

# Halbleiterbauelemente

## Übungsserie 9: *MOSFET II*

### Musterlösungen

1. Juni 2011

#### Aufgabe 1: MOSFET-Kennlinien

1. Zu beachten ist jeweils, in welchem Bereich die Drainspannung  $V_{DS}$  liegt, d.h. ob im Sättigungsbereich oder im Nichtsättigungsbereich. Diese Bereiche werden getrennt durch den “pinch-off locus”, gegeben durch  $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ .

Für  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_{th}$  (ausserhalb der Sättigung) ist folgende Formel für den Strom  $I_D$  zwischen Drain und Source zu verwenden:

$$I_D = \mu_n \frac{W}{L} C'_{ox} [(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - V_{DS}^2/2]$$

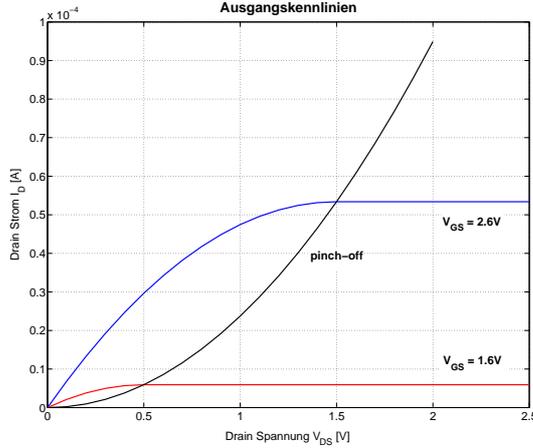
Andernfalls fliesst der Sättigungsstrom ( $I_{D,sat}$ ):

$$I_{D,sat} = \mu_n \frac{W}{L} C'_{ox} (V_{GS} - V_{th})^2/2$$

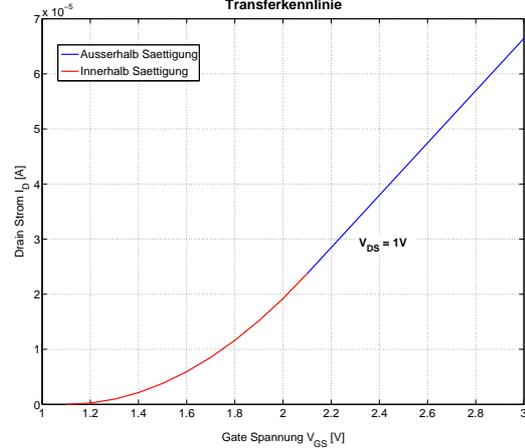
Ergebnisse:

	$V_{DS} = 0.5 \text{ V}$	$V_{DS} = 1 \text{ V}$	$V_{DS} = 2 \text{ V}$
$V_{GS} = 1.5 \text{ V}$	$I_D = 5.93 \mu\text{A}$ pinch-off	$I_D = 5.93 \mu\text{A}$ Sättigung	$I_D = 5.93 \mu\text{A}$ Sättigung
$V_{GS} = 2.5 \text{ V}$	$I_D = 29.6 \mu\text{A}$ keine Sättigung	$I_D = 47.46 \mu\text{A}$ keine Sättigung	$I_D = 53.39 \mu\text{A}$ Sättigung

### Ausgangskennlinien:



### Transferkennlinie:



2.

- Mit den Annahmen für die Herleitung der Kennlinien-Formeln fällt bis zum Abschnürungs-  
punkt des Kanals die Sättigungs-Drainspannung  $V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{th} = 1 V$  ab.
- Das elektrische Feld der Sperrschicht ist eine lineare Funktion des Ortes und wird am  
Übergang maximal ( $E_{max}$ ). Wenn dieser Wert zu gross wird, tritt Ladungsträgergeneration  
durch den Lawineneffekt auf. Die Durchbruchspannung  $V_{br}$  ist mit dem maximalen Feld  
 $E_{max}$  wie folgt verknüpft (vgl. Formel 8.111 im Buch von Neamen):

$$V_{br} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} E_{max}^2}{2 e N_A} = \frac{8.854 \cdot 10^{-14} \frac{As}{V cm} \times 11.7 \times 12.25 \cdot 10^{10} V^2/cm^2}{2 \times 1.602 \cdot 10^{-19} As \times 1.5 \cdot 10^{16} cm^{-3}} \approx 26.43 V$$

Zusammen mit der Sättigungs-Drainspannung  $V_{DS,sat} = 1 V$  beträgt die maximale mögliche  
Drainspannung ungefähr  $V_{DS,max} \approx 28 V$ , d.h. der weitaus grössere Anteil der Spannung  
fällt über der Sperrschicht des drainseitigen PN-Übergangs ab.

- Nun muss noch geprüft werden, ob zum sogenannten punch-through-Effekt kommt, bevor  
der Lawinendurchbruch auftreten kann. Punch-through bedeutet, dass die drainseitige Sperr-  
schicht sich bis zur sourceseitigen Raumladungszone ausdehnt. Der Transistor ist dann nicht  
mehr steuerbar und es kommt zu sehr hohen Drainströmen. In unserem Beispiel beträgt die  
Ausdehnung der drainseitigen Sperrschicht:

$$d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} E_{max}}{e N_A} = \sqrt{2 \varepsilon_0 \varepsilon_{Si} V_{br} / e N_A} \approx 1.5 \mu m,$$

d.h. der Kanal ist lang genug, um die Sperrschicht aufzunehmen. Bevor es zum punch-  
through-Effekt kommen kann, tritt der Lawineneffekt auf.

- Sofern man kein anderes Material verwendet, kann man nur die Dotierung ändern:  $V_{br} \propto$   
 $1/N_A$ , d.h. die Durchbruchresistenz des Bauelements liesse sich durch eine geringere Sub-  
stratdotierung vergrössern. Allerdings kommt es dann auch früher zum punch-through-  
Effekt.

## Aufgabe 2: Parameter-Extraktion aus MOSFET-Messdaten

- Die maximal auftretende Kapazität (in Akkumulation und Inversion) ist die Oxidkapazität, hier  $C'_{\text{ox}} = 70 \cdot 10^{-12} \text{ F} / (50 \mu\text{m} \cdot 200 \mu\text{m}) = 7 \cdot 10^{-11} \text{ F} / (5 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}) = 7 \cdot 10^{-7} \text{ F/cm}^2$ .  
 $\implies t_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{ox}}}{C'_{\text{ox}}} = 4.95 \cdot 10^{-7} \text{ cm} \approx \underline{\underline{5 \text{ nm}}}$
- Die Schwellspannung ist durch einen raschen Anstieg der Kapazität gekennzeichnet. Dieser findet hier bei Verkleinerung der Gatespannung statt. Ein solches Verhalten kennzeichnet einen PMOS-Kondensator, in dem die Inversionsladung von Löchern gebildet wird. Daher handelt es sich um ein n-Substrat.
- Ablesen der Werte:  $V_{\text{th}} \approx -0.25 \text{ V}$ ,  $V_{\text{FB}} \approx 1 \text{ V}$ .
- $n^+$  oder ein  $p^+$ -Gate? Wir betrachten dazu die Flachbandspannung:

$$\begin{aligned} n^+\text{-Gate: } V_{\text{FB}} &= \underbrace{\chi}_{\text{Gateseite}} - \underbrace{\left(\chi + \frac{E_g}{2e} - \phi_{fn}\right)}_{\text{Substratseite}} = -\frac{E_g}{2e} + \phi_{fn} &< 0 \\ p^+\text{-Gate: } V_{\text{FB}} &= \underbrace{\chi + \frac{E_g}{e}}_{\text{Gateseite}} - \underbrace{\left(\chi + \frac{E_g}{2e} - \phi_{fn}\right)}_{\text{Substratseite}} = \frac{E_g}{2e} + \phi_{fn} &> 0 \end{aligned}$$

Die Flachbandspannung ist in unserem Beispiel positiv, damit handelt es sich um ein  $p^+$ -Gate. Austrittsarbeit des Gatematerials:

$$e\phi_m = e\chi + E_g = 4.15\text{eV} + 1.12\text{eV} = \underline{\underline{5.27\text{eV}}}$$

- $\phi_{fn} = V_{\text{FB}} - E_g/(2e) = 1 \text{ V} - 0.56 \text{ V} = 0.44 \text{ V}$   
 $N_D = n_i \exp\left(\frac{\phi_{fn}}{V_t}\right) = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \exp\left(\frac{0.44}{0.0259}\right) \approx \underline{\underline{2.39 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}}}$

Die exponentielle Abhängigkeit der Konzentration  $N_D$  von  $\phi_{fn}$  sorgt dafür, dass kleine Fehler in  $\phi_{fn}$  grosse Fehler in  $N_D$  bewirken. Daher ist diese Art der Berechnung im Allgemeinen relativ ungenau.

- Um einen PMOSFET einzuschalten, muss die Gatespannung negativer sein als die Schwellspannung von  $V_{\text{th}} = -0.25 \text{ V}$ , d.h. es ist  $V_{\text{GS}} = -1 \text{ V}$  zu wählen. Wir benutzen die Formel für den Sättigungsdrainstrom und lösen nach der Beweglichkeit auf:

$$\mu_p = \frac{2 I_{D,\text{sat}} L}{W C_{\text{ox}} (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}})^2} = \frac{2 \cdot 0.0002 \text{ A} \cdot 0.005 \text{ cm}}{0.02 \text{ cm} \cdot 7 \cdot 10^{-7} \text{ F/cm}^2 \cdot 0.75^2 \text{ V}^2} = \underline{\underline{254 \text{ cm}^2/(\text{Vs})}}$$

- Um den Transistor im Sättigungsbereich zu betreiben, muss gelten:  
 $|V_{\text{DS}}| \geq |V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}| = 0.75 \text{ V}$