



Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

# Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

17.11.2021

# Kanavatransistori eli FET

Luento 17.11.2021

- ▶ *Field Effect Transistor vs. Bipolar Junction 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: Elektronikka ja sähkötekniikka, sivut 183–206

# Mikropiirien kehityksestä *Integrated Circuits*

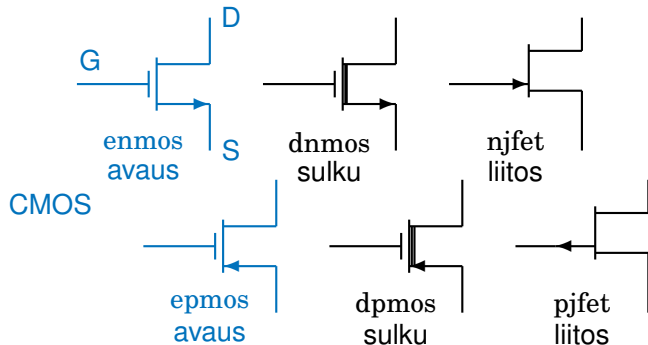
Elektroniikan historia yhdellä sivulla.

- ▶ Transistori (BJT) 1947, 74 v.
- ▶ IC (flip-flop, 2 kpl BJT, hybridi) 1959, 60+ v.  
Texas Instruments, Jack Kilby  
Vuoden 2000 Nobel-palkinto myönnettiin taskulaskimen keksijälle.
- ▶ MOSFET 1960 (Bell Labs.), 60+ v.  
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. Mikroprosessori  
← 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. 50 v.



# Kanavatransistorit *FETs*

avauskanavatransistori, sulkukanavatransistori ja liitoskanavatransistori

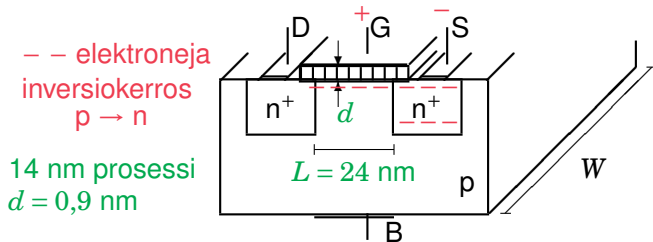


G	D	S	B (vain <i>MOSFET</i> )
<i>gate</i>	<i>drain</i>	<i>source</i>	<i>body, bulk</i>
hila	nielu	lähde	substraatti

# Avauskanavatransistori, 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)

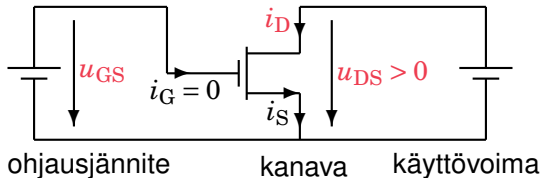
MOS = *Metal-Oxide-Semiconductor*

FET = *Field-Effect-Transistor*

MOSFET = IGFET = *Insulated-Gate-FET* (eristehilatransistori)

# 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  $U_t$  ( $t = \text{threshold}$ )

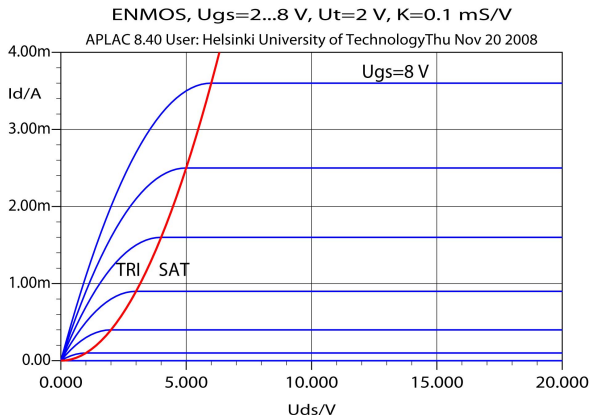
$$u_{GS} \geq U_t \Rightarrow i_D \geq 0$$

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

*Subthreshold-alue* ja *heikon inversion alue*: matala jännite, pieni virta.

# Triodi- ja saturaatio- eli vakiovirta-alue

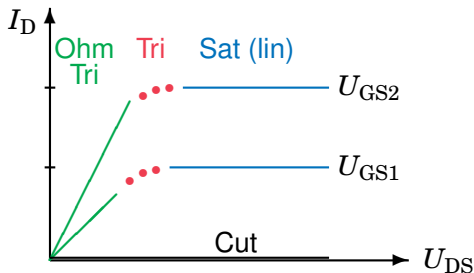
Raja merkitty punaisella, virta kyllästyy maksimiarvoonsa





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

Yhtälöt: Kako ja dtf.pdf

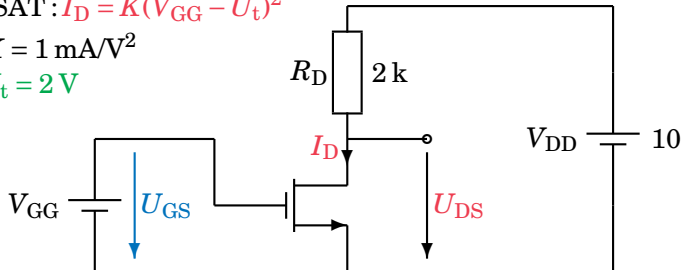
# Hyvä kotitehtävä: kattaa koko DC-analyysin, kirja EjSt s. 198

Toiminta-alueet: C = Cut, S = Sat, T = Tri.  $U_{GS}$ -arvot 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

# Mikropiirit, IC

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

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

	Loogisia portteja
SSI	$< 10$
MSI	$< 10^2$
LSI	$< 10^3$
VLSI	$< 10^4$
ULSI	$< 10^5$
GSI	$> 10^5$

# Montako transistoria?

Siis montako Mos-kanavatransistoria?

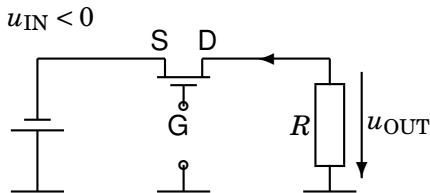
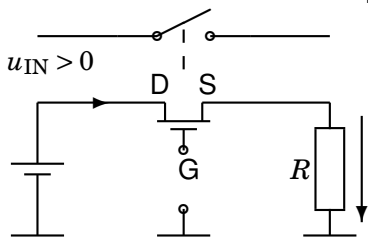
CPU	Fettejä
Intel 4004 1. mikroprosessori, 750 kHz, PMOS	2250
Intel 8088 IBM PC, 4,77 MHz, NMOS	29 000
Motorola 68000	68 000
Pentium 4, CMOS	$42 \cdot 10^6$
Intel Core 2 Duo Conroe	$291 \cdot 10^6$
i7 Broadwell-E	$3200 \cdot 10^6$
AMD Ryzen 7 3700X	$5990 \cdot 10^6$
XBOX One X	$7000 \cdot 10^6$
Qualcomm Snapdragon 865, Smartphone	$10\,300 \cdot 10^6$
Apple M1 Max	$57\,000 \cdot 10^6$ SoC

# FET kytkimenä (triodialue) *Switch*

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

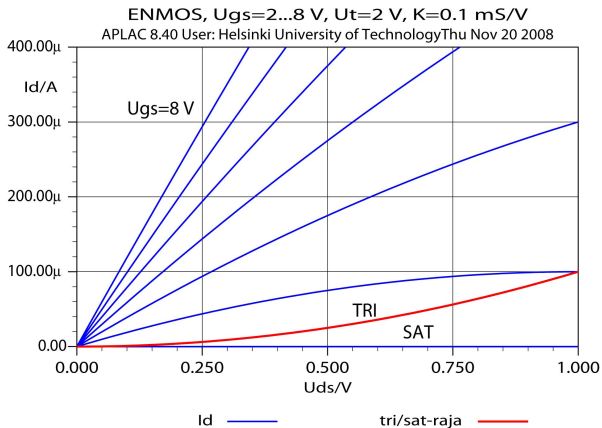
Analoginen ( $u$  ja  $i$ ) tai digitaalinen (1 vs. 0) kytkin; FET voi olla kumpi tahansa. Esim. looginen Ja-portti on digitaalinen kytkin.

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



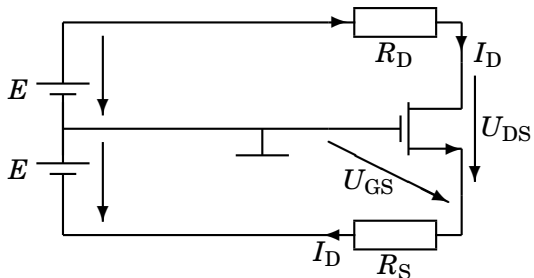
# FET vastuksena $r_{DS}$ (ohminen alue) *As a Resistor*

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



# Kotitehtävä

Laske  $I_D$ .  $E = 5\text{ V}$ ,  $R_D = 3\text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 1\text{ k}\Omega$ ,  $K = 0,5\text{ mA/V}^2$ ,  $U_t = 1\text{ V}$





# Kotitehtävän ratkaisu

Emme tiedä, onko kyseessä SAT- vai TRI-alue.

Oletetaan SAT-alue eli  $I_D = K(U_{GS} - U_t)^2$ :

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

$$\text{Merk. } U_{GS} = x \Rightarrow \quad (2)$$

$$-E + x + R_S \cdot K(x - U_t)^2 = 0 \quad (3)$$

$$x > U_t \quad (4)$$

$$\text{Posit. juuri: } x = U_{GS} = +3 \text{ V} \Rightarrow I_D = K(3 - 1)^2 = 2 \text{ mA} \quad (5)$$

$$\text{Tarkistus, onko SAT eli } U_{DS} \geq U_{GS} - U_t = 2 \text{ V?} \quad (6)$$

$$-E - E + R_D I_D + U_{DS} + R_S I_D = 0 \Rightarrow U_{DS} = 2 \text{ V} \geq 2 \text{ V on} \quad (7)$$

# Piensaalianalyysi (SAT-alue) *Small Signal Analysis*, vrt. teht. 64.

Ei tarvita Taylorin sarjaa, koska yhtälö on muutenkin helppo

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

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

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

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

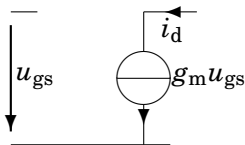
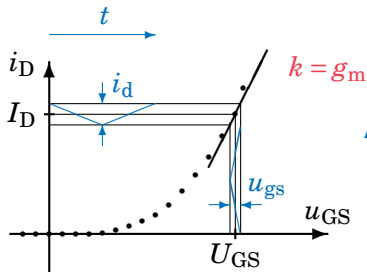
$$I_D \approx K(U_{GS} - U_t)^2$$

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

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

# Transkonduktanssi eli myötäjyrkkyys $g_m$

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



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

$$i_d = g_m u_{gs}$$

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

Huomaa case-sensitiivisyys!

# Miten Piilaakso syntyi?

Transistorin keksijät saivat syksyllä 1956 fysiikan Nobel-palkinnon. Shockleyn sanottiin olleen vainoharhainen tyranni, mikä johti ongelmiin hänen yrityksessään. Seuraavana vuonna 8 tutkijaa irtisanoutui perustaen Kalifornian *Mountain Viewiin* pienen autotallifirman. Näiden kahdeksan ”petturin” joukossa olivat mm. Robert Noyce ja Gordon Moore. Firman sponsorina oli lentokoneistaan tunnettu monialayrittäjä Sherman Fairchild, joka ehti perustaa kaikkiaan 70 yritystä. Firman nimeksi tuli tämän innoittamana Fairchild Semiconductor.

Nykyelektroniikka perustuu ainakin osaksi Fairchildin yritystoimintaan. Yhtiö kehitti mm. ensimmäisen mikropiirioperaatiovahvistimen  $\mu A702$ . Nimen *mikro* tuli sanasta mikroelektroniikka. Fairchild Semiconductoria pidetään Piilaakson hautomona ja siitä alkaneet *spin-off*-yritykset tunnetaan nimellä *Fairchildren*. Keväällä 1968 Noyce ja Moore perustivat NM Electronicsin (vrt. ”more noise”). Intel perustettiin, kun NME osti tavaramerkin hotelliketju Intelcolta. Moore tuli myöhemmin tunnetuksi Mooren laista, vaikka on itse asiassa yksi mikroprosessorin keksijöistä. Noyce keksi monoliittisen mikropiirin samana vuonna kun Kilby Nobel-palkitun hybridipiirinsä.

# Kaksinkertaistumisen voima ja huikeat visiot!

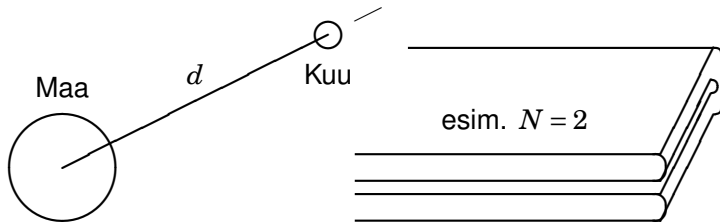
*From Earth to Moon, by Folding a Sheet of Paper, cf. Mythbusters: 7+ Times*

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!

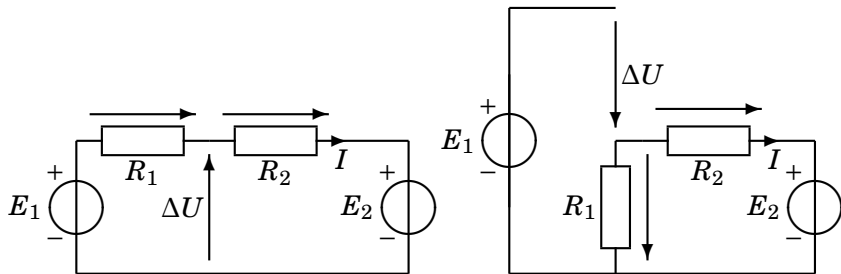


(ei mittakaavassa)

# Ensi viikon teoria kolmessa minuutissa

Kirjoita molemmille piireille Kirchhoffin jännitelaki

Millä  $E_2$ :n arvolla  $\Delta U = 0$ ? Eri tulos vasemmalla ja oikealla. Voit myös kokeilla lukuarvoja  $E_1 = 1$  V ja  $\frac{R_2}{R_1} = 2$ , esim.  $R_1 = 10$  k $\Omega$ .



Tämän hallinta riittää operaatiovahvistimen teorian oppimiseen!

# Ensi kerralla operaatiovahvistin

Elektroniikan yleistyökalu ja helppo koetehtävä

Käytännön vinkkejä:

Hyvä PDF-kirja: "Op amps for everyone (Texas Instruments)".

[https://web.mit.edu/6.101/www/reference/op\\_amps\\_everyone.pdf](https://web.mit.edu/6.101/www/reference/op_amps_everyone.pdf)

Toinen opaskirja:

<http://www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf>

Viime viikolla mainittu: "The Art of Electronics"

<http://www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf>