Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 07/08

Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)

1) Welche der Aussagen zu einem Halbleiter im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?

2) Die Diffusionskapazität eines *pn*-Übergangs

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

4) Gegeben ist eine Verstärker-Schaltung a) und das Kleinsignal-Ersatzschaltbild des Transistors b). Die Kapazitäten stellen im interessierenden Frequenzbereich Kurzschlüsse dar. Zeichnen Sie das Wechselstromersatzschaltbild der Schaltung, und tragen Sie neben Ein- und Ausgangsgrößen die steuernde Größe u_{gs} ein.

   Um welche Grundschaltung handelt es sich? ______________________

   Um welchen Transistortyp handelt es sich? ______________________

5) Tragen Sie in die Strom-Spannungskennlinien eines *pn*-Übergangs die üblichen Arbeitspunkte in Form eines Kreuzes mit entsprechendem Buchstaben für folgende optoelektronische Bauelemente ein.

6) Skizzieren Sie in das vorbereitete Feld das Schaltbild eines CMOS-Inverters.

7) Welche der Aussagen zu einer MOS-Kapazität sind richtig?

8) Welche der Aussagen zum Bipolartransistor sind richtig?

9) Welche der Aussagen zum Operationsverstärker sind richtig?s wird üblicherweise als Darlington-Stufe ausgeführt.

10) Beschriften Sie in dem gezeigten Bändermodell die Bandkanten W_V und W_L sowie die beiden Quasi-Ferminiveaus für die Elektronen und Löcher W_{Fn} und W_{Fp}. Welche der Aussagen dazu sind richtig unter der Voraussetzung gleicher effektiver Zustandsdichten im Leitungs- und Valenzband?

Name:..

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 07/08

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

1) Die Konzentrationen der Elektronen und Löcher sowie der ionisierten Störstellen im homogenen Halbleiter hängen von der Lage des Fermi-Niveaus W_F wie folgt ab:

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

$$N_D^+ = N_D\left(g\exp\left(\frac{W_F - W_D}{kT}\right) + 1\right)^{-1} \quad \text{mit } g = 2$$

$$N_A^- = N_A\left(g\exp\left(\frac{W_A - W_F}{kT}\right) + 1\right)^{-1} \quad \text{mit } g = 4$$

Folgende Daten sind bekannt:

kT_0 = 26 meV; $N_L = N_V = 10^{19}\ \text{cm}^{-3}\cdot(T/T_0)^{3/2}$; $N_D = 5\cdot10^{13}\ \text{cm}^{-3}$; $N_A = 1\cdot10^{15}\ \text{cm}^{-3}$; W_L = 1,4 eV; $W_V = 0$; $W_L - W_D$ = 6 meV; W_A = 0,3 eV.

Im thermodynamischen Gleichgewicht soll die Lage des Fermi-Niveaus bei den beiden Temperaturen T_0 = 300 K und $T_1 = 3 \cdot T_0$ grafisch bestimmt werden (Shockley-Diagramm, Abb. 1).

a) Berechnen Sie für T_0 und T_1 Zahlenwerte für N_L, N_V, Eigenleitungskonzentration n_i und -niveau W_i.

b) Berechnen Sie zahlenmäßig für beide Temperaturen die Konzentrationen $N_D^+(W_F = W_L)$ und $N_A^-(W_F = W_V)$.

c) Tragen Sie in das vorbereitete Shockley-Diagramm (Abb. 1) die Verläufe für $n(W_F)$, $p(W_F)$, $N_D^+(W_F)$, $N_A^-(W_F)$ sowie die Summenkurven für positive Ladungen und für negative Ladungen für beide Temperaturen ein (bitte eindeutig beschriften!). Markieren Sie alle wichtigen Größen (N_L, N_V, n_i, W_D, W_A, W_L, W_V, W_i).

d) Wie groß sind für Ladungsneutralität die Elektronen- und Löcherkonzentrationen und wo liegt das Fermi-Niveau bei beiden Temperaturen (Werte aus Shockley-Diagramm ablesen)? Diskutieren Sie das Ergebnis!

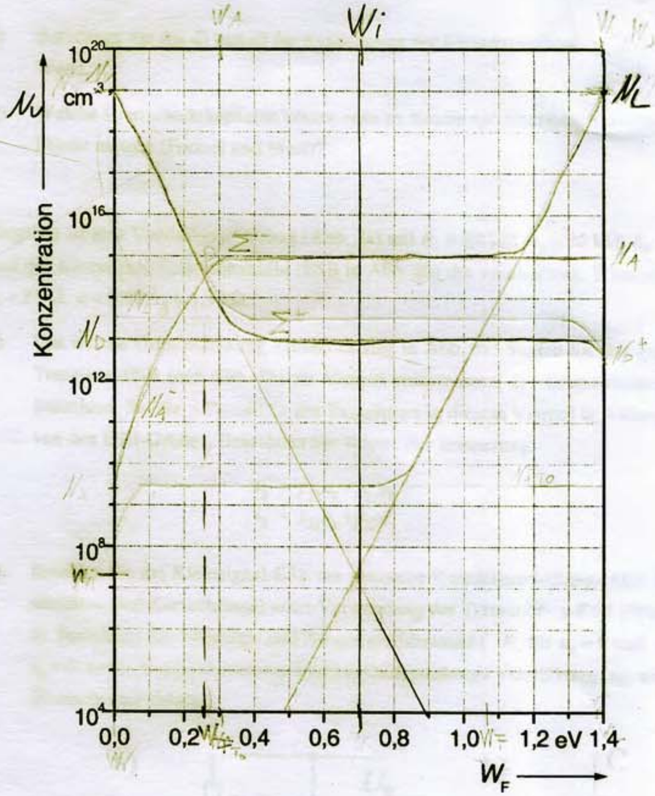


Abb. 1: Shockley-Diagramm

2) Berechnen Sie für einen np^+-Übergang (Abb. 2a) die Diffusionsspannung U_D und für den spannungslosen Fall ($U = 0$) die Ausdehnung der Verarmungszone $-w_n$ und die Größe der Sperrschichtkapazität pro Fläche c_s. Gegeben sind die thermische Energie kT = 26 meV, die konstanten Dotierungen $N_D = 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ und $N_A = 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ (alle vollständig ionisiert) des abrupten Übergangs, die Eigenleitungskonzentration $n_i = 10^{10}\ \text{cm}^{-3}$ sowie $\varepsilon = 10^{-12}$ As/(Vcm); q = $1{,}602\cdot10^{-19}$ As.

a) Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen (Abb. 2b bis d) die Verläufe der Raumladungsdichte ρ, der Feldstärke E und der Bandkanten W_L und W_V sowie der

2/6

Fermi-Energie W_F in der Diode für $U = 0$. Dabei soll angenommen werden, dass die Raumladungszone ($-w_n \le x \le w_p \approx 0$) vollständig an beweglichen Ladungsträgern verarmt ist, und ihre Ränder abrupt sind. Achten Sie auf vollständige Beschriftung!

b) Berechnen Sie im Bereich $-w_n \le x \le 0$ den Verlauf der Raumladungen. Leiten Sie daraus unter Verwendung der Poisson-Gleichung

$$\Delta W_L = q\,\mathrm{div}E = \frac{q}{\varepsilon}\rho = \frac{q^2}{\varepsilon}\left(N_D^+ + p - N_A^- - n\right)$$

die Verläufe der Feldstärke $E(x)$ (die Bahngebiete sind feldfrei) und der Bandkante $W_L(x, W_L(-w_n))$ her (Formeln).

c) Wie groß sind im thermodynamischen Gleichgewicht die Elektronenkonzentrationen $n_{n0}(-w_n)$ und $n_{p0}(w_p)$ an beiden Rändern der Verarmungszone (Formeln und Werte)? Tragen Sie in Abb. 2d die Diffusionsspannung U_D ein und bestimmen Sie unter Verwendung der Gleichung

$$n = N_L \exp\left(\frac{W_F - W_L}{kT}\right)$$

aus $n_{n0}(-w_n)$ und $n_{p0}(w_p)$ die Diffusionsspannung U_D (Formel und Wert).

d) Wo ist die Feldstärke maximal (E_m in Abb. 2c eintragen) und wie groß ist sie in Abhängigkeit von w_n (Formel aus b)?

e) Welchen Zusammenhang gibt es zwischen der maximalen Feldstärke E_m und Diffusionsspannung U_D (Formel)? Verdeutlichen Sie diesen in Abb. 2c).

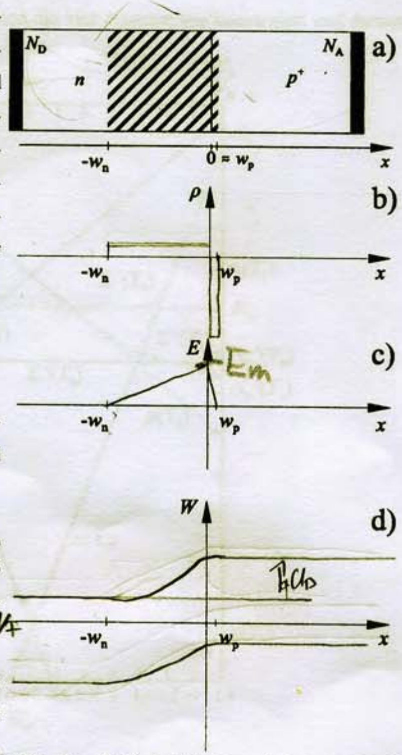


Abb. 2 np^+-Diode (a), Raumladungsverlauf (b), Feldstärkeverlauf (c), Bänderdiagramm (d)

f) Berechnen Sie aus d) und e) die Ausdehnung der Verarmungszone w_n (Formel und Wert).

g) Welche Sperrschichtkapazität könnte man an diesem np^+-Übergang bezogen auf die Fläche messen (Formel und Wert)?

3) Gegeben ist eine Verstärkerschaltung (Abb. 3a) mit $R_1 = 60\,\mathrm{k\Omega}$; $R_2 = 20\,\mathrm{k\Omega}$; $R_E = 50\,\Omega$ und das Kleinsignal-Ersatzschaltbild (ESB in Abb. 3b) des verwendeten Transistors mit $r_e = 85\,\Omega$; $\alpha = 0{,}99$; $r_b = 1{,}5\,\mathrm{k\Omega}$.

a) Um welche Grundschaltung handelt es sich in Abb. 3a? Stellen Sie das gegebene Transistor-ESB (nur Abb. 3b) als Vierpol entsprechend der Grundschaltung dar. Berechnen Sie die y-Parameter des Transistors in diesem Vierpol in Abhängigkeit von den ESB-Größen. Berechnen Sie Werte. Zur Erinnerung:

$$i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2\,,$$
$$i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2\,.$$

b) Erstellen Sie das Kleinsignal-ESB der gesamten Verstärkerschaltung (Abb. 3a, Kapazitäten sind Kurzschlüsse) unter Verwendung des Transistor- y-ESB (Werte aus a). Berechnen Sie Eingangs- und Ausgangswiderstand (R_e für $u_a = 0$ und R_a für $u_e = 0$) sowie Kurzschlussstrom- und Leerlaufspannungs-Verstärkung (v_{iKS} und v_{uLL}) (Formeln und Zahlen).

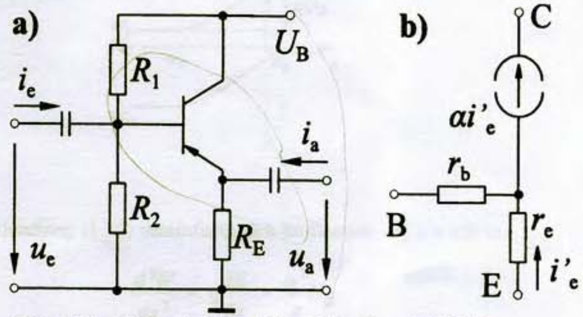


Abb. 3 Verstärkerschaltung (a) und Transistor-ESB (b)

3/6

Lösungen zu 1):

a) Aus den gegebenen Daten ergeben sich $N_L = N_V = 10^{19}$ cm^{-3} bei T_0 und $5.2\cdot10^{19}$ cm^{-3} bei T_1. Die gegebenen Gleichungen führen für T_0 (T_1) zu

$e^{\frac{-1{,}4\,eV}{52\,meV}}$

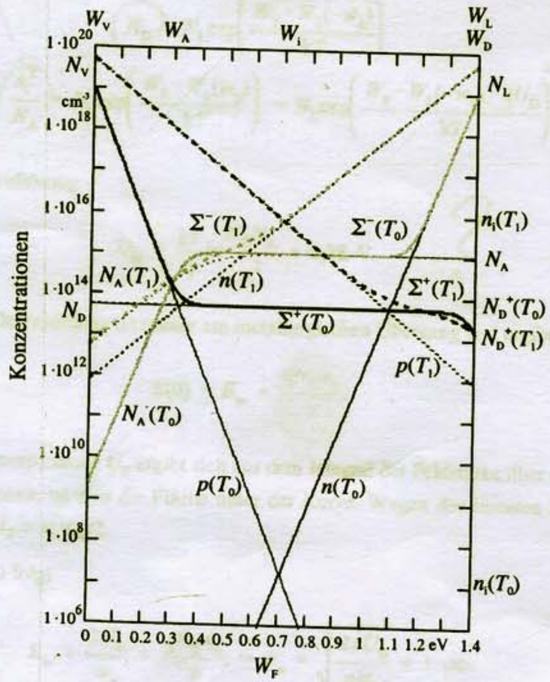
$$n_i = \sqrt{n\cdot p} = \underbrace{\sqrt{N_L N_V}}_{10^{19}}\cdot\exp\left(\frac{W_V - W_L}{2kT}\right) = 1{,}7\cdot10^{7}\ (6{,}2\cdot10^{15})\quad \text{cm}^{-3}$$

$-W_L$ e

bzw. aus $n_i = N_L\cdot\exp\left(\frac{W_i - W_L}{kT}\right)$ folgt $W_i = \frac{W_L}{2} + kT\ln\left(\sqrt{\frac{N_V}{N_L}}\right) = 0{,}7\ (0{,}7)$ eV .

b) Einsetzen ergibt $N_D^+(W_F = W_L) = 1{,}4\cdot10^{13}$ cm^{-3} und $N_A^-(W_F = W_V) = 2{,}3\cdot10^{9}$ cm^{-3} bei T_0 und $N_D^+(W_F = W_L) = 1{,}6\cdot10^{13}$ cm^{-3} und $N_A^-(W_F = W_V) = 5{,}2\cdot10^{12}$ cm^{-3} bei T_1.

c) Zunächst werden mit den berechneten Daten die vier Asymptoten konstruiert und daraus

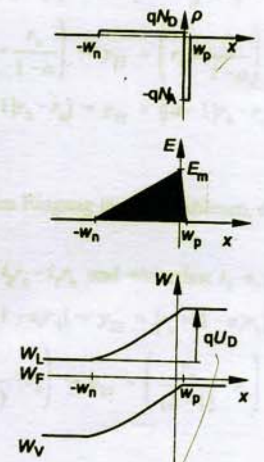


dann die Summenkurven (gestrichelte Verläufe gelten für T_1).

d) Für Elektroneutralität müssen sich die positiven und negativen Ladungen ausgleichen. Am Schnittpunkt der beiden Summenkurven (fett) kann man ablesen $W_F(T_0;T_1) = 0{,}29;0{,}7$ eV und $p(T_0;T_1) = 1{,}5\cdot10^{14};6{,}2\cdot10^{15}$ cm^{-3} sowie $n(T_0;T_1) = 2$(berechnet aus n_i^2/p);$6{,}2\cdot10^{15}$ cm^{-3}. Bei der höheren Temperatur ist die Eigenleitungskonzentration höher als die Dotierungskonzentrationen, so dass der Halbleiter dann eigenleitend ($n = p = n_i$) ist.

Lösung zu 2:

a)



b) Die Poisson-Gleichung (1.39) vereinfacht sich im Bereich $-w_n \le x \le 0$ zu:

$$\frac{d^2W}{dx^2} = q\frac{dE}{dx} = \frac{q^2}{\varepsilon}N_D.$$

Einfache Integration vom linken Rand der Verarmungszone bis zu einem Ort x in der Verarmungszone ergibt die elektrische Feldstärke:

4/6

$$E(x) = \frac{q}{\varepsilon}N_D(x+w_n).$$

Die zweite Integration liefert den Verlauf der Bandkanten:

$$W_L(x) - W_L(-w_n) = \frac{q^2}{\varepsilon}N_D\int_{-w_n}^{x}(x'+w_n)\mathrm{d}x' = \frac{q^2}{2\varepsilon}N_D(x+w_n)^2$$

$$\rightarrow W_L(x) = \frac{q^2}{2\varepsilon}N_D(x+w_n)^2 + W_L(-w_n).$$

c) Am Rande der Verarmungszone herrscht wie in der gesamten Struktur Gleichgewicht, also $n_{n0}(-w_n) = N_D = 10^{15}\ \mathrm{cm}^{-3}$ bzw. $n_{p0}(w_p) = n_i^2/N_A = 10^2\ \mathrm{cm}^{-3}$. Aus

$$N_D = N_L\exp\left(\frac{W_F - W_L(-w_n)}{kT}\right)$$

$$\text{und}\ \frac{n_i^2}{N_A} = N_L\exp\left(\frac{W_F - W_L(w_p)}{kT}\right) = N_L\exp\left(\frac{W_F - W_L(-w_n) - qU_D}{kT}\right)$$

Sinnlos!

folgt nach Auflösung

$$U_D = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_D N_A}{n_i^2} = 0{,}78\ \mathrm{V}.$$

?

d) Die maximale Feldstärke ist immer am metallurgischen Übergang und ergibt sich aus b)

$$E(0) = E_m = \frac{qN_D w_n}{\varepsilon}.$$

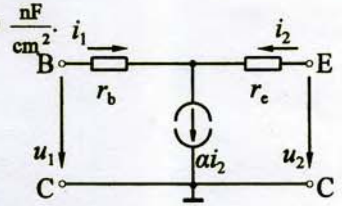
e) Die Diffusionsspannung U_D ergibt sich aus dem Integral der Feldstärke über die gesamte Verarmungszone, ist also die Fläche unter der Kurve. Wegen des linearen Zusammenhangs folgt $U_D = w_n \cdot E_m/2$.

f) Aus d) und e) folgt

$$E_m = \frac{2U_D}{w_n} = \frac{qN_D w_n}{\varepsilon};\ \rightarrow w_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon U_D}{qN_D}} = 1\ \mu\mathrm{m}.$$

g) Die Sperrschichtkapazität pro Fläche ergibt sich nach (1.56) zu

$$c_s = \frac{\varepsilon}{w_n} = 10\ \frac{\mathrm{nF}}{\mathrm{cm}^2}.$$



Lösung zu 3:

a) Da der Kollektor sowohl im Eingangs- als auch im Ausgangskreis des Wechselstrom-Ersatzschaltbildes vorhanden ist, handelt es sich hier um eine Kollektorschaltung (siehe *y*-ESB). Zur Bestimmung der *y*-Parameter betrachten wir zunächst einen Kurzschluss am Ausgang ($u_2 = 0$) und lesen ab

$$u_1 = i_1 r_b - i_2 r_e\ \text{und}\ i_1 = -i_2 + \alpha i_2 = -i_2(1-\alpha)$$

$$\rightarrow u_1 = i_1\left(r_b + \frac{r_e}{1-\alpha}\right) \rightarrow y_{11} = \left(r_b + \frac{r_e}{1-\alpha}\right)^{-1} = 100\ \mu\mathrm{S}\ \text{und}$$

$$u_1 = i_2([\alpha-1]r_b - r_e) \rightarrow y_{21} = ([\alpha-1]r_b - r_e)^{-1} = -10\ \mathrm{mS}.$$

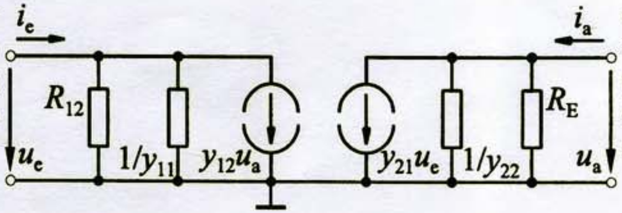
Bei einem Kurzschluss am Eingang lässt sich ablesen, dass

$$u_2 = i_2 r_e - i_1 r_b\ \text{und weiterhin}\ i_1 = i_2(\alpha-1)$$

$$\rightarrow u_2 = i_2(r_e + (1-\alpha)r_b) \rightarrow y_{22} = (r_e + (1-\alpha)r_b)^{-1} = 10\ \mathrm{mS}\ \text{und}$$

$$u_2 = i_1\left(\frac{r_e}{(\alpha-1)} - r_b\right) \rightarrow y_{12} = \left(\frac{r_e}{(\alpha-1)} - r_b\right)^{-1} = -100\ \mu\mathrm{S}\ .$$

b) Aus dem unten stehenden ESB der Gesamtschaltung können die gesuchten Größen direkt abgelesen werden



5/6

$$R_e = \left.\frac{u_e}{i_e}\right|_{u_a=0} = \frac{R_{12}}{y_{11}R_{12}+1} = 6\ \mathrm{k\Omega} \quad \text{mit} \quad R_{12} = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2};$$

$$R_a = \left.\frac{u_a}{i_a}\right|_{u_e=0} = \frac{R_E}{y_{22}R_E+1} = 33\ \Omega;$$

$$v_{uLL} = \left.\frac{u_a}{u_e}\right|_{i_a=0} = -R_a \cdot y_{21} = 0{,}33\ ;$$

$$v_{iKS} = \left.\frac{i_a}{i_e}\right|_{u_a=0} = R_e \cdot y_{21} = 60\ .$$

6/6