Name: ....

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 10

Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)

1) Gegeben ist das Bändermodell $W(x)$ von n-dotiertem Si. 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 Koordinatensystemen.
2) Welche der Aussagen zu einem idealen pn-Übergang mit angelegter Spannung U sind zutreffend?
3) Welche der Aussagen zur Kapazität C einer pn-Diode mit abruptem Übergang und homogenen Dotierungen sind zutreffend?
4) Welche der Aussagen zu dem gezeigten Bändermodell mit den Bandkanten W_V und W_L sowie den beiden Quasi-Ferminiveaus W_{Fn} und W_{Fp} für die Elektronen und Löcher sind richtig unter der Voraussetzung gleicher effektiver Zustandsdichten im Leitungs- und Valenzband?
5) Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen die örtlichen Verläufe der Raumladungsdichte $\rho(x)$, des elektrischen Feldes $E(x)$ und des Bändermodells $W(x)$ in der angedeuteten, idealen Metall-Oxid-n-Halbleiterstruktur für den Fall der starken Inversion. Beschriften Sie W_F, W_L, W_V sowie die angelegte Spannung U. Welches Vorzeichen muss dann die Spannung am Metall gegenüber dem Halbleiter aufweisen?
6) Die Steilheit eines FET mit isoliertem Gate kann erhöht werden, wenn man ...
7) Gegeben ist eine ideale Metall-Isolator-Halbleiter-Struktur (Bild a) mit gleichen Austrittsarbeiten von Halbleiter und Metall sowie in den Bildern c bis e die zugehörigen Bändermodelle für drei Arbeitspunkte. Um welchen Halbleitertyp handelt es sich?

   Zeichnen Sie für niedrige Frequenzen den $C(U_g)$-Verlauf in das Diagramm (Bild b). Markieren Sie die Arbeitspunkte der drei angegebenen Bändermodelle mit dem zugehörigen Buchstaben (c bis e) in der $C(U_g)$-Kennlinie.
8) Welche der Aussagen zu einer MOS-Kapazität sind zutreffend?
9) Welche der Aussagen zum Bipolartransistor sind richtig?
10) Skizzieren Sie in dem vorbereiteten Diagramm den Konzentrationsverlauf der Minoritätsladungsträger in der neutralen Basis (x_2 bis x_3) eines npn-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 Minoritätsladungsträgerkonzentration $n_p(x_2)$ in Abhängigkeit von U_{eb} formelmäßig an.

ptg@tu-bs.de

Name:..

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 10

Aufgaben (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

1) Ein n-Halbleiter hat bei $T_0 = 300$ K gleiche Elektronen- und Löchermassen m und -beweglichkeiten μ und eine Dotierungskonzentration $N_D >> n_i$. Die effektiven Zustandsdichten und die Beweglichkeiten hängen von der Temperatur T ab gemäß:

$$N_L(T) = N_V(T) = N_0\left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2}; \quad \mu_p(T) = \mu_n(T) = \mu_0\left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2}.$$

a) Leiten Sie hieraus die Temperaturabhängigkeit der Eigenleitungskonzentration $n_i(T)$ formelmäßig ab. Ermitteln Sie anschließend die Temperaturabhängigkeiten der spezifischen Leitfähigkeit $\sigma(T)$ für die Fälle der Eigenleitung (1) und der Störstellenerschöpfung (2). Die abgeleiteten Formeln sollen jeweils alle Temperaturabhängigkeiten explizit enthalten.

$$n_i = \sqrt{N_L N_V}\exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right); \quad \sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

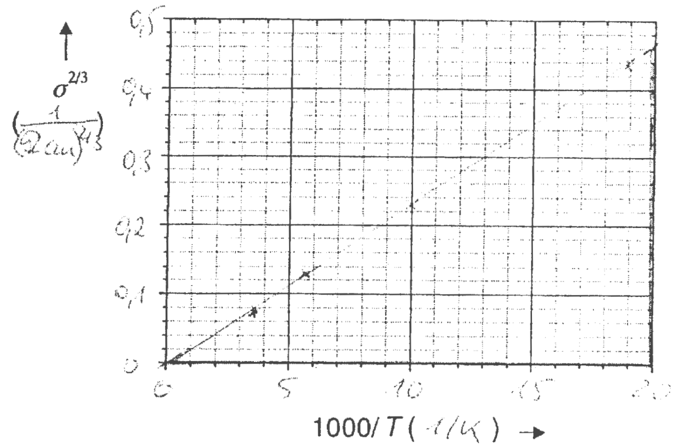
b) Formen Sie die unter a) abgeleiteten Temperaturabhängigkeiten $\sigma(T)$ für Eigenleitung (1) bzw. Störstellenerschöpfung (2) so um, dass sich in Abhängigkeit von $1/T$ jeweils eine lineare Funktion $f(\sigma) = m \cdot (1/T) + n$ ergibt. Geben Sie m und n für die beiden Fälle (1) und (2) formelmäßig an.

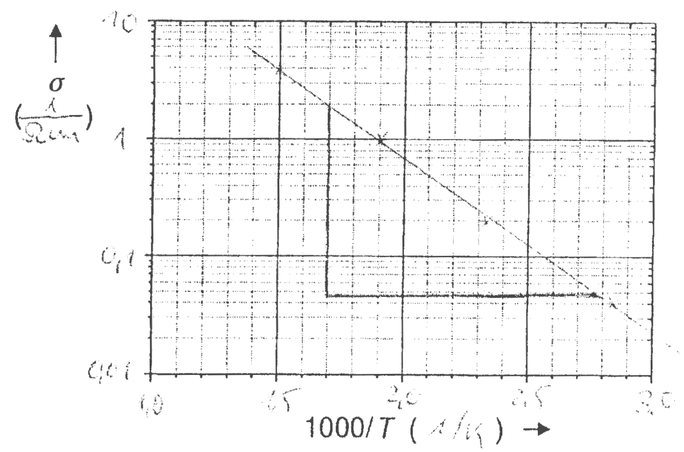
c) Der betrachtete Halbleiter weist folgende Werte für σ in Abhängigkeit von T auf,

T (K)	53	100	175	270	350	420	525	665
σ (1/Ωcm)	0,3	0,11	0,05	0,02	0,04	0,2	1,0	4,0
Bereich	(2) Störstellenerschöpfung				(1) Eigenleitung			
1000/T (1/K)	18,9	10,0	5,7	3,7	2,85	2,38	1,9	1,5
$\sigma^{2/3}$ $\left(\frac{1}{(\Omega cm)^{2/3}}\right)$	0,44	0,23	0,13	0,07				

wobei der Übergang zwischen den Bereichen (1) und (2) bei 310 K liegt. Ordnen Sie die Spalten 1 bis 4 bzw. 5 bis 8 den Bereichen Eigenleitung (1) bzw. Störstellenerschöpfung (2) zu und geben Sie dies in der dritte Zeile an. Ergänzen Sie in der Tabelle auch die fehlenden Werte von 1000/T (vierte Zeile) sowie die für die eine Geradendarstellung gemäß b) umzurechnenden Werte von σ (nur in einem der beiden

Fälle erforderlich, fünfte Zeile). Tragen Sie die ermittelten Werte nun getrennt für die beiden Bereiche (1) und (2) in das jeweils zugehörige Diagramm ein (beachten Sie die unterschiedlichen Skalierungen). Ergänzen Sie die Achsenbeschriftung. Bestimmen Sie aus den Werten im Eigenleitungsbereich den Bandabstand W_G und aus den Werten im Bereich der Störstellenerschöpfung die Dotierungskonzentration N_D (geg. Daten: $\mu_0 = 1300$ cm²/Vs; $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; $k = 8{,}62 \cdot 10^{-5}$ eV/K).





1) a) $n_{i(0)} = \sqrt{N_- N_+}\exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right) = \sqrt{N_0^2\left(\frac{T}{T_0}\right)^3}\exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right)$

$= N_0\left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2}\exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right)$

$\sigma(T) = q\,(n+p)\mu_0\left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2}$

(1) Eigenleitung: $n = p = n_i \longrightarrow \sigma(T) = q n_i \mu_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2} = q N_0 \mu_0 \underbrace{\left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2}\left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2}}_{=1} \exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right)$

(2) Störstellenerschöpfung: $n = N_D$, $p = \frac{n_i^2}{N_D} \ll n \rightarrow \sigma(T) = q N_D \mu_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2}$

b) (1) $\underbrace{\ln(\sigma)}_{f(\sigma)=} = -\frac{W_G}{2kT}\,\frac{1}{T} + \ln(q N_0 \mu_0) \rightarrow \begin{array}{l} m = -\frac{W_G}{2kT} \\ n = \ln(q N_0 \mu_0) \end{array}$

(2) $f(\sigma) = \sigma^{2/3} = (q N_D \mu_0)^{2/3} T_0 \,\frac{1}{T} \rightarrow \begin{array}{l} m = (q N_D \mu_0)^{2/3} T_0 \\ n = 0 \end{array}$

c) (1) $m = \frac{\ln 0{,}05 - \ln 2}{(2{,}8 - 1{,}7)\cdot 10^{-3}/K} = -\frac{3{,}69}{1{,}1} 10^3 K = -3{,}35 \cdot 10^3 K = -\frac{W_G}{2k}$

$\Leftrightarrow W_G = 2k\, 3{,}35 \cdot 10^3 K = 0{,}58\,eV$

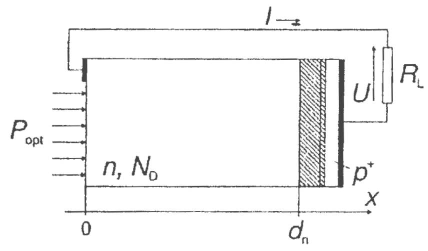
(2) $m = \frac{0{,}46\,/(\Omega cm)^{2/3}}{20 \cdot 10^{-3}/K} = 23\,\frac{K}{(\Omega cm)^{2/3}} = (q N_D \mu_0)^{2/3}\, T_0$

$\Leftrightarrow N_D = \left(\frac{23\,\frac{K}{(\Omega cm)^{2/3}}}{(q\mu_0)^{2/3}\, T_0}\right)^{3/2} = \left(\frac{23\,K}{300\,K}\right)^{3/2} \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19} As\ 1300 \frac{cm^2}{Vs}\ \cancel{\Omega}\, cm}$

$= 1 \cdot 10^{14}\, cm^{-3}$

2) Abb. 2 zeigt eine Diode, die bei 300 K als Solarzelle betrieben wird. Bestrahlung durch das n-Gebiet führt zu einer ortsabhängigen Generation mit einer auf die Fläche A bezogenen Rate $g(x)$. Thermische Generation von Ladungsträgern in der Verarmungszone (Abb. 2, schraffierter Bereich) und ein Spannungsabfall über den Bahngebieten können vernachlässigt werden. Der Lastwiderstand ist so dimensioniert, dass sich ein Spannungsabfall $U = 0{,}4$ V ergibt.

Abb. 2



a) Stellen Sie die Differenzialgleichung auf, die im eingeschwungenen Zustand den Verlauf der Löcherkonzentration $p_n(x)$ im n-Bahngebiet beschreibt. Nutzen Sie die Kontinuitätsgleichung: $dp_n/dt = -1/q(dJ_p/dx) - r_{net} + g$ mit Diffusionsstromdichte-Gleichung: $J_p = -qD_p(dp_n/dx)$, thermischer Nettorekombinationsrate: $r_{net} = (p_n - p_{n0})/\tau_p$, optischer Generationsrate: $g(x) = g_0\exp(-\bar{a}x)$, Diffusionslänge: $L_p = (D_p\tau_p)^{1/2}$ und Gleichgewichtskonzentration der Löcher im n-Bahngebiet p_{n0}.

Ermitteln Sie die Löcherkonzentration an den Rändern des n-Bahngebietes, d.h. bei $x = 0$ [Hinweis: hier liegt thermisches Gleichgewicht vor] und bei $x = d_n$ [Hinweis: $p_n(d_n) = p_{n0}\exp(W/kT)$; W ist eine Funktion von U]. Lösen Sie nun die Differenzialgleichung unter Verwendung des Ansatzes:

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

Geben Sie getrennt die Anteile der ohne Bestrahlung vorliegenden und der photogenerierten Löcherkonzentrationen an. Nähern und skizzieren Sie qualitativ den Verlauf der Konzentration der photogenerierten Ladungsträger $p_{ph}(x)$ im n-Bahngebiet für den Fall, dass $\bar{a}^2 \gg 1/L_p^2$, $d_n \ll L_p$ und $\exp(-\bar{a}d_n) \ll 1$ (nutzen Sie die Vorlage).

2a) Kont. gl. $\frac{dp_n}{dt} = 0 = -\frac{1}{q}\frac{dj_p}{dx} - r_{net} + g = D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + g_0 \exp.$

$\uparrow$ aufgelöst [illegible]

$$\hookrightarrow \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\underbrace{D_p \tau_p}_{L_p^2}} + \frac{g_0}{D_p}\exp(-\bar{\alpha}x)$$

bei $x=0$ idealer Rekomb. kontakt $\Rightarrow p_n(0) = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{n_i^2}{N_D} = p_{n0}$

bei $x = d_n$: $p_n(d_n) = p_{n0}\exp\left(\frac{W}{kT}\right) = p_{n0}\exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$

Ansatz in Rdbed. (1) $p_n(0) - p_{n0} = 0 = A\underbrace{\sinh(0)}_{=0} + B\sinh\left(-\frac{d_n}{L_p}\right) + C\underbrace{\exp(0)}_{=1}$

(2) $p_n(d_n) - p_{n0} = p_{n0}\left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right] = A\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right) + B\underbrace{\sinh(0)}_{=0} + C\exp(-\bar{\alpha}d_n)$

Ansatz in DGL. $C\bar{\alpha}^2\exp(-\bar{\alpha}x) - \frac{C}{L_p^2}\exp(-\bar{\alpha}x) + \frac{g_0}{D_p}\exp(-\bar{\alpha}x) = 0$

$$\rightarrow C\left(\bar{\alpha}^2 - \frac{1}{L_p^2}\right) + \frac{g_0}{D_p} = 0 \rightarrow C = \frac{-g_0}{D_p\left(\bar{\alpha}^2 - \frac{1}{L_p^2}\right)};\quad B = -\frac{C}{\sinh\left(-\frac{d_n}{L_p}\right)}$$

$$A = \frac{p_{n0}\left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right] - C\exp(-\bar{\alpha}d_n)}{\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right)}$$

ohne Bestrahlung: $p_d(x) = p_{n0} + p_{n0}\left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right]\frac{\sinh(x/L_p)}{\sinh(d_n/L_p)}$

mit Bestr.: $p_{ph}(x) = -C\exp(-\bar{\alpha}d_n)\frac{\sinh\left(\frac{x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} - C\frac{\sinh\left(\frac{x-d_n}{L_p}\right)}{\sinh\left(-\frac{d_n}{L_p}\right)} + C\exp(-\bar{\alpha}x)$

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

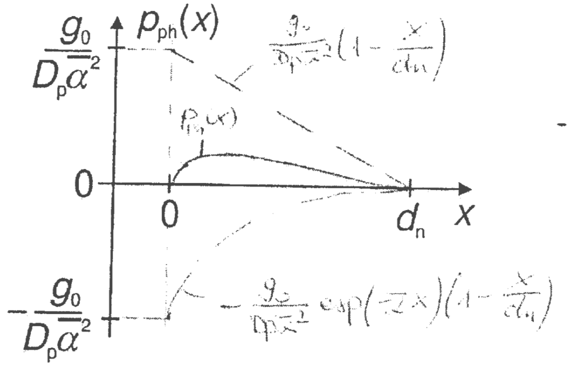
$$\approx \frac{g_0}{D_p\bar{\alpha}^2}\left[\left(-\frac{x}{d_n} + 1\right) + \exp(-\bar{\alpha}x)\left(-1 + \frac{x}{d_n}\right)\right]$$

b) $D_p = 12{,}9\ \frac{cm^2}{s}$, $L_p = 180\ \mu m$; $p_{n0} = 3{,}6\cdot 10^{4}/cm^3$

$\bar{\alpha}^2 = 4\cdot 10^{6}/cm^2 \gg 3\cdot 10^{3}/cm^2 = \frac{1}{L_p^2}$, $d_n = 12\mu m \ll 180\ \mu m = L_p$ $\quad \bar{\alpha}d_n = 2{,}4 \rightarrow \exp(\bar{\alpha}d_n) = 0{,}09 \ll 1$

c) $I_{ph} = -A\,j_{ph} = A q D_p \frac{dp_{ph}}{dx}\Big|_{d_n} = -\frac{A q D_p g_0}{D_p\bar{\alpha}^2 d_n}\left[1 - \underbrace{\exp(-\bar{\alpha}d_n)}_{\ll 1}\right] = -3{,}5\cdot 10^{-5}\,A$

$\approx -35\ \mu A$



b) Berechnen Sie den Diffusionskoeffizient $D_p = \mu_p kT/q$, die Diffusionslänge L_p sowie $p_{n0} = n_i^2/N_D$ und überprüfen Sie die Annahmen in a) unter Verwendung der Zahlenwerte: $\mu_p = 500\ cm^2/Vs$; $T = 300$ K; $k = 8{,}62\cdot 10^{-5}$ eV/K ;$q = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ C; $\tau_p = 25\ \mu s$; $n_i = 5\cdot 10^{10}\ cm^{-3}$; $N_D = 7\cdot 10^{16}\ cm^{-3}$; $\bar{\alpha} = 2\cdot 10^3 cm^{-1}$, $d_n = 12\ \mu m$.

c) Bestimmen Sie aus p_{ph} den Photostrom I_{ph} durch die Diode (Formel und Wert; $A = 1{,}5\ mm^2$, $g_0 = 7\cdot 10^{19}$ /(cm³s)).

Name:..

3) Analysieren Sie die Schaltung in Abb. 3a. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in Abb. 3 b charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben: $U_B = 3{,}5$ V, $U_{ce} = 2$ V, $U_{eb} = -0{,}8$ V, $I_b = 12{,}5$ µA, $I_q = 5 \cdot I_b$, $R_G = 10$ kΩ, $R_L = 2$ kΩ.

a) Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Ermitteln Sie den Arbeitspunkt $I_c(U_{ce})$ und U_E sowie die Widerstände R_1, R_2 und R_E. Wie groß ist I_c ($U_{ce} = 0$)? Tragen Sie Arbeitspunkt und -gerade in das Kennlinienfeld ein.

b) Führen Sie eine Wechselstromanalyse durch. Welcher Schaltungstyp liegt vor? Zeichnen Sie hierzu die Ersatzschaltung unter Verwendung des y-Parameter-Ersatzschaltbildes in Abb. 3c für den Transistor. Die Kondensatoren stellen im betrachteten Frequenzbereich Kurzschlüsse dar.

c) Bestimmen Sie aus b) für $y_{11} = y_{12} = y_{22} = 0$ und $y_{21} = -5$ mS und 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 $v_{uL} = u_2/u_1$ ($i_2 = 0$), die Spannungsverstärkung $v_u = u_2/u_G$ ($i_2 \neq 0$) und den Ausgangswiderstand $R_a = u_2/i_2$ ($u_G = 0$, $i_2 \neq 0$) der Schaltung formel- und zahlenmäßig. Nutzen Sie bei der Herleitung der Formeln sinnvolle Näherungen.

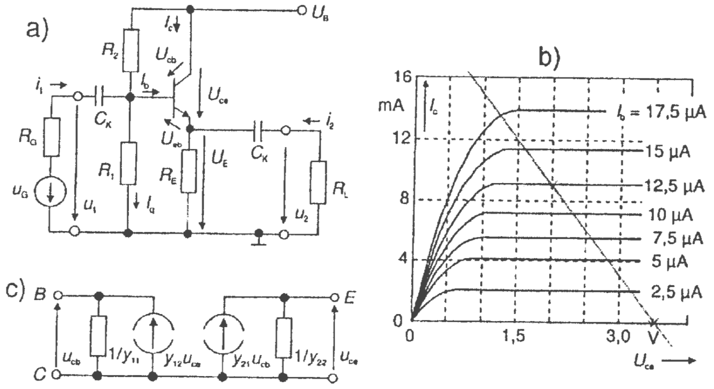
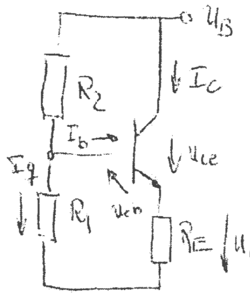


Abb. 3

3a) npn-Transistor



$I_c(U_{ce}) = 9$ mA

$U_E = U_B - U_{ce} = 1{,}5$ V

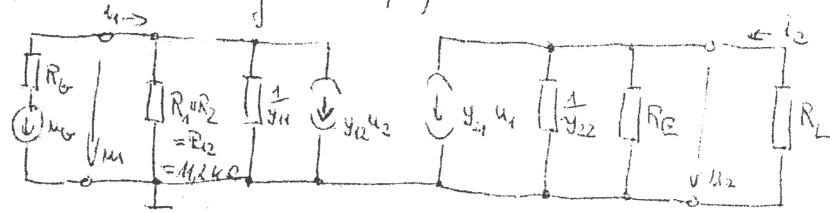
$R_E = \frac{U_E}{I_c + I_b} \approx \frac{U_E}{I_c} = \frac{1{,}5\,V}{9\,mA} = 167\,\Omega$

$R_1 = \frac{-U_{eb} + U_E}{5 I_b} = \frac{(0{,}8 + 1{,}5)\,V}{5 \cdot 12{,}5\,\mu A} = \frac{2{,}3}{62{,}5}\,M\Omega = 36{,}8\,k\Omega$

$R_2 = \frac{U_B - (-U_{eb} + U_E)}{6 I_b} = \frac{(3{,}5 - 2{,}3)\,V}{75\,\mu A} = \frac{1{,}2}{75}\,M\Omega = 16\,k\Omega$

$I_c(U_{ce} = 0) = \frac{U_B}{R_E} = \frac{3{,}5\,V}{167\,\Omega} = 21\,mA$

b) Kollektorschaltung / Emitterfolger



c) $u_1 = \left(R_{12} \| \cancel{\frac{1}{y_{11}}}\right)\left(i_1 - \cancel{y_{12}} u_2\right)$ (1) $\rightarrow R_e = \frac{u_1}{i_1} = R_{12} = R_1 \| R_2 = 11{,}2\,k\Omega$

$u_2 = \left(\cancel{\frac{1}{y_{22}}} \| R_E \| R_L\right)\left(-y_{21} u_1\right) \approx -R_E y_{21} u_1 \Rightarrow v_{uL} = \frac{u_2}{u_1}\Big|_{i_2=0} = -R_E y_{21} = 0{,}835$

$167\,\Omega \ll 2\,k\Omega$

$i_2 = -\frac{u_2}{R_L} \approx \frac{R_E}{R_L} y_{21} u_1 \approx \frac{R_E}{R_L} y_{21} R_e i_1 \Rightarrow v_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{R_E}{R_L} y_{21} R_{12} = -4{,}7$

$\frac{u_1}{u_G} = \frac{R_{12}}{R_G + R_{12}}$; $R_E \| R_L \approx R_E \Rightarrow v_u = \frac{u_2}{u_G}\Big|_{i_2 \neq 0} = \frac{u_1}{u_G} v_{uL} = \frac{R_{12}}{R_G + R_1} v_{uL} = 0{,}4$

$u_G = 0,\ i_2 \neq 0 \Rightarrow u_1 = (R_G \| R_{12})(-\cancel{y_{12}} u_2) = 0$; $u_2 = (i_2 - y_{21} u_1)(R_E \| R_L)$

$\Rightarrow \frac{u_2}{i_2}\Big|_{u_G = 0,\ i_2 \neq 0,\ R_L \to \infty} = R_a = R_E = 167\,\Omega$