Name: .... Matr.-Nr.: ....

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 22

Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)

1) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man ...

2) Welche der Aussagen zu einem idealen *pn*-Übergang mit angelegter Spannung U sind zutreffend?

3) Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen rechts die örtlichen Verläufe der Raumladungsdichte $\rho(x)$, des elektrischen Feldes $E(x)$ und des Bändermodells $W(x)$ in der angedeuteten, idealen Metall-Oxid-*p*-Halbleiterstruktur für den Fall der Inversion. Beschriften Sie im Bändermodell die Fermienergien im Metall (W_{FM}) und im Halbleiter (W_{FHL}), die Leitungs- und Valenzbandkantenenergie (W_L und W_V), die Eigenleitungsenergie (W_i) sowie qU (U: angelegte Spannung). Welches Vorzeichen muss U aufweisen?

4) Wir betrachten den Konzentrationsverlauf der Minoritätsladungsträger $n_p(x)$ in der neutralen Basis (x_2 bis x_3) eines *npn*-Transistors.

   Skizzieren Sie $n_p(x)$ in dem vorbereiteten Diagramm. Vernachlässigen Sie die Variation der Verarmungszonenbreiten mit der Spannung. Markieren Sie die Verläufe mit dem Buchstaben der Teilaufgaben.

5) Gegeben ist eine ideale Metall-Isolator-Halbleiter-Struktur (unten, Bild a) mit gleichen Austrittsarbeiten von Halbleiter und Metall sowie in den Bildern c) bis e) die zugehörigen Bändermodelle für drei Arbeitspunkte (Anreicherung, Verarmung, Inversion). Um welchen Halbleitertyp handelt es sich?eichnen Sie für niedrige Frequenzen den $C(U_g)$-Verlauf in das Diagramm (Bild b). Markieren Sie die jeweiligen Arbeitspunkte der drei angegebenen Bändermodelle mit dem zugehörigen Buchstaben c) bis e) in der $C/C_i(U_g)$-Kennlinie.

6) Welche der Aussagen zu dem gezeigten Bändermodell mit den Bandkanten W_V und W_L sind richtig? Markieren Sie an den Pfeilen rechts die Quasi-Ferminiveaus W_{Fn} für die Elektronen bzw. W_{Fp} für die Löcher.

7) Wir betrachten die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration $n(T_0/T)$ eines Halbleiters mit einer Donator-Ionisierungsenergie W_L - W_D << $W_G \approx 1$ eV (Bandlückenenergie) und einer Donatorkonzentration $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}. Skizzieren Sie diese einfach logarithmisch in die unten links gegebene Vorlage. Ergänzen Sie die Ordinaten-/Abszissenbeschriftung um Zahlenwerte (T_0 = 300 K). Markieren Sie die drei charakteristischen Bereiche Eigenleitung mit (1), Störstellenreserve mit (2) und Störstellenerschöpfung mit (3). Ordnen Sie diese Ziffern zudem jeweils einer der unten rechts gegebenen Temperaturabhängigkeiten zu.

8) 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 rechts durch “>”, “<“ oder “=”.

9) 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?

10) Gegeben ist das Bändermodell $W(x)$ von dotiertem Silizium. Geben Sie den Dotierungstyp an. 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 Vorlagen unten.

Matrikelnr.: .... Name:..

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 22

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

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

Konstanten: $q = 1{,}6\cdot10^{-19}$ As; $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ J/K $= 8{,}6\cdot10^{-5}$ eV/K; $m_0 = 9{,}1\cdot10^{-31}$ kg; $c = 3\cdot10^{8}$ m/s; $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ Js; $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ As/(Vm); $\mu_0 = 1{,}26\cdot10^{-6}$ Vs/(Am); $N_A = 6{,}02\cdot10^{23}$ Atome/mol.

1) Untersuchen Sie die Durchbruchspannung $U_B >> U_D$ (Diffusionsspannung) einer np^+-Diode unter Sperrbelastung (**Abb. 1**, Fläche $A_K = 1{,}5$ mm^2) in Abhängigkeit von der homogenen Dotierstoffkonzentration im niedrig dotierten Bereich bei 300 K. Gehen Sie davon aus, dass die Störstellen vollständig ionisiert sind, die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht (schraffierter Bereich, pn-Übergang bei x_n) keine Rolle spielen und die Bahngebiete feldfrei sind.

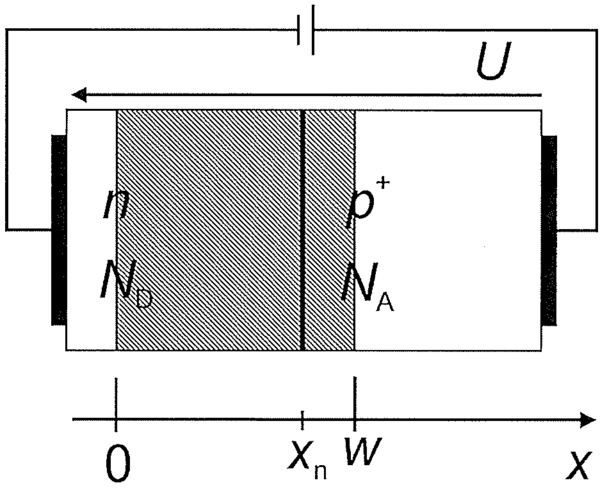


Abb. 1

a) Skizzieren Sie (vorbereitete Vorlage, nächste Seite) den Verlauf der Raumladung ρ, der elektrischen Feldstärke E und der Leitungsbandkantenenergie W_L als Funktion von x. Markieren Sie charakteristische Parameter [qN_D, $-qN_A$, $q(U_D - U)$].

b) Ermitteln Sie in der Sperrschicht für n- und p-Bereiche getrennt ρ, E und $W_L(x) - W_L(0)$ formelmäßig mit Hilfe der Poisson-Gleichung (rechts):

$$\frac{d^2W_L(x)}{dx^2} = q\frac{dE(x)}{dx} = \frac{q}{\varepsilon}\rho(x)$$

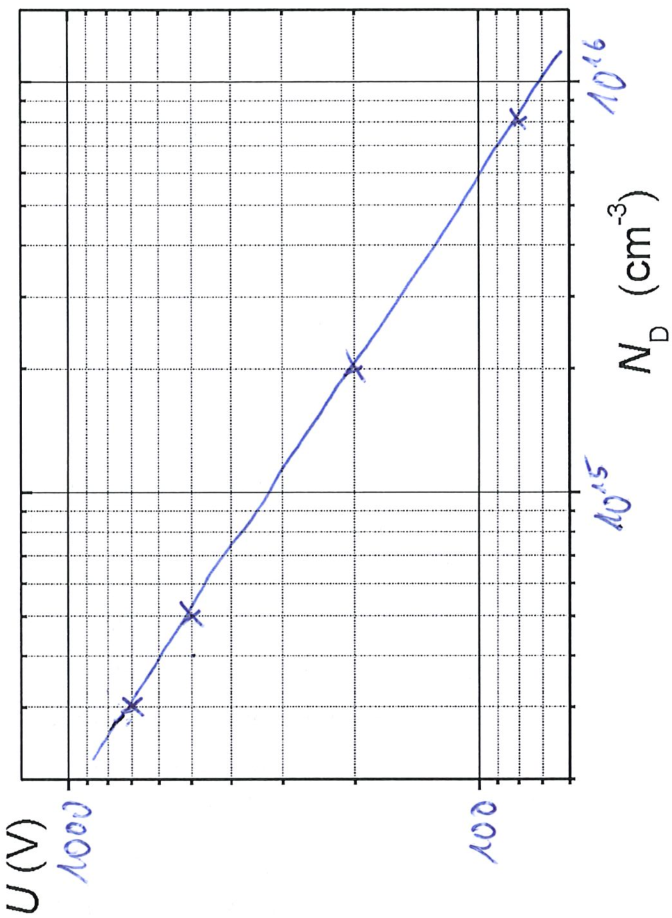
c) Wir betrachten im Folgenden nur noch den n-Bereich. Leiten Sie $U_B(x_n)$ formelmäßig aus $q(U_D - U) \approx W_L(x_n) - W_L(0)$ ab, indem Sie U durch U_B ersetzen (Vorzeichen und $U_B >> U_D$ beachten). Ermitteln Sie nun $x_n(N_D)$ aus der Durchbruchbedingung (rechts unten):

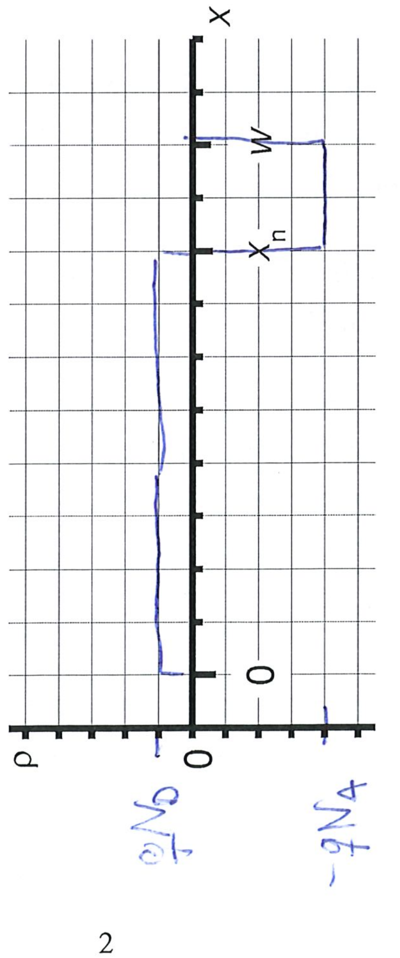
$$\int_0^{xn} \alpha_0 \left[\frac{E(x)}{E_0}\right]^6 dx = 1$$

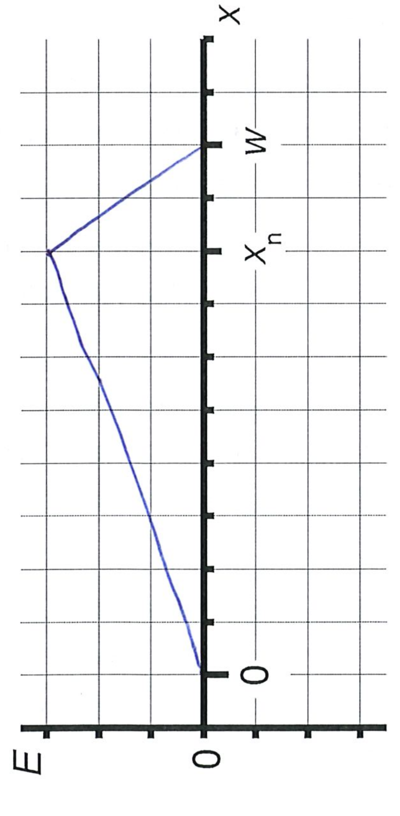
mit $E(x)$ aus b) formelmäßig. Kombinieren Sie Beides, und zeigen Sie dass gilt: $U_B \sim N_D^{\nu}$. Ermitteln Sie den Exponenten ν zahlenmäßig. Eine Messung von U_B in Abhängigkeit von N_D ergibt die in **Tab. 1** (nächste Seite) gegebenen Werte. Tragen Sie diese Werte in die vorbereitete Vorlage (nächste Seite) ein, und überprüfen Sie so den Formelzusammenhang $U_B \sim N_D^{\nu}$. Bestimmen Sie ν aus der Messung und vergleichen Sie mit dem zuvor berechneten Wert.

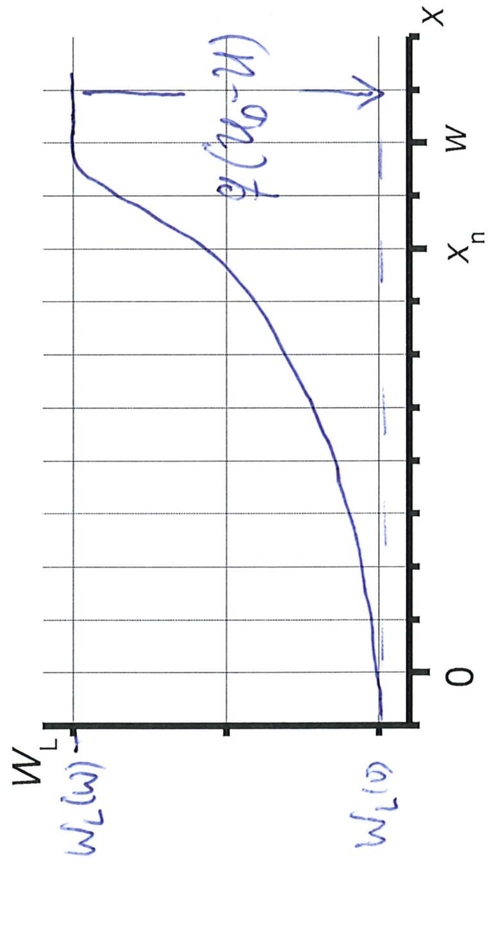
Tab. 1

N_D (10^{14} cm^{-3})	U_B (V)
3	700
5	500
20	200
80	80









Matrikelnr.: .... Name:..

2) **Abb. 2** zeigt eine pn^+-Diode ($n_i = 5 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}), die bei $T_0 = 300$ K als Fotoelement/Solarzelle betrieben wird, d. h. Bestrahlung durch das p-Gebiet ($N_A = 7 \cdot 10^{16}$ cm^{-3}) führt zu einer ortsabhängigen Generation von Ladungsträgern im Bereich $0 \leq x \leq d_n$ mit einer auf die bestrahlte 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 $U_{RL} = 0{,}5$ V ergibt.

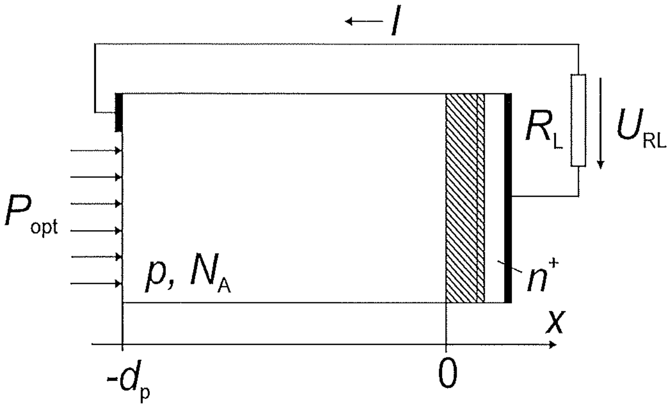


Abb. 2

a) Ermitteln Sie die Elektronenkonzentration n_p an den Rändern des p-Bahngebietes ($x = -d_p$ bzw. $x = 0$; Formeln und Zahlenwerte). Im Bahngebiet sind Elektronen und Löcher im thermischen Gleichgewicht ($n_{p0}p_{p0} = n_i^2$). An der Oberfläche ($x = -d_p$) liegt unendlich hohe Rekombinationsgeschwindigkeit vor. Hinweis: An den Rändern der Verarmungszone eines pn-Übergangs gilt bei einer von p nach n anliegenden Spannung U für die Minoritätsladungsträger-Konzentrationen allgemein:

$$p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) \; ; \; n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

b) Berechnen Sie für die Elektronen im p-Bahngebiet den Diffusionskoeffizienten $D_n = \mu_n kT/q$ sowie die Diffusionslänge $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$ und überprüfen Sie unter Verwendung der Zahlenwerte: $\mu_n = 1400$ cm^2/Vs; $\tau_n = 400$ µs; $\bar{\alpha} = 2 \cdot 10^3$cm^{-1}; $d_p = 20$ µm, dass $\bar{\alpha}^2 >> 1/L_n^2$, $d_p << L_n$ und $\exp(-\bar{\alpha} d_p) << 1$.

c) Stellen Sie die Differenzialgleichung auf, die im eingeschwungenen Zustand den Verlauf von $n_p(x) - n_{p0}$ im p-Bahngebiet beschreibt. Nutzen Sie die Kontinuitätsgleichung (1) mit der Diffusionsstromdichte-Gleichung (2) und lösen Sie nun die Differenzialgleichung

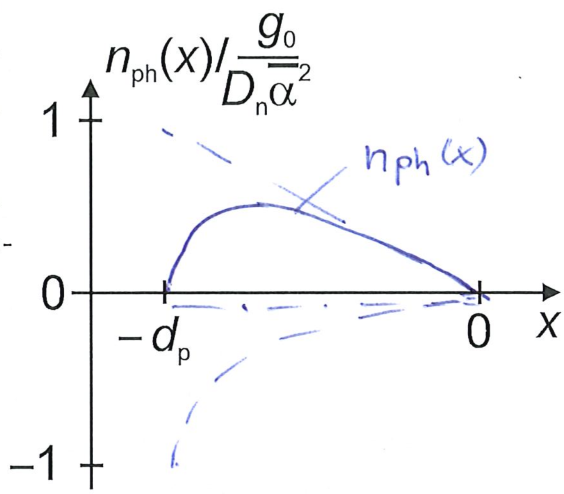
$$(1) \quad \frac{1}{D_n}\frac{dn_p}{dt} = \frac{1}{qD_n}\frac{dJ_n}{dx} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2} + \frac{g_0}{D_n}\exp\left[-\bar{\alpha}(x + d_p)\right] \; ; \quad (2) \quad J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx}$$

unter Verwendung des Ansatzes:

$$n_p(x) - n_{p0} = A \sinh\left(\frac{x}{L_n}\right) + B \sinh\left(\frac{x + d_p}{L_n}\right) + C \exp\left[-\bar{\alpha}(x + d_p)\right]$$

und den Randbedingungen aus a).

d) Geben Sie getrennt die Anteile der ohne Bestrahlung vorliegenden $n_d(x)$ und der photogenerierten Elektronenkonzentration $n_{ph}(x)$ an. Nähern und skizzieren Sie qualitativ (nutzen Sie die Vorlage rechts) den Verlauf von $n_{ph}(x)(D_n\bar{\alpha}^2/g_0)$ im n-Bahngebiet für den Fall dass $\bar{\alpha}^2 >> 1/L_n^2$, $d_p << L_n$ und $\exp(-\bar{\alpha}d_p) << 1$.



e) Bestimmen Sie mit n_{ph} aus Aufgabenteil d) den Photostrom $|I_{ph}|$ durch die Diode (Formel und Wert; A = 100 mm², $g_0 = 5\cdot10^{19}/(\text{cm}^3\text{s})$). Bestimmen Sie den Lastwiderstand R_L (Dunkelstrom vernachlässigbar) und die erzeugte optische Leistung P_{opt}.

Matrikelnr.: .... Name:...

3) Analysieren Sie die Schaltung in **Abb. 3a**. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in **Abb. 3 b** charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben: $U_B = 4$ V, $U_{ce} = 2$ V, $U_{eb} = -0{,}8$ V, $I_b = 10$ µA, $I_q = 5 \cdot I_b$, $R_G = 10$ kΩ, $R_L = 3$ kΩ.

a) Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Ermitteln Sie den Arbeitspunkt $I_c(U_{ce})$ und U_E sowie formel- und zahlenmäßig die Widerstände R_1, R_2 und R_E sowie I_c ($U_{ce} = 0$). Tragen Sie Arbeitspunkt und -gerade in das Kennlinienfeld in **Abb. 3b** 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) mit $y_{11} = 1$ mS; $y_{12} = 0$; $y_{22} = 4$ mS und $y_{21} = -7$ mS und den in a) ermittelten Widerstandswerten 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.

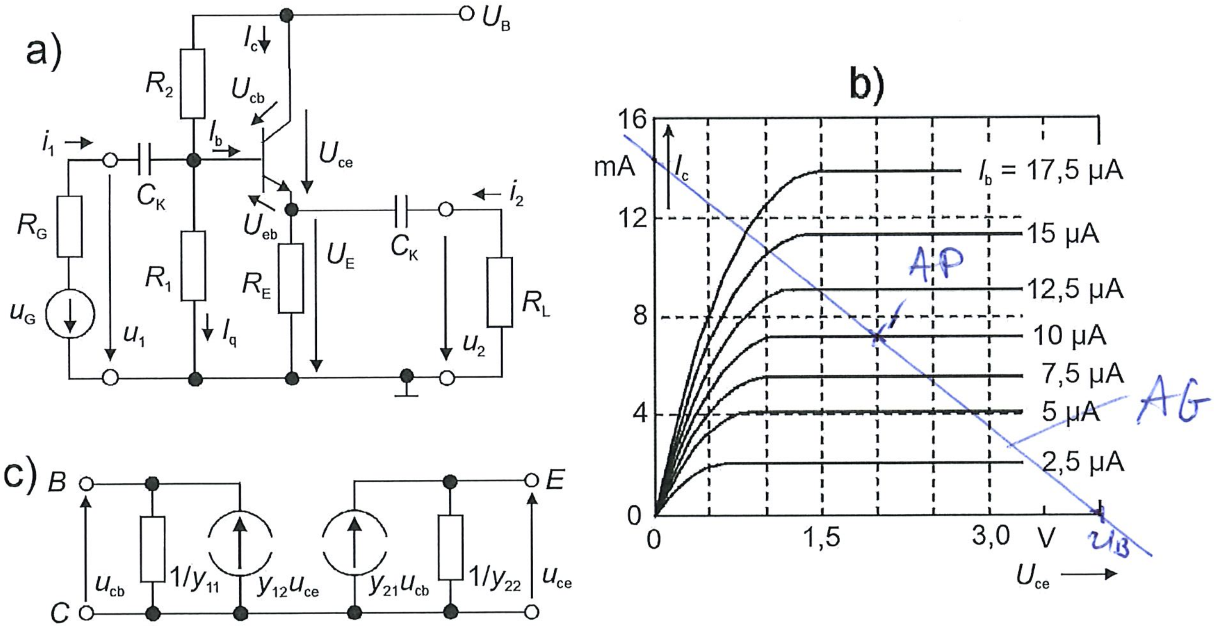


Abb. 3

Verarmungszone frei von bew. Ladungsträgern

1 b) $\rho = q\,(-N_A^- + \cancel{p} + N_D^+ - \cancel{n}) \underset{\uparrow}{\approx} q\,(-N_A + N_D)$

Störstellen vollständig ionisiert

$0 \leq x \leq x_n$ (n-Bereich) $\qquad x_n < x \leq W$ (p-Bereich)

$\rho = q N_D$

$E(x) - \cancel{E(0)}^{=0} = \frac{1}{\varepsilon}\int_0^x \rho\, dx' = \frac{qN_D}{\varepsilon}\int_0^x dx'$

$= \frac{q}{\varepsilon} N_D x$

$\rho = -q N_A$

$E(W) - E(x) = \frac{1}{\varepsilon}\int_x^W \rho\, dx'$

$= -\frac{q}{\varepsilon} N_A \int_x^W dx' = -\frac{q}{\varepsilon} N_A (W-x)$

$\Rightarrow E(x) = \frac{q}{\varepsilon} N_A (W-x)$

$W_L(x) - W_L(0) = q\int_0^x E(x')\,dx'$

$= \frac{q^2 N_D}{\varepsilon}\int_0^x x'\,dx' = \frac{q^2 N_D}{2\varepsilon} x^2$

$W_L(W) - W_L(x) = q\int_x^W E(x')\,dx'$

$= \frac{q^2 N_A}{\varepsilon}\int_x^W \underbrace{(W-x')}_{=:u}\,\underbrace{dx}_{=:-du} = -\frac{q^2 N_A}{\varepsilon}\int_{W-x}^{0} u\,du$

$= \frac{q^2 N_A}{2\varepsilon}(W-x)^2$

c) $q\,(U_D - U) \overset{U=-U_B}{=} q\,(U_D + U_B)$

$\underset{U_B \gg U_D}{\approx} q U_B = W_L(x_n) - W_L(0) = \frac{q^2 N_D}{2\varepsilon} x_n^2$

$1 = \alpha_0 \int_0^{x_n} \left[\frac{E(x)}{E_0}\right]^6 dx \underset{E(x) = \frac{q}{\varepsilon}N_D x}{=} \alpha_0 \int_0^{x_n} \left(\frac{qN_D}{\varepsilon E_0} x\right)^6 dx = \alpha_0 \left(\frac{qN_D}{\varepsilon E_0}\right)^6 \int_0^{x_n} x^6\, dx$

$= \frac{\alpha_0}{7}\left(\frac{qN_D}{\varepsilon E_0}\right)^6 x_n^7 \Rightarrow x_n = \left(\frac{7}{\alpha}\right)^{1/7}\left(\frac{\varepsilon E_0}{q N_D}\right)^{6/7}$

$U_B = \frac{qN_D}{2\varepsilon} x_n^2 = \frac{qN_D}{2\varepsilon}\left(\frac{7}{\alpha_0}\right)^{2/7}\left(\frac{\varepsilon E_0}{qN_D}\right)^{12/7} = \frac{q N_D \varepsilon^{12/7}}{\varepsilon\, q^{12/7} N_D^{12/7}}\,\frac{1}{2}\left(\frac{7}{\alpha_0}\right)^{2/7} E_0^{12/7}$

$= \frac{1}{2}\left(\frac{7}{\alpha_0}\right)^{2/7} E_0^{12/7}\left(\frac{\varepsilon}{q}\right)^{5/7} \cdot N_D^{-5/7} \sim N_D^{\nu} \rightarrow \nu = -\frac{5}{7} = -0{,}71$

Formelzusammenhang bestätigt

aus doppelt logarithm. Auftragung $\rightarrow \log(U_B/U_{B0}) = \text{const.}\,\log\left(\frac{N_D}{N_{D0}}\right)$

$\Rightarrow \text{const.} = \nu = \frac{\log(U_B/U_{B0})}{\log(N_D/N_{D0})} = \frac{\log(600/100)}{\log(4\cdot 10^{14}/6\cdot 10^{15})} \underset{\uparrow}{=} -0{,}66$

entspricht nahe zu dem berechneten Wert

2a) Randbed.: $n(-d_p) = n_{p0}$; $n_p(0) = n_{p0} \exp\left(\frac{q U_{RL}}{kT}\right)$

$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(5\cdot 10^{10})^2}{7\cdot 10^{16}} \text{cm}^{-3} = 3{,}6\cdot 10^4 \text{cm}^{-3}$; $n_p(0) = 9\cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$

b) $D_n = \frac{\mu_n kT}{q} = 36{,}2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$; $L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 1{,}2$ mm ; $\exp(-\bar\alpha d_p) = 0{,}018 \ll 1$

$\bar\alpha^2 = 4\cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2} \gg 69 \frac{1}{\text{cm}^2} = \frac{1}{L_n^2}$; $d_n = 20\,\mu\text{m} \ll 1{,}2\,\text{mm} = L_n$

c) $\underset{\substack{\uparrow \\ \text{eingeschwungener Zustand}}}{0} = \frac{1}{D_n}\frac{d(n_p - n_{p0})}{dt} = \cancel{\frac{1}{q D_n} q D_n} \frac{d^2(n_p - n_{p0})}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2} + \frac{g_0}{D_n}\left[-\bar\alpha(x+d_p)\right]$

Einsetzen Ansatz in ~~DGL~~ Randbed.:

$n_p(-d_p) - n_{p0} = 0 = A \sinh\left(-\frac{d_p}{L_n}\right) + B \underbrace{\sinh\left(\frac{-d_p + d_p}{L_n}\right)}_{=0} + C \underbrace{\exp\left[-\bar\alpha(-d_p + d_p)\right]}_{=1}$

$\Leftrightarrow A = -\frac{C}{\sinh\left(-\frac{d_p}{L_n}\right)}$

$n_p(0) - n_{p0} = n_{p0}\left[\exp\left(\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1\right] = A \underbrace{\sinh\left(\frac{0}{L_n}\right)}_{=0} + B \sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right) + C \exp\left[-\bar\alpha d_p\right]$

$\Leftrightarrow B = \frac{n_{p0}\left[\exp\left(\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1\right]}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} - \frac{C \exp(-\bar\alpha d_p)}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)}$

Einsetzen Ansatz in DGL (nur inhomogener Teil $C\exp[-\bar\alpha(x+d_p)]$)

$C(-\bar\alpha)^2 \cancel{\exp[-\bar\alpha(x+d_p)]} - \frac{C}{L_n^2}\cancel{\exp[-\bar\alpha(x+d_p)]} + \frac{g_0}{D_n}\overset{\exp}{\cancel{[-\bar\alpha(x+d_p)]}} = 0$

$\Rightarrow C\left(\bar\alpha^2 - \frac{1}{L_n^2}\right) + \frac{g_0}{D_n} = 0 \rightarrow C = -\frac{g_0}{D_n\left(\bar\alpha^2 - \frac{1}{L_n^2}\right)}$

$\Leftrightarrow n_p(x) - n_{p0} = \underbrace{n_{p0}\left[\exp\left(\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1\right]\frac{\sinh\left(\frac{x+d_p}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)}}_{n_d - n_{p0}}$

$\underbrace{- \frac{g_0}{D_n\left(\bar\alpha^2 - \frac{1}{L_n^2}\right)}\left\{-\frac{\sinh\left(\frac{x}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} - \exp(-\bar\alpha d_p)\frac{\sinh\left(\frac{x+d_p}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} + \exp\left[-\bar\alpha(x+d_p)\right]\right\}}_{n_{ph}}$

$= n_d \overset{-n_{p0}}{\cancel{+}} n_{ph}$

d) $n_d^{-n_{p0}} \underset{\uparrow}{\approx} n_{p0}\left[\exp\left(\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1\right]\frac{\frac{x+d_p}{\cancel{L_n}}}{\frac{d_p}{\cancel{L_n}}} = n_p\left[\exp\left(\frac{qU_{RL}}{kT}\right) - 1\right]\left(1 + \frac{x}{d_p}\right)$

$\sinh\left(\frac{x+d_p}{L_n}\right) \underset{\uparrow}{\approx} \frac{x+d_p}{L_n}$; $\sinh\left(\frac{d_p}{L_n}\right) \underset{\uparrow}{\approx} d_p/L_n$

$x<0 \longrightarrow x + d_p \ll L_n$ $\qquad$ $d_p \ll L_n$

$$n_{ph} \approx -\frac{g_0}{D_n\left(\bar\alpha^2 - \underbrace{\frac{1}{L_n^2}}_{\ll \bar\alpha^2}\right)} \left\{ \frac{x/\cancel{L_n}}{d_p/\cancel{L_n}} - \exp(-\bar\alpha d_p)\frac{x+d_p/\cancel{L_n}}{d_p/\cancel{L_n}} + \exp\left[-\bar\alpha(x+d_p)\right] \right\}$$

$$= -\frac{g_0}{D_n\bar\alpha^2}\left\{ \frac{x}{d_p} - \exp(-\bar\alpha d_p)\left(1+\frac{x}{d_p}\right) + \exp\left[-\bar\alpha(x+d_p)\right] \right\}$$

$$= -\frac{g_0}{D_n\bar\alpha^2}\left\{ \frac{x}{d_p}\left[1 - \cancel{\overset{\ll 1}{\exp(-\bar\alpha d_p)}}\right] - \exp(-\bar\alpha d_p) + \exp\left[-\bar\alpha(x+d_p)\right] \right\}$$

$$= -\frac{g_0}{D_n\bar\alpha^2}\left\{ \frac{x}{d_p} - \exp(-\bar\alpha d_p) + \exp\left[-\bar\alpha(x+d_p)\right] \right\}$$

$x = -d_p$: $n_{ph}/\left(g_0/(D_n\bar\alpha^2)\right) = 1 + \exp(-\bar\alpha d_p) - \underbrace{\exp\left[-\bar\alpha(-d_p+d_p)\right]}_{1}$

$$= \exp(-\bar\alpha d_p) \ll 1$$

$x = 0$: $n_{ph}/\left[g_0/(D_n\bar\alpha^2)\right] = \exp(-\bar\alpha d_p) - \exp(-\bar\alpha d_p) = 0$

e) $$I_{ph} = -A q D_n \left.\frac{d(n_{ph} - n_{p0})}{dx}\right|_{x=0} = -A q D_n\left(-\frac{g_0}{D_n\bar\alpha^2}\right)\left\{\frac{1}{d_p} - \bar\alpha \exp(-\bar\alpha d_p)\right\}$$

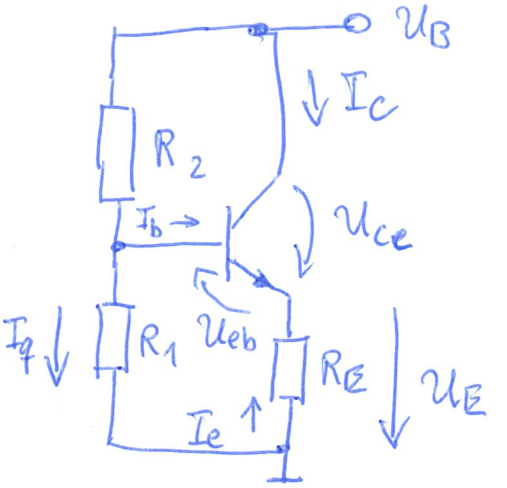
$$= \frac{A q \cancel{D_n} g_0}{\bar\alpha^2 d_p}\left\{1 - \underbrace{\underbrace{\bar\alpha d_p}_{\approx 4}\ \underbrace{\exp(-\bar\alpha d_p)}_{\approx 0{,}02}}_{\ll 1}\right\}$$

$$\approx \frac{A q g_0}{\bar\alpha^2 d_p} = 1\,\mathrm{mA}$$

$$R_L = \frac{U_{RL}}{I_{ph}} = \frac{0{,}5\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{mA}} = 500\,\Omega$$

$$P_{opt} = I_{ph}^2 R_L = 0{,}5\,\mathrm{mW}$$

3a) npn-Transistor



$$I_C = 7\,mA$$

$$U_E = U_B - U_{ce} = 2\,V$$

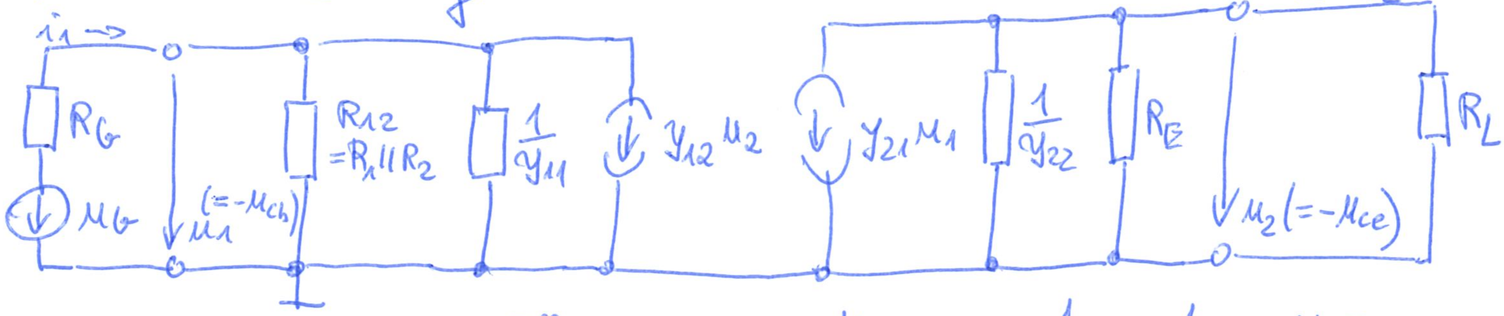
$$R_E = \frac{U_E}{I_C + I_b} \approx \frac{U_E}{I_C} = \frac{2\,V}{7\,mA} = 286\,\Omega$$

$$R_1 = \frac{-U_{eb} + U_E}{5 I_b} = \frac{(0{,}8+2)\,V}{5 \cdot 10\,\mu A} = 56\,k\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_B - (-U_{eb} + U_E)}{6 I_b} = \frac{(4-2{,}8)\,V}{6 \cdot 10\,\mu A} = 20\,k\Omega$$

$$I_C(U_{ce}=0) = \frac{U_B}{R_E} = \frac{4\,V}{286\,\Omega} = 14\,mA$$

b) Kollektorschaltung



c) $$u_1 = \left(R_{12} \| \frac{1}{y_{11}}\right)\left(i_1 - \overset{=0}{y_{12} u_2}\right) \Rightarrow R_e = \frac{u_1}{i_1} = R_{12} \| \frac{1}{y_{11}} \approx \frac{1}{y_{11}} = 1\,k\Omega$$

$$u_2 = \left(\frac{1}{y_{22}} \| R_E \| R_L\right)(-y_{21} u_1) \Rightarrow v_{uL} = \left.\frac{u_2}{u_1}\right|_{R_L=\infty} = -\left(\frac{1}{y_{22}} \| R_E\right) y_{21} = 0{,}93$$

$$\frac{u_1}{u_G} = \frac{R_e}{R_G + \cancel{R_e}_{\ll R_G}} \Rightarrow v_u = \frac{u_2}{u_G} \approx -\frac{R_e}{R_G}\left(\frac{1}{y_{22}} \| R_E \| \cancel{R_L}^{\gg \frac{1}{y_{22}} \| R_E}\right) y_{21} \approx \frac{R_e}{R_G} v_{uL} = 0{,}09$$

$$u_G = 0,\ i_2 \neq 0: \quad u_1 = R_G \| R_e \left(-\overset{=0}{\cancel{y_{21}} u_2}\right) = 0$$

$$u_2 \approx \left(i_2 - y_{21} \overset{=0}{\cancel{u_1}}\right)\left(R_E \| \frac{1}{y_{22}}\right) \Rightarrow R_a = \left.\frac{u_2}{i_2}\right|_{u_G=0,\, i_2 \neq 0} = \overbrace{R_E \| \frac{1}{y_2}}^{=133\,\Omega}$$

$$i_2 = -\frac{u_2}{R_L} = -\frac{(i_2 - y_{21} u_1)\left(R_E \| \frac{1}{y_{22}}\right)}{R_L} = -\frac{(i_2 - y_{21} R_e i_1)\left(R_E \| \frac{1}{y_{22}}\right)}{R_L}$$

$$\Leftrightarrow i_2\left(1 + \cancel{\frac{R_E \| \frac{1}{y_{22}}}{R_L}}^{\ll 1}\right) = \frac{y_{21} R_e \left(R_E \| \frac{1}{y_{22}}\right)}{R_L} i_1$$

$$\Leftrightarrow \frac{i_2}{i_1} \approx \frac{y_{21} R_e \left(R_E \| \frac{1}{y_{22}}\right)}{R_L} = \frac{y_{21} R_e R_a}{R_L} \approx -0{,}3$$

$$= -v_{uL} \frac{R_e}{R_L}$$