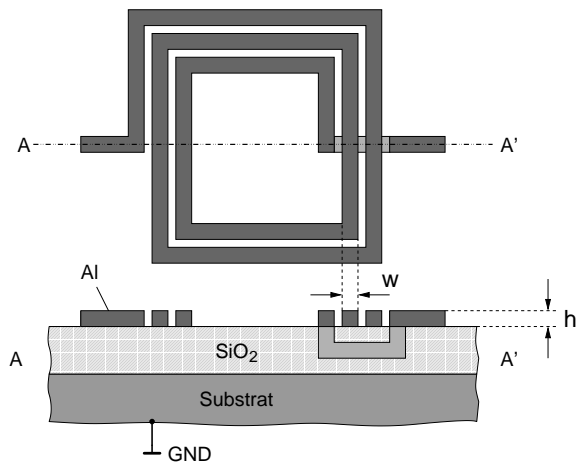


Aufgabe 1: Passive Bauelemente (20 Punkte)

Konstanten: Boltzmann-Konstante $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K}$
 Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$
 spez. Widerstand Aluminium ρ_{Al} s. Abb. 1.1 (b)

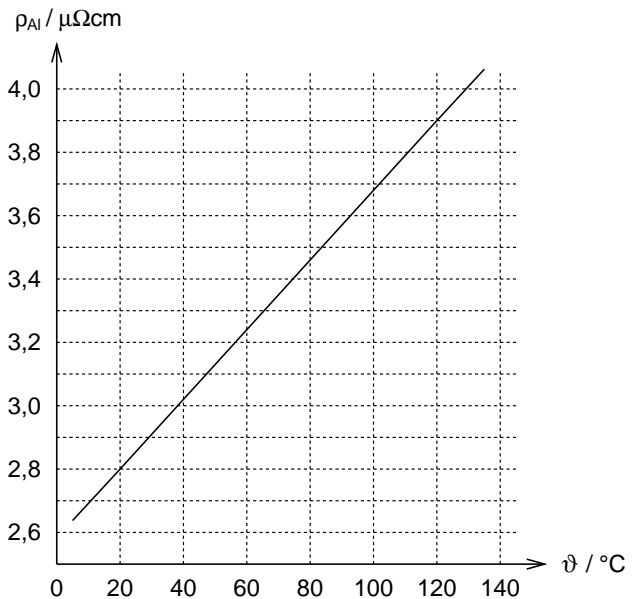


Länge der Leiterbahn: $l = 1141 \mu\text{m}$

Breite der Leiterbahn: $w = 5 \mu\text{m}$

Höhe der Leiterbahn: $h = ?$

(a)



(b)

Abb. 1.1: (a) Integrierte Spule (b) spezifischer Widerstand von Aluminium

1.1 Zuerst wird eine integrierte Spule betrachtet, welche mit einer spiralförmig verlaufenden Leiterbahn aus Aluminium (Al) realisiert wird (s. Abb. 1.1 (a)).

Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild (ESB) der integrierten Spule und erläutern Sie alle darin enthaltenen Elemente!

Hinweis: Nehmen Sie an, dass das Substrat sehr hochohmig ist!

1.2 In diesem Aufgabenpunkt sollen alle im ESB vorkommenden parasitären Kapazitäten vernachlässigt werden.

a) Der parasitäre Widerstand der Spule verursacht thermisches Rauschen. Erläutern Sie kurz die Ursache dafür!

b) Die Rauschleerlaufspannung der Spule wurde bei der Temperatur $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ und im betrachteten Mess-Frequenzbereich der Breite $\Delta f = 600 \text{ MHz}$ zu $\sqrt{u_r^2} = 10,1 \mu\text{V}$ bestimmt. Berechnen Sie den parasitären Widerstand der Spule!

c) Bestimmen Sie bei $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ den Flächenwiderstand der als Spule verwendeten Leiterbahn sowie deren Höhe h ! Gehen Sie dabei von den in Abb. 1.1 (a) angegebenen geometrischen Daten aus.

- d) Die Spule besitzt bei der Frequenz $f_1 = 400 \text{ MHz}$ einen Verlustwinkel $\tan \delta_L = 0,93$. Geben Sie an, wie der Verlustwinkel allgemein von der gesamten Impedanz Z der Spule abhängt und bestimmen Sie die Induktivität L der Spule!
- e) Das zur Realisierung der Spule verwendete Leiterbahnmaterial (Aluminium) besitzt den in Abb. 1.1 (b) dargestellten temperaturabhängigen spezifischen Widerstand ρ_{Al} . Ermitteln Sie mit Hilfe der Abbildung den Temperaturkoeffizienten α_{Al} des spezifischen Widerstandes bei $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$!
- f) Welcher Betriebstemperatur darf die Spule höchstens ausgesetzt sein, wenn sich die Güte der Spule bei der Frequenz f_1 maximal um 10% verringern darf?
Hinweis: Alle anderen Bauelemente können hier als temperaturunabhängig angenommen werden.
- g) Die Temperatur wird nun auf $\vartheta = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht. Wie ändert sich der Temperaturkoeffizient α_{Al} ?
- h) In Abb. 1.1 (b) ist zu erkennen, dass der spezifische Widerstand des Metalls Aluminium mit steigender Temperatur zunimmt. Wodurch kommt dieser Effekt zu Stande?

1.3 Von nun an werden wieder sämtliche parasitären Kapazitäten der Spule berücksichtigt!

- a) Aus einer Messung ergibt sich die Eigenresonanzfrequenz der Spule zu $f_0 = 5 \text{ GHz}$. Ermitteln Sie die gesamte effektive parasitäre Kapazität C der Spule!
Hinweis: Der parasitäre Widerstand der Spule kann hierbei vernachlässigt werden!
- b) Mit Hilfe der Spule soll ein LC-Schwingkreis für eine Oszillatorschaltung realisiert werden. Durch die Parallelschaltung der Spule mit einer (idealen) Kapazität C_p wird dazu die Resonanzfrequenz des Schwingkreises auf $f_r = 2,5 \text{ GHz}$ eingestellt. Bestimmen Sie den Kapazitätswert C_p , den Sie zur Einstellung der geforderten Resonanzfrequenz benötigen?
Hinweis: Berücksichtigen Sie hierbei die parasitären Kapazitäten der Spule!
- c) Die Kapazität C_p soll als MIM (Metall-Isolator-Metall)-Kapazität realisiert werden. Dazu stehen die beiden in Abb. 1.2 dargestellten Möglichkeiten zur Verfügung. Wählen Sie, wenn möglich, für beide Realisierungen die Kantenlänge a des Kondensators so, dass er die berechnete Kapazität C_p aufweist und gleichzeitig eine Kantenlänge $a < 100 \text{ } \mu\text{m}$ besitzt. Begründen Sie ggf., warum es nicht möglich ist!

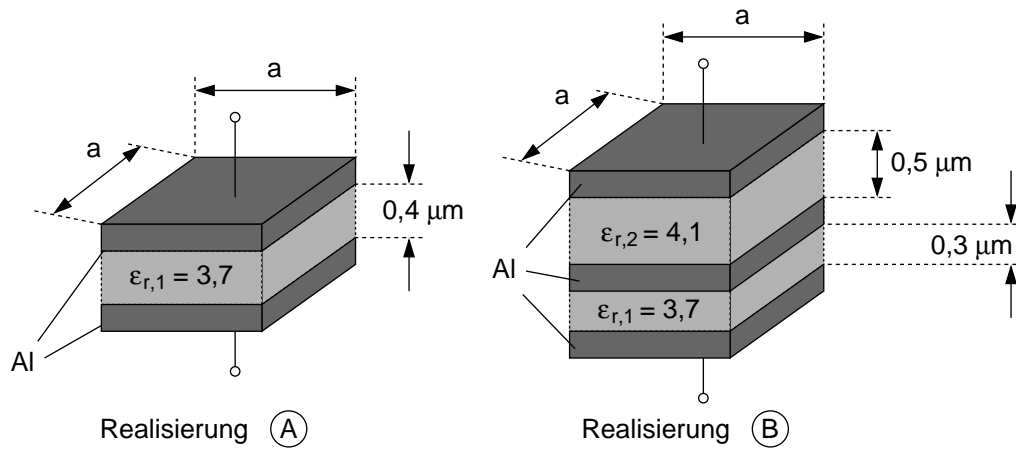


Abb. 1.2: Zwei Realisierungsmöglichkeiten für die Kapazität C_p .

Aufgabe 2: pn-Diode (20 Punkte)

Für eine pn-Diode aus Silizium mit abruptem Übergang gelten bei 300 K folgende Werte:

Donatordotierung	$N_D = 1,125 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3}$
Akzeptordotierung	$N_A = 2,25 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3}$
Sperrschichtkapazität bei $U = 0$	$C_{sp0} = 5 \text{ pF}$
Löcherlebensdauer im n-Gebiet	$\tau_p = 0,1 \mu\text{s}$
relative Dielektrizitätskonstante von Silizium	$\epsilon_r = 11,9$
Dielektrizitätskonstante in Vakuum	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
Temperaturspannung	$U_T = 26 \text{ mV}$
Diffusionskonstante für Löcher	$D_p = 10 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
intrinsische Dichte	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^3}$

- 2.1 Bestimmen Sie die Diffusionsspannung U_D der Diode!
- 2.2 Welches Verhältnis $\frac{w_p}{w_n}$ besteht zwischen den Weiten der Raumladungszone im p- und im n-Gebiet?
- 2.3 Wie groß ist die Diodenfläche A ?
- 2.4 Berechnen Sie die Sperrschichtkapazität für eine Diodenspannung von $U = -1 \text{ V}$!
Hinweis: U ist positiv in Flussrichtung.
- 2.5 Welche beiden physikalischen Vorgänge bestimmen den Verlauf der Minoritätsträgerdichte vom Rand der Raumladungszone ins Bahngebiet hinein?
- 2.6 Skizzieren Sie qualitativ in Abb. 2.1 die Verteilung der Minoritäten im Bahngebiet für eine positive Diodenspannung! Beachten Sie die Größenverhältnisse der beiden Randkonzentrationen! Berücksichtigen Sie den Einfluss von L_n und L_p mit Hilfe zweier geeigneter Hilfsgeraden!

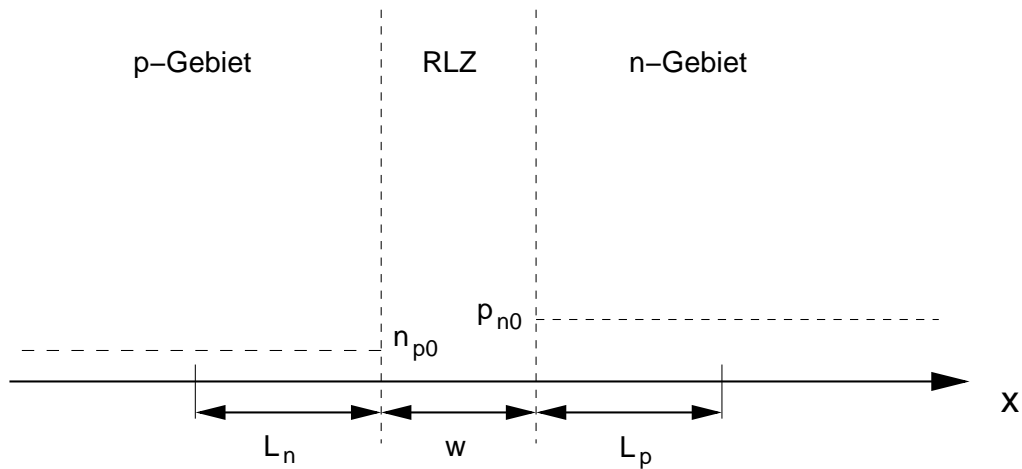


Abb. 2.1:

An der Diode liege nun eine Flussspannung von $U = 0,7 \text{ V}$ an.

- 2.7 Wie groß ist die Diffusionslänge L_p der Löcher im n-Gebiet?
- 2.8 Welche Löcherdichte stellt sich bei dieser Flussspannung am Rand der Raumladungszone im n-Gebiet ($x = w_n$) ein?
- 2.9 Berechnen Sie den Löcherdiffusionsstrom $I_p(x = w_n)$ am Rand der Raumladungszone im n-Gebiet mit Hilfe der Diffusionsgleichung!
- 2.10 Wie groß ist der Sperrsättigungsstrom I_S , wenn bei der Diodenspannung von $U = 0,7 \text{ V}$ ein Strom von $I = 5 \text{ mA}$ fließt?
- 2.11 Wie groß ist der Elektronenstrom I_n in der Raumladungszone für $U = 0,7 \text{ V}$?

Hinweis: Vernachlässigen Sie wie üblich Rekombination in der Raumladungszone!

Aufgabe 3: Bipolartransistor (20 Punkte)

- 3.1 Zeichnen Sie die Schaltsymbole für einen npn- und einen pnp-Bipolartransistor! Bezeichnen Sie die Anschlüsse: Kollektor (C), Basis (B) und Emitter (E)!
- 3.2 Die Abb. 3.1 zeigt einen Querschnitt eines npn-Bipolartransistors. Folgende Daten sind bekannt:

Emitterfläche :	$A = 10 \mu\text{m}^2$
Basisweite :	$w_B = 100 \text{ nm}$
Minoritäten-Lebensdauer im Kollektor :	$\tau_{m,C} = 23,12 \mu\text{s}$
Minoritäten-Lebensdauer im Emitter :	$\tau_{m,E} = 3,92 \text{ ps}$
Minoritäten-Lebensdauer in der Basis :	$\tau_{m,B} = 2,86 \mu\text{s}$
intrinsische Dichte:	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Diffusionskonstanten	
Elektronen :	$D_n = 35 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Löcher :	$D_p = 12,5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Elementarladung :	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Temperatur :	$T = 300 \text{ K}$

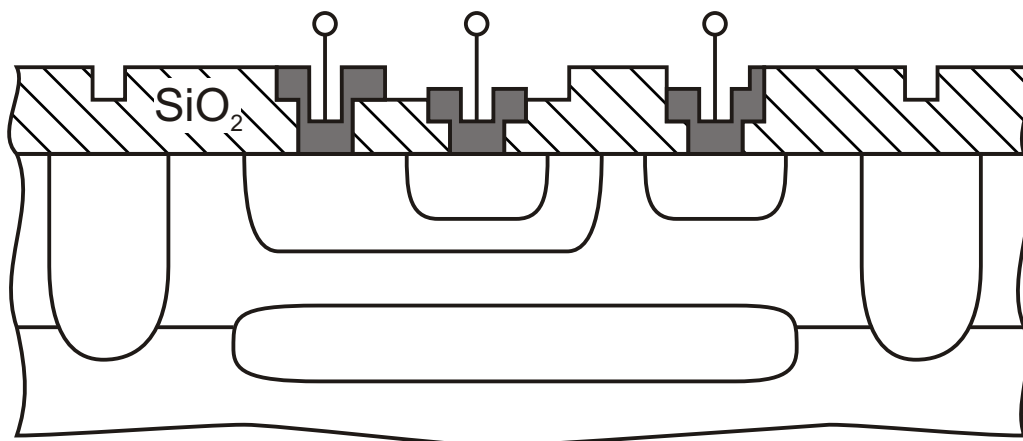


Abb. 3.1: Querschnitt eines npn-Bipolartransistors

- a) Tragen Sie die Dotierungen aller Bereiche in Abb. 3.1 ein! Kennzeichnen Sie hohe Dotierungen mit einem $+$ und niedrige Dotierungen mit einem $-$. Mögliche Dotierungen sind: n^- , n , n^+ , p^- , p , p^+ .
- b) Bezeichnen Sie die Anschlüsse in Abb. 3.1: C, B, E!
- c) Wodurch kommt der Early-Effekt zu Stande? Verdeutlichen Sie dies an einer Skizze!

- d) Zum Dotieren der verschiedenen Bereiche stehen Ihnen die Dotierstoffe Bor (**B**) und Phosphor (**P**) zu Verfügung, sowie die in der Tab. 3.1 angegebenen Dotierkonzentrationen (N_x). Weisen Sie dem Basis-, Kollektor- und dem Emitterbereich den jeweiligen Dotierstoff und die Konzentration (N_x) zu!

Hinweis: Es soll gelten: $B_N > B_I$. Der Early-Effekt soll möglichst gering sein!

x	N_x	Dotierstoff	Bereich
1	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$		
2	$6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$		
3	$4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$		

Tab. 3.1: Mögliche Dotierkonzentrationen für B-,C-,E-Bereich.

- e) Kennzeichnen sie die Basisweite w_B in Abb. 3.1!
 f) Berechnen Sie die Diffusionslängen $L_{p,E}$ und $L_{p,C}$!
 g) Zeichnen Sie das Transport-Modell, und schreiben Sie die Gleichungen für I_C , I_E und I_B auf!
 h) Durch welche drei Parameter wird ein Transistor im Transport-Modell vollständig beschrieben? Geben Sie die Formeln für diese Parameter an!

3.3 Ein Transistor wird nun, wie in Abb. 3.2 verschaltet. Der Basisbahnwiderstand ist zu vernachlässigen! Es gilt Folgendes:

Quelle U_1 :	$U_1 = -800 \text{ mV} + u_1(t)$
Quelle U_2 :	$U_2 = 5 \text{ V}$
Widerstand:	$R_L = 0,5 \text{ k}\Omega$
Temperatur:	$T = 300 \text{ K}$
Sättigungsstrom:	$I_s = 4 \cdot 10^{-17} \text{ A}$
Strom-Verstärkung:	$\beta_0 = B_N = 200$
Early-Spannung:	$U_{AN} = 25 \text{ V}$
Boltzmann-Konstante:	$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K}$

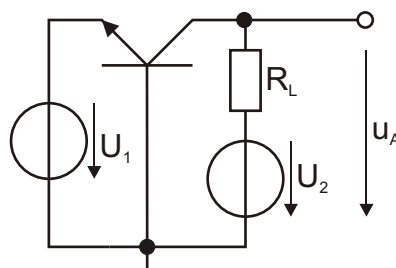


Abb. 3.2: Schaltung

- a) Wie heißt diese Grundsaltung des Transistors?
- b) In welchem Arbeitsbereich befindet sich der Transistor? Begründen Sie ihre Antwort!
- c) Berechnen Sie die Elemente des Kleinsignalersatzschaltbildes (ESB) des Transistors!
Hinweis: Lassen Sie die Kapazitäten und G_{bC} dabei unberücksichtigt!
- d) Zeichnen Sie das ESB der Schaltung unter Verwendung der ESB-Elemente nach Pkt. 3.3 c). Berechnen Sie die Spannungsverstärkung v_u der Schaltung; machen Sie dabei den Rechenweg deutlich!

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

4.1 Gegeben sei ein CMOS-Inverter in Abb. 4.1 (a) und der Querschnitt eines integrierten MOSFET nach Abb. 4.1 (b). Zu diesem sind folgende Materialkonstanten und Kenngrößen bekannt:

$$\mu_n = 1500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}; \mu_p = 450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}; \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}; \epsilon_{r,\text{OX}} = 3,92;$$

$$W = 20 \mu\text{m}; L = 180 \text{ nm}; t_{\text{OX}} = 5 \text{ nm}; |U_{\text{th}}| = 200 \text{ mV}$$

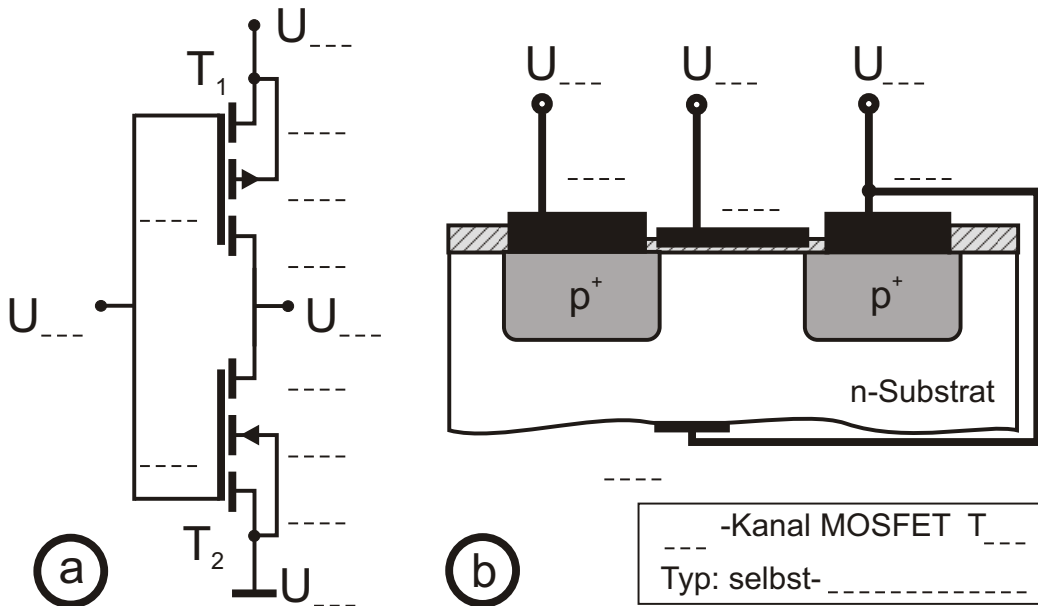


Abb. 4.1: (a) CMOS-Inverter (b) Querschnitt eines integrierten MOSFET

- Tragen Sie an den Knoten des Inverters die passenden Spannungen ein ($U_0 > 0 \text{ V}$; $U_{\text{GND}} = 0 \text{ V}$; Eingangsspannung U_E ; Ausgangsspannung U_A)!
- Tragen Sie in Abb. 4.1 (a) die Anschlussbezeichnungen beider Transistoren (S, G, D, B) ein!
- Welchem Transistor des CMOS-Inverters nach Abb. 4.1 (a) entspricht der Querschnitt nach 4.1 (b) und um was für einen Typ von MOSFET handelt es sich? Tragen Sie die Lösungen in das dafür vorgesehene Kästchen in Abb. 4.1 (b) ein!
- Welches Vorzeichen hat U_{th} für diesen Transistor? Begründen Sie ihre Antwort!
- Tragen Sie die Spannungen an den Anschlüssen in Abb. 4.1 (b) analog zu Abb. 4.1 (a) ein und kennzeichnen Sie auch in Abb. 4.1 (b) die Anschlussbezeichnungen (S, G, D, B)!
- Welche Ladungsträger sind bei diesem Bauelement (Abb. 4.1 (b)) für den Stromtransport verantwortlich?

4.2 Der Transistor nach Abb. 4.2 kann ohne Einsatz weiterer Bauelemente als Stromquelle eingesetzt werden, also unabhängig von der anliegenden Versorgungsspannung einen weitestgehend konstanten Strom I_1 liefern. Auch wenn es sich um einen anderen Transistortyp handelt, gelten auch für diesen Transistor die Kenngrößen vom Anfang der Aufgabe. Zusätzlich sei die Kanallängenmodulation mit $\lambda = 0,05 \text{ V}^{-1}$ jetzt nicht mehr zu vernachlässigen.

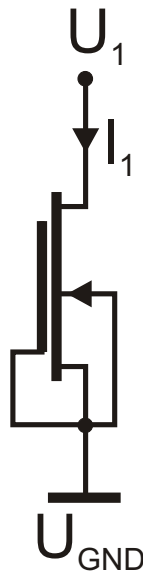
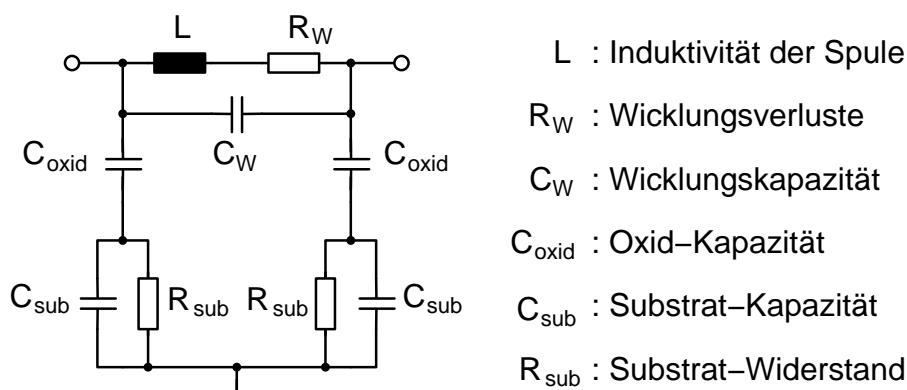


Abb. 4.2: Stromquelle

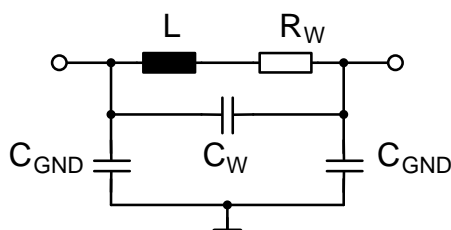
- a) Um was für einen Typ von Transistor handelt es sich in Abb. 4.2 und welches Vorzeichen hat seine Schwellspannung?
- b) Zeichnen Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild dieser Schaltung und bezeichnen Sie alle vorkommenden Elemente!
- c) In welchem Arbeitsbereich muss sich der Transistor befinden, damit ein Einsatz als Stromquelle sinnvoll ist? Wie groß muss die Spannung U_1 hierzu mindestens sein?
- d) Wie groß ist der Kleinsignal-Ausgangswiderstand der Schaltung bei hinreichend großem U_1 nach Aufgabe 4.2 c) unter Beachtung des angegebenen Wertes für λ ?
- e) Als Beispiel sei $U_1 = 150 \text{ mV}$ gegeben. In welchem Arbeitsbereich befindet sich der Transistor? Treffen Sie eine Aussage zu den Stromquelleneigenschaften der Schaltung unter diesen Bedingungen!

Aufgabe 1: Passive Bauelemente (20 Punkte)

1.1 Ersatzschaltbild einer integrierten Spule:

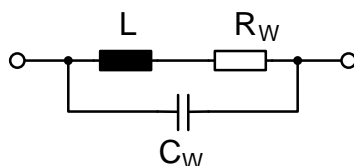


Da das Substrat sehr hochohmig sein soll, folgt:



mit $C_{GND}^{-1} = C_{oxid}^{-1} + C_{sub}^{-1}$.

Anmerkung: C_{sub} ist meistens sehr klein, sodass sich das ESB wie folgt vereinfachen lässt:



1.2 a) Durch die thermische Ladungsträgerbewegung entsteht eine statistisch schwankende Aufladung der Enden des Leiters.

b)

$$\sqrt{u_r^2} = \sqrt{4k_B T R \Delta f} \Rightarrow R = 10,51 \Omega$$

c)

$$R = R_F \cdot \frac{l}{w} \Rightarrow R_F = 46,06 \frac{\text{m}\Omega}{\square}$$

Aus Abb. 1.1 (b) : $\rho_{\text{Al},20^\circ\text{C}} = 2,8 \mu\Omega\text{cm}$

$$R_F = \frac{\rho_{\text{Al},20^\circ\text{C}}}{h} \Rightarrow h = 0,61 \mu\text{m}$$

d)

$$\tan \delta_L = \frac{\text{Re}\{Z\}}{\text{Im}\{Z\}}$$

$$\tan \delta_L = \frac{R}{2\pi f_1 \cdot L} \Rightarrow L = 4,5 \text{ nH}$$

e)

$$\alpha_{\text{Al}} = \frac{1}{\rho_{\text{Al},20^\circ\text{C}}} \frac{d\rho}{d\vartheta} = \frac{1}{2,8 \mu\Omega\text{cm}} \frac{(3,9 - 2,8) \mu\Omega\text{cm}}{(120 - 20)^\circ\text{C}} \approx 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

f)

$$Q_{20^\circ\text{C}} = \frac{2\pi f_1 \cdot L}{R_{20^\circ\text{C}}}$$

$$Q_{\vartheta_{\text{max}}} = \frac{2\pi f_1 \cdot L}{R_{\vartheta_{\text{max}}}} = 0,9 \cdot Q_{20^\circ\text{C}}$$

$$\Rightarrow 0,9 \cdot \frac{R_{\vartheta_{\text{max}}}}{R_{20^\circ\text{C}}} = 1$$

da $R \propto R_F \propto \rho$:

$$0,9 \cdot \frac{\rho_{\vartheta_{\text{max}}}}{\rho_{20^\circ\text{C}}} = 0,9 \cdot \frac{\rho_{20^\circ\text{C}} [1 + \alpha_{\text{Al},20^\circ\text{C}} (\vartheta_{\text{max}} - 20^\circ\text{C})]}{\rho_{20^\circ\text{C}}} = 1$$

$$\Rightarrow \vartheta_{\text{max}} \approx 48,5^\circ\text{C}$$

g) Der Temperaturkoeffizient wird kleiner!

Aus Abb. 1.1 (b) : $\rho_{\text{Al},100^\circ\text{C}} \approx 3,68 \mu\Omega\text{cm}$

$$\Rightarrow \alpha_{\text{Al},100^\circ\text{C}} = \frac{1}{\rho_{\text{Al},100^\circ\text{C}}} \frac{d\rho}{d\vartheta} \approx 3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

h)

$$\frac{1}{\rho} = e n \mu$$

da im Metall gilt: $n = \text{const.}$, $\mu \downarrow$ für $\vartheta \uparrow$

folgt: $\rho \uparrow$ für $\vartheta \uparrow$

1.3 a)

$$2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow C = 225,16 \text{ fF}$$

b)

$$\text{Resonanzfrequenz } \omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC_{\text{ges}}}} \quad C_{\text{ges}} = C + C_p$$

$$\Rightarrow C_p = 675,47 \text{ fF}$$

c)

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

Realisierung A:

$$C_p = \varepsilon_0 \cdot 3,7 \cdot \frac{a^2}{0,4 \mu\text{m}} \Rightarrow a = 90,81 \mu\text{m}$$

Realisierung B:

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r,1} \cdot \frac{a^2}{0,3 \mu\text{m}} \quad C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r,2} \cdot \frac{a^2}{0,5 \mu\text{m}}$$

$$C_p^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1} \Rightarrow C_p = \varepsilon_0 \varepsilon_{r,1} \varepsilon_{r,2} \cdot \frac{a^2}{0,5 \mu\text{m} \cdot \varepsilon_{r,1} + 0,3 \mu\text{m} \cdot \varepsilon_{r,2}}$$

$$\Rightarrow a = 124,45 \mu\text{m}$$

Bei der Realisierung B wäre die Kantenlänge der Kondensatorplatten zu groß.

Aufgabe 2: pn-Diode (20 Punkte)

2.1

$$U_D = U_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0,721 \text{ V}$$

2.2 Neutralitätsbedingung:

$$\begin{aligned} N_A \cdot w_p &= N_D \cdot w_n \\ \Rightarrow \frac{w_p}{w_n} &= \frac{N_D}{N_A} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

2.3

$$\begin{aligned} C_{Sp0} &= \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{w(U=0)} \\ \Leftrightarrow A &= \frac{C_{Sp0} w(U=0)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \end{aligned}$$

Mit

$$w(U=0) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}{e} \cdot U_D \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = 355,6 \text{ nm}$$

folgt:

$$A = 1,688 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$$

2.4

$$C_{Sp} = \frac{C_{Sp0}}{\sqrt{1 - \frac{U}{U_D}}} = 3,24 \text{ pF}$$

2.5 Diffusion, Rekombination

2.6 Die Randkonzentration der Elektronen im p-Gebiet ist größer als die der Löcher im n-Gebiet (genauer: doppelt so groß). Die Steigung der beiden Kurven am Rand der Raumladungszone wird durch die eingezeichneten Hilfsgeraden bestimmt.

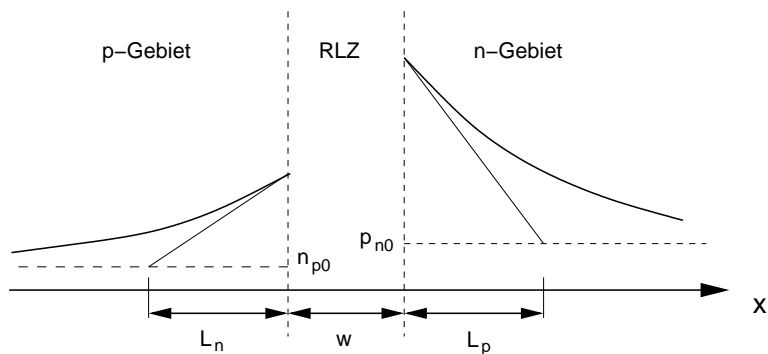


Abb. 2.1:

2.7

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 10 \mu\text{m}$$

2.8

$$p(x=w_n) = p_{n0} \cdot e^{\frac{U}{U_T}} = \frac{n_i^2}{N_D} \cdot e^{\frac{U}{U_T}} = 9,853 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

2.9

$$I_p(x=w_n) = e \cdot A \cdot D_p \cdot \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=w_n} = e \cdot A \cdot D_p \cdot \frac{p(x=w_n) - p_{n0}}{L_p} = 2,66 \text{ mA}$$

2.10

$$I = I_S e^{\frac{U}{U_T}}$$

$$I_S = I \cdot e^{-\frac{U}{U_T}} = 1,01 \cdot 10^{-14} \text{ A}$$

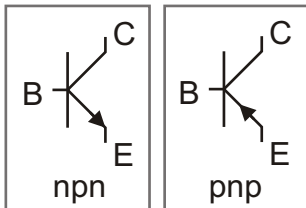
2.11 Der Löcherstrom in der Raumladungszone ist gleich dem Löcherstrom am Rand der Raumladungszone $I_p(x=w_n)$. Es gilt immer:

$$I = I_p + I_n$$

$$\Rightarrow I_{n,RLZ} = I - I_p(x=w_n) = 2,34 \text{ mA}$$

Aufgabe 3: Bipolartransistor (20 Punkte)

3.1 Die Schaltsymbole für einen npn- und einen pnp-Bipolartransistor (Anschlussbezeichnung: Kollektor (C), Basis (B) und Emitter (E)):



3.2 Querschnitt eines npn-Bipolartransistors kennen.

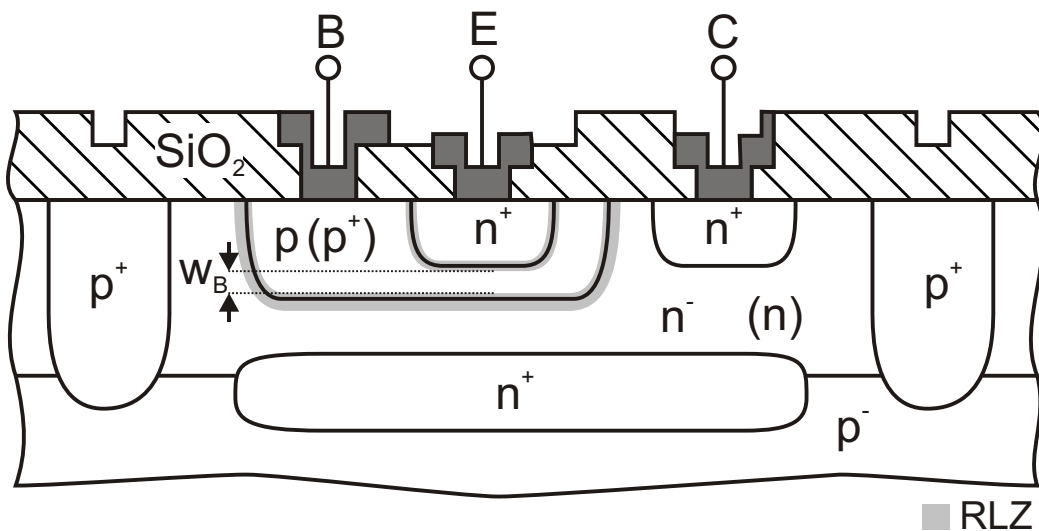


Abb. 3.1: Querschnitt eines npn-Bipolartransistors

- a) Siehe Abb. 3.1!
- b) Siehe Abb. 3.1!
- c) Der Early-Effekt kommt durch die Änderung von U_{BC} zu Stande, wodurch sich die Raumladungszone (RLZ) der CB-Diode ändert. Eine Verkleinerung von U_{BC} (bzw. $|U_{BC2}| > |U_{BC1}|$) führt zu einer größeren RLZ, wodurch sich die effektive Basisweite verkleinert. Siehe hierzu auch Abb. 3.2.

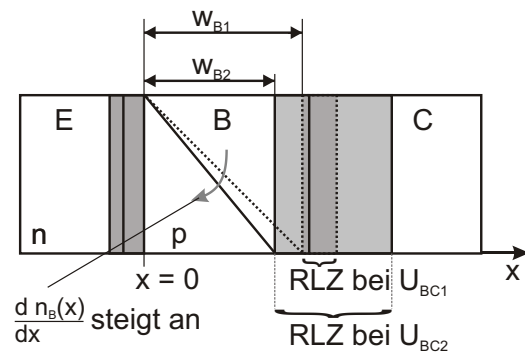


Abb. 3.2: Early-Effekt

d) Bor (**B**) ist für Si ein Akzeptor, also zum dotieren der p-Basis. Phosphor (**P**) ist für Si ein Donator, also zum dotieren des n⁺-Emitters und des n-Kollektors. Aus $B_N > B_I$ folgt $N_{DE} > N_{DC}$ und aus der Bedingung, dass der Early-Effekt möglichst gering sein sollte, folgt $N_{AB} > N_{DC}$. Die Ausdehnung und somit auch die Änderung der RLZ ist im höher dotierten Halbleiter geringer als im niedrig dotierten Halbleiter. Da B_N immer möglichst groß sein sollte muss $N_{DE} > N_{AB}$ sein. Siehe Ergebnis in Tab. 3.1.

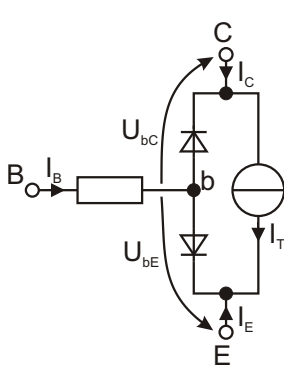
x	N_x	Dotierstoff	Bereich
1	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	Phosphor (P)	Emitter (E)
2	$6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	Phosphor (P)	Kollektor (C)
3	$4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	Bor (B)	Basis (B)

Tab. 3.1: Richtige Auswahl der Dotierstoffe und Dotierungskonzentrationen für B-,C-,E-Bereich.

- e) Siehe Abb. 3.1!
f) Berechnung von den Diffusionslängen $L_{p,E}$, $L_{p,C}$

$$L_{p,E} = \sqrt{D_p \cdot \tau_{m,E}} = 70 \text{ nm} \text{ und } L_{p,C} = \sqrt{D_p \cdot \tau_{m,C}} = 170 \text{ } \mu\text{m}$$

g) Zeichnen Sie das Transport-Modell, und schreiben Sie die Gleichungen für I_C , I_E , I_B und I_T auf!



$$I_T = I_s \left[\exp\left(\frac{U_{bE}}{U_T}\right) - \exp\left(\frac{U_{bC}}{U_T}\right) \right]$$

$$I_C = I_T - \frac{I_s}{B_I} \left[\exp\left(\frac{U_{bC}}{U_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -I_T - \frac{I_s}{B_N} \left[\exp\left(\frac{U_{bE}}{U_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_B = \frac{I_s}{B_N} \left[\exp\left(\frac{U_{bE}}{U_T}\right) - 1 \right] + \frac{I_s}{B_I} \left[\exp\left(\frac{U_{bC}}{U_T}\right) - 1 \right]$$

Abb. 3.3: Transport-Modell

h) B_N ; B_I ; I_s

$$B_N = \frac{D_{nB} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE}}{D_{pE} \cdot N_{AB} \cdot W_B}$$

$$B_I = \frac{D_{nB} \cdot N_{DC} \cdot L_{pC}}{D_{pC} \cdot N_{AB} \cdot W_B}$$

$$I_s = \frac{AeD_{nB}n_{B0}}{W_B} = \frac{AeD_{nB}n_i^2}{W_B \cdot N_{AB}}$$

3.3 Transistor in einer Schaltung.

- a) Der Transistor befindet sich in der **Basisschaltung**.
- b) Wir nehmen zu erst an, dass sich der Transistor im Normalbetrieb befindet. Hier gilt: $I_C \approx I_s \exp \frac{U_{BE}}{U_T} = 923 \mu A$ und aus $I_C \cdot R_L = 461 mV \ll U_2$ folgt das $U_{BC} < 0$ ist. Da $U_{BE} > 0$ ist, ist die getroffene Annahme richtig und der Transistor befindet sich somit im Normalbetrieb.
- c) Berechnen Sie die Elemente des Kleinsignalersatzschaltbildes (ESB) des Transistors! Hinweis: Lassen Sie die Kapazitäten und G_{bc} dabei unberücksichtigt!

$$g_m = \frac{I_C}{U_T} = 35,5 \text{ mS}$$

$$\text{und } G_{BE} = \frac{g_m}{\beta_0} = 177 \mu S \text{ oder } R_{BE} = \frac{1}{G_{BE}} = 5,6 \text{ k}\Omega$$

$$\text{und } G_{CE} = \frac{I_C}{U_{CE} + U_{AN}} = 30,4 \mu S \text{ oder } R_{CE} = \frac{1}{G_{CE}} = 32,9 \text{ k}\Omega$$

- d) Das ESB der Schaltung unter Verwendung der ESB-Elemente ist in Abb. 3.4 angegeben. Die Spannungsverstärkung v_u lautet:

$$v_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_L}{R_{CE} + R_L} + g_m \cdot \frac{R_{CE}}{R_{CE} + R_L} \cdot R_L = 17,5$$

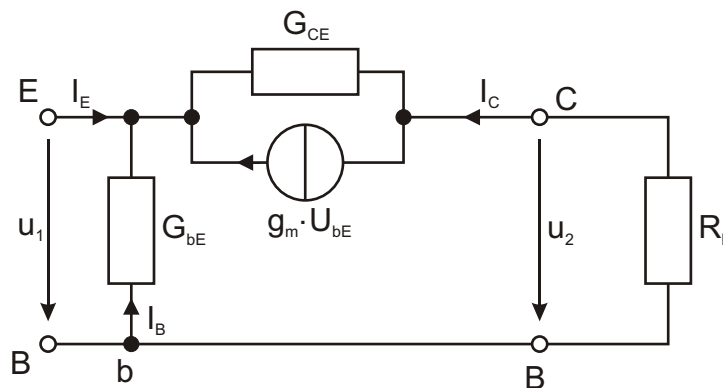


Abb. 3.4: ESB der Basis-Schaltung

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

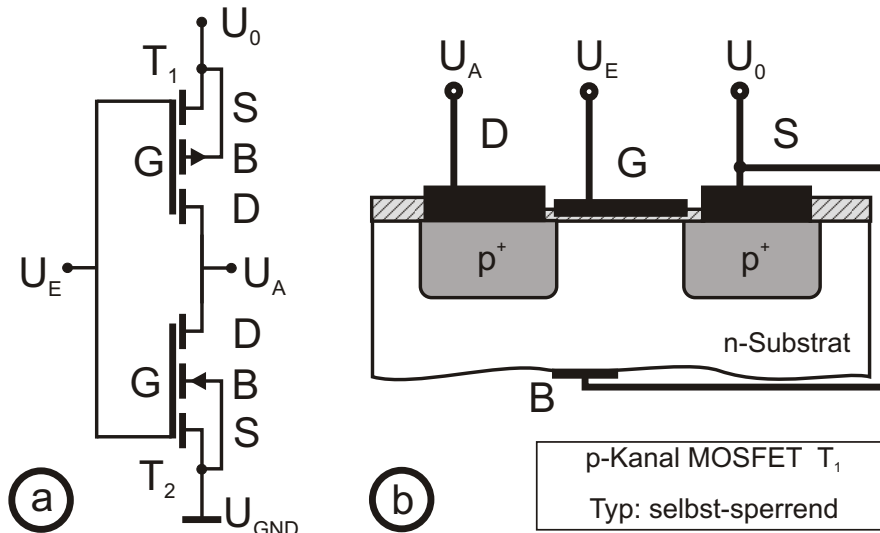


Abb. 4.1: (a) CMOS-Inverter (b) Querschnitt eines integrierten MOSFET

- 4.1 a) Siehe Abb. 4.1.
 b) Siehe Abb. 4.1.
 c) Siehe Abb. 4.1.
 d) $U_{th} = -200 \text{ mV}$, da es sich um einen selbstsperrenden p-Kanal-MOSFET handelt.
 e) Siehe Abb. 4.1.
 f) Löcher.
- 4.2 a) Selbstleitender n-Kanal MOSFET mit $U_{th} = -200 \text{ mV}$.
 b) Siehe Abb. 4.2.

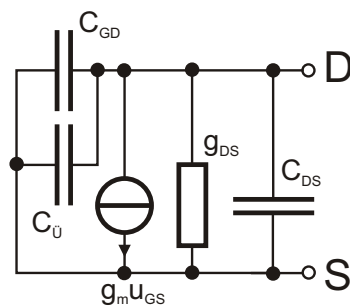


Abb. 4.2: Kleinsignal-Ersatzschaltbild der n-Kanal MOSFET Stromquelle

- c) Abschnürbereich mit $U_1 > U_{DS,sat} = 200 \text{ mV}$.

d) $G_{DS,Abs.} = \frac{\delta I_D}{\delta U_{DS}} = \frac{k\lambda}{2} (U_{GS} - U_{th})^2$

$k_n = \frac{\mu_n \epsilon_0 \epsilon_r q^2 W}{t_{ox} L} = 115,6 \frac{mA}{V^2} \Rightarrow R_{DS} = 8,56 \text{ k}\Omega$

- e) Ohmscher Bereich. Allgemein und im Vergleich zum vorherigen Fall schlechtere Stromquelleneigenschaften.