

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 16**Kurzfragen ohne Unterlagen** (Bearbeitungszeit: 30 min)

- 1) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man ...
- 2) Um welche digitale Grundschaltung handelt es sich bei dem Bild rechts unten? Um welche Transistoren handelt es sich bei M_1 und M_2 (Funktionsprinzip, Details)? Stellen Sie die Wahrheitstabelle zur Schaltung auf.
- 3) Ergänzen Sie die folgenden Aussagen zu den Eigenschaften zweier Halbleiter A und B, die sich nur in ihrer effektiven Masse der Elektronen im Leitungsband unterscheiden ($m_A^* < m_B^*$) in den punktierten Bereichen durch ">", "<" oder "=".
- 4) Skizzieren Sie in dem vorbereiteten Diagramm 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 Minoritätsladungsträgerkonzentration $n_p(x_2)$ in Abhängigkeit von U_{eb} formelmäßig an.
- 5) 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 $C(U_g)/C_i$ -Verlauf in das Diagramm (Bild b). Markieren Sie die Arbeitspunkte der drei angegebenen Bändermodelle mit dem zugehörigen Buchstaben (c bis e) in der $C(U_g)/C_i$ -Kennlinie.
- 6) Gegeben ist das Bändermodell $W(x)$ von *p*-dotiertem Silizium. Skizzieren Sie für Raumtemperatur 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.
- 7) Welche der Aussagen zu einer AlGaAs/GaAs-Doppelheterostruktur-LED sind richtig?
- 8) Welche der Aussagen zu einem idealen *pn*-Übergang mit angelegter Spannung U sind zutreffend?
- 9) 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 und das verwendete Material. CMOS ist die Abkürzung für ...
- 10) Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen die örtlichen Verläufe der Raum-

ladungsdichte $\rho(x)$, und des elektrischen Feldes $E(x)$ sowie das Bändermodell $\mathcal{W}(x)$ in der angedeuteten, idealen Metall-Oxid- p -Halbleiterstruktur für den Fall der Anreicherung. Beschriften Sie \mathcal{W}_F , \mathcal{W}_L , \mathcal{W}_V sowie die angelegte Spannung U . Welches Vorzeichen muss dann die Spannung U zwischen Metall und Halbleiter aufweisen?

Name:.....

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 16

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

- 1) Die spezifische Leitfähigkeit $\sigma(T)$ eines reinen p -Halbleiters ($N_D = 0$) soll in den zwei Temperaturbereichen (1) mit $T < T_1$ und (2) mit $T \geq T_1$ analysiert werden. Die effektiven Zustandsdichten N_L und N_V im Leitungs- und Valenzband sowie die Beweglichkeiten μ_n und μ_p der Elektronen und Löcher sollen jeweils gleich groß sein und folgende Temperaturabhängigkeiten aufweisen ($T_0 = 300 \text{ K}$):

$$\begin{aligned} N_L(T) = N_V(T) &= N_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} ; \text{ für beide Bereiche (1) und (2)} \\ \mu_p(T) = \mu_n(T) &= \mu_0 ; \text{ im Bereich (1)} \\ \mu_p(T) = \mu_n(T) &= \mu_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{3/2} ; \text{ im Bereich (2).} \end{aligned}$$

Es liegt vollständige Ionisation der Dotierstoffe ($N_A^- = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) vor, und der Halbleiter ist im thermodynamischen Gleichgewicht ($np = n_i^2$). Nutzen Sie:

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

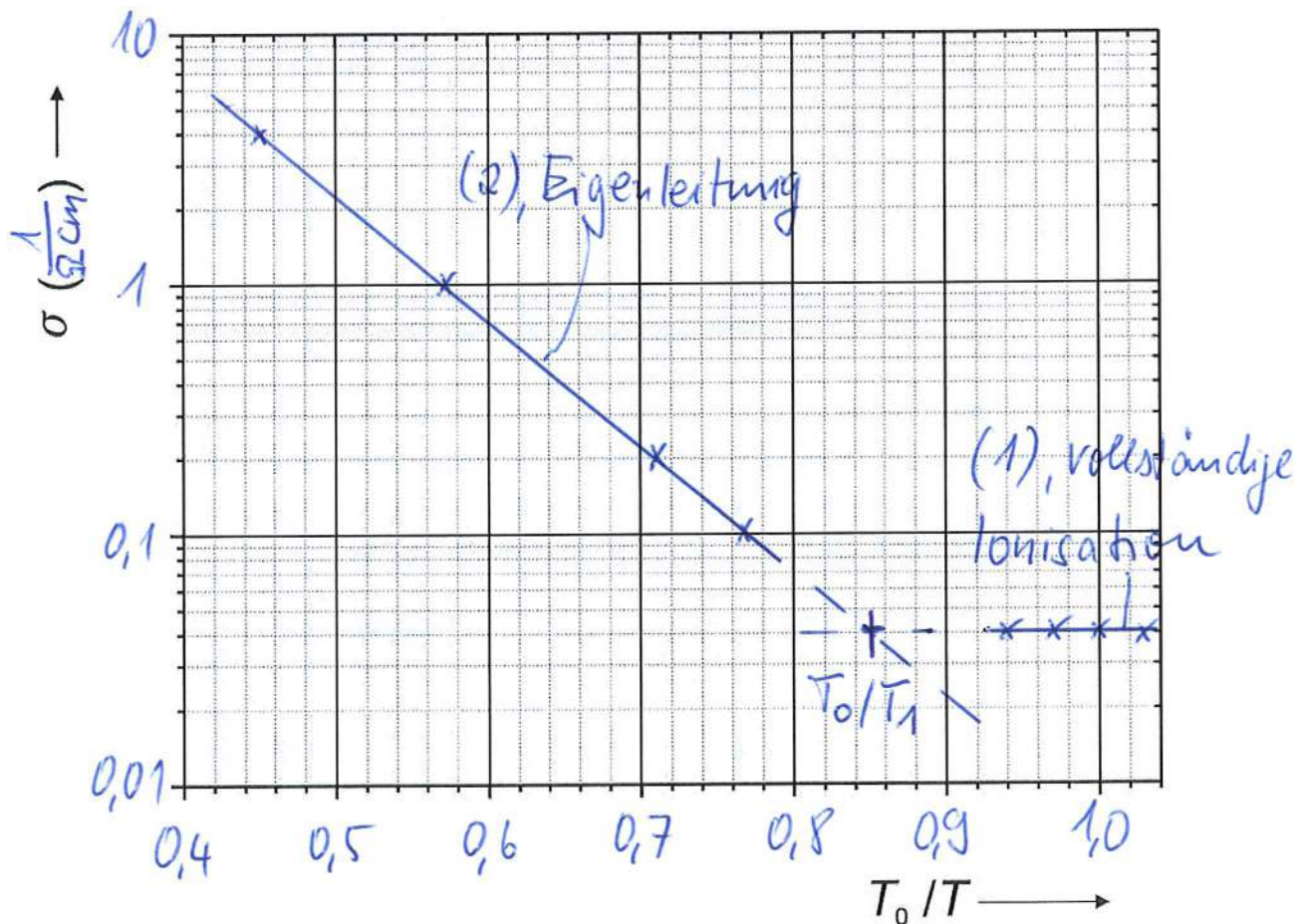
- a) Ermitteln Sie ausgehend von Ladungsneutralität ($N_D^+ + p = N_A^- + n$) unter Berücksichtigung der genannten Bedingungen eine quadratische Gleichung für p , die als weitere Parameter nur noch N_A und n_i enthält. Lösen Sie diese Gleichung, so dass sich für die Bereiche (1) und (2) näherungsweise ergibt:

$$\begin{aligned} p &= N_A ; \text{ mit } 2n_i/N_A \ll 1 ; \text{ im Bereich (1)} \\ p &= n_i ; \text{ mit } 2n_i/N_A \gg 1 ; \text{ im Bereich (2)} \end{aligned}$$

- b) Leiten Sie nun die Temperaturabhängigkeiten $p(T)$ in den Bereichen (1) und (2) explizit formelmäßig ab. Wie groß ist jeweils im Vergleich $n(T)$?
- c) Ermitteln Sie anschließend die Temperaturabhängigkeiten der spezifischen Leitfähigkeit $\sigma(T)$ in den Bereichen (1) und (2). Die abgeleiteten Formeln sollen jeweils alle Temperaturabhängigkeiten explizit enthalten.
- d) Ordnen Sie die in der Tabelle gegebenen Werte für σ in Abhängigkeit von T den Temperaturbereichen (1) und (2) zu. Ergänzen Sie in der Tabelle auch die entsprechenden Werte von T_0/T .

T (K)	290	300	310	320	390	420	525	665
σ (1/ Ω cm)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,1	0,2	1,0	4,0
Bereich	(1)				(2)			
T_0/T	1,03	1	0,97	0,94	0,77	0,71	0,57	0,45

Tragen Sie die Werte für $\sigma(T)$ nun in das Diagramm unten ein. Ergänzen Sie die Achsenbeschriftungen (Skalierung und Einheit). Markieren und bezeichnen Sie die beiden charakteristischen Temperaturabhängigkeiten im Diagramm. Bestimmen Sie aus der Auftragung den Bandabstand W_G , die Beweglichkeit μ_0 , die effektive Zustandsdichte N_0 und die Übergangstemperatur T_1 formel- und zahlenmäßig. Folgende Daten sind gegeben: $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C; $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K.



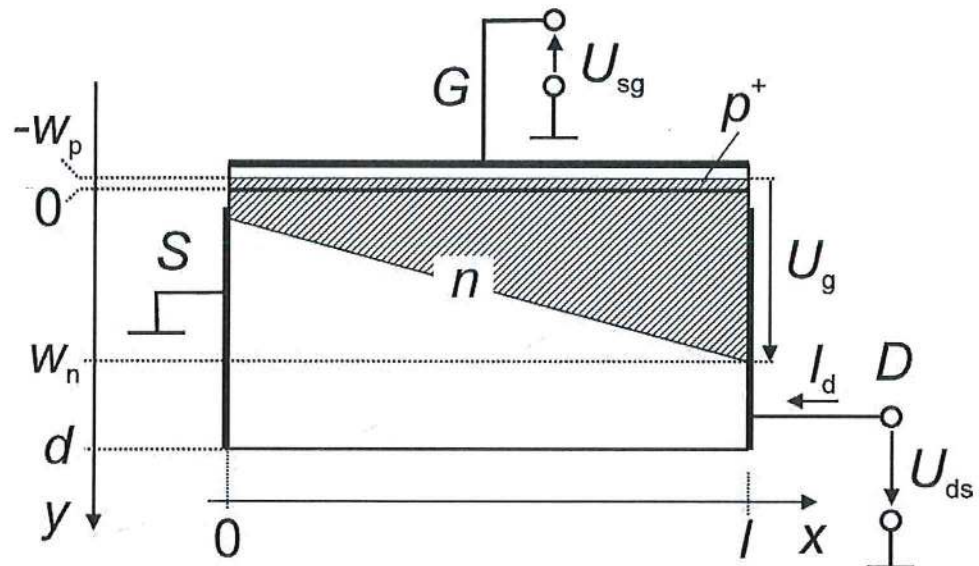
Name:.....

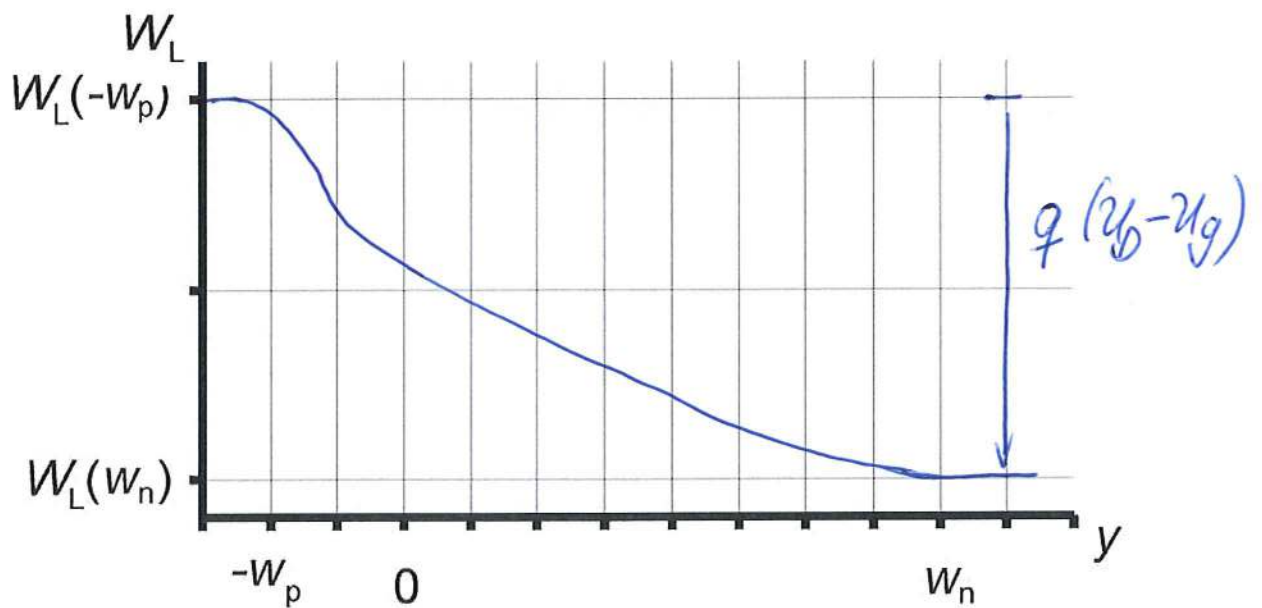
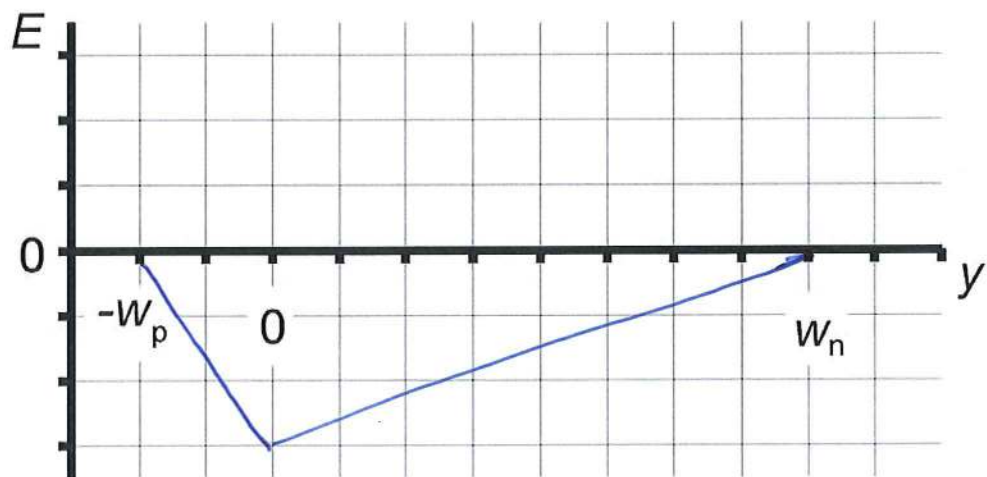
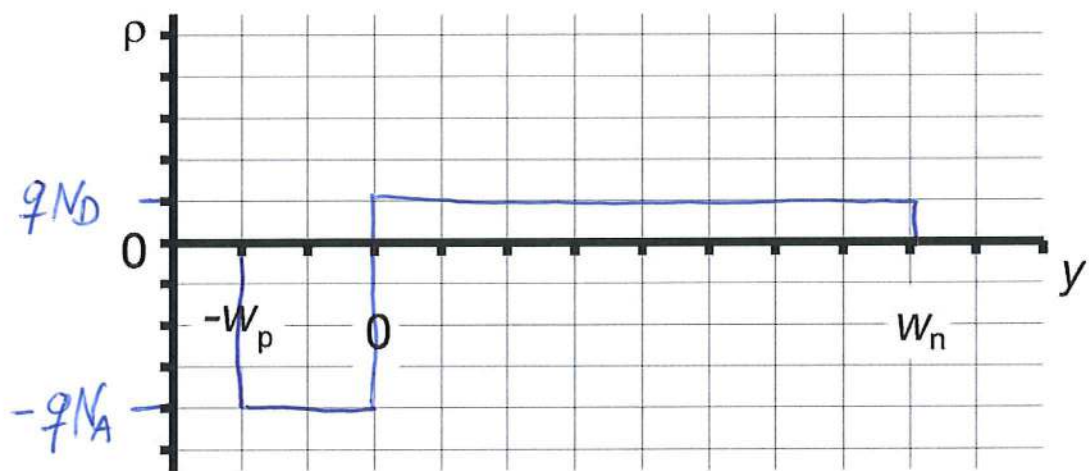
- 2) Ermitteln Sie die Abschnürspannung U_p eines n -Kanal-Sperrschicht-Feldeffekttransistors (JFET). In der gradual-channel-approximation (Abb. 2) wird angenommen, dass das elektrische Feld in der Verarmungszone unterhalb des Gates (schraffierte Fläche) in y -Richtung und im Kanal in x -Richtung verläuft. Gehen Sie, wie für die ideale pn -Diode bei 300 K üblich, davon aus, dass die Dotierstoffe vollständig ionisiert sind und die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht keine Rolle spielen.

- a) Ermitteln Sie ausgehend vom Verlauf der Raumladung $\rho(y) = q(N_D^+ + p - N_A^- - n)$ der Gate-Diode durch Integration der Poisson-Gleichung: $\frac{d^2 W_L(y)}{dy^2} = q \frac{dE(y)}{dy} = \frac{q}{\epsilon} \rho(y)$

den Verlauf der elektrischen Feldstärke $E(y)$ und der Leitungsbandkante $W_L(y)$ im Bereich der Sperrschicht jeweils für den p - und den n -Bereich. Skizzieren Sie die Verläufe (Vorlage). Markieren Sie charakteristische Parameter $[-qN_A, qN_D, q(U_D - U_g)]$.

- b) Bestimmen Sie die Bandaufwölbung $W_L(w_n) - W_L(-w_p)$ am Ort $x = l$ näherungsweise unter Beachtung von $N_D \ll N_A$. Ermitteln Sie nun die Spannung U_p ($U_{sg} = 0$) bei Kanalabschnürung näherungsweise unter Beachtung von $N_D \ll N_A$. Folgende Daten sind gegeben: $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $d = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$; relative Dielektrizitätskonstante: $\epsilon_r = 11,7$; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$; $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $U_D = 0,7 \text{ V}$.





Name:

- 3) Analysieren Sie die Schaltung in Abb. 3a. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in Abb. 3b charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben: $U_B = 6\text{ V}$, $U_{ce} = 4,0\text{ V}$, $U_{eb} = -0,7\text{ V}$, $U_E = 0,2\text{ V}$, $I_b = 6\text{ }\mu\text{A}$, $I_q = 5 \times I_b$, $R_G = 50\text{ }\Omega$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$.

- Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Ermitteln Sie den Arbeitspunkt (U_{ce} , I_c) und die Widerstände R_1 , R_2 , R_E und R_C . Wie groß ist I_c ($U_{ce} = 0$)? Tragen Sie Arbeitspunkt und -gerade in das Kennlinienfeld ein.
- Führen Sie eine Wechselstromanalyse durch. Welcher Schaltungstyp liegt vor? Zeichnen Sie hierzu die Ersatzschaltung unter Verwendung des vereinfachten Kleinsignal-Ersatzschaltbildes für den Transistor (Abb. 3c) mit den Parametern $\alpha = 0,997$; $r_b = 1,2\text{ k}\Omega$ und $r_e = 8\text{ }\Omega$. Die Kondensatoren stellen im betrachteten Frequenzbereich Kurzschlüsse dar.
- 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 $v_{uL} = u_2/u_1$ ($i_2 = 0$), die Spannungsverstärkung $v_u = u_2/u_G$ ($i_2 \neq 0$) und den Ausgangswiderstand $R_a = u_2/i_2$ ($u_G = 0$) der Schaltung formel- und zahlenmäßig. Nutzen Sie bei der Herleitung der Formeln sich aus den Zahlenwerten ergebende sinnvolle Näherungen.

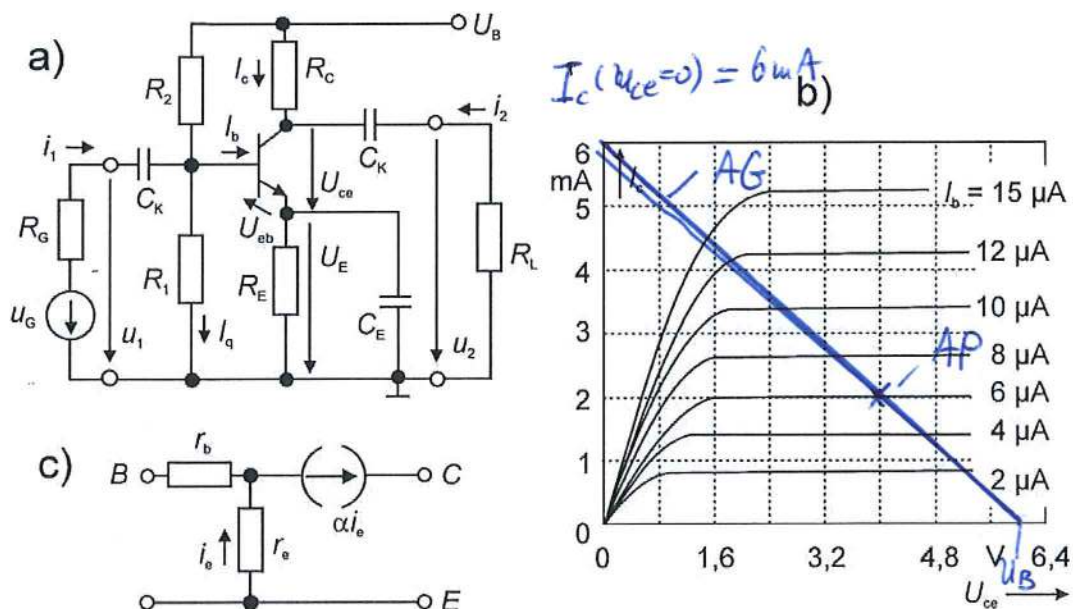


Abb. 3

$$1a) \quad N_0^+ + p = N_A^- + n, \quad N_0^+ = N_0 = 0, \quad N_A^- = N_A, \quad n = \frac{n_i^2}{p}$$

$$\rightarrow p = N_A + \frac{n_i^2}{p} \rightarrow p^2 - N_A p - n_i^2 = 0$$

$$\rightarrow p_{1/2} = \frac{N_A}{2} + \sqrt{\frac{N_A^2}{4} + n_i^2} = \frac{N_A}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_A^2}}\right)$$

hier ist physikalisch sinnvoll

$$(1) \quad p \approx \frac{N_A}{2} \left(1 + 1 + \frac{1}{2} \frac{4n_i^2}{N_A^2}\right) = \frac{N_A}{2} (1 + 1) = N_A$$

$$(2) \quad p \approx \frac{N_A}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{4n_i^2}{N_A^2}}\right) = \frac{N_A}{2} \left(1 + \frac{2n_i}{N_A}\right) \approx \frac{2n_i N_A}{2N_A} = n_i$$

$$b) (1) \quad p(T) = N_A, \quad n(T) = \frac{n_i^2(T)}{N_A} = \frac{n_i^2(T)}{N_A^2} N_A \ll N_A = p$$

$$(2) \quad p(T) = n_i(T) = N_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right) = n(T) \ll 1$$

$$c) (1) \quad G(T) = q \mu_0 [n(T) + p(T)] \approx q \mu_0 N_A \left(1 + \frac{n_i^2(T)}{N_A^2}\right) \approx q \mu_0 N_A$$

$$(2) \quad G(T) = 2q n_i(T) \mu_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2} = 2q N_0 \mu_0 \underbrace{\left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2}}_{=1} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right)$$

$$d) (2) \rightarrow \text{Eigenheit } g: \ln[G(T)] = -\frac{W_G}{2kT_0} \frac{T_0}{T} + \ln[2q N_0 \mu_0]$$

$$\rightarrow \ln[G(T_1)] - \ln[G(T_2)] = -\frac{W_G}{2kT_0} \left(\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2}\right)$$

$$\rightarrow W_G = -2kT_0 \frac{\ln[G(T_1)/G(T_2)]}{\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2}} = 0,6 \text{ eV}$$

$$(1) \rightarrow \text{Störstellenkonz. } \mu_0 = \frac{G(320 \text{ K})}{q N_A} = 250 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$(2): N_0 = \frac{G(390 \text{ K})}{2q \mu_0} \exp\left(\frac{W_G}{2k \cdot 390 \text{ K}}\right) = 9,4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

Übergangstemperatur T_1 :

$$G_i(T_1) = q \mu_0 N_A = 2q N_0 \mu_0 \exp\left(-\frac{W_G}{2kT_1}\right) \rightarrow -\frac{W_G}{2kT_1} = \ln\left(\frac{N_A}{2N_0}\right)$$

$$\rightarrow T_1 = \frac{W_G}{2k} \ln\left(\frac{N_A}{2N_0}\right) = 352 \text{ K}$$

2a) $\rho(y) = q[N_D(y) - N_A(y)]$ in der Sperrschicht

p-Bereich

$$\rho(y) = -q N_A$$

n-Bereich

$$\rho(y) = q N_D$$

1. Integration der Poisson-Gleichung: $E(y) = \frac{q}{\epsilon} \int \rho(y) dy + C$

$$E(y) = -\frac{q}{\epsilon} N_A \int dy + C = -\frac{q}{\epsilon} N_A y + C \quad | \quad E(y) = \frac{q}{\epsilon} N_D \int \rho(y) dy + C$$

$$C = E(\vec{w}_p) + \frac{q}{\epsilon} N_A (-w_p) \quad | \quad C = E(\vec{w}_n) - \frac{q}{\epsilon} N_D w_n$$

$$\rightarrow E(y) = -\frac{q}{\epsilon} N_A (y - w_p) \quad | \quad \rightarrow E(y) = \frac{q}{\epsilon} N_D (y - w_n)$$

2. Integration der Poisson-Gleichung: $W_L(y) = q \int E(y) dy + C$

$$W_L(y) = -\frac{q^2}{\epsilon} N_A \int (y + w_p) dy + C \quad | \quad W_L(y) = \frac{q^2}{\epsilon} N_D \int (y - w_n) dy + C$$

$$= -\frac{q^2}{\epsilon} N_A \left(\frac{1}{2} y^2 + w_p y \right) + C \quad | \quad = \frac{q^2}{\epsilon} N_D \left(\frac{1}{2} y^2 - w_n y \right) + C$$

$$C = W_L(-w_p) - \frac{q^2}{\epsilon} N_A \frac{w_p^2}{2} \quad | \quad C = W_L(w_n) + \frac{q^2}{\epsilon} N_D \frac{w_n^2}{2}$$

$$\rightarrow W_L(y) - W_L(-w_p) = -\frac{q^2}{2\epsilon} N_A (y + w_p)^2 \quad | \quad \rightarrow W_L(y) - W_L(w_n) = \frac{q^2}{2\epsilon} N_D (y - w_n)^2$$

$$\begin{aligned} b) \quad W_L(w_n) - W_L(-w_p) &= W_L(w_n) - W_L(0) + W_L(0) - W_L(-w_p) = -q(\psi_0 - \psi_g) \\ &= -\frac{q^2}{2\epsilon} (N_D w_n^2 + N_A w_p^2) = -\frac{q^2}{2\epsilon} N_D w_n^2 \left(1 + \frac{N_A w_p^2}{N_D w_n^2} \right) = -\frac{q^2}{2\epsilon} N_D w_n^2 \left(1 + \frac{w_p}{w_n} \right) \ll 1 \\ &\approx -\frac{q}{2\epsilon} N_D w_n^2 \end{aligned}$$

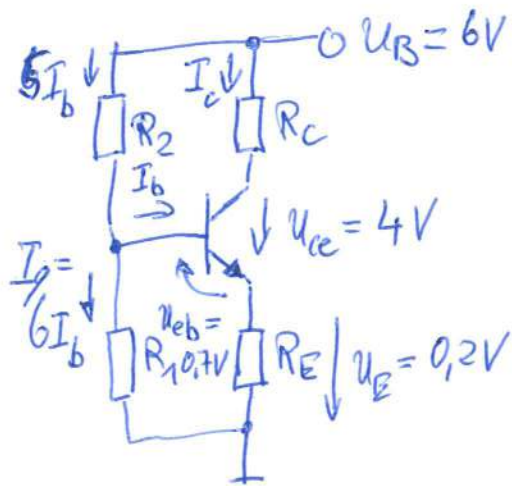
$$\frac{N_A w_p}{N_D w_n} = 1$$

bei Abschirmung des Kanals: $w_n = d \rightarrow \psi_0 - \psi_g = \frac{q}{2\epsilon} N_D d^2$

Spannungsumlauf: $-\psi_g = \psi_g + \psi_{ds} = 0 \rightarrow \psi_g = -\psi_{ds} = -\psi_p$

$$\rightarrow \psi_0 + \psi_p = \frac{q}{2\epsilon} N_D d^2 \rightarrow \psi_p = \frac{q}{2\epsilon} N_D d^2 = 1,23 \text{ V}$$

3a) npn-Transistor



aus Kennlinienfeld: $I_C = 2 \text{ mA}$

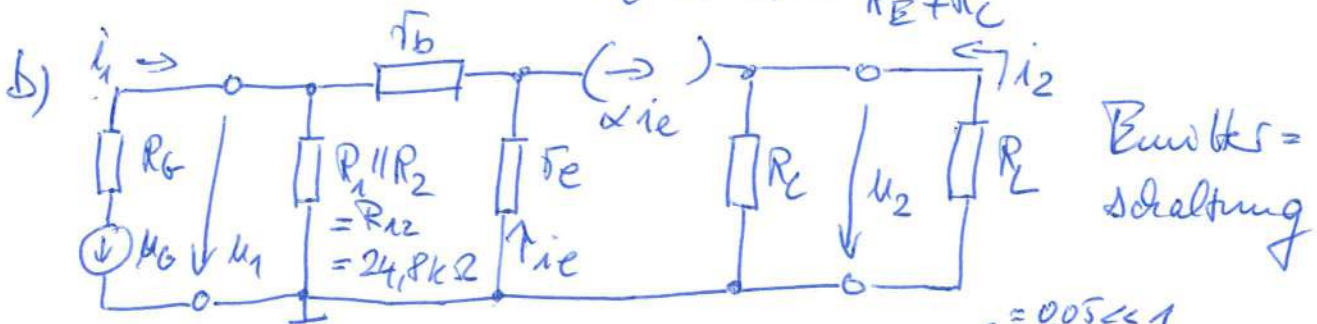
$$R_C = \frac{U_B - U_{CE} - U_E}{I_C} = 900 \Omega$$

$$R_E = \frac{U_E}{I_C + I_B} \approx \frac{U_E}{I_C} = 100 \Omega$$

$$R_1 = \frac{U_E - U_{EB}}{5 I_B} = 30 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_B - (U_E - U_{EB})}{6 I_B} = 142 \text{ k}\Omega$$

$$I_C(U_{CE}=0) = \frac{U_B}{R_E + R_C} = 6 \text{ mA}$$



$$c) U_1 = (i_1 - \frac{U_1}{R_{12}}) r_B - i_e r_e \rightarrow U_1 (1 + \frac{r_B}{R_{12}}) = i_1 r_B - i_e r_e$$

$$i_1 = \frac{U_1}{R_{12}} - (1 - \alpha) i_e \rightarrow i_e = -\frac{i_1}{1 - \alpha} + \frac{U_1}{R_{12}(1 - \alpha)}$$

$$\rightarrow U_1 = i_1 r_B + i_1 \frac{r_e}{1 - \alpha} - \frac{U_1 r_e}{R_{12}(1 - \alpha)} \rightarrow U_1 (1 + \frac{r_e}{R_{12}(1 - \alpha)}) = i_1 (r_B + \frac{r_e}{1 - \alpha})$$

$$\rightarrow R_e = \frac{U_1}{i_1} = (r_B + \frac{r_e}{1 - \alpha}) / (1 + \frac{r_e}{R_{12}(1 - \alpha)}) = 3.5 \text{ k}\Omega$$

$$i_2 = \alpha i_e \frac{R_C}{R_C + R_L}; i_e = -\frac{i_1}{1 - \alpha} + \frac{U_1}{R_{12}(1 - \alpha)} = \frac{i_1}{1 - \alpha} (1 - \frac{r_B + \frac{r_e}{1 - \alpha}}{R_{12}})$$

$$\rightarrow v_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{R_C}{R_C + R_L} (1 - \frac{r_B + \frac{r_e}{1 - \alpha}}{R_{12}}) = 133$$

$$U_2 = \alpha i_e (R_C \parallel R_L) \rightarrow v_{uL} = \frac{U_2}{U_1} \Big|_{i_2=0} = \alpha R_{C \parallel R_L} \frac{i_e}{i_1} = \alpha R_C \frac{i_e}{i_1} \frac{i_1}{U_1} = -v_i \frac{R_C + R_L}{R_e} = -72$$

$$v_{uL} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_2}{U_1} \Big|_{i_2=0} \cdot \frac{R_C \parallel R_L}{R_C} \cdot \frac{U_1}{U_1} = v_{uL} \cdot \frac{R_L}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_e}{R_C + R_L} = -37$$

$$R_a = \frac{U_2}{i_2} \Big|_{U_1=0} = R_C = 0.9 \text{ k}\Omega$$

$$U_1 = 0 \rightarrow i_1 = 0 \rightarrow i_e = 0 \rightarrow \alpha i_e = 0$$