{10}\text{ cm}^{-3}$.
- b) Mit den Daten aus a) können die Shockley-Diagramme für beide Fälle konstruiert werden. Die fett gezeichneten Verläufe entsprechen den Summenkurven der positiven und negativen Ladungen.



gen. Für Neutralität ergibt sich $W_{FA} \approx W_{iA} = 0,25\text{ eV}$ also $n_A \approx p_A = n_{iA} = 3,2 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ bzw. $W_{FB} \approx 0,95\text{ eV}$ und $n_B \approx N_D = 5 \cdot 10^{13}\text{ cm}^{-3}$.

- c) Die Neutralitätsbedingung lautet: $n + N_A^- = p + N_D^+$.

Zunächst betrachten wir Halbleiter A. Im Shockley-Diagramm (links) wird deutlich, dass die Beiträge der Dotierstoffe zur Ladungsneutralität vernachlässigt werden können, die sich also vereinfacht zu $n_A = p_A = n_{iA} = 3,2 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}$. Das Fermi-Niveau liegt beim Eigenleitungswert $W_{FA} \approx W_{iA} = 0,25\text{ eV}$. Trotz der Dotierstoffe ist der Halbleiter A eigenleitend. Beim Halbleiter B

dominieren dagegen die Donatoren und Elektronen das Shockley-Diagramm, sodass für die Neutralitätsbedingung gilt $n_B = N_D^+ = N_D = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Nach (1.14b) ergibt sich

$$W_{FB} = kT \ln \left(\frac{N_D}{N_L} \right) + W_G = 0,94 \text{ eV und } p_B = \frac{n_{iB}^2}{n_B} = 7,5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}.$$

Der Halbleiter B ist also in der Störstellenerschöpfung, da alle Dotierstoffe ionisiert sind.

Lösung zu 2:

- a) Die Diffusionsspannungen lassen sich z. B. mit $n_{n0} = N_{De}$ und $n_{p0} = n_i^2/N_{Ab}$ berechnen

$$U_{Deb} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{De} N_{Ab}}{n_i^2} \right) = 0,83 \text{ V und } U_{Dcb} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{De} N_{Ab}}{n_i^2} \right) = 0,71 \text{ V}.$$

Die Ausdehnung der Verarmungszonen ergibt sich nach Einsetzen von $w_n = w_p N_A/N_D$ in die Gleichung für w und Auflösen nach w_p

$$w_p = \sqrt{\frac{2\epsilon(U_D - U)N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \text{ bzw. } x_2 = \sqrt{\frac{2\epsilon(U_{Deb} + U_{cb})N_{De}}{qN_{Ab}(N_{Ab} + N_{De})}} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon U_{Deb}}{qN_{Ab}}} = 0,32 \text{ } \mu\text{m} \text{ und}$$

$$d_{b0} - x_3 = \sqrt{\frac{2\epsilon(U_{Dcb} + U_{cb})N_{De}}{qN_{Ab}(N_{Ab} + N_{De})}} = \sqrt{\frac{2\epsilon(U_{Dcb} - U_{cb})}{q2N_{Ab}}} \Big|_{U_{\tilde{c}c}=6,7\text{V}} = 0,68 \text{ } \mu\text{m}$$

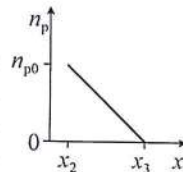
$$\rightarrow d_b = x_3 - x_2 \approx 4 \text{ } \mu\text{m}.$$

- b) Die Randbedingungen ergeben sich nach (1.63) bzw. aus der Aufgabenstellung

$$n_p(x_2) = n_{p0} = n_i^2/N_{Ab} = 10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ und}$$

$$n_p(x_3) = n_{p0} e^{-\frac{qU_{\tilde{c}c}}{kT}} \approx 0.$$

Die Werte, die in der Tabelle gegeben sind zeigen, dass die Diffusionslänge der Elektronen sehr viel größer ist als die Ausdehnung der neutralen Basis (a). Daher ergibt sich in der nebenstehenden Skizze das Diffusionsdreieck, also eine Gerade für die Ortsabhängigkeit der Minoritätsladungsträgerkonzentration.



- c) Im stationären Zustand ($dn/dt = 0$) und die feldfreie neutrale Basis ergibt sich die gesuchte Dif-

Name:

Matr.-Nr.:

ferenzialgleichung (siehe auch (1.66 und 1.69))

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

- d) Mit dem gegebenen Ansatz und den Randbedingungen (aus b) folgen direkt die Konstanten A und B

$$x = x_2: n_p - n_{p0} = 0 = A \cdot 0 + B \sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right) \rightarrow B = 0$$

$$x = x_3: n_{p0} \left(e^{-\frac{qU_{\tilde{c}c}}{kT}} - 1 \right) = A \sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right) \rightarrow A = \frac{n_{p0} \left(e^{-\frac{qU_{\tilde{c}c}}{kT}} - 1 \right)}{\sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)}.$$

Einsetzen führt zu

$$n_p - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{-\frac{qU_{\tilde{c}c}}{kT}} - 1 \right) \frac{\sinh \left(\frac{x - x_2}{L_{nb}} \right)}{\sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)}.$$

- e) Da die neutrale Basis feldfrei ist, sind die Minoritätsladungsträger-Ströme reine Diffusionsströme und berechnen sich aus der Stromgleichung und d)

$$J_{nc}(x_2) = q D_{nb} \frac{dn_p}{dx} \Big|_{x=x_2} = q D_{nb} \frac{\frac{n_{p0} \left(e^{-\frac{qU_{\tilde{c}c}}{kT}} - 1 \right)}{\sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)}}{L_{nb}} \cdot 1 = - \frac{q D_{nb} n_{p0}}{L_{nb} \sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)} = -0,1 \frac{\text{nA}}{\text{cm}^2} \text{ und}$$

$$J_{nc}(x_3) = -q D_{nb} \frac{dn_p}{dx} \Big|_{x=x_3} = -q D_{nb} \frac{\frac{n_{p0} \left(e^{-\frac{qU_{\tilde{c}c}}{kT}} - 1 \right)}{\tanh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)}}{L_{nb}} \approx \frac{q D_{nb} n_{p0}}{L_{nb} \tanh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)} = 0,1 \frac{\text{nA}}{\text{cm}^2}.$$

- f) Der Basistransportfaktor β_T ist das Verhältnis des aus der Basis in den Kollektor injizierten Minoritätsladungsträger-Stromes zu dem aus dem Emitter in die Basis injizierten, also

$$\beta_T = \frac{-J_{nc}}{J_{ne}} = \cosh\left(\frac{d_b}{L_{nb}}\right) \approx 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{d_b}{L_{nb}}\right)^2 = 1,0008.$$

Der Wert ist größer als 1 weil die Minoritätsladungsträgerkonzentration innerhalb der neutralen Basis unterhalb des Gleichgewichtswertes liegt und daher Nettogeneration überwiegt, also zusätzliche Minoritätsladungsträger generiert werden. Folglich ist der Kollektorstrom größer als der Emittorstrom und $\beta_T > 1$.

Lösung zu 3:

- a) Gleichstrom-ESB und Arbeitspunkt und -gerade sind im Bild dargestellt. Der Kollektorstrom $I_3 = 10 \text{ mA}$ lässt sich ablesen. Mit dem gegebenen U_B ergibt sich unter Vernachlässigung von I_5 $R_3 + R_4 = 6R_4 = (U_B - U_{34})/I_3 = 1,5 \text{ k}\Omega$, also $R_4 = 250 \Omega$ und $R_3 = 1250 \Omega$. Die Stromübertragungskennlinie lässt sich einfach aus dem Ausgangskennlinienfeld für $U_{34} = 2 \text{ V}$ ablesen und in das

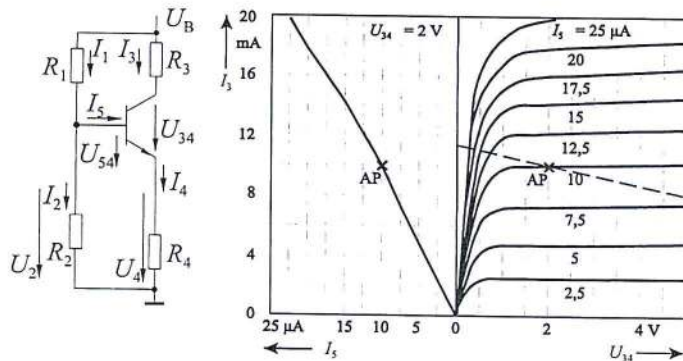


Diagramm eintragen. Der Spannungsteiler zur Einstellung des Basis-Potenzials kann dimensioniert werden über

$$R_1 + R_2 \approx \frac{U_B}{20I_5} \text{ und } U_2 = U_{54} + I_4 R_4 \approx U_{54} + I_3 R_4 = 20I_5 R_2.$$

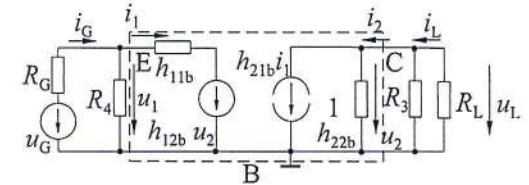
Es ergibt sich

Name:

Matr.-Nr.:

$$R_2 = \frac{U_{54} + I_3 R_4}{20I_5} = 15 \text{ k}\Omega \text{ und } R_1 = \frac{U_B}{20I_5} - R_2 = 60 \text{ k}\Omega.$$

- b) Durch Kurzschließen der Kapazitäten und der Versorgungsspannung sowie Einsetzen des Transistor-ESBs (im gestrichelten Rechteck) ergibt sich das Wechselstrom-ESB. Da die Basis sowohl im Eingangs- als auch im Ausgangskreis ist, handelt es sich um eine Basisschaltung.



- c) Aus der Steigung der Stromübertragungskennlinie in a) im Arbeitspunkt ergibt sich $\beta = \Delta I_3 / \Delta I_5 = 18 \text{ mA} / 20 \mu\text{A} = 900$. Für das Transistor-ESB ergibt sich daraus $h_{21b} = -0,999$. Für die weiteren gesuchten Größen folgt mit $1/h_{22b} \gg R_3, R_L$

$$v_i = \frac{i_L}{i_G} \approx \frac{h_{21b} i_1 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_L} \right)}{i_G} = \frac{h_{21b} i_G \left(\frac{R_4}{R_4 + h_{11b}} \right) \left(\frac{R_3}{R_3 + R_L} \right)}{i_G} = -0,4.$$

$$v_u = \frac{u_L}{u_G} \approx \frac{h_{21b} i_1 \left(\frac{R_3 R_L}{R_3 + R_L} \right)}{u_G} = \frac{-h_{21b} i_G \left(\frac{R_4}{R_4 + h_{11b}} \right) \left(\frac{R_3 R_L}{R_3 + R_L} \right)}{u_G} = \frac{-h_{21b} \frac{u_G}{R_G + R_4 h_{11b} / (R_4 + h_{11b})} \left(\frac{R_4}{R_4 + h_{11b}} \right) \left(\frac{R_3 R_L}{R_3 + R_L} \right)}{u_G} = 7,9.$$

$$v_p = v_i v_u = -3,16.$$