



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

11.11.2020

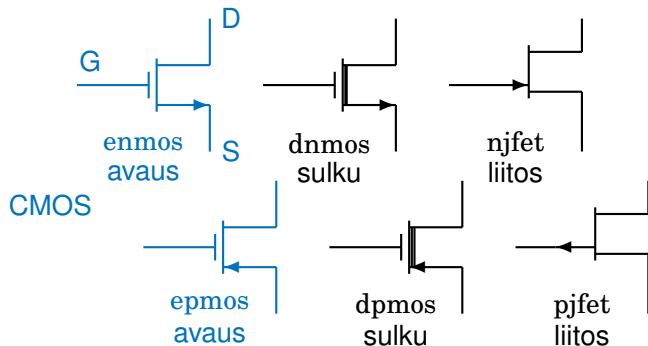
Kanavatransistori eli FET

Luento 11.11.2020

- ▶ *Field Effect Transistor*
- ▶ Mikropiirit ja Mooren laki
- ▶ Mosfet on mikroelektronikan tärkein pelinappula
Kuka kertoisi tästä tiedotusvälineille!?
- ▶ FET-tyypit, rakenne ja toiminta
- ▶ Triodialue vs. saturaatioalue
- ▶ Yhtälöt ja parametrit
- ▶ Jänniteohjattu (elektroninen) kytkin
- ▶ Jännitteellä säädettävä vastus
- ▶ Lisätietoa: *Elektroniikka ja sähkötekniikka, Gaudeamus 2018*

Kanavatransistorit *FETs*

avauskanavatransistori, sulkukanavatransistori ja liitoskanavatransistori

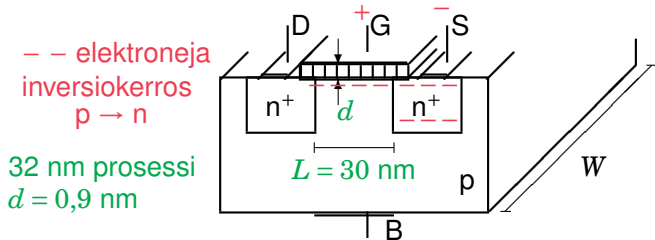


G	D	S	B (vain <i>MOSFET</i>)
<i>gate</i>	<i>drain</i>	<i>source</i>	<i>body, bulk</i>
hila	nielu	lähde	substraatti

Avaskanavatransistori, ENMOSFET keskitymme tähän tyyppiin

N-Channel Enhancement-MOSFET (E-MOSFET)

Kerrosvoileipä: metalli – piidioksidi d – puolijohde (pii, Si)



n^+ = vahvasti seostettu n-puolijohde (paljon vapaita elektroneja)

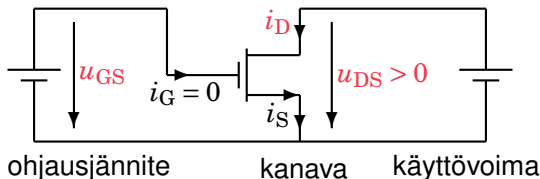
MOS = *Metal-Oxide-Semiconductor*

FET = *Field-Effect-Transistor*

MOSFET = IGFET = *Insulated-Gate-FET*

Kynnysjännite ja kanavan virta *Threshold Voltage*

Kanava voidaan avata ja sulkea osittain tai kokonaan hilaportin kautta



$$i_G = 0 \Rightarrow i_D = i_S$$

Kynnysjännite U_t ($t = \textit{threshold}$)

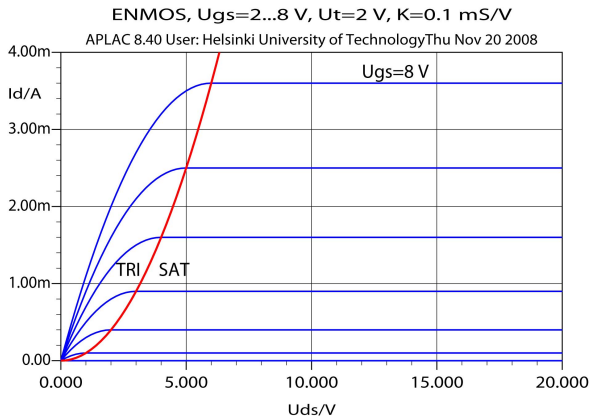
$$u_{GS} \geq U_t \Rightarrow i_D \geq 0$$

$$u_{GS} \leq U_t \Rightarrow i_D \approx 0$$

Subthreshold-alue ja *heikko inversio*: matala jännite, pieni virta

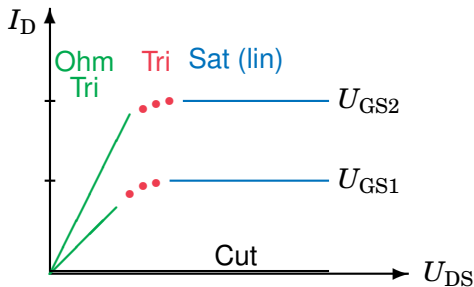
Triodi- ja saturaatio- eli vakiovirta-alue

Raja merkitty punaisella, virta kyllästyy maksimiarvoonsa



Toiminta-alueet: Cut, Ohm, Tri, SAT(FET) \neq SAT(BJT)

MOSFETin johtavuusparametri $K = \frac{1}{2}\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}$ *Conductivity Parameter*



Cutoff $I_D = 0$, kun $U_{GS} \leq U_t$

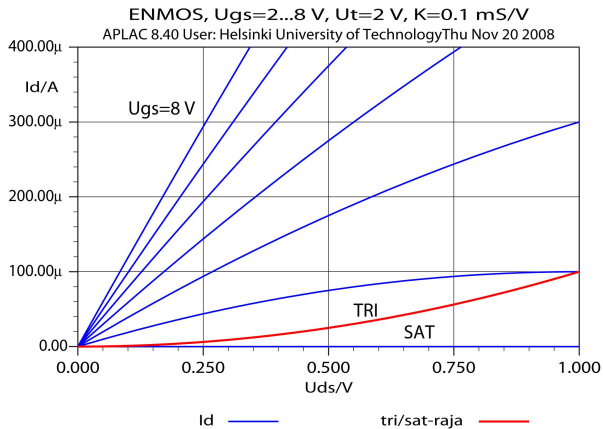
Ohmic (Triode) $u_{DS} \ll u_{GS} - U_t : I_D \approx K[2(U_{GS} - U_t)U_{DS}]$

Triode $u_{DS} \leq u_{GS} - U_t : I_D = K[2(U_{GS} - U_t)U_{DS} - U_{DS}^2]$

Saturation $u_{DS} \geq u_{GS} - U_t : I_D = K(U_{GS} - U_t)^2$

FET vastuksena r_{DS} (ohminen alue) *As a Resistor*

Triodialue pienellä jännitteellä u_{DS} ; käyrät origon kautta kulkevia suorita

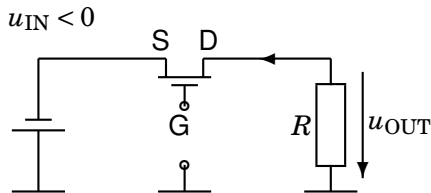
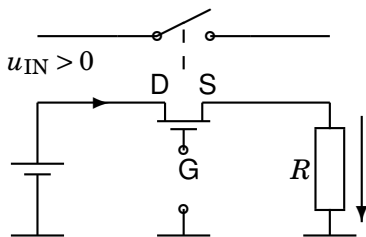


FET kytkimenä (triodialue) *Switch*

Se kumpi on D ja kumpi S, määräytyy u_{DS} :n suunnasta eli u_{IN} :n merkistä!

Analoginen (u ja i) tai digitaalinen (1 vs. 0) kytkin; FET voi olla kumpi tahansa. Esim. looginen Ja-portti on digitaalinen kytkin.

$$i_D = K \left[2(u_{GS} - U_t)u_{DS} - \underbrace{u_{DS}^2}_{\approx 0} \right]$$



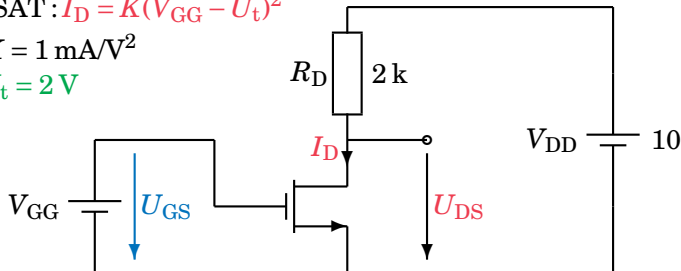
Hyvä esimerkki: kattaa DC-analyysin, kirja EjSt s. 198

Toiminta-alueet: C = Cut, S = Sat, T = Tri. U_{GS} on vedetty hatusta.

$$\text{SAT: } I_D = K(V_{GG} - U_t)^2$$

$$K = 1 \text{ mA/V}^2$$

$$U_t = 2 \text{ V}$$



C/S	$2,0 \text{ V} \leq U_t$	0 mA	10 V	
S	3,0 V	1,0 mA	8,0 V	$> U_{GS} - U_t$
S/T	4,0 V	4,0 mA	2,0 V	$\geq 4,0 - 2$
T(S)	4,2 V	4,84 mA	0,32 V	$< 4,2 - 2$
T	4,2 V	4,28 mA	1,449 V	$< 4,2 - 2$ (seur. sivu)

Triodialueen käsittely (taulukon viimeinen rivi)

Jatkoa edelliseltä sivulta. Eri virtayhtälö, koska ollaan TRI-alueella:

$$I_D = K [2(V_{GG} - U_t)U_{DS} - U_{DS}^2] = \frac{V_{DD} - U_{DS}}{R_D}$$

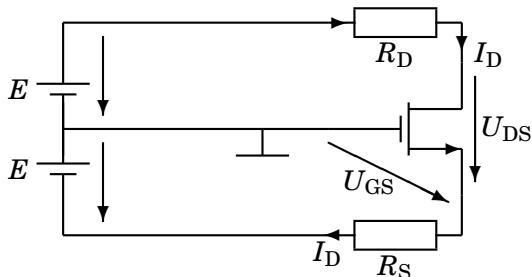
$$\underbrace{R_D K}_2 \left[\underbrace{2(V_{GG} - U_t)}_{2,2} \underbrace{U_{DS}}_x - \underbrace{U_{DS}^2}_{x^2} \right] = \underbrace{V_{DD}}_{10} - \underbrace{U_{DS}}_x$$

$$2x^2 - 9,8x + 10 = 0 \Rightarrow x = 2,45 \pm 1,001$$

$$U_{DS} = x = 1,449 \text{ V} < U_{GS} - U_t = 2,2 \text{ V}$$

⇒ TRI, OK

Esimerkki. Laske I_D . $E = 5\text{ V}$, $R_D = 3\text{ k}\Omega$, $R_S = 1\text{ k}\Omega$, $K = 0,5\text{ mA/V}^2$, $U_t = 1\text{ V}$
Emme tiedä, onko kyseessä SAT- vai TRI-alue. Oletetaan SAT: $I_D = K(U_{GS} - U_t)^2$



$$\text{KJL: } -E + U_{GS} + R_S I_D = 0 \quad (1)$$

$$\text{Merk. } U_{GS} = x \Rightarrow -E + x + R_S \cdot K(x - U_t)^2 = 0 \ \& \ x > U_t \quad (2)$$

$$\text{Posit. juuri: } x = U_{GS} = +3\text{ V} \Rightarrow I_D = K(3 - 1)^2 = 2\text{ mA} \quad (3)$$

$$\text{Tarkistus, onko SAT eli } U_{DS} \geq U_{GS} - U_t = 2\text{ V?} \quad (4)$$

$$-E - E + R_D I_D + U_{DS} + R_S I_D = 0 \Rightarrow U_{DS} = 2\text{ V} \geq 2\text{ V on} \quad (5)$$

Piensignaalianalyysi (SAT-alue) *Small Signal Analysis*

Ei tarvita Taylorin sarjaa, koska yhtälö on muutenkin niin helppo!

$$\overbrace{u_{GS}}^{\text{tot.}} = \overbrace{U_{GS}}^{\text{d.c.}} + \overbrace{u_{gs}}^{\text{a.c.}}$$

$$i_D = K(u_{GS} - U_t)^2$$

$$i_D = K[(U_{GS} - U_t) + u_{gs}]^2$$

$$= \underbrace{K(U_{GS} - U_t)^2}_{I_D} + \underbrace{2K(U_{GS} - U_t)u_{gs}}_{i_d} + \underbrace{Ku_{gs}^2}_{\approx 0}$$

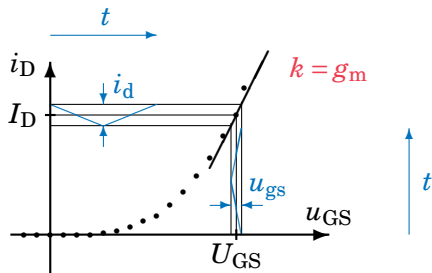
$$I_D \approx K(U_{GS} - U_t)^2$$

$$i_d \approx \underbrace{2K(U_{GS} - U_t)}_{g_m} u_{gs}$$

"Dyn. siirtokonduktanssi" *transconductance* g_m on fetin "vahvistus".

Transkonduktanssi eli myötäyrkkyys g_m

Kulmakerroin k määrää signaalin 'vahvistuksen', vrt. diodi ja BJT



$$i_D = K(u_{GS} - U_t)^2$$

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{GS}=U_{GS}} = 2K(U_{GS} - U_t) = 2\sqrt{KI_D}$$

Mikropiirien kehityksestä *Integrated Circuits*

MOSFET → mikroprosessori

- ▶ **IC** (flip-flop, 2 kpl BJT, hybridi) 1959
Texas Instruments, Jack Kilby
Vuoden 2000 Nobel-palkinto myönnettiin taskulaskimen keksijälle.
- ▶ **MOSFET** 1960 (Bell Labs.)
M. Atalla Egypti, k. 2009 ja D. Kahng Korea, k. 1992
- ▶ **CMOS** (= NMOS + PMOS) 1963-1968 (RCA)
Yleisin mikropiiriteknologia (CPU, GPU, DRAM, SSD, ym.)
- ▶ **Intel** 1968 (*'More-Noise'*)
← Gordon Moore ja Robert Noyce, Fairchild (IC myös 1959)
Noycen IC oli monoliitti, menikö Nobel väärälle miehelle?
8 chipin tilaus 1969, vain 2 suunnittelijaa, piti keksiä
Mikroprosessori 4004 vuonna 1971

Mikropiirit, IC

Luokittelu, esim. ULSI = *Ultra Large Scale Integration*

Small, Medium, Large, Very Large, Ultra, Giant, ...
Gimme bigger words! BFL?

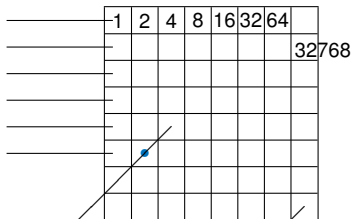
	Loogisia portteja	Fettejä
SSI	< 10	$< 10^2$
MSI	$< 10^2$	$< 10^3$
LSI	$< 10^3$	$< 10^4$
VLSI	$< 10^4$	$< 10^5$
ULSI	$< 10^5$	$< 10^6$
GSI	$> 10^5$	$> 10^6$
XBOX One X		$7000 \cdot 10^6$
AMD 32-core		$19200 \cdot 10^6$

Moore's Law. Alamainen pyytää kuninkaalta

riisinjyviä palkkioksi palveluksestaan; hölmö kuningas myöntyy!

Olet nyt tässä •

IC 1959
 μ P 1971
PC 1983
Win 95
iPhone -07
Sycamore 2019



1 jyvä shakkilaudan 1. ruutuun

2 jyvää 2. ruutuun

...

512 jyvää 10. ruutuun

...

32 000 vadillista jyvää vuonna 2010

...

Biljoona uima-altaallista jyvää 64. ruutuun (2053)

Kaksinkertaistumisen voima ja huikeat visiot!

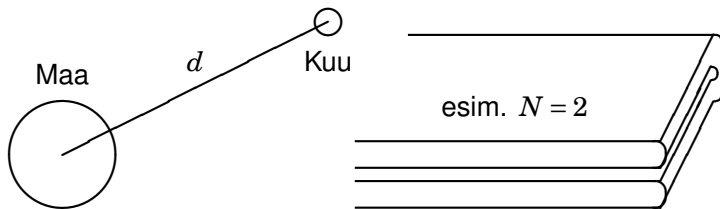
From Earth to Moon, by Folding a Sheet of Paper

Paperin paksuus: $t = 0,15$ mm (20 arkin pino noin 3 mm)

Taita paperi 42 kertaa!

$$N = 42 \Rightarrow 2^N \cdot t > 1,5d$$

missä $d = 385 \cdot 10^6$ m on matka maasta kuuhun!



(ei mittakaavassa)

Ensi kerralla operaatiovahvistin

Elektroniikan yleistyökalu

Voit googlata hyvän PDF-kirjan: "Op amps for everyone Texas Instruments".

Toinen opaskirja:

[http:// www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf](http://www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf)