

Musterlösung zu Übungsblatt 12

Aufgabe 1) npn-Transistor

Gegeben ist ein npn-Si-Transistor in Emitterschaltung bei einer Temperatur von $T = 300\text{K}$ mit einer Basisweite von $w = 8 \cdot 10^{-5}\text{cm}$ und einer Stromverstärkung $\beta_0 = 50$ nach folgendem Ersatzschaltbild:

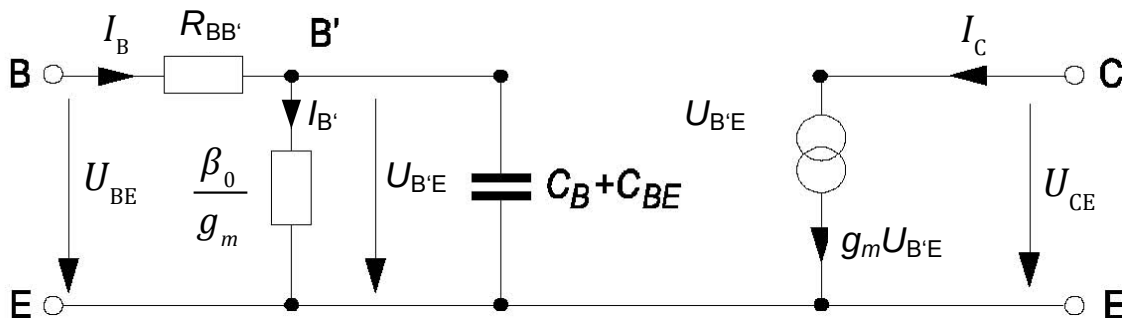


Fig. 1: Ersatzschaltbild eines npn-Transistors in Emitterschaltung

Es fließt ein Kollektorstrom von $I_C = 2,5\text{ mA}$. Die Diffusionskonstante für Elektronen in der Basis ist $D_{npB} = 25\text{ cm}^2/\text{s}$. Der gesamte Basis-Bahnwiderstand wird mit $R_{BB'} = 20\ \Omega$ angenommen.

Hinweis: Benutzen zur Bestimmung von g_m folgende Gleichung aus dem Skript:

$$g_m = \left. \frac{dI}{dU} \right|_{U_0} \approx \frac{|I_C|}{U_T} \quad (1.1)$$

a) Berechnen Sie die Eingangsimpedanz U_{BE}/I_B für $f \rightarrow 0$?

Lösung:

- Die Eingangsimpedanz in Emitterschaltung $Z_{1E}(\omega)$ berechnet sich mit Basis-Bahnwiderstand $R_{BB'}$, Steilheit g_m , Kleinsignal-Stromverstärkung β_0 und Kapazität $C_B + C_{BE}$:

$$Z_{1E}(\omega) = \frac{U_{BE}}{I_B} = R_{BB'} + Z_E = R_{BB'} + \frac{1}{\frac{g_m}{\beta_0} + j\omega(C_B + C_{BE})}$$

- Der Wert für g_m kann mit (Gl. 8.90) ermittelt werden:

$$g_m \equiv \left. \frac{dI}{dU} \right|_{U_0} \approx \frac{|I_C|}{U_T} \approx \left| \frac{I_C}{[\text{mA}]} \right| 0.04 [\text{S}] \rightarrow g_m \approx 100\text{ mS}$$

$$3) \ \omega \rightarrow 0: Z_{1E}(\omega \rightarrow 0) = R_{BB'} + Z_E = R_{BB'} + \frac{\beta_0}{g_m}, \quad Z_{1E}(\omega \rightarrow 0) = 520\ \Omega$$

b) Berechnen Sie die an den Transistorklemmen wirksame Steilheit $g_m^* := \left. \frac{I_C}{U_{BE}} \right|_{U_{CE}=0}$ im

Grenzfall kleiner Frequenzen, also für $f \rightarrow 0$?

Lösung:

$$g_m^*(\omega) := \frac{I_C}{U_{BE}} \bigg|_{U_{CE}=0} = g_m \frac{U}{U_{BE}} = g_m \frac{Z_E}{Z_E + r_{BB'}} = \frac{g_m}{1 + \frac{R_{BB'}}{Z_E}} = \frac{g_m}{1 + R_{BB'} \left[\frac{g_m}{\beta_0} + j\omega(C_B + C_{BE}) \right]}$$

$$g_m^*(0) = \frac{g_m}{1 + R_{BB'} \frac{g_m}{\beta_0}} = \frac{100 \text{ mS}}{1 + 0,04} = 96 \text{ mS}$$

- c) Berechnen Sie die Basiskapazität C_B . Wie groß ist die Transitfrequenz f_T des Bauteils unter der Annahme, dass die Basiskapazität C_B sehr viel größer ist als die Basis-Emitter Kapazität C_{BE} ?

Lösung:

Die Basiskapazität ergibt sich (Skript Gl. 8.103) zu $C_B = \frac{1}{2} \frac{w^2}{D_{npB}} g_m = 12,4 \text{ pF}$

Die Transitfrequenz f_T ist dadurch definiert, dass bei dieser Frequenz die Stromverstärkung der Emitterschaltung auf 1 abgefallen ist (siehe Skript Gl. 8.106):

$$f_T = \frac{1}{\pi} \frac{D_{npB}}{w^2} = 1,24 \text{ GHz}$$

- d) Zeichnen Sie anhand der Skizze das Niederfrequenz-Ersatzschaltbild für die Basisschaltung. Berechnen Sie die Eingangsimpedanz U_{EB}/I_E für $f \rightarrow 0$.

Lösung:

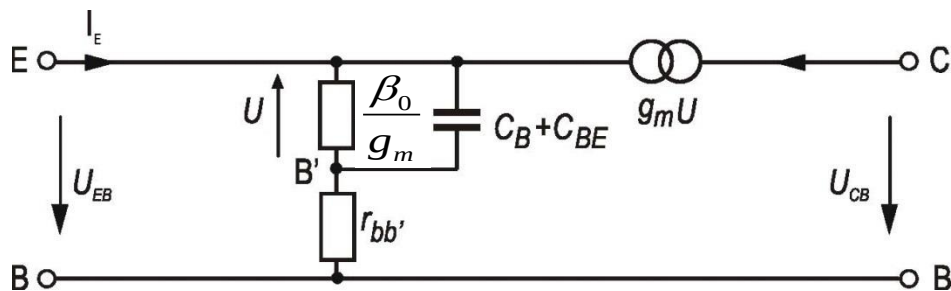


Fig. 2: Ersatzschaltbild eines npn-Transistors in Basisschaltung

Zur Berechnung der Eingangsimpedanz betrachten wir den Emitterstrom bei kleinen Frequenzen, für die die Kapazitäten vernachlässigt werden können. Die Spannung $U_{B'E}$ hat ein zu U_{EB} entgegengesetztes Vorzeichen, sodass der Kollektorstrom $g_m U_{B'E}$ und der

Emitterstrom in die selbe Richtung zeigen $I_E = \frac{U_{EB}}{R_{BB'} + \frac{\beta_0}{g_m}} + g_m U_{B'E}$. Die Spannung $U_{B'E}$

kann durch U_{EB} ausgedrückt werden, $U = U_{EB} \frac{\frac{\beta_0}{g_m}}{R_{BB'} + \frac{\beta_0}{g_m}}$, sodass

$$I_E = \frac{U_{EB}}{R_{BB'} + \frac{\beta_0}{g_m}} + U_{EB} \frac{\frac{\beta_0}{g_m}}{R_{BB'} + \frac{\beta_0}{g_m}} = U_{EB} \frac{(1 + \beta_0)}{R_{BB'} + \frac{\beta_0}{g_m}}.$$

Damit folgt für die Eingangsimpedanz $\frac{U_{EB}}{I_E} = \frac{R_{BB'} + \frac{\beta_0}{g_m}}{(1 + \beta_0)} = 10,5 \Omega$.

Aufgabe 2) MIS-Struktur

Eine MIS-Struktur besteht aus einem Metall, einem raumladungsfreien Isolator der Dicke $d_I = 100 \text{ nm}$ und einem Halbleiter. Der Halbleiter hat eine Dotierung von $n_D = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (Annahme: Störstellenerschöpfung, $n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ und einen Bandabstand von $W_G = 1 \text{ eV}$. Die Elektronenaffinitäten von Halbleiter und Isolator weisen eine Differenz von $W_{\chi,HL} - W_{\chi,Isolator} = 1 \text{ eV}$ auf. Die Differenz der Elektronenaffinität des Isolators und der Austrittsarbeit des Metalls beträgt $W_{\chi,Metal} - W_{\chi,Isolator} = 2 \text{ eV}$. Im Folgenden bezeichnen $x = x_{M-I} = 0$ und $x = x_{I-HL} = d_I$ die Grenzflächen zwischen Metall und Isolator bzw. zwischen Isolator und Halbleiter, siehe Fig. 2.

- a) Im thermischen Gleichgewicht ohne angelegte äußere Spannung sei der Halbleiter am Übergang zum Isolator eigenleitend, d.h. $n(x_{I-HL}) = n_i$. Wie groß ist die Potentialdifferenz $\varphi_H = \varphi(x_{I-HL}) - \varphi(x \rightarrow \infty)$ zwischen dem ungestörten HL und der Grenzfläche zum Isolator?

Lösung:

Im thermischen Gleichgewicht ist das Fermi-Niveau flach. Da die Elektronenaffinitäten und Austrittsarbeiten der Materialien unterschiedlich sind, entstehen an den Grenzflächen und im Isolator Potentiale, die die Bänder verbiegen. Laut Angabe ist das Potential an der Oberfläche so groß, dass der Halbleiter an der Grenzfläche zum Isolator eigenleitend wird

und es gilt $n(x_{I-HL}) = n_D \exp\left(\frac{\varphi_H}{U_T}\right) = n_i$. Daraus erhält man

$$\Rightarrow \varphi_H = -U_T \ln\left(\frac{n_D}{n_i}\right) = -374 \text{ mV} \text{ mit } U_T = 25.8 \text{ mV}.$$

- b) Welchen Energieabstand hat das Fermi-niveau zum Leitungsband, wenn die äquivalenten Zustandsdichten in den Bändern gleich groß sind? Betrachten Sie eine Stelle weit entfernt vom Übergang zum Isolator, an der die Bänder nicht verbogen sind.

Lösung:

i) $W_L - W_F$ kommt z.B. vor in: $n = n_D = N_L \exp\left(-\frac{W_L - W_F}{kT}\right)$

$$\Rightarrow W_L - W_F = -kT \ln\left(\frac{n_D}{N_L}\right)$$

ii) N_L fehlt, jedoch $N_L = N_V$: $n_i^2 = N_L N_V \exp\left(-\frac{W_G}{kT}\right) = N_L^2 \exp\left(-\frac{W_G}{kT}\right)$

iii) Einsetzen: $W_L - W_F = -kT \ln\left[\frac{n_D}{n_i} \exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right)\right] = -kT \ln\left(\frac{n_D}{n_i}\right) + \frac{W_G}{2}$

$$\rightarrow W_L - W_F = 126 \text{ meV}$$

Bem.: Man kann sich auch leicht aus dem Banddiagramm überlegen, dass $(W_L - W_F) / e - \varphi_H$ zusammen $W_G / 2$ ergeben müssen (das intrinsische Niveau liegt genau bei $W_L - W_G / 2$).

- c) Skizzieren Sie die Bandverläufe im thermischen Gleichgewicht in die untenstehende Zeichnung (Fig. 3). Mit welcher äußeren Spannung $U = U_{FB}$ zwischen Metall und Halbleiter erreicht man den Flachbandfall?

Lösung:

Hinweise zur Konstruktion der Bandverläufe:

- 1) Beginnen Sie mit der Fermienergie, da dieses im thermischen Gleichgewicht flach verläuft.
- 2) Einzeichnen der Leitungsbandkante im Halbleiter: Weit entfernt von der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Isolator ist die Leitungsbandkante nicht verbogen und der Abstand zum Fermienergie beträgt $W_L - W_F$. An der Grenzfläche ist das Leitungsband um $-e\varphi_H$ verbogen. Verbinden Sie beide Bereiche parabolisch.
- 3) Zeichnen Sie die Potentialwälle an den Grenzflächen entsprechend ihrer Größe $W_{\chi,HL} - W_{\chi,Isolator} = 1 \text{ eV}$ und $W_{\chi,Metal} - W_{\chi,Isolator} = 2 \text{ eV}$ ein.
- 4) Verbinden Sie die Teilstücke im Isolator linear, um dessen Bandverlauf zu erhalten.

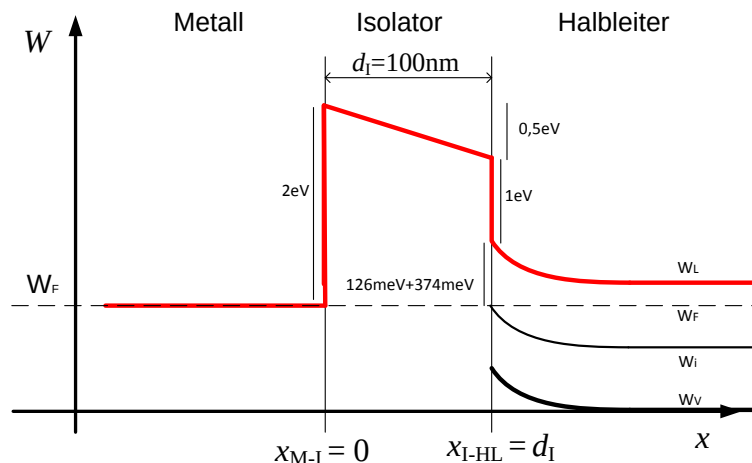


Fig. 3: Dimensionen der MIS Struktur / Bandverläufe

Den Flachbandfall kann erreicht werden, indem die Bandverbiegung von Isolator und Halbleiter kompensiert wird. Dazu muss insgesamt eine Spannung von $374\text{ meV} + 0,5\text{ eV} = 0,874\text{ eV}$ angelegt werden, wobei der Pluspol an das Metall anzuschließen ist.