

**Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 14/15****Kurzfragen ohne Unterlagen** (Bearbeitungszeit: 30 min)

- 1) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man
- 2) Welche der Aussagen zu einem Halbleiter im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
- 3) Welche der Aussagen zu einer Doppelheterostruktur-LED sind richtig?
- 4) Betrachten Sie die nebenstehende Schaltung mit einem idealen Operationsverstärker. Bestimmen Sie die Ausgangsspannung  $u_a$  in Abhängigkeit von den Eingangsspannungen  $u_1$  und  $u_2$  sowie den Widerständen.

Wie lässt sich die Funktion der Schaltung beschreiben?

- 5) 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?

- 6) Wie groß ist in einem Diamantgitter mit der Gitterkonstante  $a = 1/2$  nm der Abstand zweier nächstbenachbarter Gitteratome (Formel)? .....  
die Konzentration der Gitteratome (Formel und Zahlenwert)? .....

- 7) Gegeben ist das Bändermodell  $W(x)$  von Si. Markieren Sie für den Fall der  $n$ -Dotierung das Fermi-niveau  $W_F$ . 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.

- 8) Welche digitalen Verknüpfungen werden hier realisiert (vereinfachen Sie möglichst die Ausdrücke)?

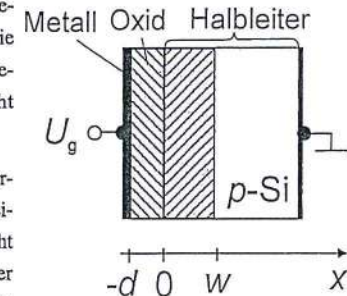
Welches Gatter wird dabei ausschließlich verwendet? .....

- 9) Welche der Aussagen zu dem gezeigten Bändermodell mit den Bandkanten  $W_V$  und  $W_L$  sowie den beiden Quasi-Fermi-niveaus  $W_{Fn}$  und  $W_{Fp}$  für die Elektronen und Löcher sind richtig unter der Voraussetzung gleicher effektiver Zustandsdichten im Leitungs- und Valenzband?

- 10) Ergänzen Sie bei  $T = T_0$  den Proportionalitätsfaktor zwischen den abgeleiteten Eigenschaften zweier Halbleiter A und B, die sich nur in ihrer effektiven Masse der Elektronen im Leitungsband unterscheiden ( $m_A^* = 2m_B^*$ ):

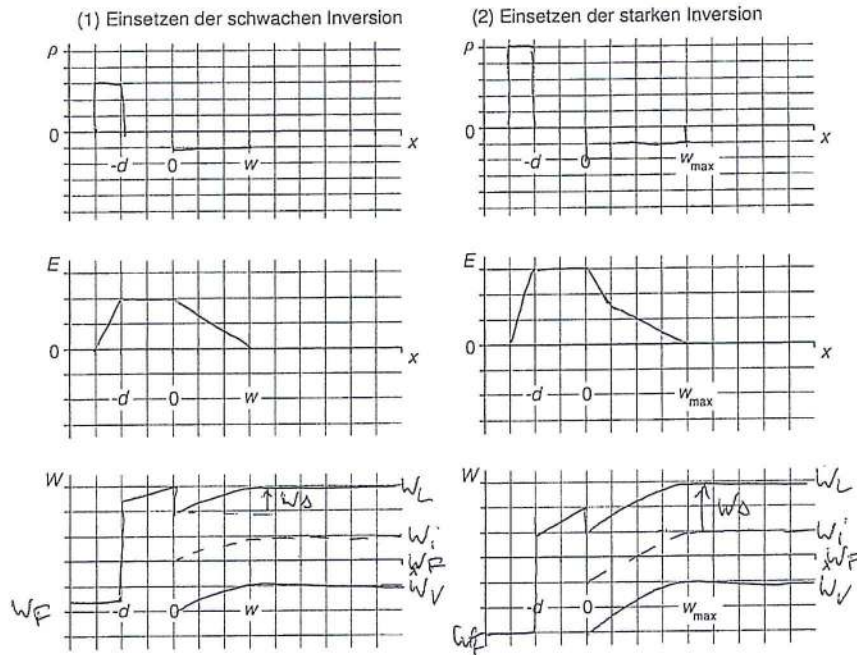
**Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 14/15****Aufgaben ohne Unterlagen** (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

- 1) Abb. 1 zeigt eine ideale Metall-Oxid- $p$ -Halbleiter (MOS)-Struktur mit am metallartigen Poly-Silizium-Gate anliegender Spannung  $U_g$ . Gehen Sie, wie bei 300 K üblich, davon aus, dass die Dotierstoffe vollständig ionisiert sind und die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht ( $0 \leq x \leq w$ ) keine Rolle spielen.



- Skizzieren Sie das vereinfachte Kapazitäts-Ersatzschaltbild der MOS-Struktur mit den Beiträgen der Oxidschicht  $C_{ox}$  und der Sperrschicht  $C_s$ . (Hinweis: Kapazitätsbelag  $C = \epsilon/d$ , mit der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon$  und der Dicke  $d$ ). Ermitteln Sie den Gesamtkapazitätsbelag der Struktur  $C$  bezogen auf  $C_{ox}$  in Abhängigkeit von der Sperrschichtausdehnung  $w$ . Skizzieren Sie für niedrige Frequenzen den Verlauf von  $C/C_{ox}$  in Abhängigkeit von  $U_g$ . Markieren Sie die Bereiche der Anreicherung, Verarmung und Inversion sowie den Flachbandfall ( $C/C_{ox}|_{FB}$ ).
- Skizzieren Sie in der Vorlage die Verläufe der Raumladung, der elektrischen Feldstärke und der Bandkanten für den Fall des Einsetzens der schwachen Inversion (1) mit  $W_s = W_i - W_F$  und der starken Inversion (2) mit  $W_s = 2(W_i - W_F)$ . Markieren Sie  $W_s$ ,  $W_i$ ,  $W_F$ ,  $W_L$  und  $W_V$ .
- Bestimmen Sie die Bandaufwölbung  $W_s$  im Halbleiter in Abhängigkeit von der Dotierungskonzentration  $N_A$  und der Eigenleitungskonzentration  $n_i$  (Formel) mit:

$$p = N_A = N_V \exp\left(\frac{W_V - W_F}{kT}\right); \quad n_i = N_V \exp\left(\frac{W_V - W_i}{kT}\right)$$

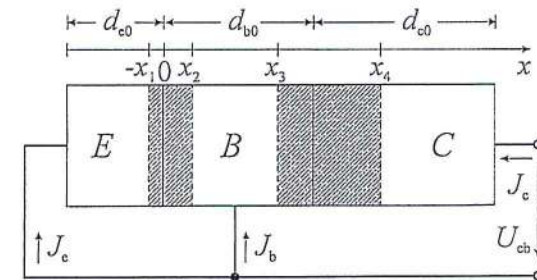


d) Bestimmen Sie die bei (2) erreichte maximale Ausdehnung der Sperrschicht  $w_{\max}$  mit:

und daraus die minimale relative Kapazität  $(C/C_{ox})_{\min}$  (Formeln und Zahlenwerte für beide Größen). Folgende Daten sind gegeben:  $N_A = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ;  $d = 30 \text{ nm}$ ;  $\epsilon_{ox} = 2,96$ ;  $\epsilon_s = 11,7$ ;  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$ ;  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ;  $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ .

2) Die Stromdichte-Spannungs-Charakteristik  $J_e(U_{cb})$  des  $n\text{-pn}$ -Transistors mit Emitter-Basis-Kurzschluss in Abb. 2 bei  $T = 300 \text{ K}$  soll bestimmt werden. Thermische Generation/Rekombination von Ladungsträgern in den Verarmungszonen (schraffiert) und Spannungsabfälle über den Bahngebieten sind zu vernachlässigen. Die Kontakte sind ideal ohmsch.

Name: .....



Folgende Daten sind bekannt:  $n_i = 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ,  $kT = 26 \text{ meV}$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  und  $\epsilon = 10^{-12} \text{ As/(Vcm)}$  sowie:

| Emitter                                | Basis                                    | Kollektor                               |
|--|--|---|
| $N_{De} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$     | $N_{Ab} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$       | $N_{Dc} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$      |
| $d_{e0} = 10 \text{ }\mu\text{m}$      | $d_{b0} = 4 \text{ }\mu\text{m}$         | $d_{c0} = 500 \text{ }\mu\text{m}$      |
| $L_{pe} = 0,2 \text{ }\mu\text{m}$     | $L_{nb} = 100 \text{ }\mu\text{m}$       | $L_{pc} = 1 \text{ }\mu\text{m}$        |
| $\mu_{pe} = 80 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ | $\mu_{nb} = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ | $\mu_{pc} = 150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ |

Hinweis: Am  $pn$ -Übergang (mit dem Spannungspfeil von  $p$  nach  $n$ ) gilt allgemein:

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

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D}{n_{p0}} \right); n_{p0} N_A = n_i^2; n_p(x_p) = n_{p0} \exp \left( \frac{qU}{kT} \right)$$

$x_p$  bezeichnet den Rand des  $p$ -Bahngebietes zur Verarmungszone,  $w_{n,p}$  die Ausdehnung der Verarmungszone im  $n$ -Bahngebiet/ $p$ -Bahngebiet.

- Berechnen Sie die Diffusionsspannungen  $U_{pb}$  und  $U_{cb}$  und die Ausdehnung der neutralen Basis  $d_b = x_3 - x_2$  (Formeln) sowie zahlenmäßig für  $U_{cb} = 6,7 \text{ V}$ .
- Ermitteln Sie die Minoritätsladungsträgerkonzentration  $n_b$  an den Rändern der neutralen Basis  $x_2$  und  $x_3$  für  $U_{cb} = 6,7 \text{ V}$ . Skizzieren Sie hierfür den Verlauf von  $n_b(x)$  in der neutralen Basis. Markieren Sie die Gleichgewichtskonzentration  $n_{b0}$ .
- Stellen Sie eine Differentialgleichung (DGL) für den stationären Zustand von  $n_b(x)$  in



der neutralen Basis auf. Nutzen Sie hierfür die Stromgleichung:

$$J_n = J_{nD} = qD_n \frac{dn_b}{dx} \text{ mit } D_n = kT\mu_n/q$$

und die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{dn_b}{dt} = \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{n_b - n_{b0}}{\tau_n} \text{ mit } L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

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

$$n_b = A \cdot \sinh\left(\frac{x_3 - x}{L_{nb}}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x - x_2}{L_{nb}}\right) + n_{b0}$$

- e) Berechnen Sie die Minoritätsträger-Stromdichte an den Rändern der neutralen Basis  $J_n(x_2)$  und  $J_n(x_3)$  (Formeln und Werte) und den Basistransportfaktor  $\beta_T = J_n(x_3)/J_n(x_2)$  (Formel und Wert).

- 3) Analysieren Sie die Schaltung in Abb. 3a. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in Abb. 3b charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben:  $U_B = 15 \text{ V}$ ,  $U_{GS} = 11 \text{ V}$ ,  $U_{GS} = -1,5 \text{ V}$ ,  $I_G = 0$ ,  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 80 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ .

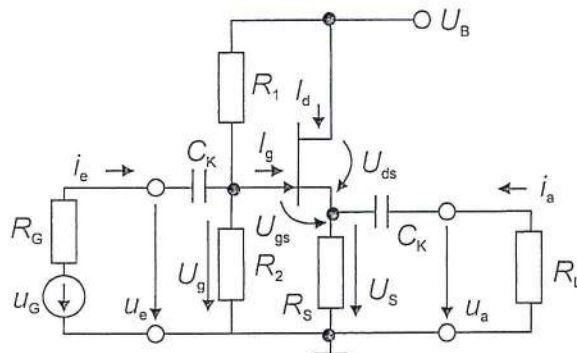


Abb. 3a

Name: .....

- a) Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Tragen Sie die Arbeitspunkte (AP) und die Arbeitsgerade (AG) in das Kennlinienfeld (Abb. 3b) ein. Lesen Sie  $I_d$  ab und ermitteln Sie  $U_{GS}$ ,  $U_G$  und die Widerstände  $R_2$  und  $R_S$ .

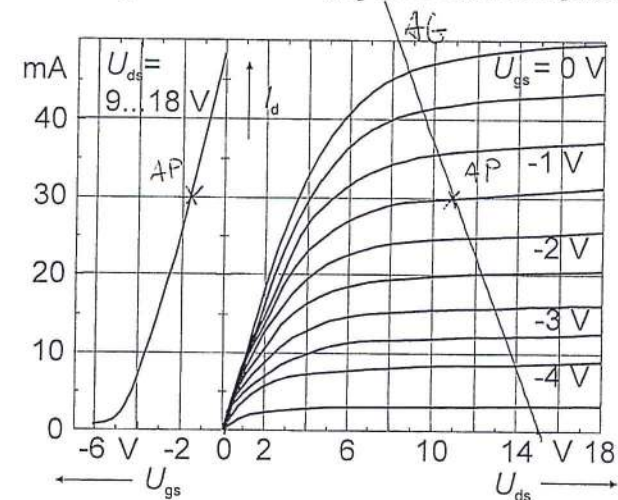


Abb. 3b

- b) Führen Sie eine Wechselstromanalyse durch. Welcher Schaltungstyp liegt vor? Zeichnen Sie hierzu die Ersatzschaltung unter Verwendung des Kleinsignal-Ersatzschaltbildes für den Transistor (Abb. 3c). Die Kondensatoren stellen hierbei Kurzschlüsse dar.

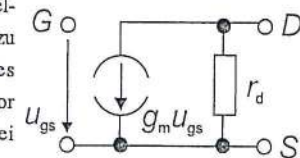
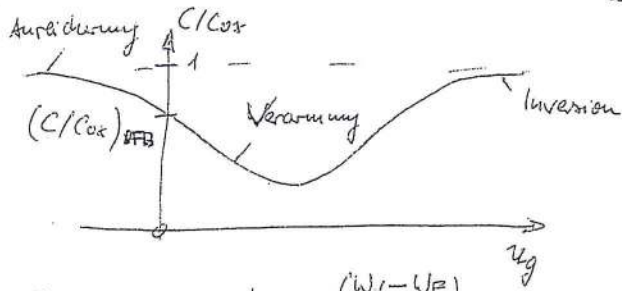


Abb. 3c

- c) Ermitteln Sie aus dem Kennlinienfeld (Abb. 3b) im AP die Ersatzschaltbild-Parameter  $g_m = |\Delta I_d / \Delta U_{GS}|_{AP}$  und  $r_d = |\Delta U_{DS} / \Delta I_d|_{AP}$ . Bestimmen Sie aus b) mit Hilfe der in a) ermittelten Werte den Eingangswiderstand  $R_e = u_e / i_e$ , die Leerlaufspannungsverstärkung  $v_{uL} = u_a / u_e (i_a = 0)$ , die Spannungsverstärkung  $v_u = u_a / u_e (i_a \neq 0)$  und den Ausgangswiderstand  $R_a = u_a / i_a (u_G = 0)$  der Schaltung formel- und zahlenmäßig. Benennen Sie ein Anwendungsbeispiel.

a)  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s} \Rightarrow C = \frac{C_{ox} C_s}{C_{ox} + C_s} \Rightarrow \frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{1 + C_{ox}/C_s} = \frac{1}{1 + \epsilon_{ox} W / (\epsilon_s d)}$

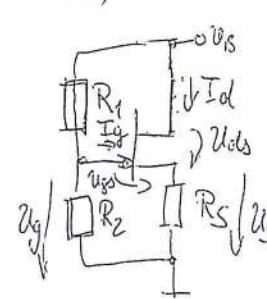


c)  $p = N_A = N_V \exp\left(\frac{W_V - W_F}{kT}\right)$   
 $n_i = N_V \exp\left(\frac{W_V - W_i}{kT}\right) \Rightarrow \frac{N_A}{n_i} = \exp\left(\frac{W_i - W_F}{kT}\right)$   
 $\Rightarrow W_i - W_F = kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \rightarrow \begin{cases} (1) V_D = kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \\ (2) W_D = 2kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \end{cases}$

d)  $W_{max} = \sqrt{\frac{4 \epsilon_s \epsilon_0 W_D}{q^2 N_A}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 (W_i - W_F)}{q^2 N_A}}$   
 $= 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A}} = 0,44 \mu m$

$\left(\frac{C}{C_{ox}}\right)_{min} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \frac{W_{max}}{d}} = 0,21$

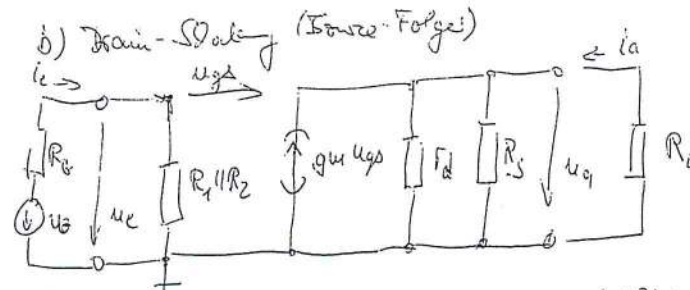
3a) n-Kanal-Sperrschicht-FET, aus Kernbereich:  $I_{D1} = 30 \mu A$



$R_2 = R_1 \frac{u_g}{U_D - u_g} = 100 k\Omega \frac{2,5V}{12,5V} = 20 k\Omega$

$u_g = u_{gs} + u_s = (-1,5 + 4)V = 2,5V; U_S = U_D - u_{ds} = 4V$

$R_S = \frac{U_S - u_{ds}}{I_D} = \frac{U_S}{I_D} = \frac{4V}{30 \mu A} = 134 \Omega$



$R_2 = R_1 || R_2 = 16,7 k\Omega$

c)  $g_m = \left| \frac{\Delta I_D}{\Delta u_{gs}} \right| = \frac{48 \mu A}{4,3V} = 11,2 mS; r_d = \left| \frac{\Delta u_{ds}}{\Delta I_D} \right| = \frac{18V}{4 \mu A} = 4,5 k\Omega$

$u_{gs} = u_e - u_a, u_a = g_m (r_d || R_S) u_{gs} \approx g_m R_S u_{gs}$

$R_e = \frac{u_e}{i_e} = R_{12} = 16,7 k\Omega; \bar{u}_{uL} = \frac{u_a}{u_e} \Big|_{i_i=0} = \frac{g_m R_S u_e}{u_e} = \frac{g_m R_S}{u_e} = \frac{g_m R_S}{u_e}$

$\bar{u}_{uL} = \frac{u_a}{u_e} \Big|_{i_i=0} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = 0,60$

$= \frac{R_{12}}{R_{12} + R_6} \frac{g_m (r_d || R_S || R_L) u_{gs}}{u_e} \approx \frac{R_{12}}{R_{12} + R_6} \frac{g_m R_S u_{gs}}{u_e} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_6} \bar{u}_{uL} = 0,1$

Ausgangswiderstand:  $u_g = 0 \rightarrow u_e = 0 \rightarrow u_{gs} = -u_a$

$R_a = \frac{u_a}{i_a} \Big|_{u_g=0} = -g_m R_S \frac{u_a}{i_a} \Rightarrow R_a = \frac{R_S}{1 + g_m R_S} = 53,6 \Omega$

Impedanzwandler

$$a) U_{Deb} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{De}}{n_{b0}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{De} N_{Ab}}{n_i^2}\right) = 0,95 V$$

$$U_{Dcb} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{Dc}}{n_{b0}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{Dc} N_{Ab}}{n_i^2}\right) = 0,71 V$$

$$\Delta p = x_3 - x_2 = d_{b0} - w_e - w_c = (4,0 - 0,34 - 0,1) \mu m = 3,56 \mu m$$

$$[NR: \omega = \omega_n + \omega_p = \omega_p \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right) \Rightarrow \omega_p = \frac{\omega}{1 + \frac{N_A}{N_D}} = \omega \frac{N_D}{N_D + N_A}]$$

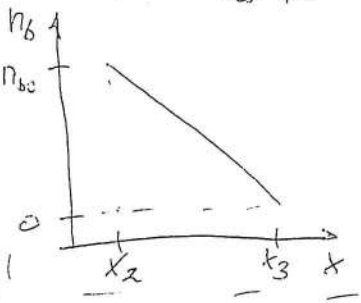
$$\Rightarrow w_e = \frac{N_{De}}{N_{De} + N_{Ab}} \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_{Deb} + U_{eb})}{q} \left(\frac{1}{N_{Ab}} + \frac{1}{N_{De}}\right)} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon U_{Deb}}{q N_{Ab}}} = 0,34 \mu m$$

$$w_c = \frac{N_{Dc}}{N_{Dc} + N_{Ab}} \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_{Dcb} + U_{cb})}{q} \left(\frac{1}{N_{Ab}} + \frac{1}{N_{Dc}}\right)} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_{Dcb} + U_{cb}) N_{Dc}}{q N_{Ab}^2}} = 0,1 \mu m$$

$$b) n_b(x_2) = n_{b0} \exp\left(-\frac{q U_{eb}}{kT}\right) \stackrel{U_{eb}=0}{=} n_{b0}, \quad n_b(x_3) = n_{b0} \exp\left(-\frac{q U_{cb}}{kT}\right) \stackrel{U_{cb}=0,7V}{\ll} n_{b0}$$

$$c) 0 = \frac{dn_b}{dx} = \frac{1}{q} \frac{d^2 n_b}{dx^2} - \frac{n_b - n_{b0}}{L_n^2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{d^2 n_b}{dx^2} - \frac{n_b - n_{b0}}{L_n^2} = 0$$



$$d) n_b(x_2) = A \sinh\left(\frac{x_2}{L_{nb}}\right) + n_{b0} = n_b \rightarrow A = 0$$

$$n_b(x_3) = B \sinh\left(\frac{x_3}{L_{nb}}\right) + n_{b0} = n_{b0} \exp\left(-\frac{q U_{cb}}{kT}\right)$$

$$\Leftrightarrow B = \frac{n_{b0}}{\sinh\left(\frac{x_3}{L_{nb}}\right)} \left[\exp\left(-\frac{q U_{cb}}{kT}\right) - 1\right] \Rightarrow n_b(x) = \frac{n_{b0}}{\sinh\left(\frac{x_3}{L_{nb}}\right)} \left[\exp\left(-\frac{q U_{cb}}{kT}\right) - 1\right] \sinh\left(\frac{x - x_2}{L_{nb}}\right) + n_{b0}$$

$$e) J_n(x_2) = q D_{nb} \frac{dn_b}{dx} \Big|_{x_2} = -\frac{q D_{nb} n_{b0}}{L_{nb} \sinh\left(\frac{x_3}{L_{nb}}\right)} \approx \frac{q \frac{kT \mu_{n0}}{q} n_{b0}}{d_b} \approx \frac{kT \mu_n n_i^2}{d_b N_{Ab}} = 1,2 \frac{pA}{\mu m^2}$$

$$J_n(x_3) = q D_{nb} \frac{dn_b}{dx} \Big|_{x_3} = -\frac{q D_{nb} n_{b0}}{L_{nb} \tanh\left(\frac{x_3}{L_{nb}}\right)} \approx \dots$$

$$\beta_T = \frac{J_n(x_3)}{J_n(x_2)} = \cosh\left(\frac{x_3}{L_{nb}}\right) \approx 1 + \left(\frac{x_3}{L_{nb}}\right)^2 \approx 1,001 \approx 1$$