

Name:

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 12/13

Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)

- 1) Gegeben ist das Bändermodell $W(x)$ von Si. Markieren Sie für den Fall der n -Dotierung das Ferminiveau 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.
- 2) Welche der Aussagen zu einem idealen pn -Übergang mit angelegter Spannung $U = (W_{Fn} - W_{Fp})/q$ und zugehörigen Quasi-Fermi-Niveaus W_{Fn} und W_{Fp} sind zutreffend?
- 3) 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?
- 4) Tragen Sie in die durchgezogene Strom-Spannungskennlinie eines pn -Übergangs die üblichen Arbeitspunkte in Form eines Kreuzes mit entsprechendem Buchstaben für folgende optoelektronischen Bauelemente ein:
- 5) 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?
- 6) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man
- 7) Um welche digitale Grundschialtung handelt es sich bei dem Bild rechts unten?
- 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 $nnpn$ -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.
 - a) $U_{eb}^a = 0$; $U_{cb}^a \gg 0$;
 - b) $U_{eb}^b < U_{cb}^b = 0$.
 - c) Geben Sie die Minoritätsladungsträgerkonzentration $n_p(x_2)$ in Abhängigkeit von U_{eb} formelmäßig an.

Klausur: Grundlagen der Elektronik WS 12/13

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Klausurnote gemeinsam mit meiner Matrikelnummer im Institut ausgehängt wird.

Braunschweig, den 27. 3. 2013 Unterschrift: _____

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

- 1) Die spezifische Leitfähigkeit $\sigma(T)$ eines reinen p -Halbleiters mit einer Akzeptorkonzentration N_A und einer Donatorkonzentration $N_D = 0$ soll in den zwei Temperaturbereichen (1) und (2) für $n \ll p$ analysiert werden. Die effektiven Zustandsdichten N_c und N_v im Leitungs- und Valenzband sowie die Beweglichkeiten μ_n und μ_p der Elektronen und Löcher sollen jeweils gleich groß sein. Weiterhin gilt:

- a) Ermitteln Sie ausgehend von Ladungsneutralität ($N_D^+ + p = N_A^- + n$) eine quadratische Gleichung für p , die als weitere Parameter nur noch p_0 und N_A enthält. Lösen Sie diese Gleichung näherungsweise für die Bereiche (1) und (2). Nutzen Sie:

$$N_A^- = \frac{N_A p_0}{p + p_0}; p_0 = \frac{N_v}{4} \exp\left(-\frac{W_v - W_A}{kT}\right); \text{Bereich (1): } \frac{1}{2} \sqrt{\frac{p_0}{N_A}} \ll 1; \text{Bereich (2): } 4 \frac{N_A}{p_0} \ll 1$$

- b) Leiten Sie nun die Temperaturabhängigkeiten der Löcherkonzentration $p(T)$ in den Bereichen (1) und (2) formelmäßig ab. Nutzen Sie das Ergebnis aus a):

$$p = \sqrt{\frac{N_A N_0}{4} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/4} \exp\left(-\frac{W_A - W_v}{2kT}\right)} \text{ im Bereich (1) und } p = N_A \text{ im Bereich (2)}$$

sowie $N_L(T) = N_v(T) = N_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/4}; T_0 = 300\text{K}$

- 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. Nutzen Sie:

$$\sigma(T) = q[n(T)\mu_n(T) + p(T)\mu_p(T)] \text{ mit}$$

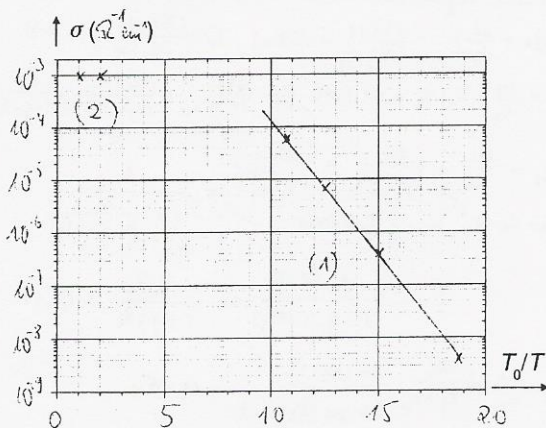
$$\mu_p(T) = \mu_n(T) = \mu_1 \left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/4} \text{ im Bereich (1) und } \mu_p(T) = \mu_n(T) = \mu_2 \text{ im Bereich (2)}$$

- d) Der betrachtete Halbleiter weist die in der Tabelle gegebenen Werte für σ in Abhängigkeit von T auf. Ergänzen Sie in der Tabelle auch die Werte von T_0/T .

T (K)	16	20	24	28	300	150
σ (1/Ωcm)	$4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	10^{-1}
T_0/T	18,75	15	12,5	10,7	1	2

Nutzen Sie die Vorlage und tragen Sie die Werte $\sigma(T_0/T)$ auf. Ergänzen Sie die Achsenbeschriftung. Markieren Sie die Bereiche (1) und (2) im Diagramm.

Formen Sie die in Bereich (1) vorliegende Temperaturabhängigkeit $\sigma(T)$ so um, dass sich in Abhängigkeit von T_0/T eine lineare Funktion ergibt. Bestimmen Sie aus der Auftragung von $\sigma(T)$ die Ionisierungsenergie $W_A - W_v$ formel- und zahlenmäßig. ($k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$).



$$N_D^+ + p = N_A^- + n$$

$$\rightarrow p = N_A^- = \frac{N_A}{4 \exp\left(\frac{W_A - W_v}{kT}\right) + 1} = \frac{N_A p_0}{p + p_0} \quad | \cdot (p + p_0)$$

$$\Leftrightarrow p^2 + p p_0 + N_A p_0 = 0 \quad \Leftrightarrow \text{Lsg. } p_{1/2} = -\frac{p_0}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p_0}{2}\right)^2 + N_A p_0}$$

$$\rightarrow \text{Bereich (1): } p_{1/2} = -\frac{p_0}{2} + \sqrt{\frac{p_0^2}{4} + N_A p_0} \quad \text{Näherung}$$

$$\approx -\frac{p_0}{2} + \sqrt{N_A p_0} = \sqrt{N_A p_0} \left(1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{p_0}{N_A}}\right) \approx \sqrt{N_A p_0}$$

$$\text{Bereich (2): } p = -\frac{p_0}{2} + \frac{p_0}{2} \sqrt{1 + \frac{4N_A}{p_0}} \approx \frac{p_0}{2} \left[-1 + \left(1 + \frac{2N_A}{p_0}\right)\right] = N_A$$

$$\text{b) Bereich (1): } p(T) = \sqrt{\frac{N_A N_0}{4} \exp\left(-\frac{W_A - W_v}{2kT}\right)} = \frac{1}{2} \sqrt{N_A N_0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/4} \exp\left(-\frac{W_A - W_v}{2kT}\right)$$

$$\text{Bereich (2): } p(T) = N_A$$

$$\text{c) } \sigma(T) = q[n(T)\mu_n(T) + p(T)\mu_p(T)] \approx q p(T) \mu_p(T)$$

$$\text{Bereich (1): } \sigma(T) = \frac{q}{2} \sqrt{N_A N_0} \exp\left(-\frac{W_A - W_v}{2kT}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/4} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/4} \mu_1$$

$$\text{Bereich (2): } \sigma(T) = q N_A \mu_2$$

$$\text{d) } \sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{W_A - W_v}{2kT}\right) \rightarrow \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = -\frac{W_A - W_v}{2kT}$$

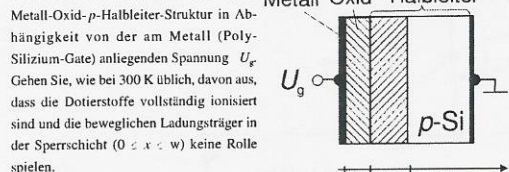
$$\Leftrightarrow W_A - W_v = -2kT_0 \frac{\ln(\sigma(T_1)/\sigma(T_2))}{T_0/T_1 - T_0/T_2}$$

T_0/T	σ (Ω ⁻¹ cm ⁻¹)
10	10 ⁻⁴
18	10 ⁻⁸

$$\rightarrow W_A - W_v = -2 \cdot 0,0258 \text{ eV} \frac{\ln(10^{-4})}{10 - 18} = 0,06 \text{ eV}$$

Name: _____

- 2) Wir betrachten in Abb. 2 eine ideale Metall-Oxid- p -Halbleiter-Struktur in Abhängigkeit von der am Metall (Poly-Silizium-Gate) anliegenden Spannung U_g .



- a) Skizzieren Sie das vereinfachte Ersatzschaltbild der Struktur beste Abb. 2. Ermitteln Sie hieraus den Gesamtkapazitätsbelag der Struktur C bezogen auf C_{ox} in Abhängigkeit von 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}.

- b) Bestimmen Sie die Bandaufwölbung W_i im Halbleiter in Abhängigkeit von der Dotierungskonzentration N_A und der Eigenleitungskonzentration n_i (Formel) mit:

$$p = N_A = N_v \exp\left(-\frac{W_v - W_p}{kT}\right); n_i = N_v \exp\left(-\frac{W_v - W_i}{kT}\right)$$

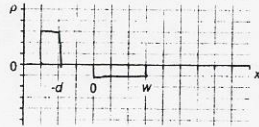
- c) Skizzieren Sie in der Vorlage die Verläufe der Raumladung, der elektrischen Feldstärke und der Bänder für den Fall des Einsetzens der schwachen Inversion (1) mit $W_i = W_v - W_p$ und der starken Inversion (2) mit $W_i = 2(W_v - W_p)$. Markieren Sie W_v , W_i , W_p und W_q .

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

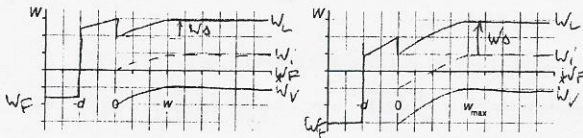
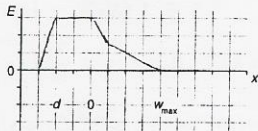
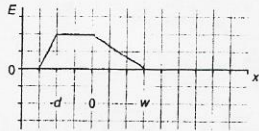
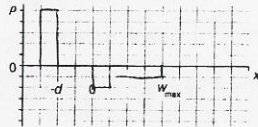
$$w_{max} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s W_i}{q^2 N_A}}$$

und daraus die minimale normierte Kapazität $(C/C_{ox})_{min}$ (Formeln und Zahlenwerte für beide Größen). Folgende Daten sind gegeben: $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $d = 50 \text{ nm}$; $\epsilon_{Si} = 2,96$; $\epsilon_0 = 11,7$; $\epsilon_s = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$; $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$.

(1) Einsetzen der schwachen Inversion



(2) Einsetzen der starken Inversion



3) Die in Abb. 3a dargestellte Verstärkerschaltung wird bei einer Betriebsspannung $U_B = -16\text{ V}$ betrieben. Als weitere Daten sind bekannt: $R_G = 2\text{ k}\Omega$; $R_1 = 20\text{ k}\Omega$; $R_2 = 100\text{ k}\Omega$; die Koppelkondensatoren C_K sind so dimensioniert, dass sie bei der Wechselstromanalyse als Kurzschlüsse betrachtet werden können.

- Die Arbeitspunkteinstellung soll analysiert werden. Zeichnen Sie dazu das Gleichstromersatzschaltbild der Schaltung aus Abb. 3a incl. Beschriftung. Bestimmen Sie, für $I_D = 0$ und den Arbeitspunkt (AP: $I_D = -60\text{ mA}$; $U_{GS} = -11\text{ V}$) Zahlenwerte für U_{GS} , U_S und U_D sowie R_1 und R_2 . Verwenden Sie dazu die Kennlinien in Abb. 3b, in die Sie die Arbeitsgerade und die beiden Arbeitspunkte eintragen. Welcher Transistortyp liegt vor?
- Für die Wechselstromanalyse zeichnen und beschriften Sie das Wechselstromersatzschaltbild der Gesamtschaltung unter Verwendung des FET-Ersatzschaltbildes in

Abb. 3c. Um welche Grundschaltung handelt es sich? Bestimmen Sie die Parameter g_m und r_d für den gegebenen Fall aus den Kennlinien in Abb. 3b (Formeln und Zahlenwerte).

- Berechnen Sie Eingangswiderstand $R_e = u_i/i_i$, den Ausgangswiderstand $R_a = u_o/i_o$ ($u_o = 0$), die Leerlauf-Spannungsverstärkung $v_{ul} = u_o/u_i$ ($R_L = \infty$) und die Spannungsverstärkung $v_s = u_o/u_G$ (Formeln und Zahlenwerte).

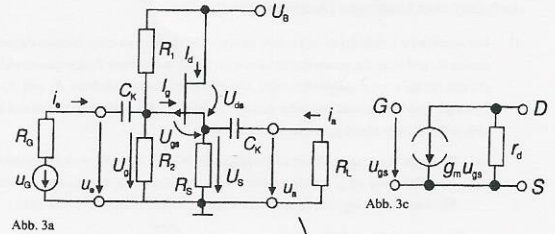


Abb. 3a

Abb. 3c

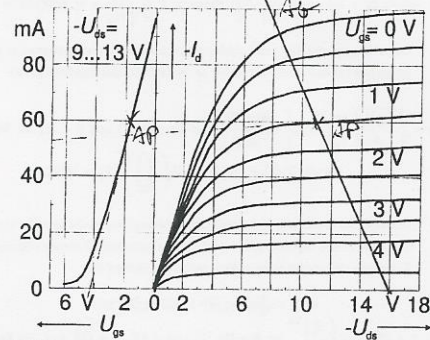
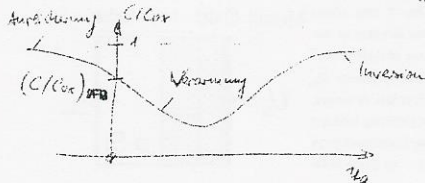


Abb. 3b

5

$$2a) \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_1} \rightarrow C = \frac{C_{ox} C_1}{C_{ox} + C_1} \rightarrow \frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{1 + C_{ox}/C_1} = \frac{1}{1 + \epsilon_{ox} \omega / (\epsilon_s \omega)}$$



$$b) \quad p = N_A = N_V \exp\left(\frac{W_F - W_F}{kT}\right) \quad n_i = N_V \exp\left(\frac{W_F - W_F}{kT}\right) \quad \rightarrow \quad W_F - W_F = kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \rightarrow (1) \quad U_S = kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (2) \quad W_S = kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

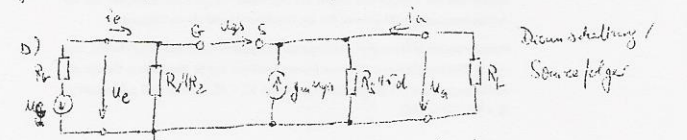
$$d) \quad \omega_{max} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 W_S}{q^2 N_A}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 (W_F - W_F)}{q^2 N_A}} = 0,88 \mu\text{m}$$

$$\left(\frac{C}{C_{ox}}\right)_{min} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \frac{\omega_{max}}{\omega}} = 0,47$$

$$3a) \quad \text{aus der Zeichnung: } R_3 = \frac{U_{GS}}{I_{D,AP}} = \frac{U_{GS} - U_{GS}}{I_{D,AP}} = \frac{-11\text{ V} - (-16\text{ V})}{-60\text{ mA}} = 83\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_{GS}}{U_{GS} - U_S} R_1 = \frac{U_{GS} + U_S}{U_{GS} - U_S} R_1 = 28\text{ k}\Omega$$

$$U_2 = U_{GS} + U_S = -3,5\text{ V}; \quad U_S = R_S I_{D,AP} = -5\text{ V}$$



$$d) \quad g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \bigg|_{U_{GS}=0} = 20,8\text{ mS}; \quad r_d = \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \bigg|_{U_{GS}=0} = 2,5\text{ k}\Omega$$

$$c) \quad R_e = \frac{U_e}{i_e} = R_1 \parallel R_2 = 21,9\text{ k}\Omega; \quad R_a = \frac{U_a}{i_a} = \frac{R_D \parallel R_L}{1 + g_m (R_D \parallel R_L)} \approx \frac{R_S}{1 + g_m R_S} = 2,9\Omega$$

$$v_{ul} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{u_a}{u_{gs} + u_a} = \frac{1}{1 + \frac{u_{gs}}{u_a}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{g_m (R_D \parallel R_L)}} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m (R_D \parallel R_S)} \approx \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = 0,665$$

$$v_s = \frac{u_a}{u_G} = \frac{R_e}{R_e + R_G} \frac{g_m (R_D \parallel R_L)}{1 + g_m (R_D \parallel R_S)} = 0,254$$