Impuls- und Digitaltechnik

Version: 1.0

http://bauki.virtualave.net

Jochen Bauknecht
Andreas Selig

19. März 2001

Inhaltsverzeichnis

Dieses Dokument wurde mit LaTeX gesetzt.

0 maßgebliche Trivialitäten

0.0 banale Trivialitäten

$$\boxed{U = RI \qquad I = \frac{U}{R} \qquad R = \frac{U}{I}} \tag{1}$$

$$\boxed{U_2 = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}} \tag{2}$$

$$\boxed{Q = CU = It} \tag{3}$$

$$\boxed{W_C = \frac{1}{2} C U^2} \boxed{W_L = \frac{1}{2} L I^2} \tag{4}$$

$$\boxed{\frac{\partial U}{\partial t} C = i_C} \boxed{\frac{\partial I}{\partial t} L = u_L} \tag{5}$$

0.1 mathematische Trivialitäten

$$\boxed{x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \tag{6}$$

1 Die Diode

1.1 Die wichtigsten Beziehungen

- Diffusionsspannung

$$\boxed{\Phi_i = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2 y}} \tag{1}$$

- Überschußdichten an den Rändern der Raumladungszone

$$\boxed{p_n'(x_n) = p_{n0} \left[e^{\frac{q}{kT} U_{PN} - 1} \right]} \tag{2}$$

$$\boxed{n_n'(-x_p) = n_{p0} \left[e^{\frac{q}{kT} U_{PN} - 1} \right]} \tag{3}$$

- Diodengleichung

$$\boxed{I = I_S \left[e^{\frac{q}{NkT} U_{PN}} - 1 \right]} \tag{4}$$

  - lange Abmessung

$$\boxed{I_S = qA \left[\frac{D_p}{L_p} p_{p0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right]} \tag{5}$$

  - kurze Abmessung

$$\boxed{I_S = qA \left[\frac{D_p}{w_n'} p_{p0} + \frac{D_n}{w_p'} n_{p0} \right]} \tag{6}$$

- Kapazitäten
  - Sperrschichtkapazität

$$\boxed{C_j = \frac{C_{j0}}{\left[1 - \frac{U_{PN}}{\Phi_i} \right]^M}} \tag{7}$$

  - Diffusionskapazität

$$\boxed{C_d = \tau_T \frac{q}{nkT} I_S e^{\frac{q}{nkT} U_{PN}}} \tag{8}$$

τ_T ... Ladungsträgerlebensdauer
n ... Idealitätsfaktor (≥ 1)

- Speicherzeit

$$\boxed{t_s \approx \tau_T \frac{I_F}{|I_R|}} \qquad |I_R| \gg I_F \tag{9}$$

- Weite der Raumladungszone

$$\boxed{w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r}{q} \left[\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right] [\Phi_i - U_{PN}]}} \tag{10}$$

2 Der Bipolartransistor

2.1 Die wichtigsten Beziehungen

- Normalbetrieb
  - Kollektorstrom

$$\boxed{I_C = I_S\left[e^{\frac{q}{kT}U_{BE}}-1\right] = I_S\left[e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}-1\right] \approx I_s e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \text{ bei } U_{BE} >> U_T} \tag{1}$$

  - Basisstrom

$$\boxed{I_B = \frac{I_S}{\beta_N}\left[e^{\frac{q}{kT}U_{BE}}-1\right] = \frac{I_S}{\beta_N}\left[e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}-1\right] \approx \frac{I_S}{\beta_N} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \text{ bei } U_{BE} >> U_T} \tag{2}$$

  - Stromverstärkung

$$\boxed{\alpha_N = \frac{I_C}{I_E}} \tag{3}$$

$$\boxed{\beta_N = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha_N}{1-\alpha_N}} \tag{4}$$

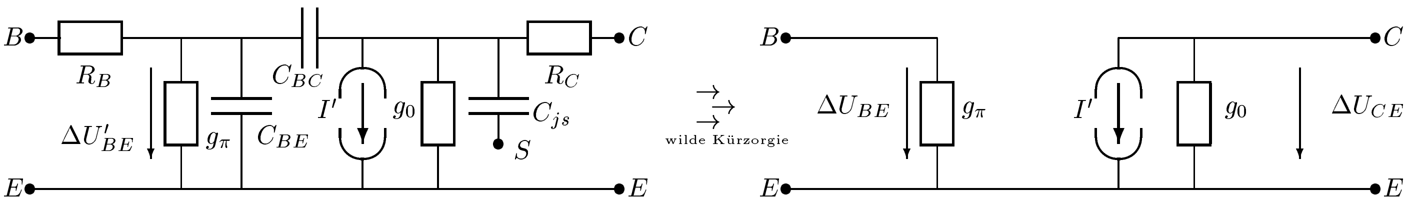
- Inversbetrieb
  - Emitterstrom

$$\boxed{I_E = I_S\left[e^{\frac{q}{kT}U_{BC}}-1\right] = I_S\left[e^{\frac{U_{BC}}{U_T}}-1\right]} \tag{5}$$

  - Basisstrom

$$\boxed{I_B = \frac{I_S}{\beta_I}\left[e^{\frac{q}{kT}U_{BC}}-1\right] = \frac{I_S}{\beta_I}\left[e^{\frac{U_{BC}}{U_T}}-1\right]} \tag{6}$$

2.1.1 Kleinsignal ESB



(stolen from www.agutscher.de) $I' = g_m \Delta U'_{BE}$ $I' = g_m \Delta U_{BE}$

- Steilheit

$$\boxed{g_m = \left.\frac{\partial I_C}{\partial U'_{BE}}\right|_{U_{CE}=\text{const}} = \frac{q}{kT} I_C = \frac{I_C}{U_T}} \qquad \boxed{U_T = 25.5\text{mV}} \tag{7}$$

- differentieller Eingangsleitwert

$$\boxed{g_\pi = \left.\frac{\partial I_B}{\partial U'_{BE}}\right|_{U_{CE}=\text{const}} = \left.\frac{\partial I_B}{\partial I_C}\frac{\partial I_C}{\partial U'_{BE}}\right|_{U_{CE}=\text{const}} = \frac{g_m}{\beta'_N}} \tag{8}$$

- differentieller Ausgangsleitwert

$$\boxed{g_0 = \left.\frac{\partial I_C}{\partial U'_{CE}}\right|_{U_{BE}=\text{const}} = \left.\frac{\partial I_C}{\partial U'_{CE}}\right|_{U_{BE}=\text{const}} = \frac{I_C(U_{BC}=0)}{U_{AN}}} \tag{9}$$

$$\boxed{\beta_N = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha_N}{1-\alpha_N}} \tag{10}$$

3 Der Feldeffekttransistor

3.1 Die wichtigsten Beziehungen

- n-Kanal
  - Widerstandsbereich (Anfaufbereich, Triodenbereich) ($U_{GS} - U_{Tn} > U_{DS}$)

$$\boxed{I_{DS} = \beta_n \left[(U_{GS} - U_{Tn}) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]} \tag{1}$$

  - Sättigunsbereich ($U_{GS} - U_{Tn} \leq U_{DS}$)

$$\boxed{I_{DS} = \frac{\beta_n}{2} \left[U_{GS} - U_{Tn} \right]^2} \tag{2}$$

  - Einsatzspannungen

$$\text{Schwellspannung: } \boxed{U_{Tn} = U_{T0n} + \gamma \left[\sqrt{2\Phi_F + U_{SB}} - \sqrt{2\Phi_F} \right]} \tag{3}$$

$$\boxed{U_{T0n} = U_{FB} + 2\Phi_F + \gamma \sqrt{2\Phi_F}} \tag{4}$$

$$\boxed{\gamma = \frac{\sqrt{q N_A 2 \epsilon_0 \epsilon_{\mathrm{Si}}}}{C'_{\mathrm{Ox}}}} \tag{5}$$

$$\boxed{\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}} \tag{6}$$

$$\boxed{\beta_n = k_n \frac{w}{l} = \nu_n C'_{\mathrm{Ox}} = \mu_n \frac{W}{L} C'_{\mathrm{Ox}}} \tag{7}$$

$$\text{Prozessverstärkungsfaktor: } \boxed{k_n = \mu_n C'_{\mathrm{Ox}}} \qquad \boxed{\nu_n = \mu_n \frac{W}{L}} \tag{8}$$

- allgemein
  - Oxidkapazität

$$\boxed{C_{\mathrm{Ox}} = W L C'_{\mathrm{Ox}}} \qquad \boxed{C'_{\mathrm{Ox}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d}} \tag{9}$$

μ_n	...	Beweglichkeitsfaktor
d	...	Dicke vom Oxid

- p-Kanal
  - Widerstandsbereich ($|U_{GS} - U_{Tn}| > |U_{DS}|$)

$$\boxed{I_{DS} = -\beta_p \left[(U_{GS} - U_{Tp}) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]} \tag{10}$$

  - Sättigunsbereich ($|U_{GS} - U_{Tn}| \leq |U_{DS}|$)

$$\boxed{I_{DS} = -\frac{\beta_p}{2} \left[U_{GS} - U_{Tp} \right]^2} \tag{11}$$

  - Einsatzspannungen

$$\boxed{U_{Tp} = U_{T0p} - \gamma \left[\sqrt{-2\Phi_F - U_{SB}} - \sqrt{-2\Phi_F} \right]} \tag{12}$$

$$\boxed{U_{T0p} = U_{FB} + 2\Phi_F - \gamma \sqrt{-2\Phi_F}} \tag{13}$$

$$\boxed{\gamma = \frac{\sqrt{q N_D 2 \epsilon_0 \epsilon_{\mathrm{Si}}}}{C'_{\mathrm{Ox}}}} \tag{14}$$

$$\boxed{\Phi_F = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i}} \tag{15}$$

$$\boxed{\beta_p = k_p \frac{w}{l} = \nu_p C'_{\mathrm{Ox}} = \mu_p \frac{W}{L} C'_{\mathrm{Ox}}} \tag{16}$$

$$\text{Prozessverstärkungsfaktor: } \boxed{k_p = \mu_p C'_{\mathrm{Ox}}} \qquad \boxed{\nu_n = \mu_n \frac{W}{L}} \tag{17}$$

3.2 Statische CMOS-Logik

- Im P-MOS Zweig wird $Q(\bar{I})$ logisch realisiert (oben)
- Im N-MOS Zweig wird $\overline{Q}(I)$ logisch realisiert (unten)
- Weiten der Transistoren:

$$\boxed{w_p = n_p \cdot \beta_R \cdot w_g} \tag{18}$$

n_p	...	Anzahl der p-Transistoren in Serie
w_g	...	Weite des Minimaltransistors
β_R	...	$\frac{\beta_p}{\beta_n}$

$$\boxed{w_n = n_n \cdot w_g} \tag{19}$$

n_n	...	Anzahl der n-Transistoren in Serie
w_g	...	Weite des Minimaltransistors

- Abschätzungen für die Kapaziäten

$$\begin{aligned} C_{GS} &\approx C_g \approx \frac{2}{3} C_{\text{Ox}} = WLC'_{\text{Ox}} \\ C_{GD} &\approx \frac{2}{3} C_g \\ C_j &\approx \frac{2}{3} C_g \end{aligned}$$

C_g ... geometrische Kapazität des Minimaltransistors

P-Zweig	N-Zweig
$C_{GSp} = \beta_r \cdot n_p \cdot C_{GS}$	$C_{GSn} = n_n \cdot C_{GS}$
$C_{GDp} = \beta_r \cdot n_p \cdot C_{GD}$	$C_{GDn} = n_n \cdot C_{GD}$
$C_{jp} = \beta_r \cdot n_p \cdot C_J$	$C_{jn} = n_n \cdot C_J$

- Verzögerungszeit

$$\boxed{t_p = \frac{U_{DD} \cdot C_L}{I} \alpha = \frac{2C_{\text{int}}}{\beta U_{\text{DD}}} \alpha} \tag{20}$$

α ... ist der Faktor für die zu erreichende Ausgangsspannung im Zweifelsfall $\boxed{\alpha = \frac{1}{2}}$

- Verlustleistung (dynamisch, ohne Querstrom)

$$\boxed{P_V = f \cdot C_L \cdot U_{DD}^2} \tag{21}$$

- Power-Delay-Produkt

$$\boxed{\text{PDP} = P_V \cdot t_p} \tag{22}$$

3.3 C-MOS Inverter

- Übertragungskennlinie $U_2 = \Phi(U_1)$

$$\boxed{U_2 = \begin{cases} U_{DD} & U_1 < U_T \\ U_{DD} - \frac{\beta \cdot R}{2}(U_1 - U_T)^2 & U_2 - U_T \geq U_1 > U_T \\ U_1 - U_T + \frac{1}{\beta R} - \sqrt{((U_1 - U_T)\beta R + 1)^2 - U_{DD}\beta R} & U_1 > U_2 + U_T \end{cases}} \tag{23}$$

- Querstrom

$$\boxed{I_D = \begin{cases} 0 & U_1 < U_T \\ \frac{\beta}{2}(U_1 - U_T)^2 & U_2 - U_T \geq U_1 > U_T \\ \beta[(U_1 - U_T) \cdot U_2 - \frac{1}{2}U_2^2] & U_1 > U_2 + U_T \end{cases}} \text{ mit } \boxed{\beta = \begin{cases} -\beta_p & \text{für p-kanal} \\ +\beta_n & \text{für n-kanal} \end{cases}} \tag{24}$$