Zusammenfassung vom 18.11.2011

npn-Transistor ➔ *zwei Dioden in Reihe geschaltet: 1) np-Diode in Durchlassrichtung, 2) pn-Diode in Sperrrichtung*

➔ *gemeinsame Basis (p-HL) muss so dünn sein, dass für ihre Dicke d_p gilt:* $d_B \ll L_{n,p}^B$ $\quad L^B_{n,p}$ *= Diffusionslänge in der Basis*

➔ *Stromverstärkung* $B_N = I_C/I_B \cong 50 - 500$

np-Diode *(vernach-lässige Stromver-stärkung)* *Durchlassrichtung mit Spannung* U_{BE}

➔ *Minoritäts-ladungsträger:*

$$p_n^E = p_n^E(U_{BE}=0)\left[e^{\frac{eU_{BE}}{kT}} - 1\right] \qquad n_p^B = n_p^B(U_{BE}=0)\left[e^{\frac{eU_{BE}}{kT}} - 1\right]$$

➔ *Löcherstrom Basis → Emitter, der exponentiell mit* U_{BE} *anwächst:*

$$I_B \propto j_{p,BE}^{Diff} = \frac{eD_p^E}{L_p^E} p_n^E(U_{BE}=0)\left[e^{\frac{eU_{BE}}{kT}} - 1\right]$$

pn-Diode *Sperrrichtung mit Spannung* U_{CB}

➔ *Minoritätsladungsträger können ungehindert (d.h. unabhängig von* U_{CB}*) durch die Sperrschicht fließen*

➔ *Sättigungsstrom in Sperrrichtung:*

$$j_{sätt}^{BC} = \frac{eD_p}{L_p} p_n^C + \frac{eD_n}{L_n} n_p^B$$

Zusammenfassung vom 18.11.2011

pn-Diode

➔ $j^{BC}_{sätt}$ *ist proportional zur Konzentration der Minoritätsladungsträger, insbesondere zur Elektronendichte* n^B_p *in der Basis:*

$$I_C \propto j^{BC}_{sätt} \propto n^B_p \quad \Rightarrow \quad I_C \propto n^B_p(U_{BE}=0)\left[e^{\frac{eU_{BE}}{kT}}-1\right]$$

➔ *Kollektorstrom* I_C *nimmt exponentiell mit* U_{BE} *zu*

➔ *Kollektorstrom* I_C *wird durch* U_{BE} *gesteuert*

Ursache der Stromverstärkung B_N

$$d_B << L^B_{n,p}$$

➔ *wegen der geringen Dicke der Basisschicht können fast alle Elektronen, die vom Emitter* $\rightarrow$ *Basis gelangt sind, zum Kollektor weiterwandern, ohne dass sie in der Basisschicht mit einem Loch rekombinieren*

➔ *stationäres Gleichgewicht für Minoritätsladungsträger* n^B_p *in der Basisschicht wird verschoben*

➔ *dies ist gleichbedeutend mit einer erheblich reduzierten effektiven Lebensdauer der Minoritätsladungsträger in der Basisschicht, da diese sehr schnell zum Kollektor diffundieren:*

$$L^B_n = \sqrt{D^B_n \tau^B_n} \quad \Rightarrow \quad \tau^B_n = \frac{{L^B_n}^2}{D^B_n} \propto {L^B_n}^2$$

Zusammenfassung vom 18.11.2011

effektive Lebensdauer

➔ *wegen der geringen Dicke der Basisschicht ist die effektive Lebensdauer $\tau^B_{n,eff}$ in der Basisschicht bestimmt durch die Dicke der Basis:*

$$\tau^B_{n,eff} = d_B^2 / D_n^B \quad \Rightarrow \quad \tau^B_{n,eff} << \tau^B_n$$

Rekombinationsrate für n^B

$$\frac{\partial n^B}{\partial t} = -\frac{1}{e}\vec{\nabla}\cdot\vec{j}^{\,Diff}_{n,BE} - \frac{n^B - n^B_p}{\tau^B_{n,eff}}$$

stationäre Lösung

$$\frac{\partial n^B}{\partial t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 n^B}{\partial x^2} = \frac{n^B - n^B_p}{D^B_n\,\tau^B_{n,eff}} \cong \frac{1}{d_B^2}\left(n^B - n^B_p\right)$$

$$\Rightarrow \quad n^B(x) = n^B_p\left(1 + e^{-\frac{x}{d_B}}\right)$$

$$j^{Diff}_{n,BE} = -e D^B_n \frac{\partial n^B(x)}{\partial x} \quad \Rightarrow \quad I_C \propto j^{BC}_{sätt} \cong j^{Diff}_{n,BE} = \frac{e D^B_n}{d_B} n^B_p(U_{EB}=0)\left[e^{\frac{eU}{kT}} - 1\right]$$

Stromverstärkung

$$\Rightarrow \quad B_N = \frac{I_C}{I_B} = \frac{j^{BC}_{sätt}}{j^{Diff}_{p,BE}} \cong \frac{j^{Diff}_{n,BE}}{j^{Diff}_{p,BE}} = \frac{D^B_n}{D^E_p}\,\frac{L^E_p}{d_B}\,\frac{n^B_p(U_{EB}=0)}{p^E_n(U_{EB}=0)}$$

$$\Rightarrow \quad B_N \cong \frac{L^E_p}{d_B} \cong \frac{L^B_n}{d_B} >> 1$$

da $p^E_n(U_{EB}=0) = n^B_p(U_{EB}=0)$, $D^B_n \cong D^E_p$, $L^B_n \cong L^E_p$

Zusammenfassung vom 18.11.2011

Magnetfeld $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$ *H = magnet. Feldstärke (Hilfsgröße)*
B_0 = äußeres Magnetfeld

Magnetisierung $\vec{M} = \frac{1}{V}\sum_i \vec{\mu}_i$ ➔ $\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$ *$\vec{\mu}_i$ = magnet. Dipolmoment*
$\vec{B}$ = Magnetfeld in Materie

magnetische Suszeptibilität $\chi = \mu_0 \frac{\partial M}{\partial B_0}$ $\chi_{\mu\nu} = \mu_0 \frac{\partial M_\mu}{\partial B_{0\nu}}$ *im Allgemeinen Tensor 2. Stufe*

diamagnetisch $\chi < 0, \quad \chi \neq \chi(B_0, T)$

paramagnetisch $\chi > 0, \quad \chi \neq \chi(B_0)$

➔ $\vec{M} = \chi \frac{1}{\mu_0} \vec{B}_0$ *häufig linearer Zusammenhang*

Vektorpotential $\vec{B}_0 = \vec{\nabla} \times \vec{A}, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$ ➔ $\vec{A} = \frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{B}_0$ *$\vec{B}_0$ = konstant*

magn. Bahnmoment
(klassisch: Kreisstrom)

$\vec{\mu}_l = -\mu_B \vec{L}$ $\hbar\vec{L} = \hbar \sum_i \vec{l}_i = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{p}_i$ *Bahndrehimpuls der Elektronen*

$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ $= 5.788 \cdot 10^{-5}\, eV\, T^{-1}$ *Bohrsches Magneton*

magn. Spinmoment $\vec{\mu}_s = -\mu_B g_0 \vec{S}$ $\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i$ *Spin der Elektronen*

elektronischer g-Faktor $g_0 = 2\left[1 + \frac{\alpha}{2\pi} + O(\alpha^2)\right] = 2.0023 \cong 2$ $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c} \cong \frac{1}{137}$

Feinstrukturkonstante

Zusammenfassung vom 18.11.2011

Gesamtdrehmoment und gesamtes magnetisches Moment

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad \Rightarrow \quad \vec{\mu} = -\mu_B \vec{J} = -\mu_B \left(\vec{L} + g_0 \vec{S} \right)$$

Feldimpuls

$$\vec{p}_i \to \vec{p}_i + e\vec{A}(\vec{r}_i) = \vec{p}_i - \frac{e}{2} \vec{r}_i \times \vec{B}_0$$

Hamiltonoperator im äußeren Magnetfeld (*ohne Spin*)

$$H = \frac{1}{2m} \sum_i \left[\vec{p}_i^{\,2} + e\vec{A}(\vec{r}_i) \right]^2$$

$$\Rightarrow \quad H = \frac{1}{2m} \vec{p}^{\,2} + \mu_B \vec{L} \cdot \vec{B}_0 + \frac{e^2}{8m} B_0^2 \sum_i \left(x_i^2 + y_i^2 \right) \qquad \vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$$

Hamiltonoperator mit Spin

$$H_s = -\vec{m}_s \cdot \vec{B}_0 = \mu_B g_0 \vec{S} \cdot \vec{B}_0$$

$$\Rightarrow \quad H = H_0 + H_{int} \qquad H_0 = \frac{1}{2m} \vec{p}^{\,2}$$

$$\Rightarrow \quad H_{int} = \mu_B \left(\vec{L} + g_0 \vec{S} \right) \cdot \vec{B}_0 + \frac{e^2}{8m} B_0^2 \sum_i \left(x_i^2 + y_i^2 \right)$$

Störungstheorie (*1. und 2. Ordnung*)

$$\Delta E_n = \langle n | H_{int} | n \rangle + \sum_{n' \neq n} \frac{\left| \langle n | H_{int} | n' \rangle \right|^2}{E_n - E_{n'}}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta E_n = \mu_B \vec{B}_0 \cdot \langle n | \vec{L} + g_0 \vec{S} | n \rangle + \sum_{n' \neq n} \frac{\left| \langle n | \mu_B \vec{B}_0 \cdot \left(\vec{L} + g_0 \vec{S} \right) | n' \rangle \right|^2}{E_n - E_{n'}} + \frac{e^2}{8m} B_0^2 \langle n | \sum_i \left(x_i^2 + y_i^2 \right) | n \rangle$$

Langevin Paramagnetismus — *Van-Vleck-Paramagnetismus* — *Langevin Diamagnetismus*