



# Große Übung zu Foliensatz E2-F4

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (E2-GrÜb-F4)

6. Juli 2016



### Halbleiter

### Dioden

- 2.2 Durchlassbereich
- 2.3 Sperr- und Durchbruchbereich
- 2.4 Sperrschicht- und Diffusionskapazität
- 2.5 Kleinsignalmodell

### Schaltverhalten von Dioden

#### 3.1 Gleichrichter

### Spezielle Dioden

- 4.1 Schottky-Diode
- 4.2 Z-Diode
- 4.3 PIN-Diode
- 4.4 Kapazitätsdiode



# Halbleiter



### Aufgabe 4.1: Chemisches Potential, Diffusionsspg.

Wie groß ist in Silizium bei 300 K des chemischen Potentials

- 1 in einem mit  $N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$  dotiertem p-Gebiet der Abstand des chemischen Potentials  $\zeta_p$  zur Valenzbandkante ,
- 2 in einem mit  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$  dotiertem n-Gebiet der Abstand des chemischen Potentials  $\zeta_n$  zur Leitungsbandkante ?
- 3 Wie groß ist die Diffusionsspannung?
- 4 Wie groß sind die Minoritäts- und Majoritätsladungsdichten in den beiden Gebieten?

---

Hilfestellungen: Die Breite der Bandlücke in Silizium ist

$W_g = W_L - W_V \approx 1,1 \text{ eV}$ , die Temperaturspannung  $U_T \approx 26 \text{ mV}$ ,

die Rechengrößen der Boltzmannnäherung sind

$N_V \approx 15 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$  und  $N_L \approx 24 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$  und die

intrinsische Leitfähigkeit beträgt für 300 K  $n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{cm}^{-3}$ .



## 2. Halbleiter

- 1 Abstand  $\zeta_p$  zur Valenzbandkante bei  $N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$ :

$$\zeta_p - W_V = q \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right) =$$

- 2 Abstand  $\zeta_n$  zur Leitungsbandkante bei  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ :

$$W_L - \zeta_n = q \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{N_L}{N_D} \right) =$$

- 3 Diffusionsspannung:

$$U_{\text{Diff}} =$$

- 4 Majoritäten- und Minoritätendichten:

Akzeptordichte in $\text{cm}^{-3}$	p-Gebiet	n-Gebiet
Majoritätsdichte in $\text{cm}^{-3}$		
Minoritätsdichte in $\text{cm}^{-3}$		

---

Bandlücke  $W_g = W_L - W_V \approx 1,1 \text{ eV}$ ;  $U_T \approx 26 \text{ mV}$ ;  
 $n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ;  $N_V \approx 15 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $N_L \approx 24 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$ .



### Zur Kontrolle

- 1 Abstand  $\zeta_p$  zur Valenzbandkante bei  $N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$ :

$$\zeta_p - W_V = q \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right) = q \cdot 26 \text{ mV} \cdot \ln \left( \frac{15 \cdot 10^{18}}{10^{13}} \right) = 370 \text{ meV}$$

- 2 Abstand  $\zeta_n$  zur Leitungsbandkante bei  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ :

$$W_L - \zeta_n = q \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{N_L}{N_D} \right) = q \cdot 26 \text{ mV} \cdot \ln \left( \frac{24 \cdot 10^{18}}{10^{15}} \right) = 262 \text{ meV}$$

- 3 Diffusionsspannung:

$$U_{\text{Diff}} = \frac{\zeta_n - \zeta_p}{q} = 1,1 \text{ V} - 370 \text{ mV} - 262 \text{ mV} = 468 \text{ mV}$$

- 4 Majoritäten- und Minoritätendichten:

Akzeptordichte in $\text{cm}^{-3}$	p-Gebiet	n-Gebiet
Majoritätsdichte in $\text{cm}^{-3}$	$10^{13}$	$10^{15}$
Minoritätsdichte in $\text{cm}^{-3}$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^3$

## Aufgabe 4.2: Sperrschichtbreite und -kapazität

- 1 Bestimmen Sie die Breiten  $w$ ,  $w_p$  und  $w_n$  der Raumladungszone eines spannungsfreien pn-Übergangs mit denselben Akzeptor- und Donatordichten wie in der Aufgabe zuvor ( $N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ).
- 2 Wie groß ist die Kapazität des pn-Übergangs bei  $U_D = 0$  bei einem Querschnitt des Übergangs von  $A = 0,1 \text{mm}^2$ ?

Hinweise: Die Diffusionsspannung für die gegebenen Dotierdichten laut Aufgabe zuvor  $U_{\text{Diff}} = 468 \text{mV}$ . Elementarladung  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ . Dielektrizitätskonstante von Silizium  $\epsilon_{\text{Si}} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}$ .



## 2. Halbleiter

### 1 Gesamtbreite:

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

Breite des p-Gebiets:

$$w_p = \frac{w \cdot N_D}{N_D + N_A} =$$

Breite des n-Gebiets:

$$w_n = w - w_p =$$

### 2 Kapazität :

$$C = \epsilon_{Si} \cdot \frac{A}{w} =$$

---

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}; \epsilon_{Si} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}, N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}, N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}, \\ A = 0,1 \text{mm}^2.$$





### Zur Kontrolle

Gesamtbreite:

$$\begin{aligned}w &= w_p + w_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot U_{\text{Diff}}}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \\&= \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 0,468 \text{ V}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \cdot \left( \frac{1}{10^{19} \text{ m}^{-3}} + \frac{1}{10^{21} \text{ m}^{-3}} \right)} = 7.687 \mu\text{m}\end{aligned}$$

Auflösung nach den Einzelbreiten:

$$\begin{aligned}w_p &= \frac{w \cdot N_D}{N_D + N_A} = \frac{7.687 \mu\text{m} \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{10^{15} \text{ cm}^{-3} + 10^{13} \text{ cm}^{-3}} = 7,611 \mu\text{m} \\w_n &= \frac{w \cdot N_A}{N_D + N_A} = \frac{7.687 \mu\text{m} \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}}{10^{15} \text{ cm}^{-3} + 10^{13} \text{ cm}^{-3}} = 76,1 \text{ nm}\end{aligned}$$

Kapazität nach dem Plattenkondensatormodell:

$$C = \varepsilon_{\text{Si}} \cdot \frac{A}{w} = 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot \frac{10^{-7} \text{ m}^2}{7.687 \mu\text{m}} = 1,301 \text{ pF}$$



### Aufgabe 4.3: Sperrspannung und max. Feldstärke

Ein abrupter pn-Übergang mit den Dotierungen  $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$  und  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$  wird mit den Sperrspannungen  $U_S = 10 \text{V}$  und  $100 \text{V}$  betrieben.

- 1 Wie hoch ist die Diffusionsspannung?
- 2 Wie groß sind für beide Werte der Sperrspannung die max. Feldstärke?
- 3 Welche Breite  $w_i$  muss eine intrinsische Schicht zwischen dem p- und dem n-Gebiet haben, um die maximale Feldstärke für  $U_S = 100 \text{V}$  auf  $10 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$  zu verringern?

Hinweis: In einer intrinsischen Schicht zwischen dem n- und dem p-Gebiet ist die Raumladung null und damit die Feldstärke konstant.



### Berechnung der Diffusionsspannung

- Abstand  $\zeta_p$  zur Valenzbandkante bei  $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ :

$$\zeta_p - W_V = U_T \cdot \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln ( \quad ) =$$

- Abstand  $\zeta_n$  zur Leitungsbandkante bei  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ :

$$W_L - \zeta_n = \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{N_L}{N_D} \right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln ( \quad ) =$$

- Diffusionsspannung:

$$U_{\text{Diff}} =$$

---


$$W_g = W_L - W_V \approx 1,1 \text{ eV}; U_T \approx 26 \text{ mV}; N_V \approx 15 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3};$$

$$N_L \approx 24 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}, N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}, N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$$



### Zur Kontrolle

- Abstand des chemischen Potentials im p-Gebiet von der Valenzbandkante:

$$\zeta_p - W_V = U_T \cdot \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln \left( \frac{15 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{15}} \right) = 148 \text{ mV}$$

- Abstand des chemischen Potentials im n-Gebiet von der Leitungsbandkante:

$$W_L - \zeta_n = U_T \cdot \ln \left( \frac{N_L}{N_D} \right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln \left( \frac{24 \cdot 10^{18}}{10^{15}} \right) = 202 \text{ meV}$$

- Diffusionsspannung:

$$\begin{aligned} U_{\text{Diff}} &= \frac{\zeta_n - \zeta_p}{q} = \frac{(W_L - W_V) - (W_L - \zeta_n) - (\zeta_p - W_V)}{q} \\ U_{\text{Diff}} &= 1,1 \text{ V} - 130 \text{ mV} - 202 \text{ mV} \approx 750 \text{ mV} \end{aligned}$$



## 2. Halbleiter

Beite des Übergangs:

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (U_{\text{Diff}} + U_S)}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot (0,75 \text{ V} + U_S)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{As}} \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3}} + \frac{1}{10^{21} \text{m}^{-3}} \right)}$$

$U_S$	10 V	100 V
$w$	4 $\mu\text{m}$	12 $\mu\text{m}$

Maximale Feldstärke:

$$E_{\text{max}} = \frac{2 \cdot (U_{\text{Diff}} + U_S)}{w}$$

$U_S$	10 V	100 V
$E_{\text{max}}$	5,25 kV/mm	16,75 kV/mm



### Feldstärkereduzierung durch instrinsische Schicht

In den dotierten Schichten ist die Raumladung  $\rho = q \cdot N_{A/D}$  und die Feldstärke nimmt proportional zu bzw. ab. In einer instrinsischen Schicht dazwischen ist  $\rho = 0$  und die Feldstärke  $E_{\max}$ . Integral über den Trapezverlauf:

$$U_{\text{Diff}} + U_S = E_{\max} \cdot \left( \frac{w_p + w_n}{2} + w_i \right)$$

Breite der Raumladungsbereiche für  $E_{\max}$ :

$$w_p + w_n = \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)$$

Eingesetzt und nach  $w_i$  aufgelöst:

$$w_i = \frac{U_{\text{Diff}} + U_S}{E_{\max}} - \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{2 \cdot q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)$$

---


$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}, \varepsilon_{\text{Si}} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}, U_{\text{Diff}} = 0,75 \text{V}, U_S = 100 \text{V},$$

$$N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}, N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}, E_{\max} = 10 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}.$$



$$\begin{aligned}w_i &= \frac{U_{\text{Diff}} + U_S}{E_{\text{max}}} - \frac{\varepsilon \cdot E_{\text{max}}}{2 \cdot q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \\&= \frac{100,75 \text{ V}}{10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}} - \frac{10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{As}} \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3}} + \frac{1}{10^{21} \text{m}^{-3}} \right) \\&= 10,75 \mu\text{m} - 3,75 \mu\text{m} = 7 \mu\text{m}\end{aligned}$$

---

$$\begin{aligned}q &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}, \quad \varepsilon_{\text{Si}} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}, \quad U_{\text{Diff}} = 0,75 \text{ V}, \quad U_S = 100 \text{ V}, \\N_A &= 10^{13} \text{cm}^{-3}, \quad N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}, \quad E_{\text{max}} = 10 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}.\end{aligned}$$



### Aufgabe 4.4: Diffusionslänge

- 1 Wie groß ist die Diffusionslänge der in ein p-Basisgebiet diffundierenden Elektronen bei  $T = 300 \text{ K}$ ? Die Beweglichkeit der Elektronen sei  $\mu_n = 0,05 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$  und die mittlere Lebensdauer von Ladungsträgerungleichgewichten im p-Basisgebiet  $\tau_p = 200 \mu\text{s}$ .
- 2 Welche Breite  $w_B$  darf die Basis haben, damit 99,9% der vom Emitter ankommenden Ladungsträger bis zur Kollektorsperrschicht diffundieren?





## 2. Halbleiter

- 1 Diffusionslänge:

$$L_n = \sqrt{U_T (300 \text{ K}) \cdot \mu_n \cdot \tau_p}$$

- 2 Abnahme des Diffusionsstroms der beweglichen Elektronen im p-Basisgebiet:

$$n_p(x) = n_{p0} \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{x}{L_n}}$$

Nach einem Weg  $x = w_B$  sollen noch 99,9% davon übrig sein:

$$w_B = L_n.$$

---

$$U_T (300 \text{ K}) = 26 \text{ mV}, \mu_n = 0,05 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}, \tau_p = 200 \mu\text{s}.$$



### Zur Kontrolle

- 1 Diffusionslänge:

$$\begin{aligned}L_n &= \sqrt{U_T (300 \text{ K}) \cdot \mu_n \cdot \tau_p} \\ &= \sqrt{26 \text{ mV} \cdot 0,05 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}} \cdot 200 \mu\text{s}} = 510 \mu\text{m}\end{aligned}$$

- 2 Damit nach einem Weg  $x = w_B$  noch 99,9% der in die Basis diffundierenden Ladungsträger übrig sind:

$$\begin{aligned}\frac{n_p(w_B)}{n_p(0)} &= 99,9\% = \frac{n_{p0} \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{w_B}{L_n}}}{n_{p0} \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{0}{L_n}}} = e^{-\frac{w_B}{L_n}} \\ w_B &= L_n \cdot (-\ln(99,9\%)) = 0,51 \mu\text{m}\end{aligned}$$



# Dioden



## Durchlassbereich

## Aufgabe 4.5: Durchlassspannung

- 1 Stellen Sie die Gleichung für die Berechnung des Durchlassstroms unter Vernachlässigung des Rekombinationsstroms und des Hochstromeffekts

$$I_D = I_S \cdot \left( e^{\frac{U_D}{N \cdot U_T}} - 1 \right)$$

nach der Spannung  $U_D$  um.

- 2 Berechnen Sie  $U_D$  für eine Diode mit den Spice-Parametern  $I_S = 2 \text{ nA}$ ,  $N = 2$  und  $T = 300 \text{ K}$  für die Ströme in der nachfolgenden Tabelle:

$I_D$	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$U_D$				

Hinweis: Temperaturspannung  $U_T (300 \text{ K}) = 26 \text{ mV}$ .

## Zur Kontrolle

- 1 Spannung über einer Diode in Abhängigkeit vom Durchlassstrom:

$$I_D = I_S \cdot \left( e^{\frac{U_D}{N \cdot U_T}} - 1 \right)$$

$$U_D = N \cdot U_T \cdot \left( \ln \left( \frac{I_D}{I_S} + 1 \right) \right)$$

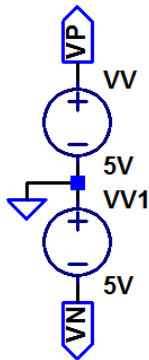
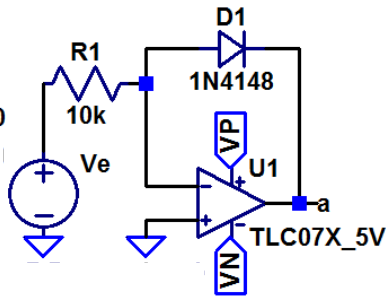
- 2 Spannungen  $U_D$  für eine Diode mit den Spice-Parametern  $I_S = 2 \text{ nA}$ ,  $N = 2$  und  $T = 300 \text{ K}$  für die Ströme in der nachfolgenden Tabelle:

$$U_D = 52 \text{ mV} \cdot \left( \ln \left( \frac{I_D}{I_S = 2 \text{ nA}} + 1 \right) \right)$$

$I_D$	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$U_D$	563 mV	682 mV	802 mV	922 mV

## Aufgabe 4.6: Logarithmierer mit Diode

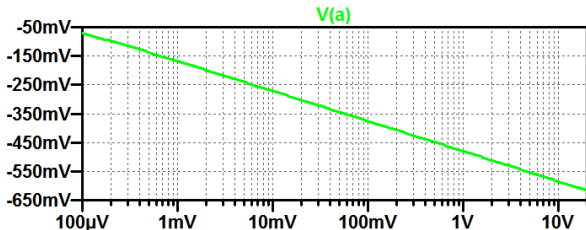
```
.include TLC074.mod
.dc oct Ve 100µV 20V 10
```



- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion (DC sweep) mit einer logarithmischen Darstellung der Eingangsspannung.
- Berechnen Sie die zu erwartende Ausgangsspannung unter der Annahme »idealer Operationsverstärker« und unter Berücksichtigung der Diodenparameter  $I_s=2,5\text{nA}$ ,  $n=1,75$  für die Eingangsspannungen  $100\ \mu\text{V}$ ,  $1\ \text{mV}$  und  $10\ \text{mV}$ . Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Simulationsergebnis.



Zur Kontrolle



$$U_D = N \cdot U_T \cdot \left( \ln \left( \frac{U_e}{R_1 \cdot I_S} + 1 \right) \right) \quad \text{mit } I_D = \frac{U_e}{R_1}$$

$$= 1,75 \cdot 26 \text{ mV} \cdot \left( \ln \left( \frac{U_e}{10 \text{ k}\Omega 2,5 \text{ nA}} + 1 \right) \right)$$

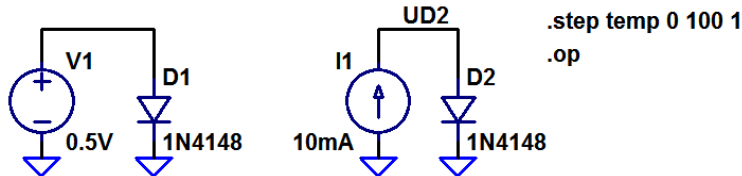
$U_e$	100 $\mu$ V	1 mV	10 mV	100 mV	1 V	10 V
$V_a^*$	-71 mV	-168 mV	-271 mV	-375 mV	-480 mV	-585 mV
$U_D^{**}$	-73 mV	-169 mV	-273 mV	-377 mV	-482 mV	-587 mV

(\* Simulation; \*\* Rechnung).



## Aufgabe 4.7: Temperaturverhalten

- 1 Bestimmen Sie mit den nachfolgenden Testschaltungen den Durchlassstrom bei konstanter Spannung und die Durchlassspannung bei konstantem Strom im Temperaturbereich von 0°C bis 100°C.



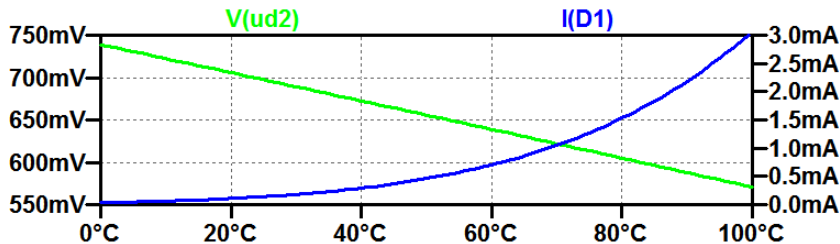
- 2 Berechnen Sie daraus die Spannungszunahme und relative Stromzunahmen

$$\frac{dU_D}{dT} \approx \frac{U_D(22^\circ\text{C}) - U_D(20^\circ\text{C})}{2\text{K}}; \quad \frac{1}{I_D} \cdot \frac{dI_D}{dT} \approx \frac{I_D(22^\circ\text{C}) - I_D(20^\circ\text{C})}{I_D(21\text{V}) \cdot 2\text{K}}$$

aus den Werten für 20°C, 21°C und 21°C.

## Zur Kontrolle

### 1 Simulationsergebnis:



### 1 Spannungszunahme und relative Stromzunahme mit $T$ :

	20°C	21°C	22°C	
$I_D$	108,64 mA	114,66 mA	120,96 mA	$\frac{1}{I_D} \cdot \frac{dI_D}{dT} \approx 5,4 \frac{\%}{K}$
$U_D$	705,78 mV	704,09 mV	702,39 mV	$\frac{dU_D}{dT} \approx -1,7 \frac{mV}{K}$



## Sperr- und Durchbruchbereich



## Aufgabe 4.8: Durchbruchspannung

- 1 Stellen Sie die Gleichung für die Berechnung des Stroms im Durchbruchbereich

$$I_S = I_{bv} \cdot e^{\frac{U_S - BV}{U_T}}$$

nach  $U_S$  um.

- 2 Berücksichtigen Sie in der Gleichung zur Berechnung des Spannungsabfalls in Sperrrichtung  $U_S$  zusätzlich den Bahnwiderstand (Spice-Parameter  $R_s$ ).i
- 3 Berechnen Sie für eine Diode mit den Parametern  $I_{bv} = 50 \mu\text{A}$ ,  $BV = 8\text{V}$  und  $T = 300\text{K}$ ,  $R_s = 0,8 \Omega$  den Spannungsabfall  $U_S$  für die Ströme in der nachfolgenden Tabelle:

$I_S$	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$U_S$				



## Sperrschicht- und Diffusionskapazität



## Aufgabe 4.9: Sperrschicht- und Diffusionskapazität

Berechnen Sie für eine Diode mit den Spice-Parametern  $C_{j0} = 2 \text{ pF}$ ,  $M = 1$ ,  $V_j = 500 \text{ mV}$ ,  $T_t = 10 \text{ ns}$  und  $N=15$  und eine Temperatur von  $T = 300 \text{ K}$

- die Sperrschichtkapazität  $C_S$  für die Sperrspannungen

$U_S$	0 V	1 V	3 V	10 V
$C_S$				

- die Diffusionskapazitäten  $C_D$  für die Durchlasströme

$I_D$	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$C_D$				



## Aufgabe 4.10: Schaltverzögerung

Untersuchen Sie mit der Testschaltung auf Folie ??, ob die

- 1 Einschaltverzögerung
- 2 Ausschaltverzögerung

mit zunehmendem Diodenstrom zu- oder abnimmt. Verdoppeln und halbieren Sie dazu einmal den Vorwiderstand und füllen Sie dazu die nachfolgende Tabelle aus:

	$R = 250 \Omega$	$R = 500 \Omega$	$R = 1 \text{ k}\Omega$
Einschaltverzögerung			
Ausschaltverzögerung			



## Kleinsignalmodell





## Aufgabe 4.11: Kleinsignalwiderstand

- 1 Berechnen Sie für eine Diode mit den Parametern  $N=15$  und  $I_{kf} \gg 20 \text{ mA}$  (Wechsel Hochstrom- bereich) für eine Temperatur von  $T = 300 \text{ K}$  den Kleinsignal- widerstand in Abhängigkeit vom Strom durch die Diode:

$I_D$	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$r_D$				

- 2 Auf welche Werte ändern sich abschätzungsweise Strom und Kleinsignalwiderstand bei einer Temperaturerhöhung um 20 K:

$I_D$ (300 K)	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$I_D$ (320 K)				
$r_D$ (320 K)				



## Aufgabe 4.12: Verständnisfragen

- 1 Steigt bei einer Diode, wenn sie im in Durchlassrichtung betrieben wird, die Durchlassspannung er Spannungabfall über einer Diode, wenn sie wärmer wird oder fällt sie? Wie groß ist etwa die Änderung je Kelvin?
- 2 Nimmt unter der Annahme, dass sich der Diodenstrom nicht ändert, die Verlustleistung einer Diode in einem Gleichrichter bei Erwärmung zu oder ab?
- 3 Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Diffusionskapazität einer pn-Diode und dem Kleinsignalwiderstand im Durchlassbereich?

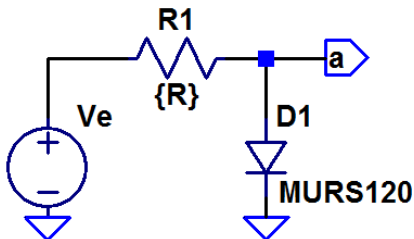




# Schaltverhalten von Dioden



### Geschaltetes RD-Glied



```
PULSE(-5V 5V 100ns 20ns 20ns 180ns 400ns)  
.step param R list 10 100 1k  
.tran 1µs
```

- Bestimmen Sie den Ausgabesignalverlauf für den vorgegebenen Eingabepulsverlauf für die drei verschiedenen Widerstandswerte.



## 4. Schaltverhalten von Dioden

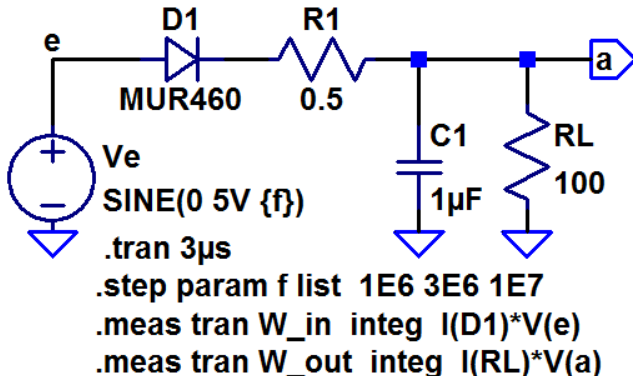
- Welche Merkmale des Ausgabesignalverlaufs verursacht die Diffusions- und welche die Sperrschichtkapazität?  
(Kontrollierbar, indem einmal der Parameter  $C_{jo}$  und einmal der Parameter  $t_t$  auf null gesetzt wird.)
- Wie hängt die Schaltverzögerung durch die Sperrschichtkapazität und wie die durch die Diffusionskapazität von der Größe des Widerstands  $R_1$  ab?



# Gleichrichter

## Aufgabe 4.13: Gleichrichter

Die Abbildung zeigt eine Experimentierschaltung zur Untersuchung des Wirkungsgrads eines einfachen Gleichrichters in Abhängigkeit von der Frequenz.







- Wozu wird  $R_1$  benötigt? Bestimmen Sie dazu den Strom durch die Diode einmal mit und einmal ohne  $R_1$  und schauen im Simulationsmodell oder einem Datenblatt aus dem Internet nach, wie groß der Strom maximal sein darf.
- Welche Ströme entstehen durch die Stromschleife?
- Bestimmen Sie die Ausgangsspannungsverläufe. Wo wird der Glättungskondensator durch den Lastwiderstand und wo durch die Stromschleife entladen?
- Die Integralanweisungen berechnen die von der Eingabequelle »Ve« abgegebene und die in  $R_L$  verbrauchte Energie während der simulierten Zeit. Bestimmen Sie die im Mittel aufgenommene und die im Mittel abgegebene Leistung sowie den Wirkungsgrad für die drei vorgegebenen Frequenzen.
- Ersetzen Sie die pn-Diode durch eine geeignete Schottky-Diode aus der Bibliothek des Simulators und vergleichen Sie die Stromaufnahme, den Ausgangsspannungsverlauf und den Wirkungsgrad.



# Spezielle Dioden



# Schottky-Diode



## Aufgabe 4.14: Schottky-Diode

- Was sind die beiden wesentlichen Vorteile einer Schottky-Diode gegenüber einer PN-Diode beim Einsatz als Gleichrichter?
- Stellen Sie die Gleichung für die Berechnung des Rekombinationsstroms unter Vernachlässigung des Diffusionsstroms und des Hochstromeffekts nach der Spannung  $U_D$  um.

$$U_D =$$

- Berechnen Sie  $U_D$  mit den Parametern  $I_{sr} = 0,25 \text{ nA}$ ,  $N_r = 2$  und  $T = 300 \text{ K}$  für die Ströme in der nachfolgenden Tabelle:

$I_D$	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$U_D$				



## Z-Diode



## Aufgabe 4.15: Z-Diode

Gegeben sind die Durchbruchspannungen in V und die Temperaturkoeffizienten ( $Tk$ ) in  $\text{mV}/^\circ\text{C}$  für Z-Dioden vom Typ BZT585...

Typ	$U_{BR}$	TC in $\frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$	Typ	$U_{BR}$	$Tk$ in $\frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$
...B2V4T	$2,4 \pm 0,05 \text{ V}$	-1,3	...B4V3T	$4,3 \pm 0,09 \text{ V}$	-1,7
...B2V7T	$2,7 \pm 0,05 \text{ V}$	-1,4	...B4V7T	$4,7 \pm 0,09 \text{ V}$	-1,2
...B3V3T	$3,3 \pm 0,07 \text{ V}$	-1,8	...B5V1T	$5,1 \pm 0,10 \text{ V}$	-0,5
...B3V6T	$3,6 \pm 0,07 \text{ V}$	-1,9	...B5V6T	$5,6 \pm 0,11 \text{ V}$	1,0
...B3V9T	$3,9 \pm 0,08 \text{ V}$	-1,9	...B6V2T	$6,2 \pm 0,12 \text{ V}$	2,2

Konstruieren Sie daraus ein Bauteil mit einer Durchbruchspannung von ca. 9 V und möglichst geringem Temperaturkoeffizient.

### Zur Kontrolle

Typ	$U_{BR}$	TC in $\frac{mV}{^{\circ}C}$	Typ	$U_{BR}$	$Tk$ in $\frac{mV}{^{\circ}C}$
...B2V4T	$2,4 \pm 0,05 V$	-1,3	...B4V3T	$4,3 \pm 0,09 V$	-1,7
...B2V7T	$2,7 \pm 0,05 V$	-1,4	...B4V7T	$4,7 \pm 0,09 V$	-1,2
...B3V3T	$3,3 \pm 0,07 V$	-1,8	...B5V1T	$5,1 \pm 0,10 V$	-0,5
...B3V6T	$3,6 \pm 0,07 V$	-1,9	...B5V6T	$5,6 \pm 0,11 V$	1,0
...B3V9T	$3,9 \pm 0,08 V$	-1,9	...B6V2T	$6,2 \pm 0,12 V$	2,2

- Reihenschaltung BZT585B2V4T und BZT585B5V6T:  
 $U_{BR} = 7,5 \pm 1,5 V$ ,  $Tk = -0,3 \frac{mV}{^{\circ}C}$
- Reihenschaltung BZT585B3V6T und BZT585B6V2T:  
 $U_{BR} = 9,8 \pm 1,9 V$ ,  $Tk = 0,4 \frac{mV}{^{\circ}C}$



# PIN-Diode





### Aufgabe 4.16: PIN-Diode

Was ist die wesentliche Eigenschaft einer PIN-Diode gegenüber einer normalen PN-Diode beim Einsatz als spannungsgesteuerter Widerstand für hochfrequente Signale?

---

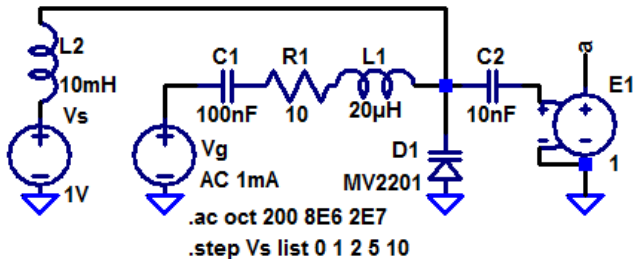
Eine große Transitzeit, wegen der sie für hohe Frequenzen wie ein spannungsgesteuerter Widerstand wirkt.



## Kapazitätsdiode

## Aufgabe 4.17: Kapazitätsdiode

Gegeben ist die nachfolgende RLC-Filterschaltung mit einer Kapazitätsdiode zur Abstimmung:



- 1 Stellen Sie die Gleichung für den Frequenzgang auf

$$\frac{U_a}{U_g} = f(R_1, L_1, C_S) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{Q \cdot f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$



- 1 ... ( $C_S$  – Sperrschichtkapazität der Diode D1). Die Spannungsabfälle über  $C_1$ ,  $C_2$  und  $R_B$  (Bahnwiderstand der Diode) sowie der Strom durch  $L_2$  seien vernachlässigbar.
- 2 Wie berechnen sich die Frequenzgangparameter  $Q$  und  $f_0$ ?
- 3 Bestimmen Sie die Frequenzgänge für die Steuerspannungswerte 0V, 1V, 2V, 5V und 10V durch Simulation und lesen Sie für jeden Steuerspannungswerte die Resonanzfrequenz  $f_0$  ab.
- 4 Berechnen Sie aus den so abgeschätzten Werten für  $f_0$  die Sperrschichtkapazität in Abhängigkeit von der Sperrspannung.

$U_S$	0V	1V	2V	5V	10V
$f_0$					
$C_S$					



- 5 Lesen Sie aus dem Spice-Modell der Diode MV2201 die Parameter  $C_S = C_{j0}$ ,  $U_{\text{Diff}} = V_j$  und  $m_s = M$  ab und kontrollieren Sie die Ergebnisse über die Gleichung:

$$C_S = C_{S0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_S}{U_{\text{Diff}}}\right)^{m_s}} \quad \text{für } U_S \geq 0$$

## Zur Kontrolle

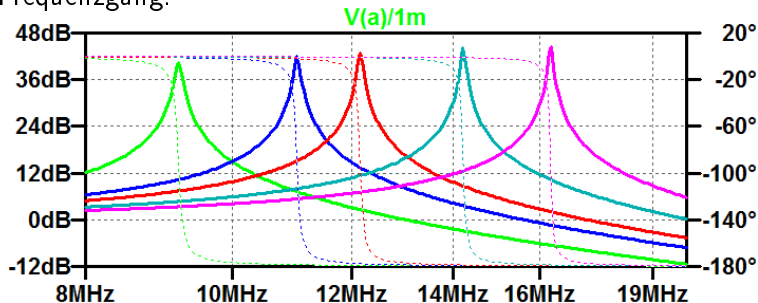
- 1 Frequenzgang:

$$\frac{U_a}{U_g} = \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_S \cdot f - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L_1 \cdot C_S}$$

- 2 Güte und Resonanzfrequenz:

$$Q = \frac{2\pi \cdot L_1}{R_1}; \quad f_0 = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot L_1 \cdot C_S}$$

- 3 Frequenzgang:





- 5 Resonanzfrequenzen  $f_0$ , aus den Resonanzfrequenzen berechnete Sperrschichtkapazitäten  $C_S$  und aus dem Simulationsmodell berechnete Sperrschichtkapazitäten  $C_S^*$ :

$U_S$	0V	1V	2V	5V	10V
$f_0$	9,22 MHz	11,04 MHz	12,18 MHz	14,23 MHz	16,26 MHz
$C_S$	14,90 pF	10,39 pF	8,54 pF	6,25 pF	4,79 pF
$C_S^*$	14.93 pF	10.45 pF	8,64 pF	6,33 pF	4,87 pF

- 6 Aus dem Simulationsmodell ablesbare Parameter:  
 $C_{j0} = 14,93 \text{ pF}$ ;  $V_j = 0,75 \text{ V}$ ,  $M = 0,4261$ .  
Berechnungsvorschrift für die Sperrschichtkapazität:

$$C_S = C_{j0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_S}{V_j}\right)^M} = 14,93 \text{ pF} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_S}{0,75 \text{ V}}\right)^{0,4261}}$$