

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 14Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)

- Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man ...
- Um welche digitale Grundschialtung 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:
- 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?
- Tragen Sie in die Strom-Spannungskennlinie eines pn -Übergangs die üblichen Arbeitspunkte in Form eines Kreuzes mit entsprechendem Buchstaben für folgende optoelektronischen Bauelemente ein:

Zeichnen Sie für niedrige Frequenzen den $C(U_\#)$ -Verlauf in das Diagramm (Bild b). Markieren Sie die Arbeitspunkte der drei angegebenen Bändermodelle mit dem zugehörigen Buchstaben (c bis e) in der $C/C_i(U_\#)$ -Kennlinie.
- 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?

Gegeben ist das Bändermodell $W(x)$ von p -dotiertem Si. 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 Koordinatensystemen.
- Welche der Aussagen zu einem Halbleiter im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
- Welche der Aussagen zu einem idealen pn -Übergang mit angelegter Spannung U sind zutreffend?
- 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:
- Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen die örtlichen Verläufe der Raumladungsdichte $\rho(x)$, und des elektrischen Feldes $E(x)$ sowie das Bändermodell $W(x)$ in der angedeuteten, idealen Metall-Oxid- p -Halbleiterstruktur für den Fall der Anreicherung. Beschriften Sie W_F , W_L , W_V sowie die angelegte Spannung U . Welches Vorzeichen muss dann die Spannung U zwischen Metall und Halbleiter aufweisen?

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 14Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

- Die spezifische Leitfähigkeit $\sigma(T)$ eines reinen n -Halbleiters ($N_A = 0$) soll in den zwei Temperaturbereichen (1) mit $T < T_i$ und (2) mit $T \geq T_i$ 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 bei $T = T_0 = 300$ K jeweils gleich groß sein und folgende Temperaturabhängigkeiten aufweisen:

$$N_L(T) = N_V(T) = N_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} ; \text{ für beide Bereiche (1) und (2)}$$

$$\mu_p(T) = \mu_n(T) = \mu_0 ; \text{ im Bereich (1)}$$

$$\mu_p(T) = \mu_n(T) = \mu_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{3/2} ; \text{ im Bereich (2).}$$

Es liegt vollständige Ionisation der Dotierstoffe ($N_D^+ = N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) vor, und der Halbleiter ist im thermodynamischen Gleichgewicht ($np = n_i^2$). Nutzen Sie:

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

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

$$p = N_D ; \text{ mit } 2n_i/N_D \ll 1 ; \text{ im Bereich (1)}$$

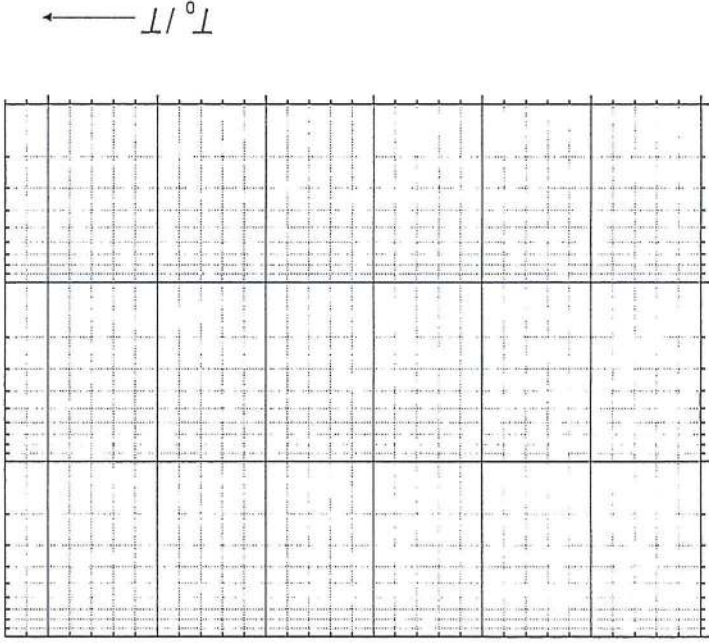
$$p = n_i ; \text{ mit } 2n_i/N_D \gg 1 ; \text{ im Bereich (2)}$$

- Leiten Sie nun die Temperaturabhängigkeiten $n(T)$ in den Bereichen (1) und (2) explizit formelmäßig ab. Wie groß ist jeweils im Vergleich $p(T)$?
- 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.
- 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 Werte von T_0/T .

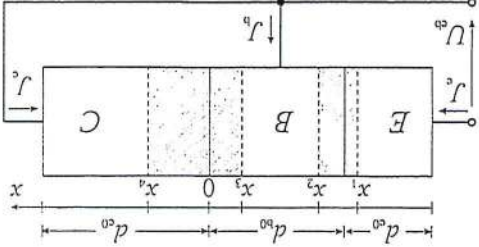
$\sigma () \rightarrow$

T (K)	σ (1/52cm)	Bereich	T_0/T
665	4,0		
525	1,0		
420	0,2		
350	0,04		
320	0,02		
310	0,02		
300	0,02		
290	0,02		

Tragen Sie die Werte für $\sigma (T)$ nun in das Diagramm unten ein. Ergänzen Sie die Achsenbeschriftung (Skalierung und Einheit). Markieren und bezeichnen Sie die beiden charakteristischen Temperaturabhängigkeiten im Diagramm. Bestimmen Sie aus der Auftragung den Bandabstand W_0 , die Beweglichkeit μ_0 , die effektive Zustandsdichte N_0 und die Übergangstemperatur T_1 Formel- und zahlenmäßig. Folgende Daten sind gegeben: $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$.



2)



Die Strom-Spannungs-Charakteristik $J_c(U_{cb})$ des npn-Transistors in Abb. 2 bei $T = 300 \text{ K}$ soll bestimmt werden. Thermische Ladungsträger in den Verarmungszonen (schraffiert) und Spannungsabfälle über den Bahngebieten sind zu vernachlässigen. Die Kontakte sind ideal ohmsch. Folgende Daten sind bekannt: $n_i = 10^9 \text{ cm}^{-3}$, $kT = 26 \text{ meV}$, $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ und $\epsilon = 10^{-12} \text{ As/Vcm}$ sowie:

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

Am pn -Übergang (mit dem Spannungsfeld von p nach n , Verarmungszone von $-w_p$ bis w_n), Akzeptoren-/Donatorkonzentration N_A/N_D im p - n -Gebiet) gilt allgemein:

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

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

- a) Berechnen Sie die Diffusionsspannungen U_{Dpb} und U_{Dpb} sowie die Ausdehnung der neutralen Basis $d_b = x_3 - x_2$ (Formeln) sowie zahlenmäßig für $U_{cb} = -0,7 \text{ V}$.
- b) Ermitteln Sie die Minoritätsladungsträgerkonzentration n_p an den Rändern der neutralen Basis x_2 und x_3 für $U_{cb} = -0,7 \text{ V}$ (Formeln). Skizzieren Sie hierfür den Verlauf von n_p in der neutralen Basis. Markieren Sie die Gleichgewichtskonzentration n_{p0} .
- c) Stellen Sie eine Differentialgleichung (DGL) für den stationären Zustand von $n_p(x)$

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 Minoritätsladungsträger-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)? Diskutieren Sie das Ergebnis.

- 3) Analysieren Sie die Schaltung in Abb. 3a. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in Abb. 3b charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben: $U_B = 18 \text{ V}$, $U_{ds} = 11 \text{ V}$, $U_{gs} = -1,5 \text{ V}$, $U_s = 4 \text{ V}$, $I_b = -25 \mu\text{A}$, $R_G = 80 \text{ k}\Omega$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$.

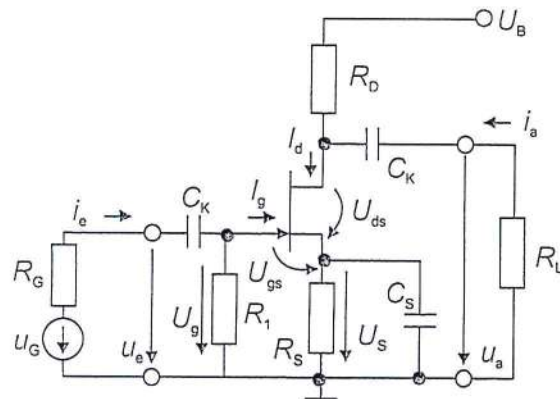


Abb. 3a

Name:

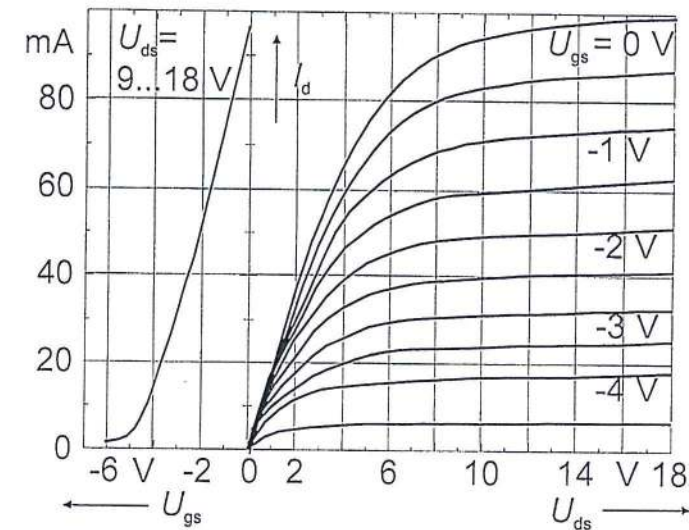


Abb. 3b

- 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_g sowie die Widerstände R_1 , R_s und R_D .
- 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.
- 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 $v_u = u_a / u_G$ ($i_a \neq 0$), die Stromverstärkung $v_i = i_a / i_e$ und den Ausgangswiderstand $R_a = u_a / i_a$ ($u_G = 0$) der Schaltung formel- und zahlenmäßig.

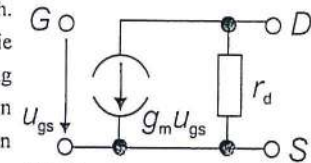
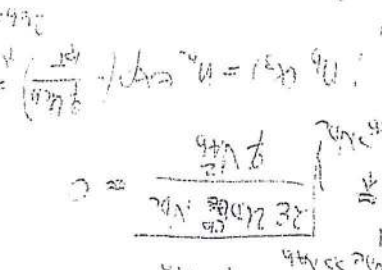
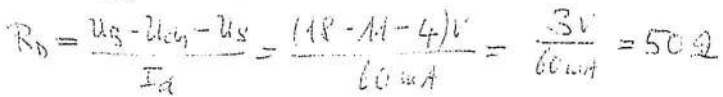


Abb. 3c

$$N_D + \frac{n}{n^2} = n - n^2 N_D - n^2 = 0$$

(2a) $\mu_{\text{MBC}} = \frac{q}{eT} \ln \left(\frac{\lambda_{\text{BCE}} N_A n_i}{N_D N_A} \right) = \frac{q}{eT} \ln \left(\frac{n_i^2}{N_D N_A} \right) = 0.95 \text{ eV}$
 $\mu_{\text{SCB}} = \frac{q}{eT} \ln \left(\frac{\lambda_{\text{BCE}} n_i}{N_D N_A} \right) = \frac{q}{eT} \ln \left(\frac{n_i^2}{N_D N_A} \right) = 0.71 \text{ eV}$
 $V_b = X_3 - X_5 = d_b - V_c - V_d = 3.72 \text{ mV}$
 $[W] W = W_n + W_p = W_p \left(\frac{N_D}{N_A} + 1 \right) \rightarrow W_p = \frac{W}{1 + \frac{N_D}{N_A}} = \frac{W}{1 + 10} = \frac{W}{11}$




$$\tau_i = \frac{L_i}{I_{e_i}} = \frac{I_{d_i} + R_{d_i} I_{m_i}}{I_{d_i} + R_{d_i} + R_{L_i}} \approx \frac{I_{m_i} R_{d_i}}{I_{d_i} + R_{L_i}} = 1.1 \mu s$$