

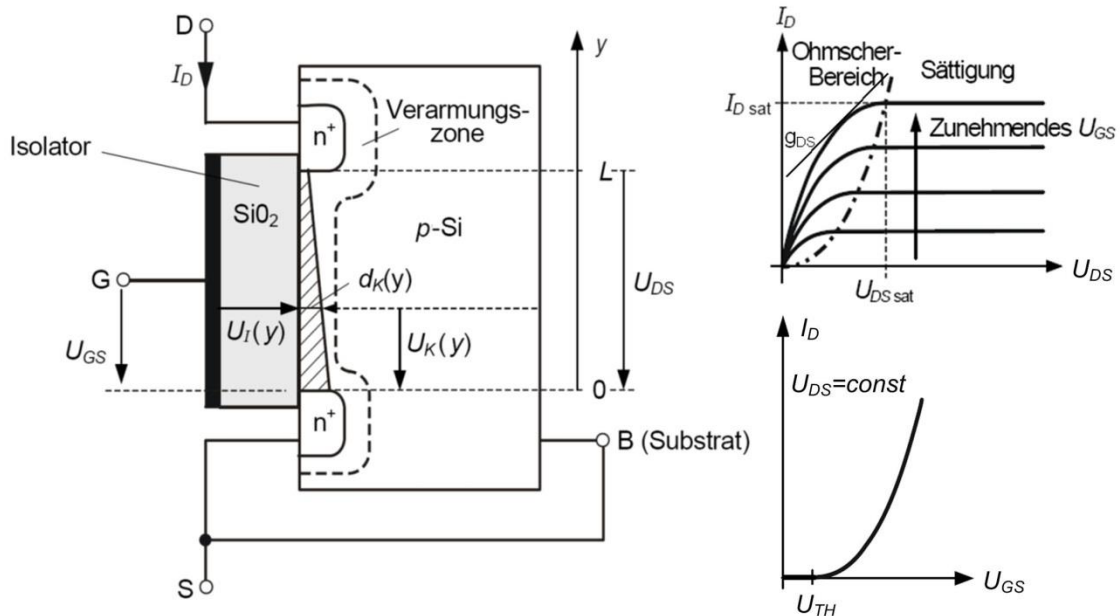
Lösung zum Übungsblatt 13

Aufgabe 1) MOSFET

Ein n-Kanal MOSFET weist eine Kanallänge von $L = 2 \mu\text{m}$ und eine Kanalweite von $b = 30 \mu\text{m}$ auf. Die Einsatzspannung beträgt $U_{th} = 1.4 \text{ V}$; die Elektronenbeweglichkeit μ_n im Inversionskanal beläuft sich auf $600 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$. Die relative Dielektrizitätszahl des Gate-Oxids beträgt $\epsilon_r = 3.9$.

- a) Skizzieren Sie einen Querschnitt durch den MOSFET, tragen Sie die Dotierungen ein und beschriften Sie die für die Funktion relevanten Elemente. Skizzieren Sie das Ausgangskennlinienfeld, d.h. den Drainstrom I_D als Funktion der Drain-Source Spannung U_{DS} mit der Gate-Source Spannung U_{GS} als Parameter.

Lösung:



Formelhaft für n-MOSFET:

Skript Gl. 10.6 angepasst (Vorzeichen für alle Ströme und Spannungen kehren sich um):

$$I_D = -\frac{\mu_n b}{2L} C'_I \left[U_{DS}^2 - 2U_{DS} (U_{GS} - U_{th}) \right] \quad \text{für feste } U_{GS} \text{ und } U_{th}$$

$$\text{mit } C'_I = \frac{\epsilon}{d_I} \quad d_I = \text{Dicke des Gateoxids}$$

Ohmscher Bereich: $U_{GS} \geq U_{th} \Rightarrow U_{DS} \leq U_{GS} - U_{th}$

Kleinsignalwiderstand $r_{DS} = 1/g_{DS} \quad g_{DS} = \frac{dI_D}{dU_{DS}} = \frac{\mu_n b \epsilon}{L d_I} [U_{GS} - U_{th} - U_{DS}]$

- b) Berechnen Sie die Dicke d des Gate Oxids, für die der MOSFET bei $U_{DS} = 3 \text{ V}$ und $U_{GS} = 6 \text{ V}$ den Kleinsignalwiderstand $r_{DS} = 100 \Omega$ zwischen Source und Drain annimmt. Was ändert sich an diesem Ergebnis, wenn die Drain-Source Spannung auf $U_{DS} = 4 \text{ V}$ und $U_{DS} = 5 \text{ V}$ erhöht wird?

Geg.: $U_{GS} = 6 \text{ V}$, $r_{DS} = 100 \Omega$, $\epsilon_r(\text{SiO}_2) = 3.9$, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$

Fall 1: $U_{DS} = 3 \text{ V}$ **Fall 2:** $U_{DS} = 4 \text{ V}$ **Fall 3:** $U_{DS} = 5 \text{ V}$

Ges.: Dicke des Gateoxids d_I

Lösung:

i) Wenn MOSFET im ohmschen Bereich ist

→ Einsetzen in Formeln aus a), Auflösen nach d_I

- **Fall 1** $U_{DS} = 3 \text{ V}$ $U_{GS} \geq U_{th} \Rightarrow U_{DS} \leq U_{GS} - U_{th}$ erfüllt

$$\rightarrow d_I = \frac{\mu_n b \epsilon_0 \epsilon_r r_{DS}}{L} [U_{GS} - U_{th} - U_{DS}] \approx 4.95 \text{ nm}$$

- **Fall 2** $U_{DS} = 4 \text{ V}$ $U_{GS} \geq U_{th} \Rightarrow U_{DS} \leq U_{GS} - U_{th}$ erfüllt

$$\rightarrow d_I = \frac{\mu_n b \epsilon_0 \epsilon_r r_{DS}}{L} [U_{GS} - U_{th} - U_{DS}] \approx 1.88 \text{ nm}$$

- **Fall 3** $U_{DS} = 5 \text{ V}$ → im Sättigungsbereich!

$$\text{Steigung im Kennlinienfeld } g_{DS} = 0 \Rightarrow g_{DS} \neq \frac{1}{r_{DS}}$$

→ es gibt keine Dicke d_I für die eine Lösung möglich wäre!

Aufgabe 2) MOSFET II

Ein n-Kanal MOSFET besitzt eine Gate-Kapazität $C_G = C_I = bL C_I' = 1 \text{ pF}$, wobei C_I' den Kapazitätsbelag des Gates beschreibt. Die Kanallänge beträgt $L = 2 \text{ }\mu\text{m}$ und die Elektronenbeweglichkeit im Kanal liegt bei $\mu_n = 350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Der FET wird an der Sättigungsgrenze $U_{GS} = U_{DS} = 6 \text{ V}$ betrieben. Es wird angenommen, dass die Schwellenspannung bei $U_{th} = 0 \text{ V}$ liegt und dass das Gate-Oxid frei von Raumladungen ist.

a) Wie groß ist der Drainstrom I_D im Abschnürbereich?

Geg.: n-Kanal MOSFET, Gate-Kapazität $C_G = C_I = bL C_I' = 1 \text{ pF}$, Kanallänge $L = 2 \text{ }\mu\text{m}$,

$\mu_n = 350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $U_{GS} = U_{DS} = 6 \text{ V}$, $U_{th} = 0 \text{ V}$

Ges.: Drainstrom I_D im Abschnürbereich

Lösung: i) Im Abschnürbereich (Sättigungsbereich) gilt (Skript Gl. 10.7 und 10.9) unter Berücksichtigung der Stromrichtung (μ_n statt μ_p , Vorzeichen geändert):

$$I_D = I_{D,Sat} = \frac{\mu_n b C_I'}{2L} U_{DS,Sat}^2 = \frac{\mu_n C_g}{2L^2} U_{DS,Sat}^2$$

$$\text{ii) } U_{th} = 0 \text{ V}, U_{GS} = U_{DS} = 6 \text{ V} \Rightarrow U_{DS,Sat} = U_{DS}, \text{ mit } C_g = C_I = 1 \text{ pF} \Rightarrow I_{D,Sat} = 157.5 \text{ mA}$$

b) Berechnen Sie für diesen Strom den örtlichen Verlauf des Kanalpotentials $U_K(y)$ an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Gate-Oxid. Die y-Achse verläuft von Drain in Richtung Source entlang des Inversionskanals.

Hinweis: Stellen Sie den Ausdruck für den Drainstrom allgemein als Funktion der Flächenladungsdichte im Kanal auf. Der Verlauf des elektrischen Feldes ergibt sich aus der ortsabhängigen Driftgeschwindigkeit. Dies führt auf eine Differentialgleichung für $U_K(y)$, die die folgende Form aufweist:

$$I_D = b \mu_n \frac{d}{dy} U_K(y) \cdot C_I' [U_{DS,Sat} - U_K(y)]$$

Nehmen Sie die Source-Elektrode als Potentialnullpunkt an.

Ges.: $U_K(y)$

Lösung:

Bem.: Im Vergleich zum Skript, in dem der p-Kanal-MOSFET betrachtet wird, kehren sich für den n-Kanal-MOSFET die Ströme, Spannungen und die Vorzeichen der Ladungsträger um.

Entgegen der Angabe im Übungsblatt soll der Nullpunkt der y-Achse bei der Source Elektrode liegen. Dies vereinfacht den Ausdruck für $U_K(y)$.

i) Wir beginnen mit dem allgemeinen Ausdruck für den Drainstrom (vgl. Skript Gl. 10.1):

$$I_D = -\rho_K(y) \cdot v(y) \cdot A(y)$$

ii) Wir erhalten mit $\rho_K(y) = \sigma_K(y)/d_K(y)$ (Gl. 9.42), wobei die Kanalladungsdichte $\sigma_K(y) = C'_I [U_{th} - (U_{GS} - U_K(y))] = C'_I [U_K(y) - U_{DS,Sat}]$,

und $v = -\mu_n E(y) = \mu_n \frac{d}{dy} U_K(y)$, $A(y) = b d_K(y)$, (vgl. Skript Gl. 10.4, 10.5)
den folgenden Ausdruck:

$$I_D = b \mu_n \frac{d}{dy} U_K(y) \cdot C'_I [U_{DS,Sat} - U_K(y)]$$

iii) Mit der Integrationsregel $\int f(x) f'(x) dx = \frac{1}{2} f^2(x) + C$ können wir diese Gleichung integrieren zu folgender quadratischer Gleichung:

$$y I_D = b \mu_n C'_I U_{DS,Sat} U_K(y) - \frac{1}{2} b \mu_n C'_I U_K^2(y) + K$$

$$0 = U_K^2(y) - 2 U_{DS,Sat} U_K(y) - \frac{2 [K - y I_D]}{b \mu_n C'_I}$$

Und damit ist

$$U_{K1,2}(y) = U_{DS,Sat} \pm \sqrt{U_{DS,Sat}^2 + \frac{2 [K - y I_D]}{b \mu_n C'_I}}$$

iv) $U_{DS,Sat}$ aus a)-ii), d.h. es fehlt noch K . Aus der Randbedingung $U_K(y=0) = 0$ folgt: $K = 0$

Einsetzen ergibt die Gesamtlösung:

$$U_K(y) = U_{DS,Sat} - \sqrt{U_{DS,Sat}^2 - \frac{2 y I_D}{b \mu_n C'_I}} = U_{DS,Sat} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{y}{L}} \right]$$

Hier wurde der Drainstrom durch die Spannung $U_{DS,Sat}$ ausgedrückt. L bezeichnet die Kanallänge.

- c) Berechnen Sie den Verlauf der in Stromflussrichtung gerichteten E-Feldkomponente $E_y(y)$ im Kanal. Der formale Ausdruck ergibt eine unphysikalische Polstelle bei $y = L$. Erklären Sie dieses Phänomen qualitativ vor dem Hintergrund des Abschnürverhaltens des Transistors. Wie wird sich ein reales Bauteil an dieser Stelle tatsächlich verhalten?

Ges.: $E_y(y)$

Lösung:

$$E_y(y) = -\frac{dU_K(y)}{dy} = \frac{U_{DS,Sat}}{2L\sqrt{1 - \frac{y}{L}}}$$

Bei der Sättigungsspannung schnürt der Inversionskanal am Drainkontakt ab, d.h. die Ladungsträgerinversion bricht zusammen. Durch die Annahme, dass die Leitfähigkeit allein durch die Inversionsträger im Kanal entsteht, wird der Widerstand am Abschnürpunkt unendlich groß, was dort zu einer Polstelle im elektrischen Feld führt. Ein reales Bauteil weist hingegen auch im Falle des Abschnürens eine Restleitfähigkeit durch die thermisch generierte Trägerdichte auf, sodass kein Pol entsteht.

Achtung: Diese Übung findet am Montag, 09.02. um 11:30 Uhr für alle Teilnehmer gemeinsam im NTI-Hörsaal statt.

Am Montag, 02.03.2015 findet um 14.00 Uhr eine Fragestunde im NTI Hörsaal statt.

Fragen können Sie vorher per E-Mail an simon.schneider@kit.edu, matthias.lauermann@kit.edu, sascha.muehlbrandt@kit.edu oder wladislaw.hartmann@kit.edu senden.