

S-69.128 Puolijohdetekniikan laboratoriotyöt
syksy 1997

Leif Roschier 41913W (*leif.roschier@hut.fi*)

Jani Lahtinen 46290H (*jani.lahtinen@hut.fi*)

Eeva Kallio (*ekkallio@cc.hut.fi*)

25. elokuuta 1998

Sisältö

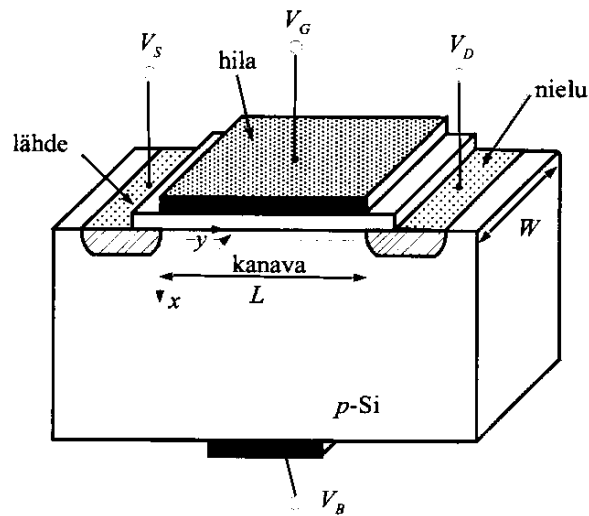
1	Johdanto	3
2	Teoriaa	3
2.1	Lineaarinen alue	4
2.2	Saturaatio alue	5
2.3	Kynnysjännite	5
3	Mittaukset	5
3.1	Mittaus 1	6
3.2	Mittaus 2	6
3.3	Mittaus 3	7
3.4	Mittaus 4	8
3.5	Vastukset	8
3.6	Kapasitanssi	9
4	Parametrien määrittäminen	10
4.1	Transistorin ominaiskäyrä	10
4.2	Kanavanpituusmodulaatioparametri λ	11
4.3	Lineaarisen alueen transkonduktanssiparametri K_L	12
4.4	Saturaatioalueen transkonduktanssiparametri K_S	13
4.5	Kynnysjännite	14
4.6	Hilaoksidin paksuus	14
4.7	$2 \Phi_F $:n ja γ :n määrittäminen	14
4.8	Lateraalidiffuusion määrittäminen	15
4.9	Neliövastuksen määrittäminen	16
5	Parametrit	17
6	Simulaatio	17
7	Pohdinnat	19

1 Johdanto

Tämä on selostus kurssiin *S-69.128 Puolijohdetekniikan laboratoriotyöt* syksyllä 1997, jossa TKK:n Mikroelektroniikkakeskuksen puhtastilassa sekä Elektronifysiikan laboratorion vanhassa puhtastilassa prosessoimme kaksi kiekkoa nelimaskisella PMOS prosessilla. Toisen kiekon prosessi epäonnistui toisessa maskivaiheessa mahdollisesti huonosta kohdistuksesta johtuen. Tätä kiekkoa ei metalloitu. Toiselle kiekolle sensijaan saatiin kohtuullisen onnistuneesti toimivia transistoreja.

2 Teoriaa

Esitämme tässä yksinkertaisen oppikirja-mallin [1] metalli-oksidi-puolijohde-kenttäemissio-transistorin (MOSFET) toiminnalle, jota sovelsimme tekemiimme transistoreihin määrittämällä mallin mukaiset parametrit. Simuloimme määrittämillämme parametreillä transistorin ominaiskäyrästä. Emme pyri antamaan täydellistä johtoa transistorin virta-jännite-kaavoille, vaan antamaan jonkinlaisen lyhyen kuvauksen mitä kautta kaavoihin on päädytty. Lukijaa pyydetään konsultoimaan erinomaista kirjaa Muller-Kamins [3] halutessaan täsmällisen johdon.



Kuva 1. MOS transistorin rakenne.

2.1 Lineaarinen alue

Kuvassa 1 on esitetty poikkileikkaus FET-transistorista. Transistorin voidaan ajatella koostuvan kanavasta, jossa kulkee virta lähteestä nieluun. Kanavan virtaa ohjataan hilan jännitteellä V_G . Kun nielun jännite v_{SD} on pieni, voidaan kanavan jännitettä approksimoida $v_{SG} - V_T$:llä. V_T on kynnysjännite eli arvo jännitteelle hilalla, jonka jälkeen kanava alkaa johtamaan. Elektronien varaustiheydeksi kanavassa saadaan

$$Q'_n = -C'_{OX}(v_{SG} - V_T). \quad (1)$$

Johtavuus Δx :n pituisessa kanavassa on

$$\rho = \frac{\Delta x}{\mu_n |Q'_n|}, \quad (2)$$

joten kanavan vastukselle R saadaan

$$R = \frac{\rho L}{\Delta x W} = \frac{L}{\mu_n |Q'_n| W}. \quad (3)$$

Kanavan virta i_{SD} lineaarisella alueella on tällöin

$$i_{SD} = \frac{v_{SD}}{R} = -\mu_n C'_{OX} \frac{W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}}(v_{SG} - V_T)v_{SD}. \quad (4)$$

Yhdistämällä $\mu_n C'_{OX}$:n yhdeksi vakioksi saadaan

$$i_{SD} = -K'_L \frac{W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}}(v_{SG} - V_T)v_{SD}. \quad (5)$$

Jännitteen v_{SD} kasvaessa ei jännite kanavassa ole enää vakio, jolloin jännitteen vaihtelu kanavan yli täytyy ottaa huomioon. Parempi malli saadaan korvaamalla se keskiarvolla kanavassa $(v_{SD} - v_T) - v_{SD}/2$, jolloin

$$i_D = -K'_L \frac{W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}}[(v_{SG} - V_T)v_{SD} - \frac{v_{SD}^2}{2}]. \quad (6)$$

Kanavan pituuden pienemisestä, v_{SD} kasvaessa, aiheutuvaa muutosta voidaan kohtuullisella tarkkuudella mallintaa suhteessa v_{SD} :hen lineaarisella lisäyksellä vakion λ avulla (*kanavan pituus modulaatio parametri*) jolloin saamme lineaarisen alueen virtajännitekäyräksi,

$$\boxed{i_D = -K'_L \frac{W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}}[(v_{SG} - V_T)v_{SD} - \frac{v_{SD}^2}{2}](1 + \lambda v_{SD})}. \quad (7)$$

2.2 Saturaatio alue

Kun jännite v_{SD} saavuttaa saturaation

$$v_{SD} = v_{SG} - v_T, \quad (8)$$

saadaan sijoittamalla kaavaan 7

$$i_d = -\mu_n C'_{OX} \frac{W_{\text{eff}}}{2L_{\text{eff}}} (v_{SG} - V_T)^2 (1 + \lambda v_{SD}). \quad (9)$$

Nielu-virralle voidaan johtaa tarkempi kaava ottamalla huomioon varausvaihtelu tyhjennysalueella, mutta tällöin malli on laskennallisesti paljon mutkikkaampi. Tätä mallia voidaan kuitenkin hyvällä tarkkuudella approksimoida kaavalla 9 varioimalla sen kerrointa. Tällöin päädytään virran kaavalle saturaatiossa

$$\boxed{i_d = -K'_S \frac{W_{\text{eff}}}{2L_{\text{eff}}} (v_{SG} - V_T)^2 (1 + \lambda v_{SD})}. \quad (10)$$

Saturaation virta on v_{SG} :n funktio samoin parametrein kuin lineaarisella alueella, lukuunottamatta kerrointa K'_S .

2.3 Kynnysjännite

Näissä kaavoissa kynnysjännite V_T määritetään kaavalla

$$\boxed{V_T = V_{T0} - \gamma [\sqrt{2|\Phi_F| + |v_{SB}|} - \sqrt{2|\Phi_F|}],} \quad (11)$$

missä γ on *body-effect* parametri ja Φ_F on pintapotentiaali inversiossa.

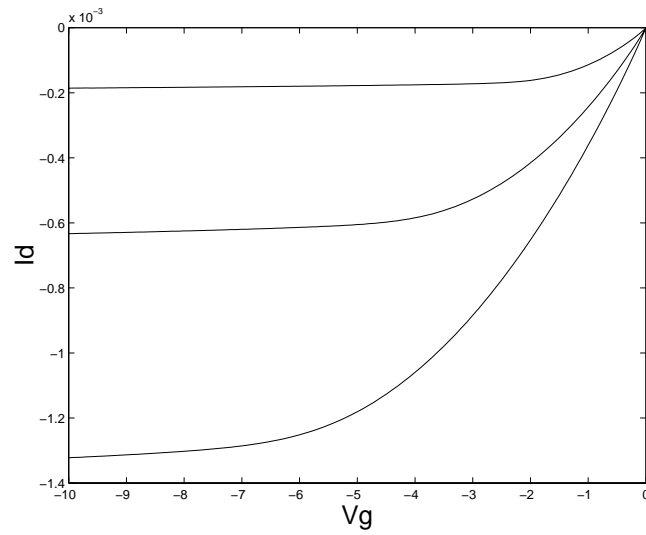
3 Mittaukset

Suoritimme neljä mittausta transistoreista, kaksi vastuksista neliöresistanssia varten, sekä kapasitanssin mittauksen. Kapasitanssi mittauksen tulos on paria kertaluokkaa väärä, joten käytimme laskuissamme erään toisen ryhmän arvoa, jonka saimme assistentilta.

Seuraavassa on listattu tekemämme mittaukset sekä arvot graafisesti esitettyinä.

3.1 Mittaus 1

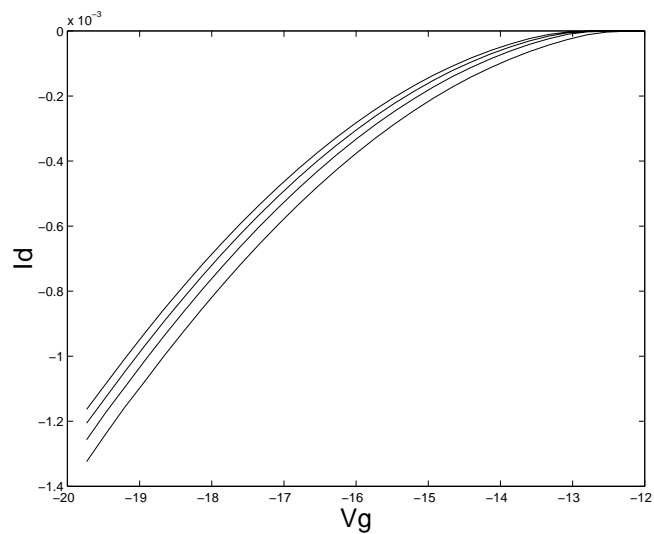
transistori		V_{DS}	V_{GS}	V_{BS}
pituus	leveys			
30μ	$300\mu m$	Sweep 0 – -10	Step -10.-20	0



Kuva 2. Mittauksen 1 tulos.

3.2 Mittaus 2

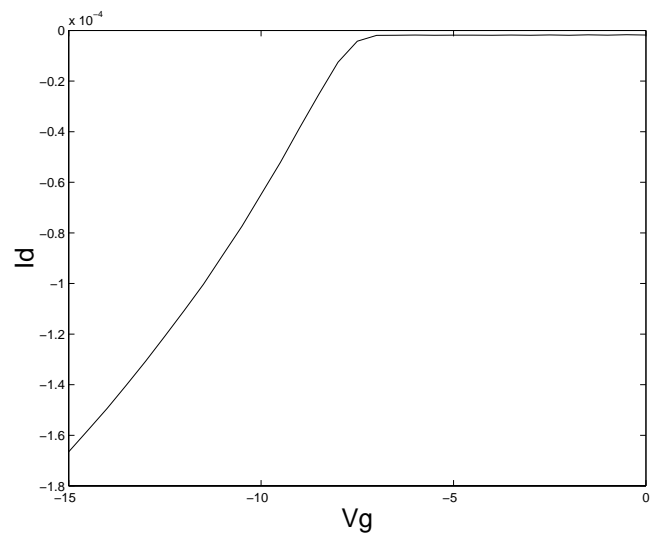
transistori		V_{DS}	V_{GS}	V_{BS}
pituus	leveys			
$30\mu m$	$300\mu m$	-10	Sweep -12– -20	Step 0–3



Kuva 3. Mittauksen 2 tulos.

3.3 Mittaus 3

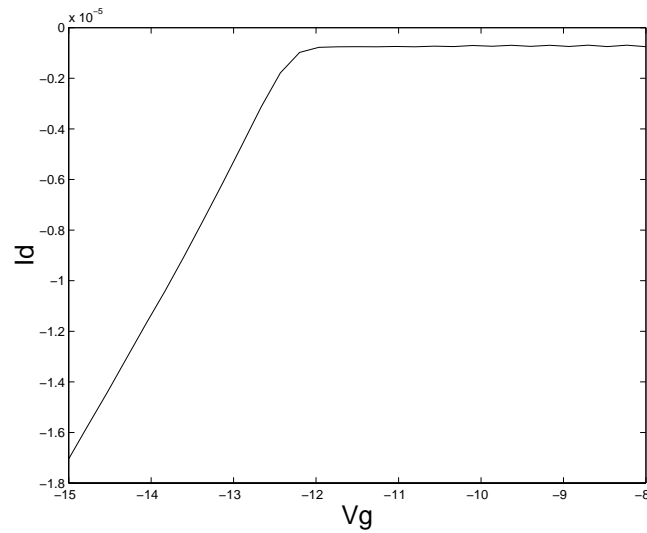
transistori		V_{DS}	V_{GS}	V_{BS}
pituus	leveys			
$10\mu m$	$300\mu m$	-0.1	Sweep 0 – -15	0



Kuva 4. Mittauksen 3 tulos.

3.4 Mittaus 4

transistori		V_{DS}	V_{GS}	V_{BS}
pituus	leveys			
$30\mu m$	$300\mu m$	-0.1	Sweep -8- -15	0

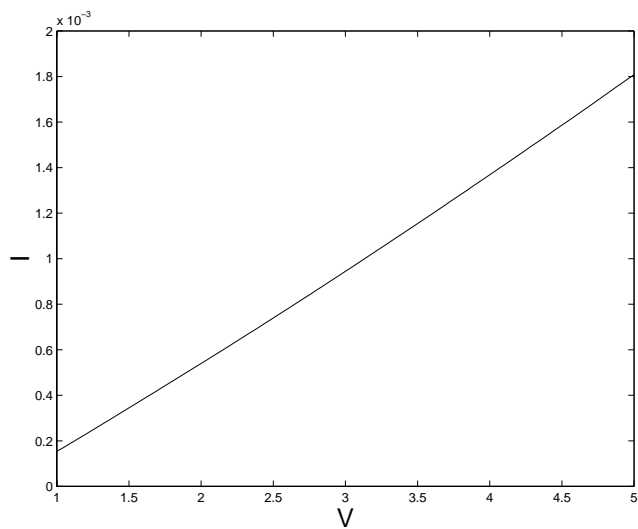


Kuva 5. Mittauksen 4 tulos.

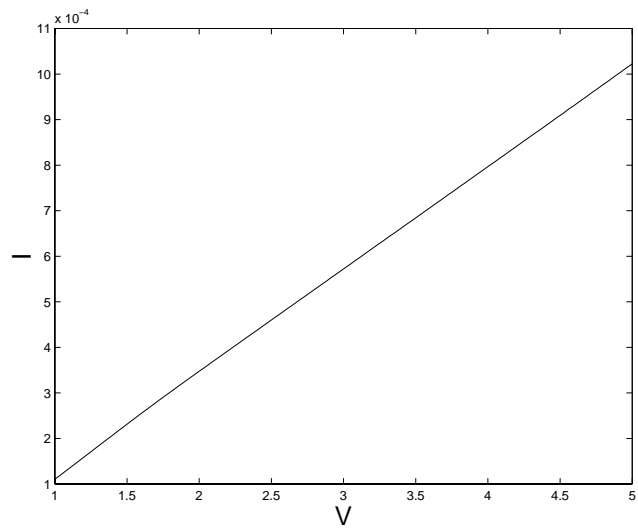
3.5 Vastukset

Neliövastus mitattiin kahdesta serpentiinivastuksesta.

leveys	muoto
$20\mu m$	Serpentiinivastus, 17 neliötä + 10 kulmaa
$20\mu m$	Serpentiinivastus, 34 neliötä + 20 kulmaa



Kuva 6. Vastuksen 1 mittaus.



Kuva 7. Vastuksen 2 mittaus.

3.6 Kapasitanssi

Mittasimme testirakenteen $500\mu m \times 500\mu m$ kokoisesta kondensaattorista saaden arvon $C = 8,0 \cdot 10^{-13} F$, joka on väärää suuruusluokkaa.

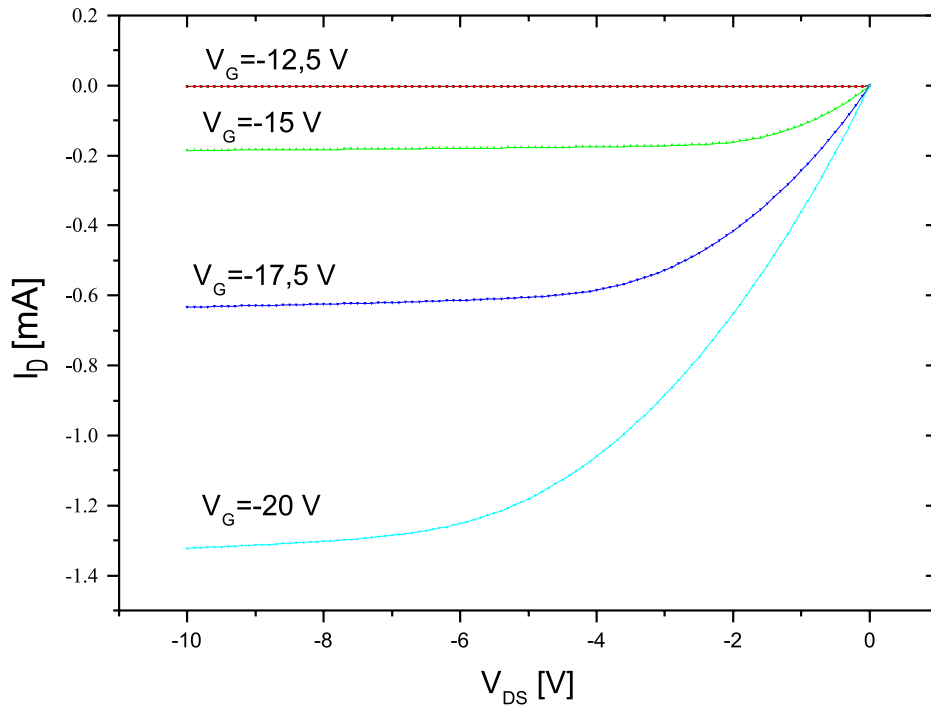
4 Parametrien määrittäminen

4.1 Transistorin ominaiskäyrä

PMOS-transistori on lineaarisella alueella, kun $V_{GS} - V_t < V_{DS} < 0$, jossa V_T on transistorin kynnyksjännite. Linearisella alueella transistorin virtajännitekäyrää kuvaa yhtälö (7). Kun drain-jännitettä lasketaan alle arvon $V_{GS} - V_T$, MOS-transistori siirtyy saturaatioalueelle, jolloin transistorin virta ei enää riipu jännitteestä V_{DS} . Tällöin transistorin virtajännitekäyrä on yhtälön (10) mukainen.

Transistorin karakterisointi aloitettiin ominaiskäyrän mittaamisella; Tähän käytettiin 1. mittauksen tuloksia. Kiekolta valittiin mitattavaksi PMOS-transistori, jonka kanavan leveys oli $W = 300\mu m$ ja pituus $L = 30\mu m$. Ominaiskäyrän mittauksessa drain-jännitettä V_{DS} vaihdettiin arvosta $0V$ arvoon $-10V$. Transistorista mitattiin neljä ominaiskäyrää hilajännitteen arvoilla $-12.5... -20V$.

Transistorin ominaiskäyrä on esitetty kuvassa 8. Ominaiskäyrästä nähdään suoraan, että kynnyksjännite V_T on välillä $-12.5... -15V$.



Kuva 8. Transistorin ominaiskäyrä.

4.2 Kanavanpituusmodulaatioparametri λ

Ominaiskäyrästä on mahdollista selvittää kanavanpituusmodulaatioparametri λ . Parametri saadaan sovittamalla saturaatioalueen mittauspisteisiin suora $i_D = i'_D \lambda v_{DS} + i'_D$ ja määrittämällä suoran kulmakerroin $k = i'_D \lambda$ ja piste i'_D , jossa suora leikkaa y-akselin.

Kuvasta 8 havaitaan, että hilajännitteen arvoilla $-15V$ ja $-17.5V$ ominaiskäyrät ovat selvästi saturaatioalueella, kun drain-jännite on pienempi kuin $-5.0V$. Kun näihin mittauspisteisiin sovitetaan suorat, saadaan tulokseksi:

V_{GS}	k	i'_D	$\lambda = k/i'_D$
$-15V$	$1.58 \cdot 10^{-6}$	$(-)$ 0.00017	0.0093
$-17.5V$	$5.28 \cdot 10^{-6}$	$(-)$ 0.00058	0.0091

Valmistamamme PMOS-transistorin kanavanpituusmodulaatioparametri $\lambda \gg 0.0091/V$. Tulos vaikuttaa järkevältä, sillä [2] mukaan tyypillinen arvo PMOS-

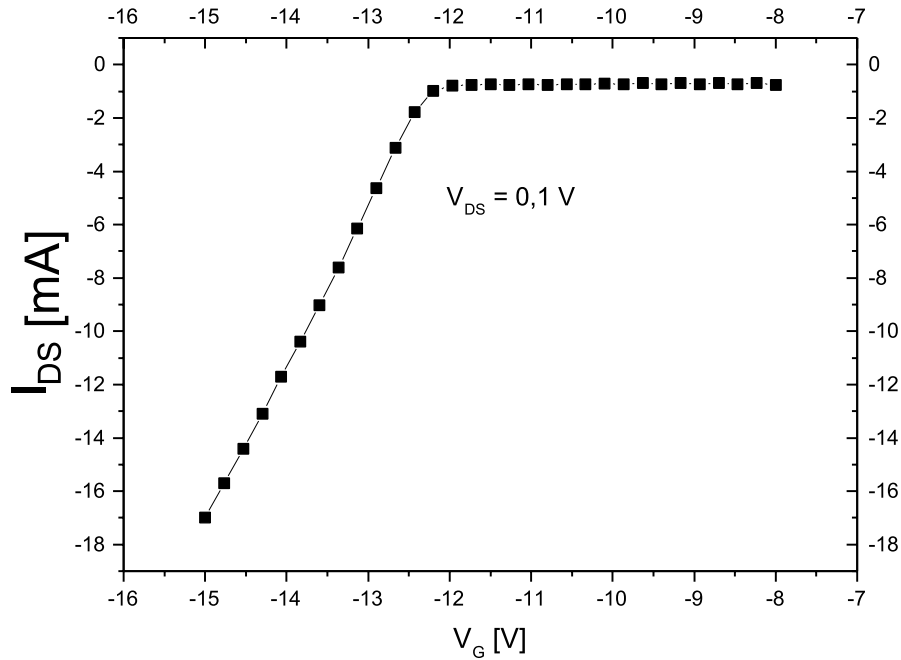
transistorille ($L = 20\mu m$) on $0.0081/V$.

4.3 Lineaarisen alueen transkonduktanssiparametri K_L

Kaava (7) voidaan kirjoittaa muotoon

$$i_D = K'_L \frac{W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}} v_{SG} v_{SD} + \text{vakio}. \quad (12)$$

mittauksen 3 tuloksista saadaan kuva:



Kuva 9. Mittaustulos, jonka perusteella määritimme arvon K'_L :lle.

Määritimme parametrin K'_L mittaamalla virtaa i_D jännitteen v_{SG} funktiona jännitteen V_{SD} ollessa 0.1 V, jolloin olemme varmuudella lineaarisella alueella. Sovittamalla kuvan 9 mittauspisteisiin suora, saadaan suoran kulmakertoimesta $m = 5.81 \cdot 10^{-6} A/V$ kaavalla

$$K'_L = m \frac{W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}} \frac{1}{V_{SD}}, \quad (13)$$

määritettyä K'_L , joka saa arvon

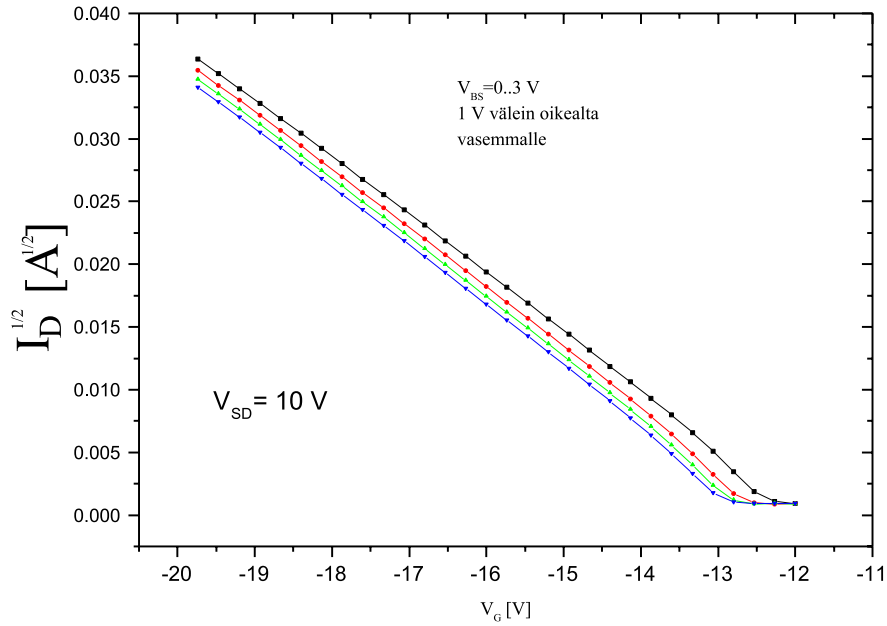
$$K'_L = 6,2 \cdot 10^{-6} A/V^2. \quad (14)$$

Laskussa käytettiin hyväksi jäljempänä laskettua arvoa $\frac{W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}}$ kaavasta (27).

4.4 Saturaatioalueen transkonduktanssiparametri K_S

Saturaatioalueen transkonduktanssin määrittämiseen käytimme, mittauksen 2 dataa, ja kaavaa (10), joka voidaan kirjoittaa muotoon

$$i_D^{1/2} = |K'_S \frac{W_{\text{eff}}}{2L_{\text{eff}}}(v_{SG} - V_T)|. \quad (15)$$



Kuva 10. Mittaustulos, jossa jännitettä bulkissa vaihdeltiin 1 V välein välillä 0...3 V

Kuvassa 10 on esitetty $i_D^{1/2}$ v_{GS} :n funktiona, kun v_{SD} on 10 V jolloin transistori on saturaatiossa. Kuvajasta, jossa $v_{BS} = 0$, saadaan sovittamalla suora kulmakertoimeksi

$$m = \sqrt{\frac{K'_S W_{\text{eff}}}{2L_{\text{eff}}}} = -4,6 \cdot 10^{-3}, \quad (16)$$

josta saadaan määritettyä

$$K'_S = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^2. \quad (17)$$

4.5 Kynnysjännite

Kynnysjännite V_{T0} saadaan kuvan 10 pistejoukkoon $v_{BS} = 0$ sovitetun suoran ja x-akselin leikkauskohdasta kaavan (15) mukaisesti. Tulokseksi saimme

$$V_T = -11,8V. \quad (18)$$

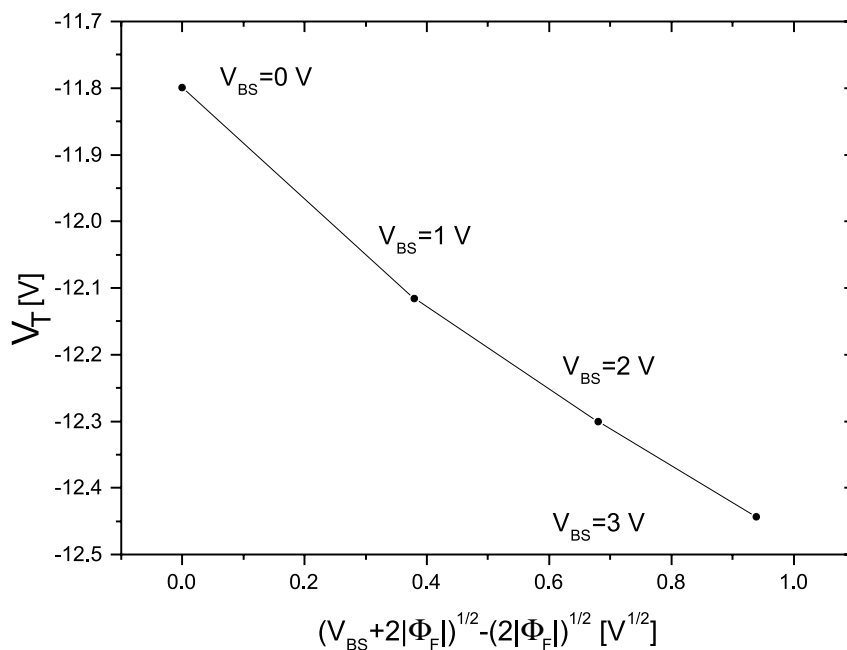
4.6 Hilaoksidin paksuus

Hilaoksidin paksuuden t_{ox} määrittämistä varten mitattiin kapasitanssi piikiekon testirakenteesta, jonka mitat olivat $500\mu m \times 500\mu m$. Mittauksessa käytetty taajuus oli 1 MHz. Kapasitanssi arvoksi saatiin $C = 8,0 \cdot 10^{-13}F$. Tästä voidaan laskea hilaoksidin paksuus yhtälön $C = e_0 e_r A / t_{ox}$, kun tiedetään, että piidioksidin suhteellinen permittiivisyys on 3.9. Oksidin paksuudeksi saadaan $t_{ox} = 11\mu m$. Tämä vaikuttaa kertaluokkaa liian suurelta, sillä [3] mukaan 1000 asteessa 90 minuuttia kasvatettu kuivaoksidi olisi noin $0,2\mu m$ paksu.

Tuloksen sopimattomuudesta johtuen olemme käyttäneet laskuissa kapasitanssille arvoa $1,2 \cdot 10^{-10}F$, jolla saadaan paksuudeksi $72nm$. Tämän arvon mittasi eräs toinen ryhmä ja lukuarvon saimme herra Joni Melliniltä.

4.7 $2|\Phi_F|$:n ja γ :n määrittäminen

$2|\Phi_F|$:n ja γ :n määrittämiseen käytimme kuvassa 10 esitettyjä mittaustuloksia sekä kaavaa (11). Laskimme ensin kynnysjännitteet V_T eri v_{BS} arvoilla. Otimme $2|\Phi_F|$:lle alkuarvaukseksi 0,6 V. Tämän jälkeen sovitin suoran kuvan 11 mukaisesti, jossa on esitetty kynnysjännite V_T parametrin $\sqrt{v_{BS} + 2|\Phi_F|} - \sqrt{2|\Phi_F|}$ funktiona. Tämän suoran kulmakerroin on γ . γ :sta saimme laskettua Φ_F :n kaavalla



Kuva 11. gamma

$$\Phi_F = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{\gamma^2 C_{ox}^2}{3\epsilon_S i q}\right). \quad (19)$$

Itoimimme, kunnes arvot konvergoituivat. Kuvaaja 11 kuvaa tilannetta konvergenssissa jossa saimme arvoiksi

$$\gamma = 0,69V^{1/2} \quad (20)$$

sekä

$$2|\Phi| = 0,64V. \quad (21)$$

4.8 Lateraalidiffuusion määrittäminen

Mittasimme kahdesta $300 \mu\text{m}$ leveään, mutta $30 \mu\text{m}$ ja $10 \mu\text{m}$ pitkän kanavan transistorista, mittaukset 3 ja 4, transkonduktanssia g_m , joka määritetään

$$g_m \equiv \frac{\partial i_D}{\partial v_{SG}} = \frac{K'_L W_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}} v_{SD}. \quad (22)$$

Edellinen kaava pätee lineaarisella alueella, jolla mittasimme transkonduktanssin v_{SD} :n ollessa $0,1 \text{ V}$. Lateraalidiffuusion laskemiseen käytimme Muller-

Kaminskin [3] kaavaa (40):

$$\Delta L = \frac{(L_2 - L_1)g_{m1}}{g_{m1} - g_{m2}}, \quad (23)$$

joka on johdettu yhtälöstä (22). Transkonduktansseiksi saimme

$$g_{m1} = -5.88 \cdot 10^{-6} \mathcal{U}, \quad (24)$$

sekä

$$g_{m2} = -2.21 \cdot 10^{-5} \mathcal{U}. \quad (25)$$

Näistä saimme lateraaliseksi diffuusioksi

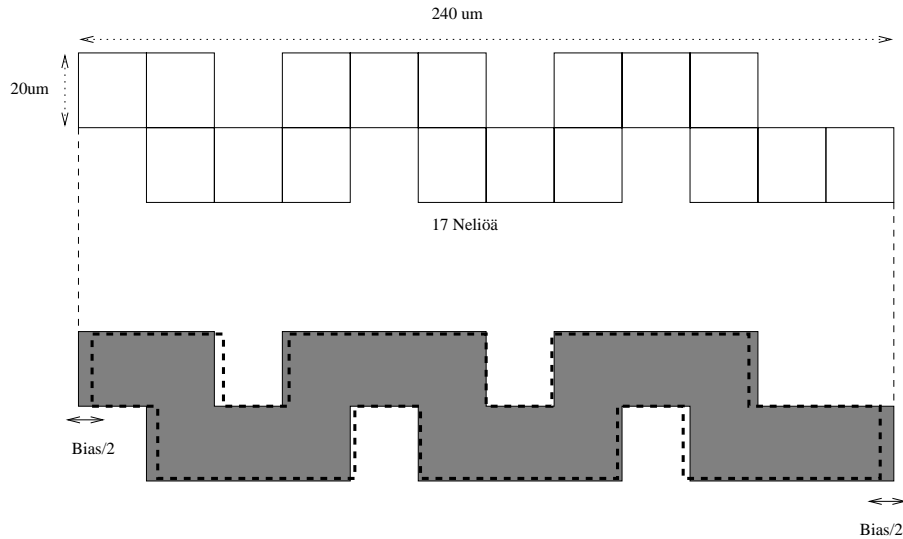
$$\Delta L = 2,7 \mu m. \quad (26)$$

Täten

$$\frac{L_{\text{eff}}}{W_{\text{eff}}} \approx \frac{L_{\text{eff}} + \Delta L}{W_{\text{eff}} + \Delta L} = 0,11 \quad (27)$$

jota olemme käyttäneet aiemmissa laskuissa.

4.9 Neliövastuksen määrittäminen



Kuva 12. Testirakenne neliövastuksen määrittäystä varten.

Neliövastus määritettiin pyyhkäisemällä saman jännitettä yli kahdesta erikoisesta serpentiinivastuksesta ja mittaamalla virtaa niiden läpi. Resistanssin suuruudet laskettiin mittaustuloksista, kuvat 6 ja 7, pienimmän neliösumman

menetelmällä. Jolloin saimme arvot

$$R_1 = 3.0 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 5.1 \text{ k}\Omega$$

Vastuksien pituus saadaan laskettua seuraavasti

$$L_i = (n_i - k_i/2)W, \quad W = 20\mu\text{m}, \quad (28)$$

missä n on neliöiden lukumäärä vastuksessa ja k kulmien. Tällöin

$$L_1 = 240\mu\text{m}$$

$$L_2 = 480\mu\text{m}$$

Neliöresistanssi voidaan määrittää kaavalla,

$$R_s = R_i \frac{W}{L_i - \text{Bias}}, \quad (29)$$

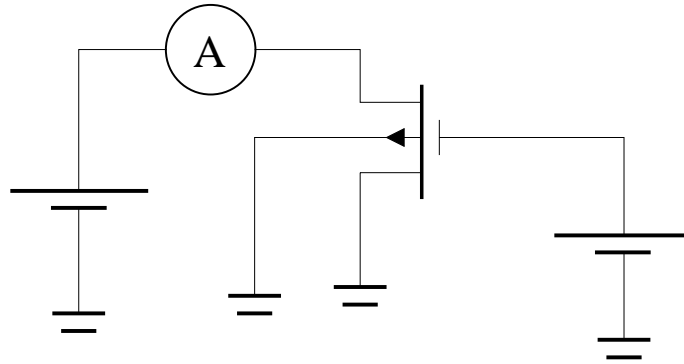
jossa *Bias* on piirretyn laitteen ja todellin laitteen leveyden ero. Täten kahdesta mittauksesta saadaan laskettua arvo neliövastukselle $R_s = 177\Omega$

5 Parametrit

Parametri	Arvo
V_T	-11,8 V
K'	$4,5 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^2$
γ	$0,69 \text{ V}^{1/2}$
ϕ	0,64 V
λ	0.0093
R_s	177 Ω
ΔL	4,12 μm
T_{OX}	72 nm

6 Simulaatio

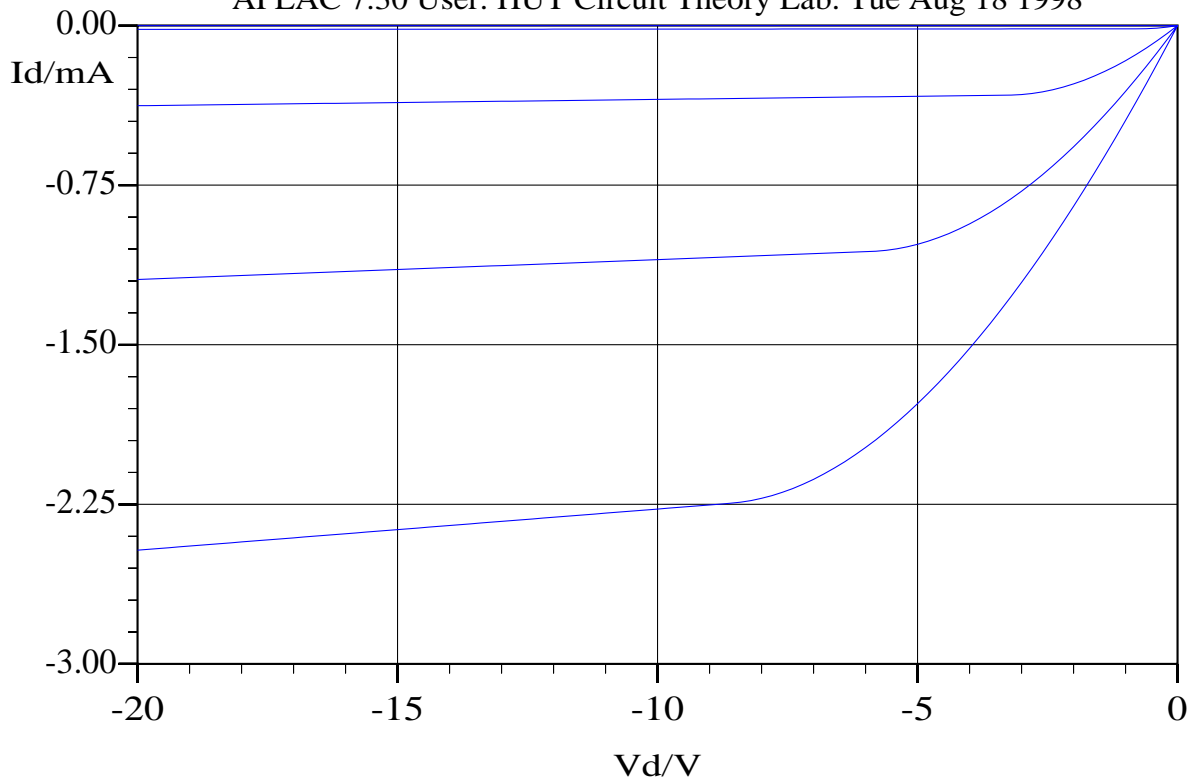
Simuloimme transistorin ominaiskäyrästöä Aplacilla TKK:n ATK-keskuksen koneissa. Simulointipiiri on esitetty kuvassa 13. Lähdekoodi simuloinnille on esitetty kaaviossa *Ohjelma 6.1*. Kuvassa 14 on esitetty simuloitu ominaiskäyrästö.



Kuva 13. Simuloinnin piirikaavio

PMOS ominaisk yr

APLAC 7.30 User: HUT Circuit Theory Lab. Tue Aug 18 1998



Kuva 14. Simuloitu ominaiskäyrä

7 Pohdinnat

Tämä oli opettavainen laboratoriotyö. Opimme paljon prosessoinnista noiden 30 tunnin aikana, jotka vietimme puhdastilassa.

Suuri miinus laboratoriotöissä meidän kohdallamme oli se, että mittaukset epäonnistuivat kokonaan ensimmäisellä kerralla, ja kun viimein saimme 4 kuukauden jälkeen mitattua uudestaan, ei kapasitanssimittaus onnistunut. Tämän seurauksena olemme käyttäneet laskuissamme arvattua hilaoksidin paksuutta 72nm. Tämä myös selittää simuloidun ja mitatun ominaiskäyrästä eroa.

Lisäksi jaetut prosessin kuvaus -paperit sisälsivät paljon väärää tietoa, kuten työn edistyessä kävi ilmi.

Kiitämme assistenttiamme Nina Hakkarasta ohjauksesta töiden aikana.

Viitteet

- [1] Juha Sinkonen, *Puolijohdeteknologian perusteet*, (Reports in Electronic Physics, TKK Otaniemi, 1996).
- [2] P. E. Allen ja D. R. Holberg, *Cmos Analog Circuit Design*, (Holt, Rinehart and Winston, 1987).
- [3] R. S. Muller ja T. I. Kaminsin, *Device Electronics for Integrated Circuits*, (Wiley, New York, 1986).

```

$
$ PMOS transistorin simulaatio
$

Model PMOSI W 300u L 30u GAMMA 0.69
+ VTO -11.8 KP 4.5u PHI 0.64 LAMBDA 0.0093
+ RS 177 LD 4.12u TOX 72n

#define NCurves 5
#define NPoints 101
#define MinVg 10
#define MaxVg 20
#define MinVd -20
#define MaxVd 0

AplacVar Vg=0
AplacVar Vd=0

Volt Vg Gnd Gate DC=Vg
Mosfet Q1 Gnd Gate Source Gnd P MODEL=PMOSI
Short AmMeter DcIn Source I Amperes
Volt Vd DCin Gnd DC=Vd

Sweep "PMOS ominaiskäyrä"
+ DC
+ LOOP NCurves APLACVAR Vg LIN MinVg MaxVg
+ LOOP NPoints APLACVAR Vd LIN MinVd MaxVd
+ X "Vd" "V" MinVd MaxVd
+ Y "Id" "mA" -3 0
+ GRID BIG_SCREEN
+ EPS="pmos.eps"

SHOW XY Vdc(Source) 1e3*Idc(Amperes)

EndSweep

```

Ohjelma 6.1: Aplac-simulaation lähdekoodi