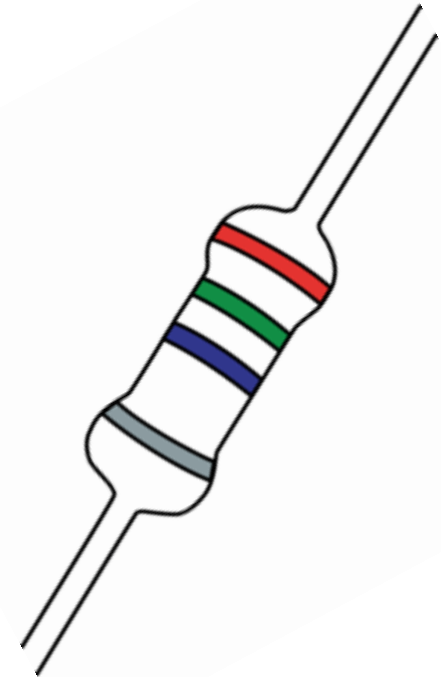


- OP-Amp – Komplex Återkoppling.
- Klippning. Maximal spänning/ström. Gain-bandwidth-product. Offset. Slewrate
- Avkopplingskondensator
- Transistorer - MOSFETs



# Lab 4

---

Anmälan på hemsidan

Projektnummer du får vid anmälan

För att bli godkänd

- Du ska demonstrera en *fungerande* krets - se till att ha kopplat upp den innan!
- Du ska presentera vad du gjort – **7-10** minuters presentation. (Powerpoint)

**Lab 2 – godkänd på rapporten innan  
julupphålet.**

# Icke-ideal operationsförstärkare

$v_n/v_p$  måste vara lite större (0.7-3V) än  $V_{CC}$

- Små  $V_{CC}$

Klipping / Distortion:

Maximal utspänning: Lite mindre än +/-  $V_{CC}$

Maximal utström:

- Stora spänningar
- Stora strömmar

Slew rate:

- Höga frekvenser (MHz)

Offset Voltage:

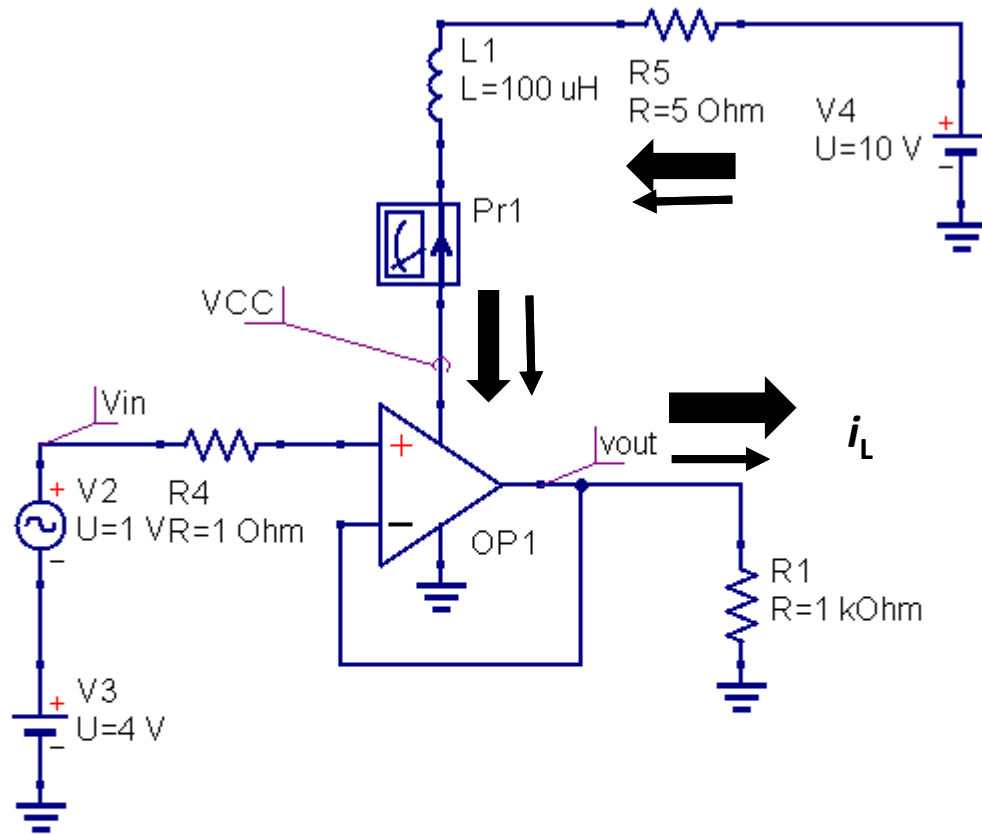
- Små signaler (mV)

Frekvensberoende förstärkning:  $A_d \approx \frac{A_{d0}}{1+j\frac{\omega}{\omega_0}}$

- Höga frekvenser (kHz-MHz)
- Stora förstärkningar

Bias  $i_n/i_p > 0$

# Avkoppling - Biasering



Elektriska ledare & sladdar

- Induktans
- Resistans

Då  $i_L$  ökar drar OP-ampen mer ström genom biaseringen!

Spänningsförluster i  $L_1$  och  $R_5$  gör att  $V_{CC}$  ändras!

Op-ampens förstärkning ändras då  $V_{CC}$  ändras.

Kan ge upphov till 'konstiga' fel, speciellt vid höga frekvenser (10+ kHz på breadboarden..)

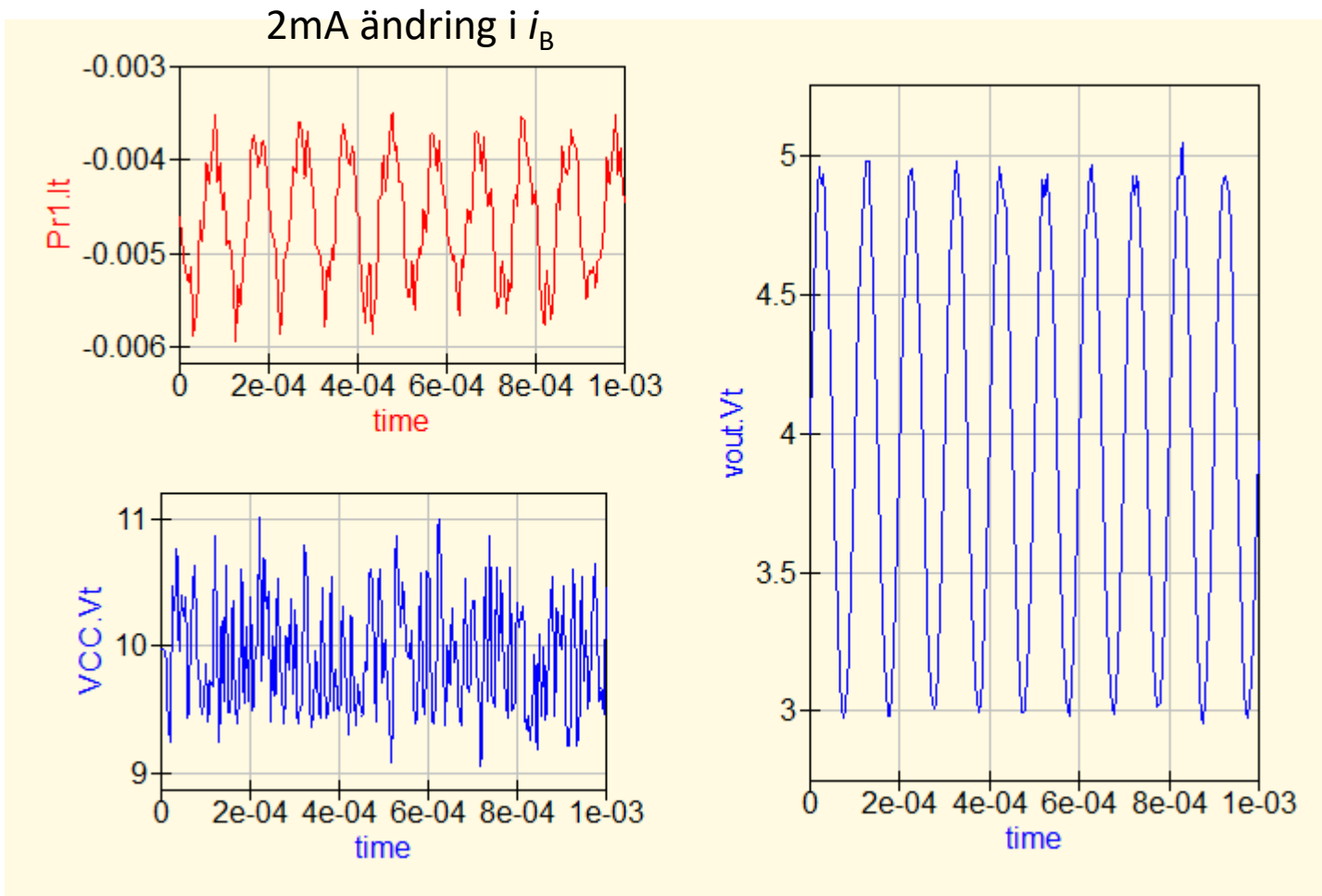
dc-simulering

DC1

transientsimulering

TR1  
Type=lin  
Start=0  
Stop=1 ms

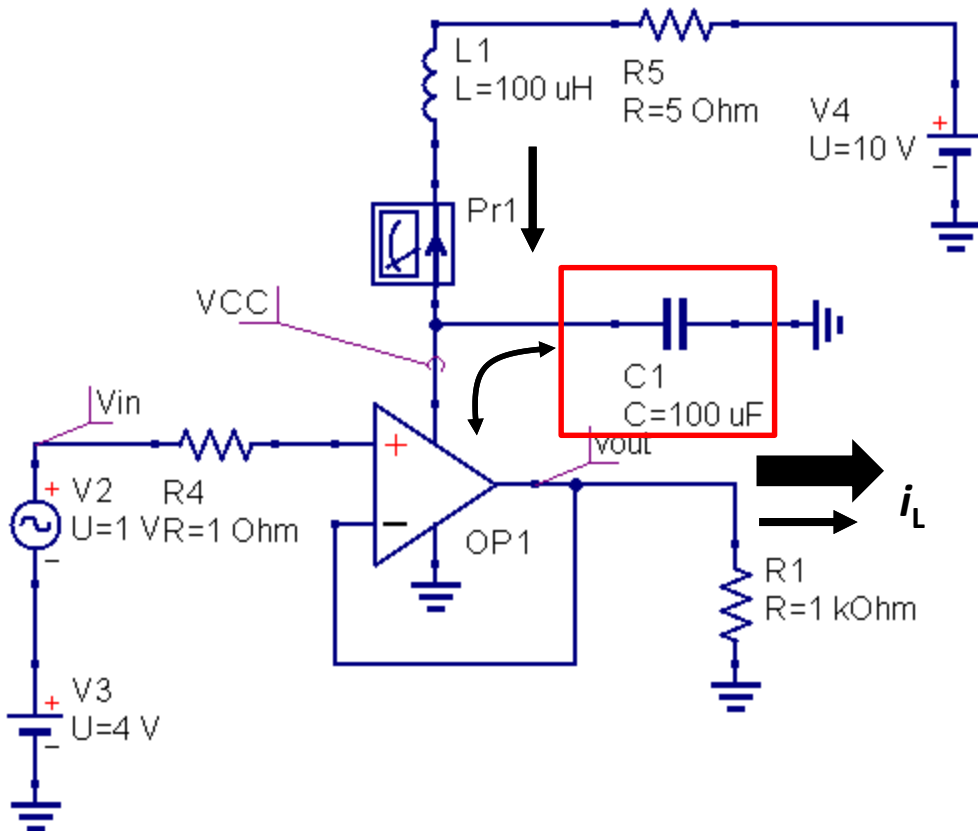
# Avkoppling - Biasering



Utan avkoppling:  $V_{CC}$  ändras +/- 2V!!

Op-ampens förstärkning varierar lite med  $V_{CC}$

# Avkoppling - Biasering



Lösning – placera kondensatorer nära  $\pm V_{CC}$  och jord på OP-ampen.

Kan förse OP-ampen med extra elektrisk energi

Stabiliserar spänningen då ström flyter in/ut ur kondensatorn – inget extra spenningsfall över  $L_1$  och  $R_5$ !

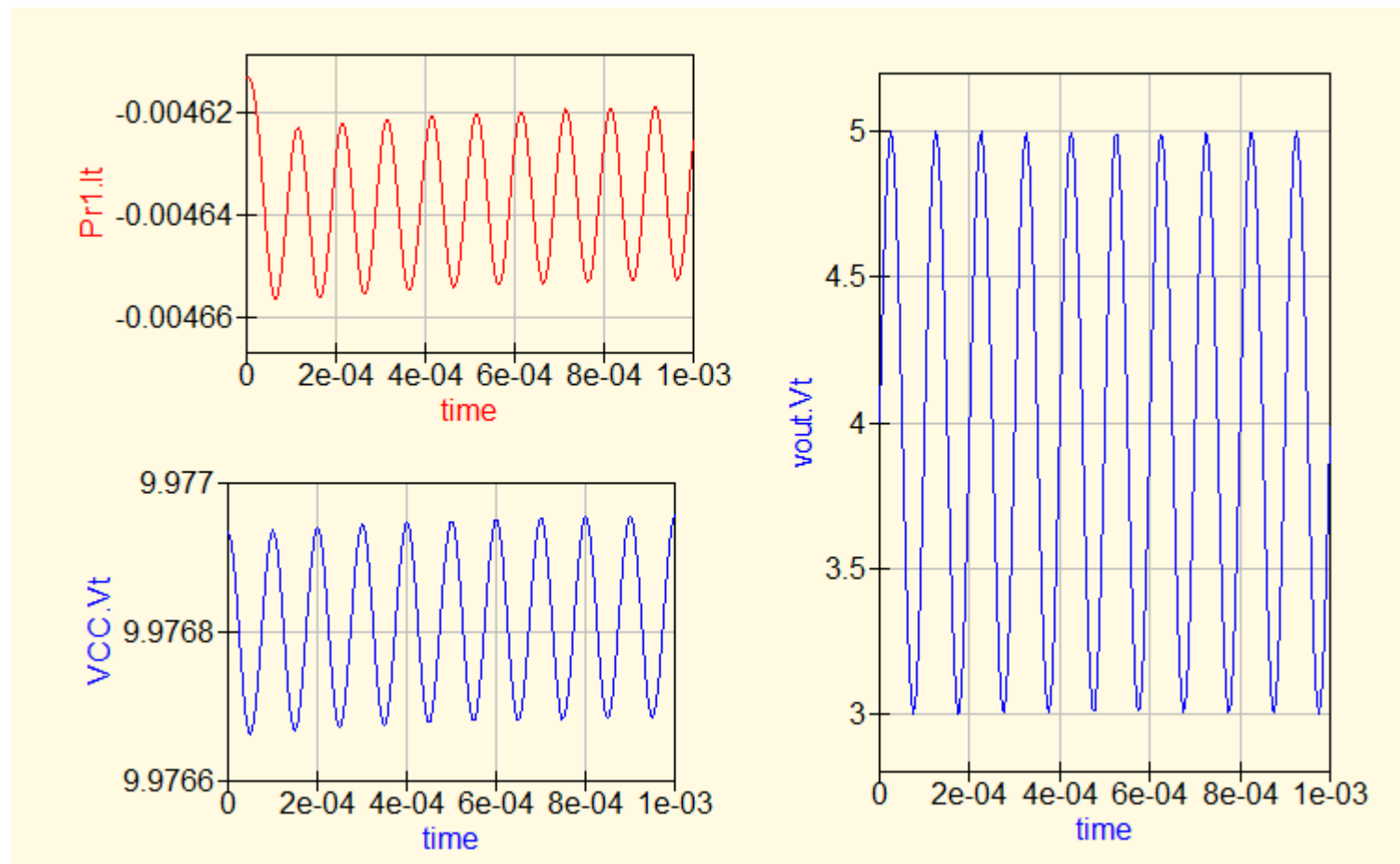
dc-simulering

DC1

transientsimulering

TR1  
Type=lin  
Start=0  
Stop=1 ms

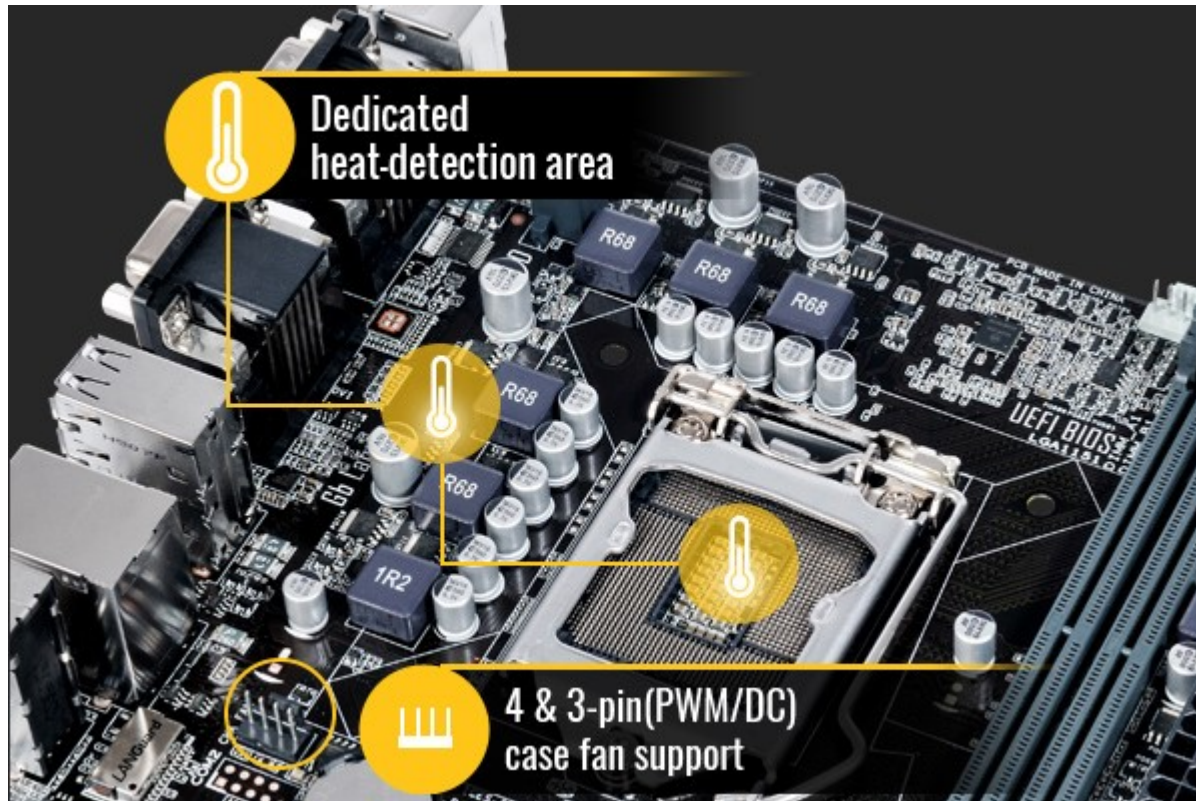
# Avkoppling - Biasering



Med avkoppling:  $V_{CC}$  ändras 1mV!!

Minimal variation i förstärkning

# Avkoppling - Biasering

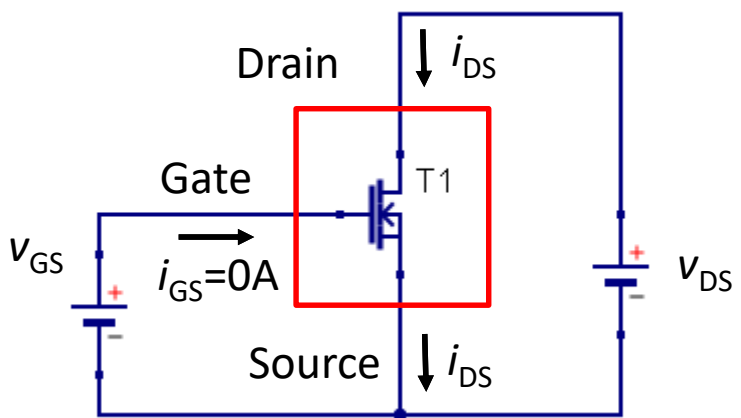


Moderkort – gott om avkopplingskondensatorer..

- Bygger du analoga kretsar vid höga frekvenser – avkopplingskondensatorer!
- Digitala kretsar – i princip alltid avkoppling!

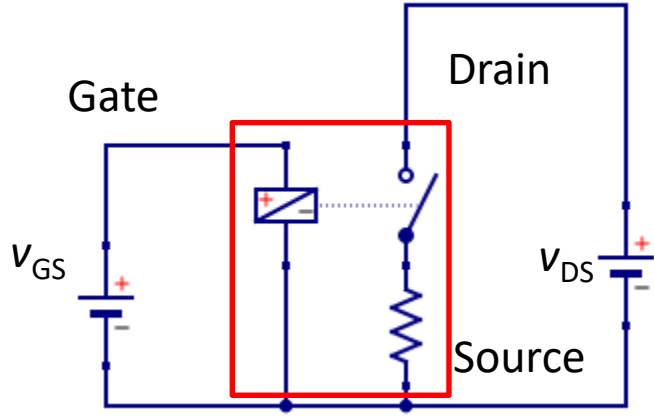


# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



$v_{DS}$  'liten'

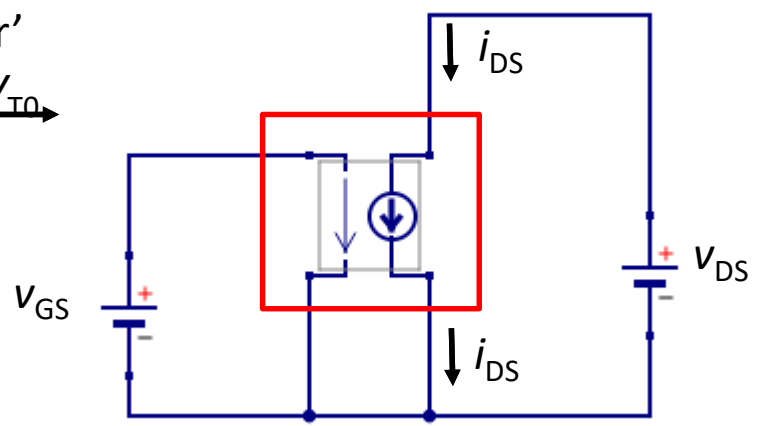
Strömbrytare av om  
 $v_{GS} < V_{T0}$   
 $V_{T0}$ : tröskelspänning



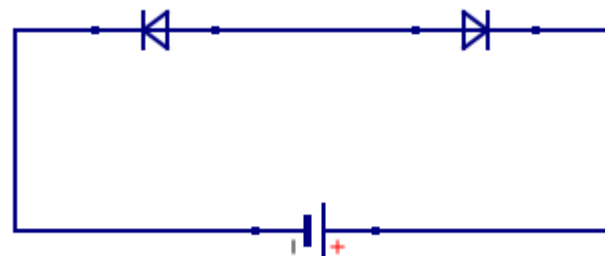
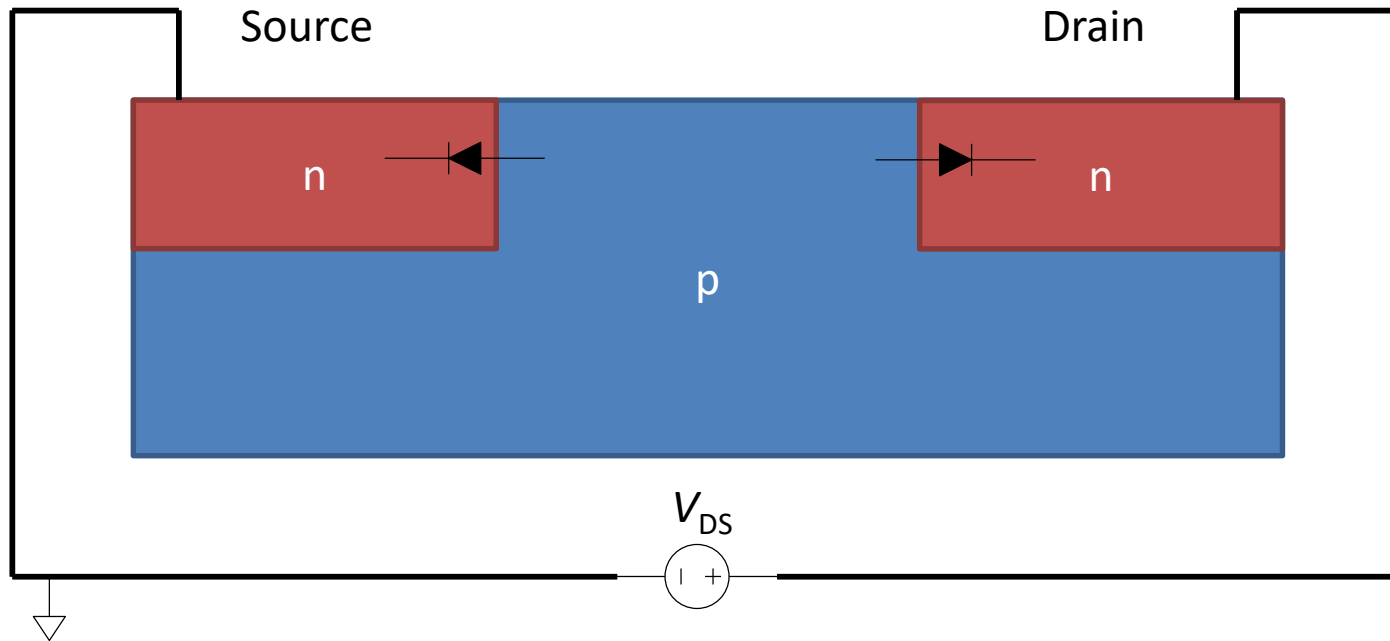
$$i_{DS} = f(v_{GS}, v_{DS}) A$$
$$i_{GS} \approx 0 A$$

$v_{DS}$  'stor'  
&  $v_{GS} > V_{T0}$

$i_{DS} = K(v_{GS} - V_{T0})^2$   
Spänningsstyrd strömkälla!



# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

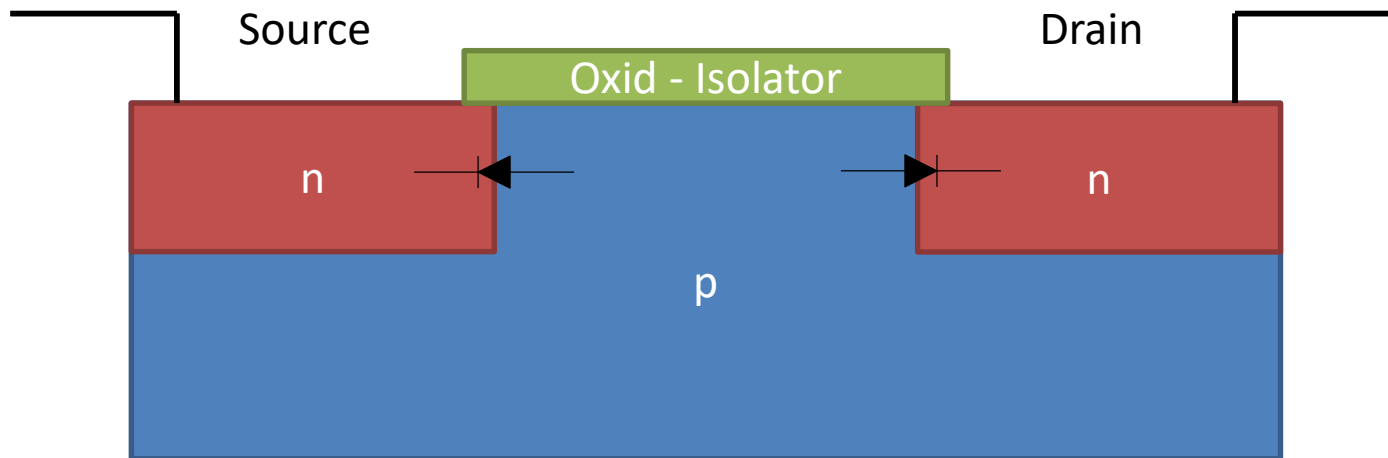


$$i_{DS} \approx 0A$$

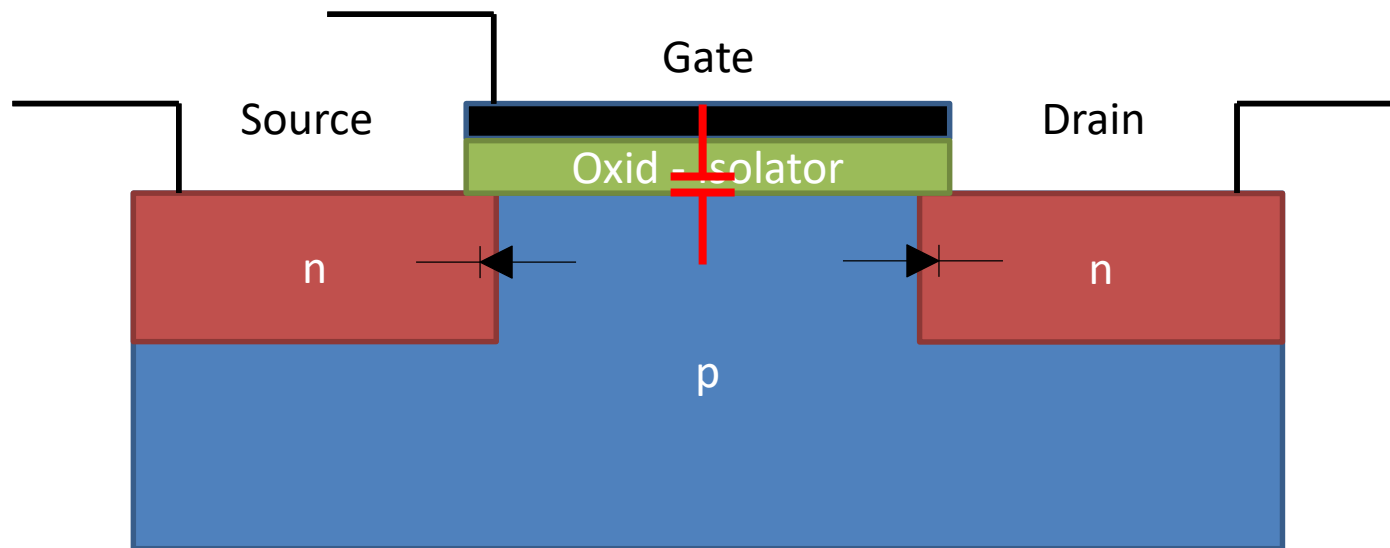
Mindre användbar  
component...

# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

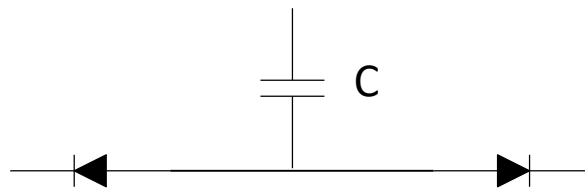
---



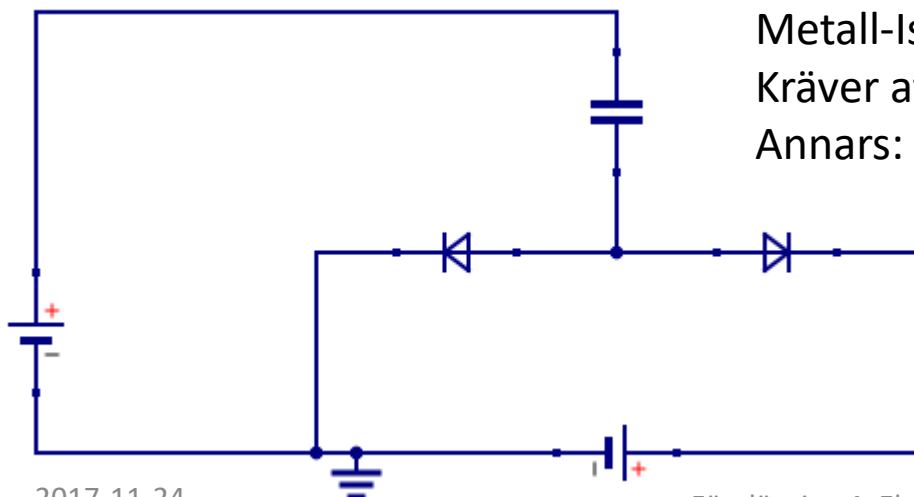
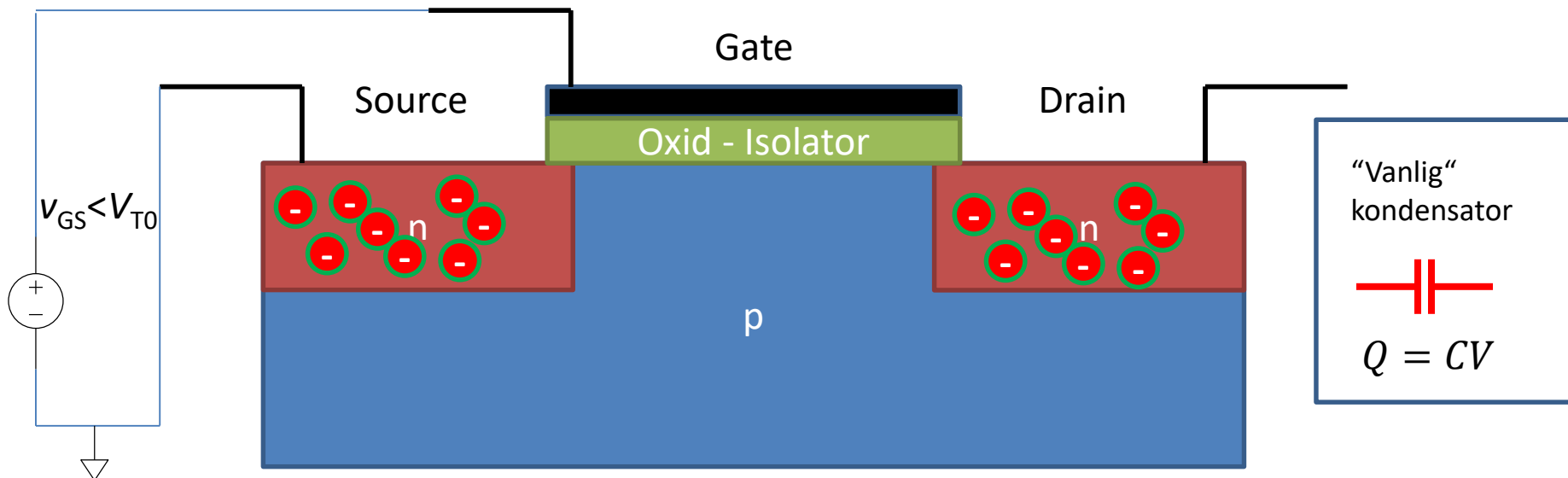
# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



Metall-Isolator-Halvledare: Plattkondensator!

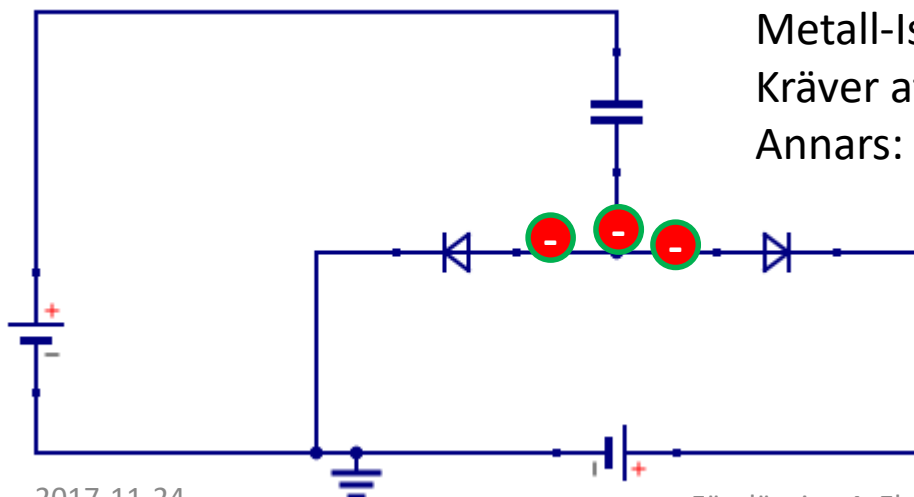
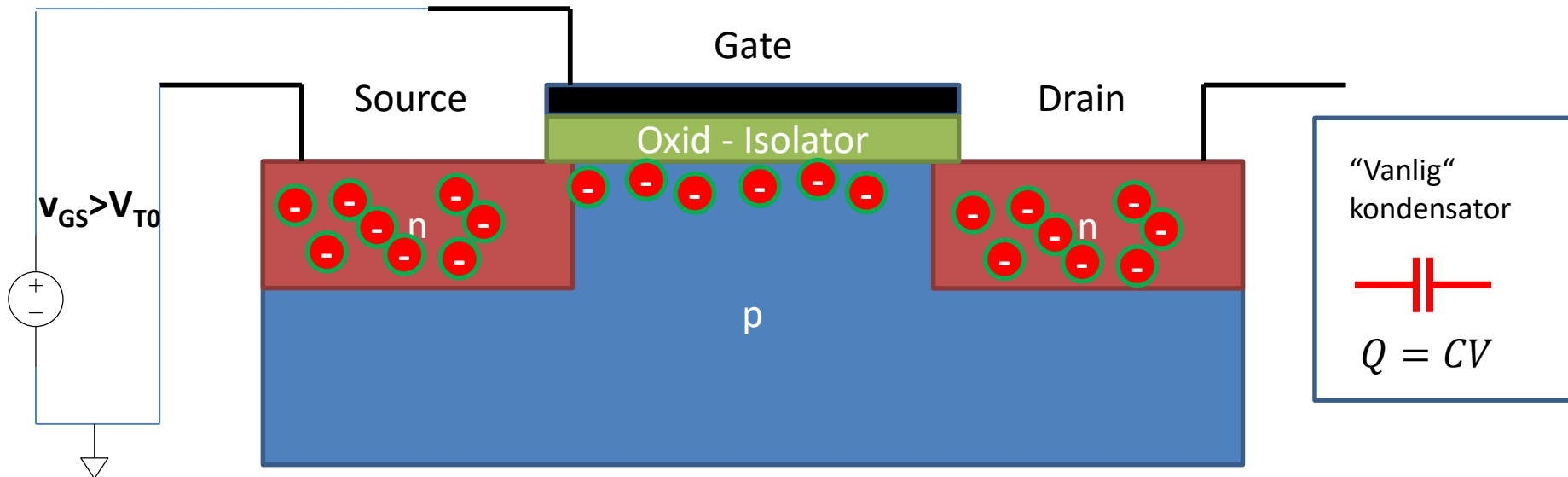


# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



Metall-Isolator-Halvledare struktur:  
 Kräver att  $v_{GS}$  ska vara över tröskelspänningen  $V_{T0}$   
 Annars:  $Q \approx 0 : v_{GS} < V_{T0}$

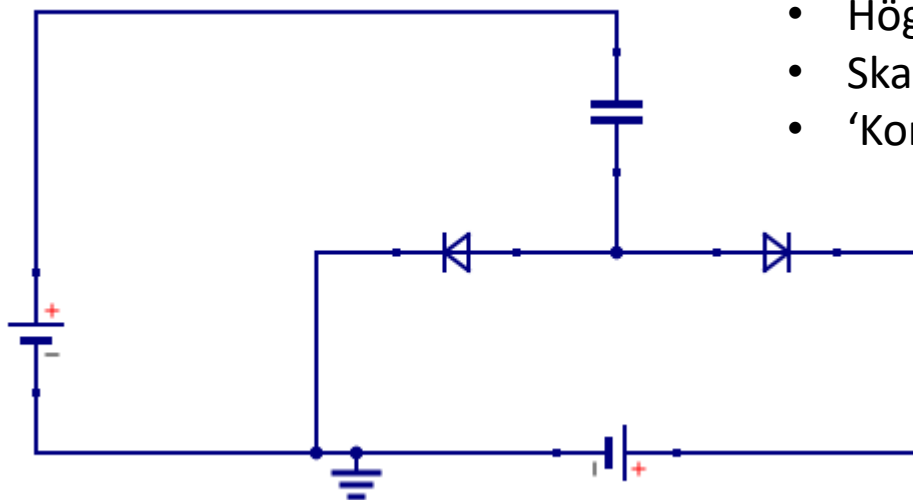
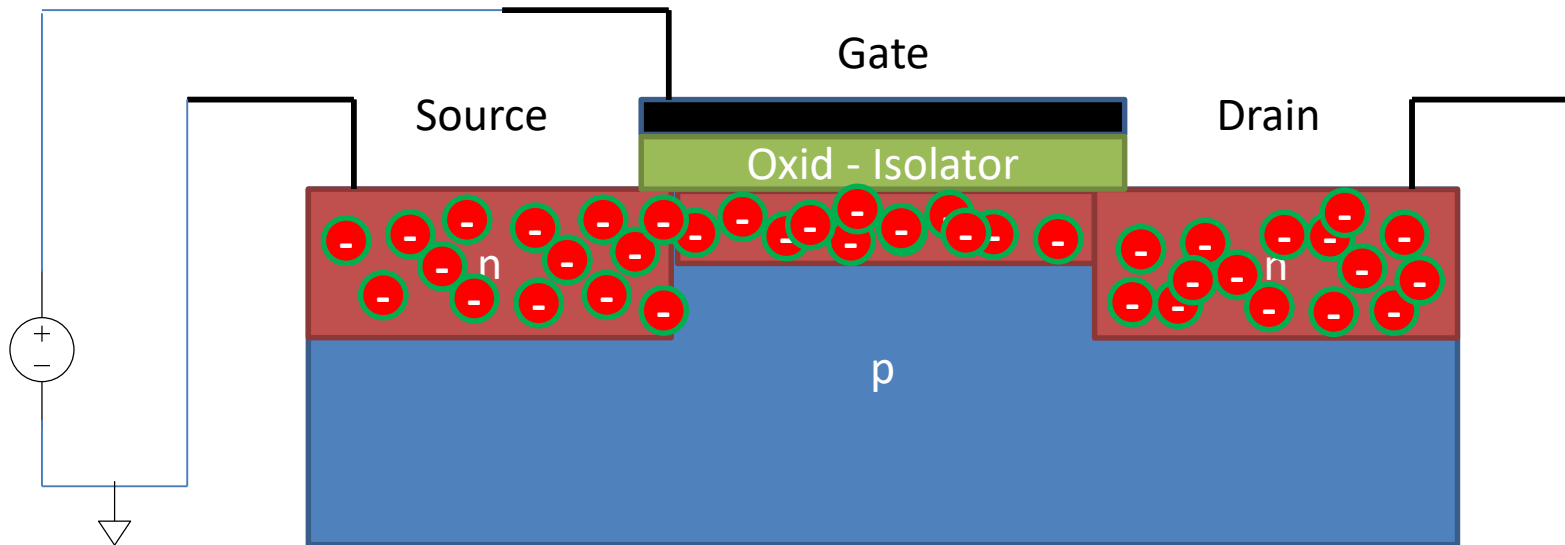
# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



Metall-Isolator-Halvledare struktur:  
 Kräver att  $v_{GS}$  ska vara över tröskelspänningen  $V_{T0}$   
 Annars:  $Q \approx 0 : v_{GS} < V_{T0}$

Laddningen ökar sedan enligt:  
 $Q = C(v_{GS} - V_{T0})$  om  $v_{GS} > V_{T0}$

# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

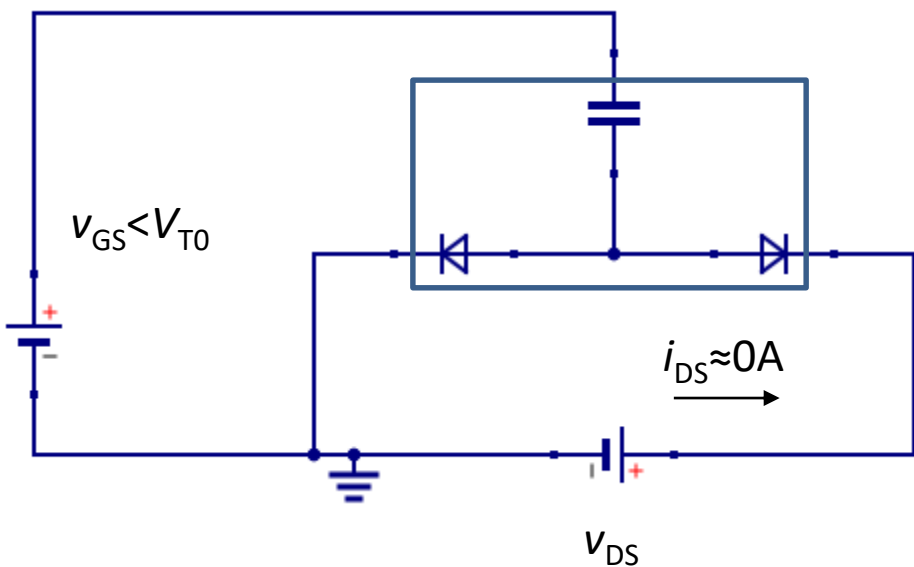


- Hög koncentration av elektroner under gaten
- Skapar ledande kanal
- 'Kortsluter'- pn-övergången

$$Q = C(V_{GS} - V_T)$$

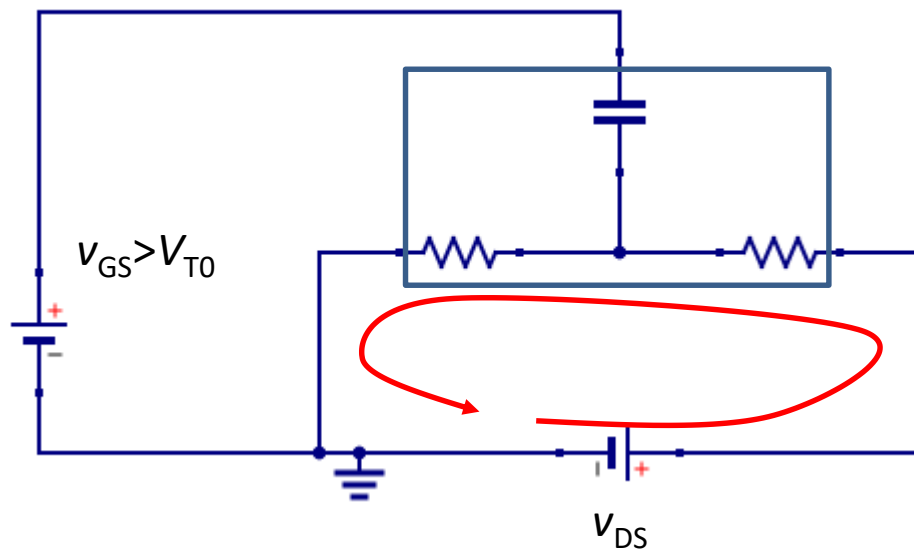
$$R \propto \frac{1}{Q} = \frac{1}{C(V_{GS} - V_T)}$$

# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



- $v_{GS} < V_{T0}$  -> Inga elektroner mellan source/drain
- Ingen ström – strypt mod. 'Öppen strömbrytare'

$$Q = 0, V_{GS} < V_T$$



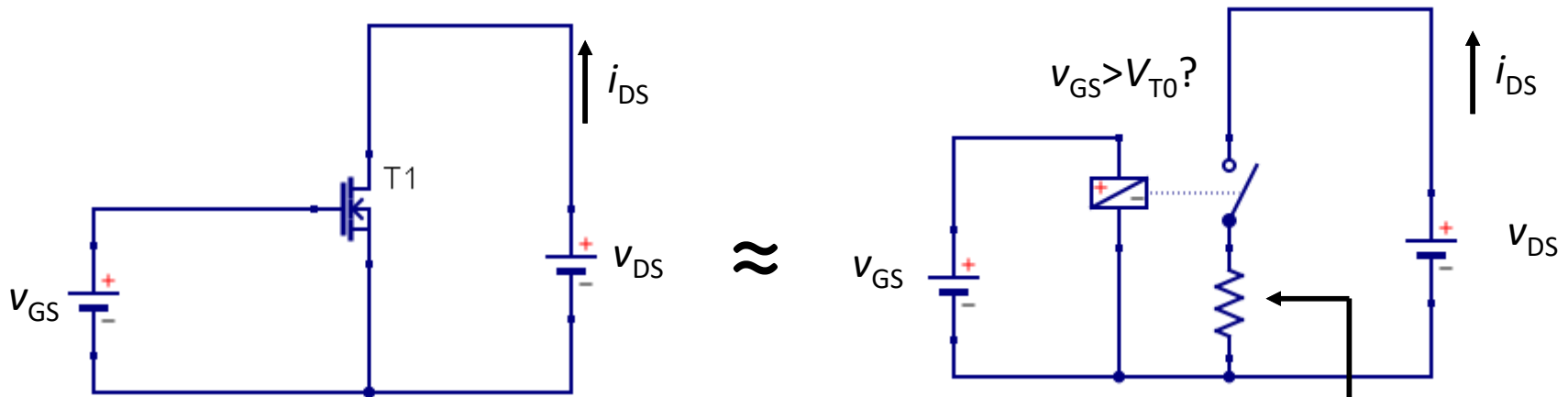
$v_{GS} > V_{T0}$  -> Ledanade kanal med elektroner mellan source/drain

$$Q = C(v_{GS} - V_{T0})$$

$$R \propto \frac{1}{Q} = \frac{1}{C(V_{GS} - V_T)}$$

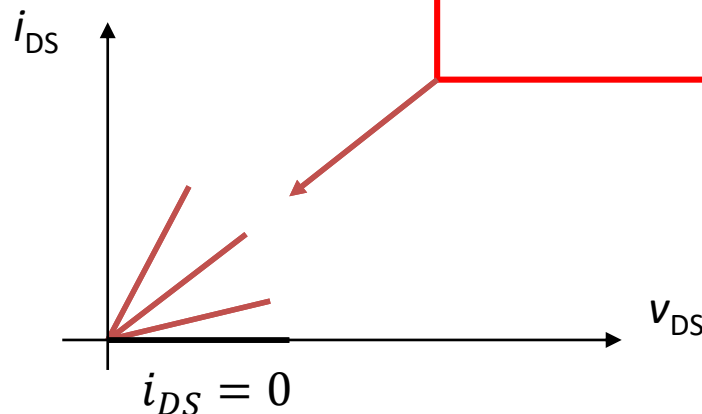


# Linjära området: $v_{DS} \ll v_{GS} - V_{T0}$



$$i_{DS} = 2K(v_{GS} - V_{T0})v_{DS}$$

$K$  – mått på hur bra transistorn leder ström



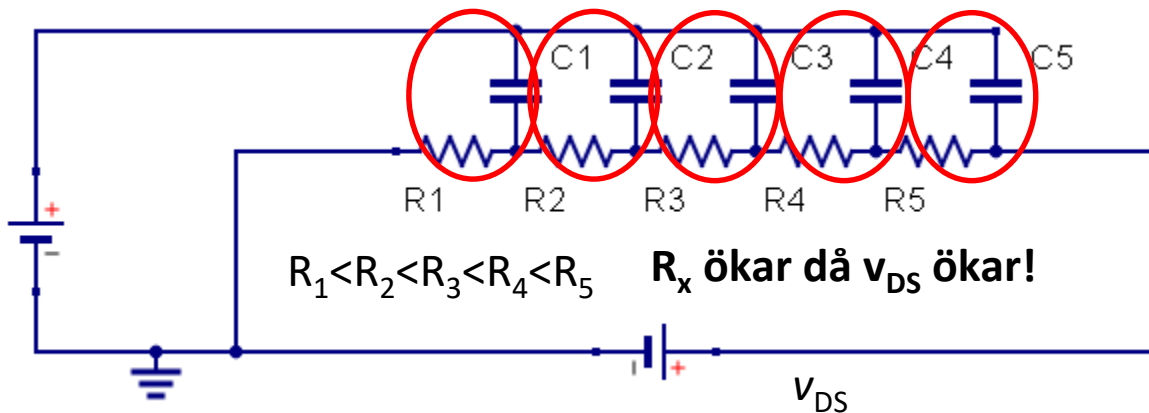
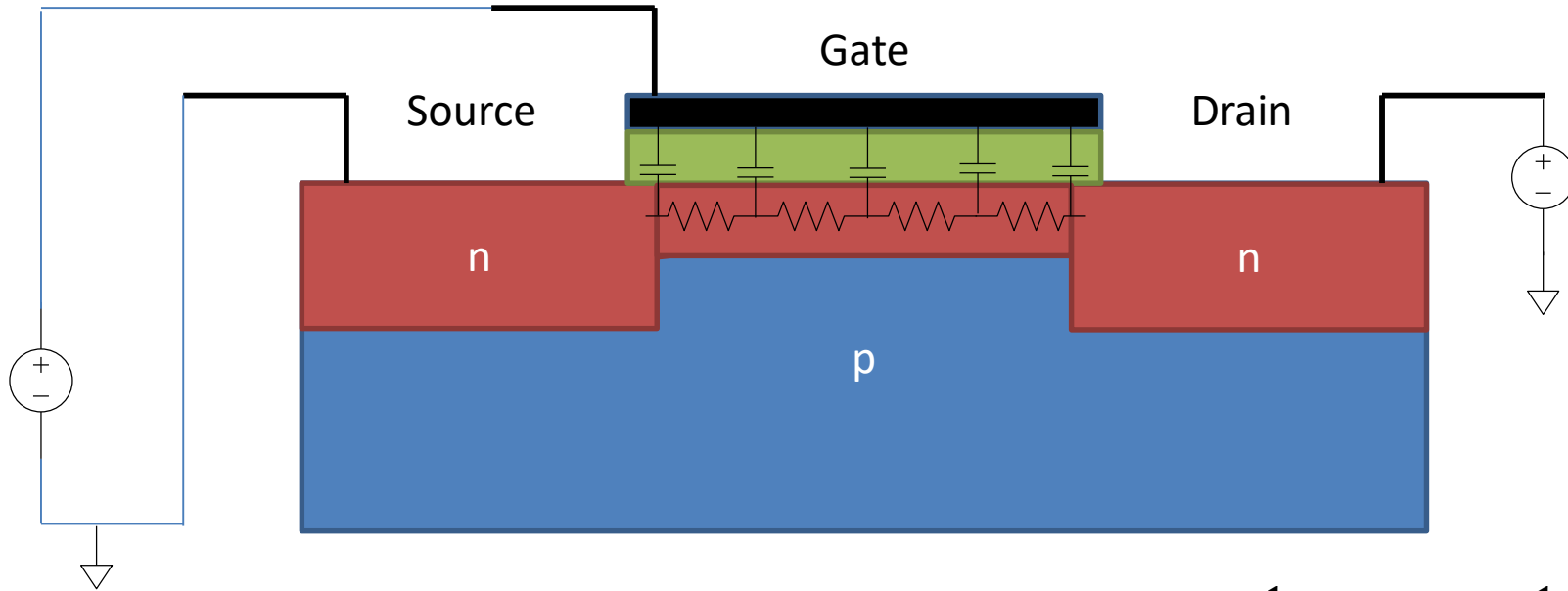
$$R \propto \frac{1}{Q} \propto \frac{1}{(v_{GS} - V_{T0})}$$

$$i_{DS} = \frac{v_{DS}}{R}$$

Låga  $v_{DS}$ :

Transistorn fungerar som en variabel resistor!

# “Stora” $v_{DS}$ : Triod/Mättnad

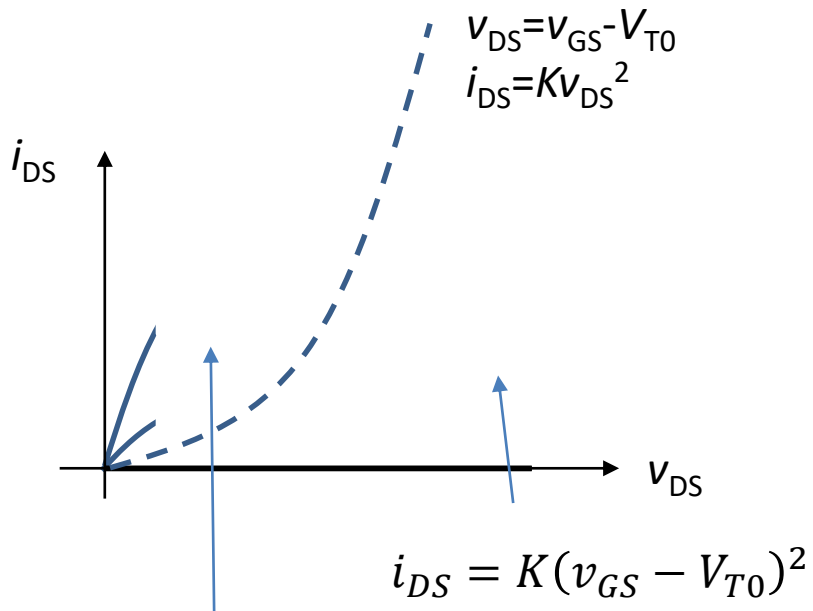


$$R_x \propto \frac{1}{Q_x} = \frac{1}{C(v_{GS} - V_{T0} - v_x)}$$

$$R_5 \propto \frac{1}{Q_5} = \frac{1}{C(v_{GS} - V_{T0} - v_{DS})}$$

$$v_{DS} = v_{GS} - V_{T0} \quad ???$$

# Triod/Mättnad



$$i_{DS} = K[2(v_{GS} - V_{T0})v_{DS} - v_{DS}^2]$$

$$v_{DS,sat} = v_{GS} - V_{T0}$$

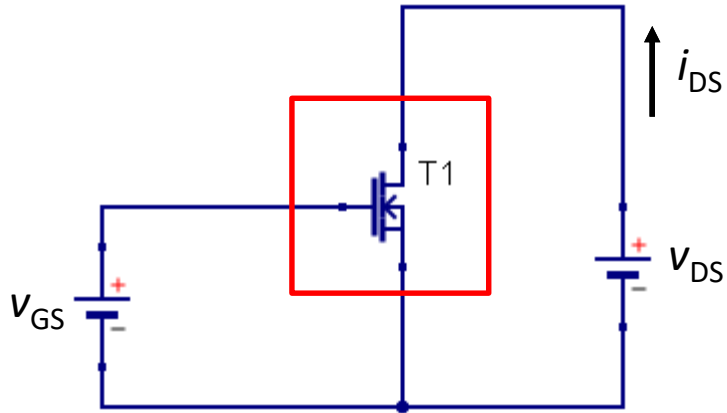
$$R_5 \propto \frac{1}{Q_5} = \frac{1}{C(v_{GS} - V_{T0} - v_{DS})}$$

$$R_5 \rightarrow \infty \Omega \quad ??$$

Vår enkla modell (gradual channel approximation) ger felaktigt svar!

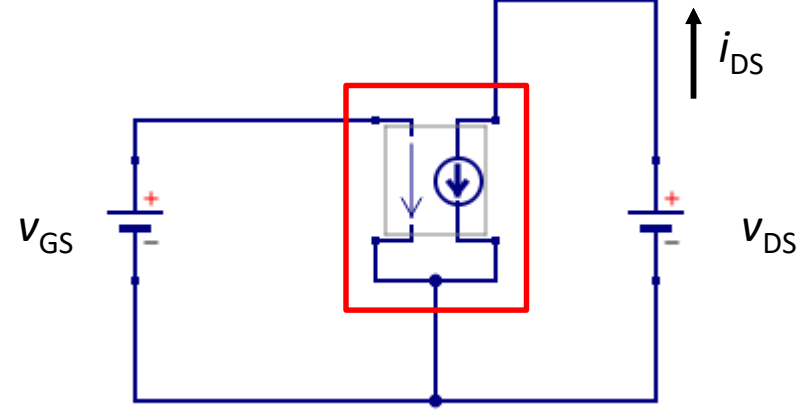
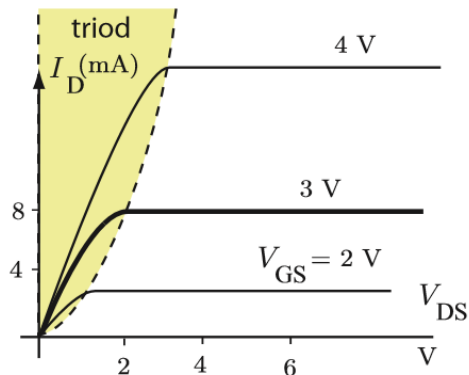
- Istället: *Pinch-off*
- Mättnadsområdet –  $v_{DS}$  oberoende av  $i_{DS}$

# Triod / Mättnadsområdet: $v_{DS} > v_{gs} - V_{T0}$



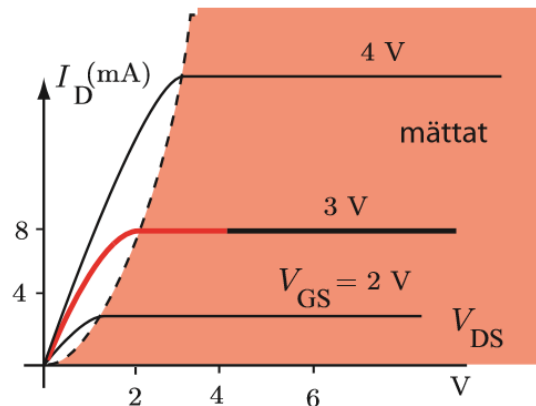
$$v_{DS} < v_{DS,sat}$$

$$i_{DS} = K[2(v_{GS} - V_{T0})v_{DS} - v_{DS}^2]$$



$$v_{DS} > v_{DS,sat}$$

$$i_{DS} = K(v_{GS} - V_{T0})^2$$



Spänningsstyrd  
strömkälla!

Analog Elektronik



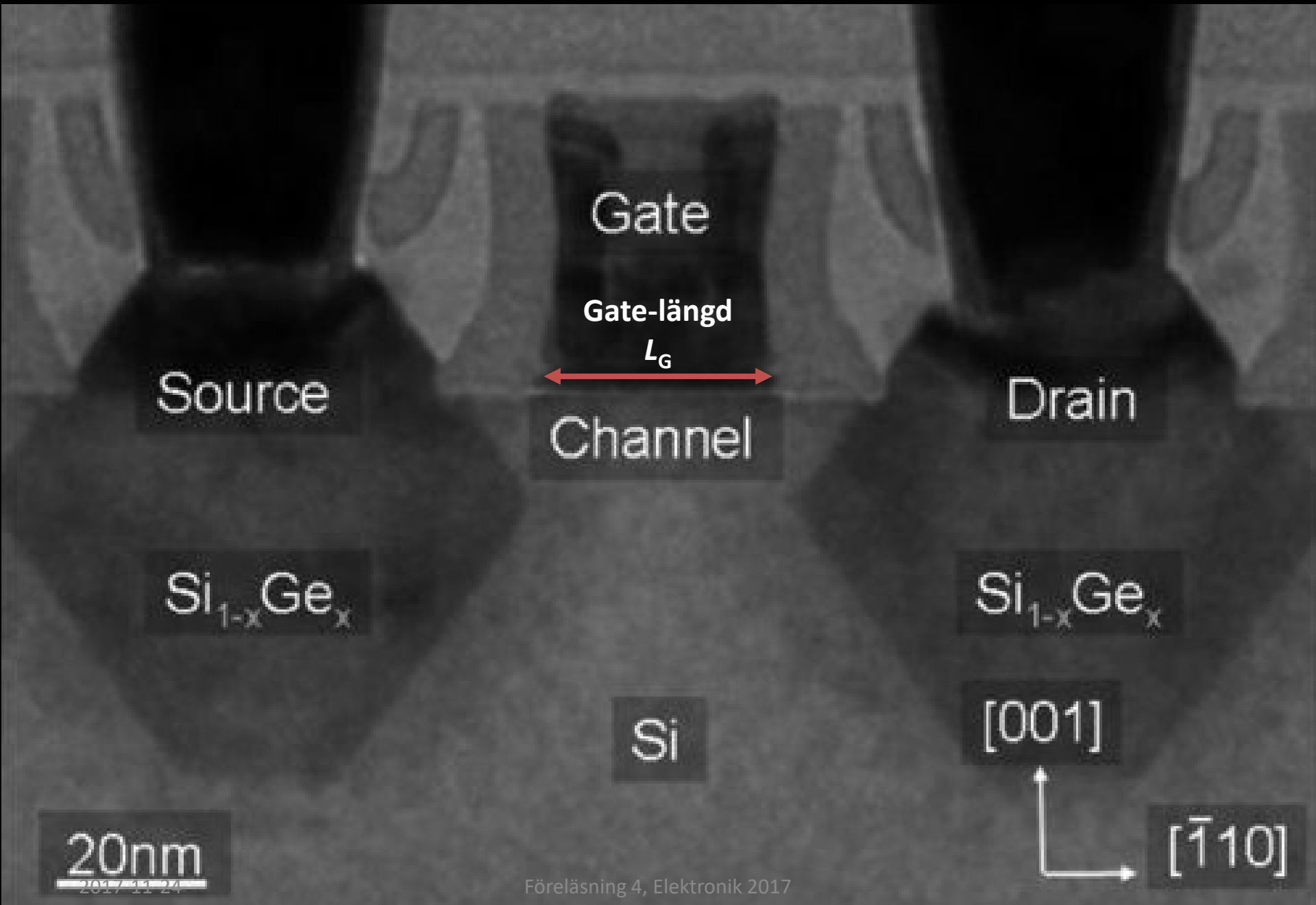
A cross-sectional diagram of a MOSFET. The top part shows a grey substrate with a white channel layer. A red gate is positioned above the channel. Two dark grey regions, labeled 'Source' and 'Drain', are on either side of the gate. The bottom part of the diagram is a solid green area labeled 'Channel / Substrate'.

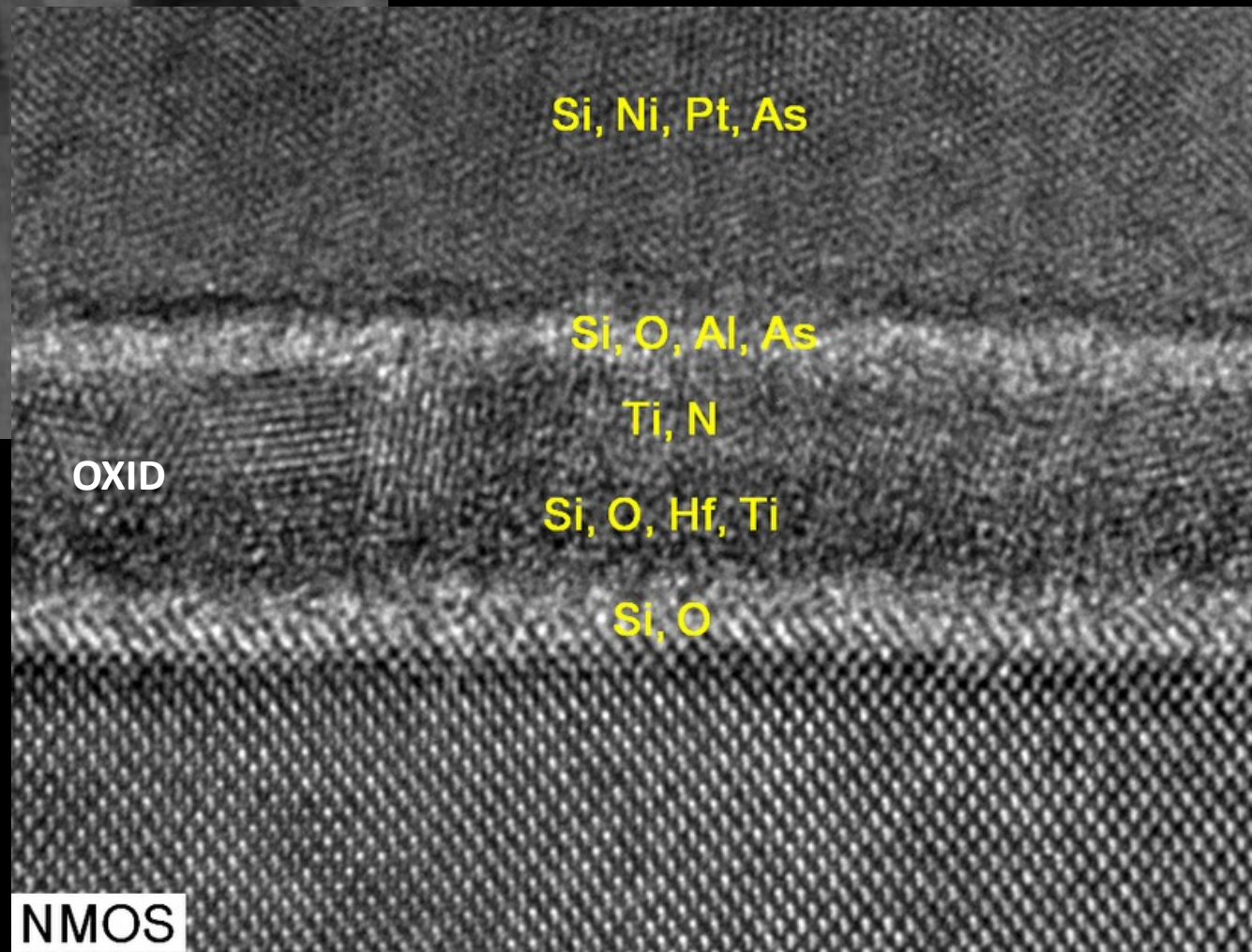
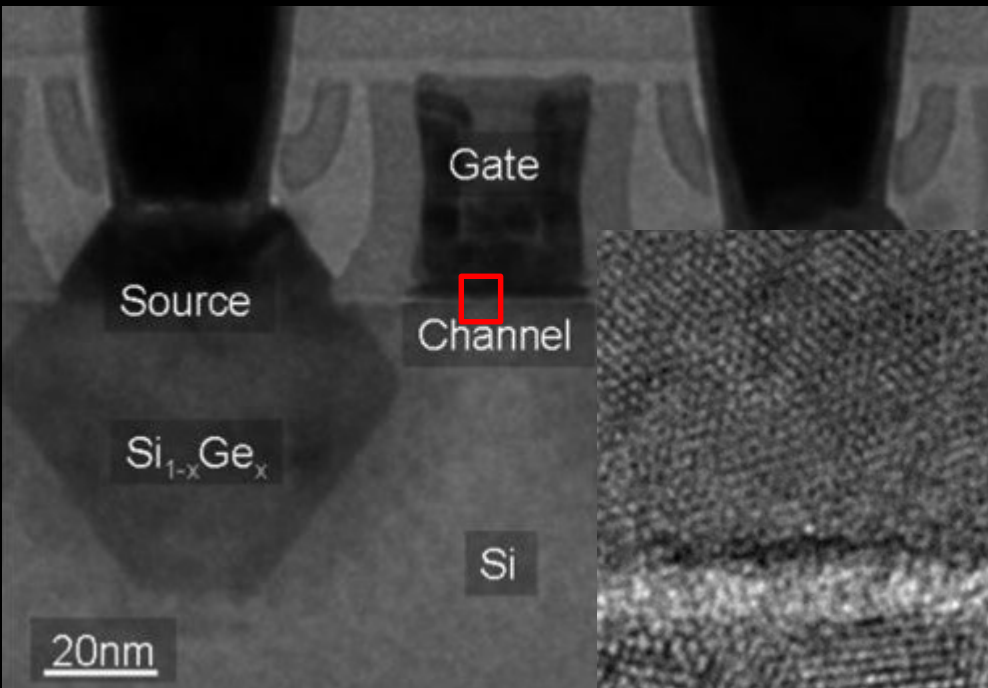
Source

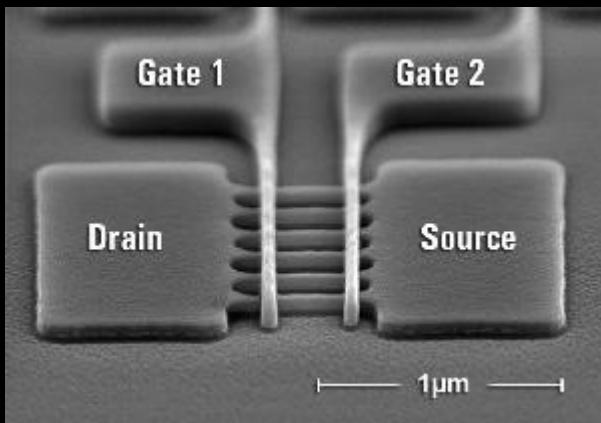
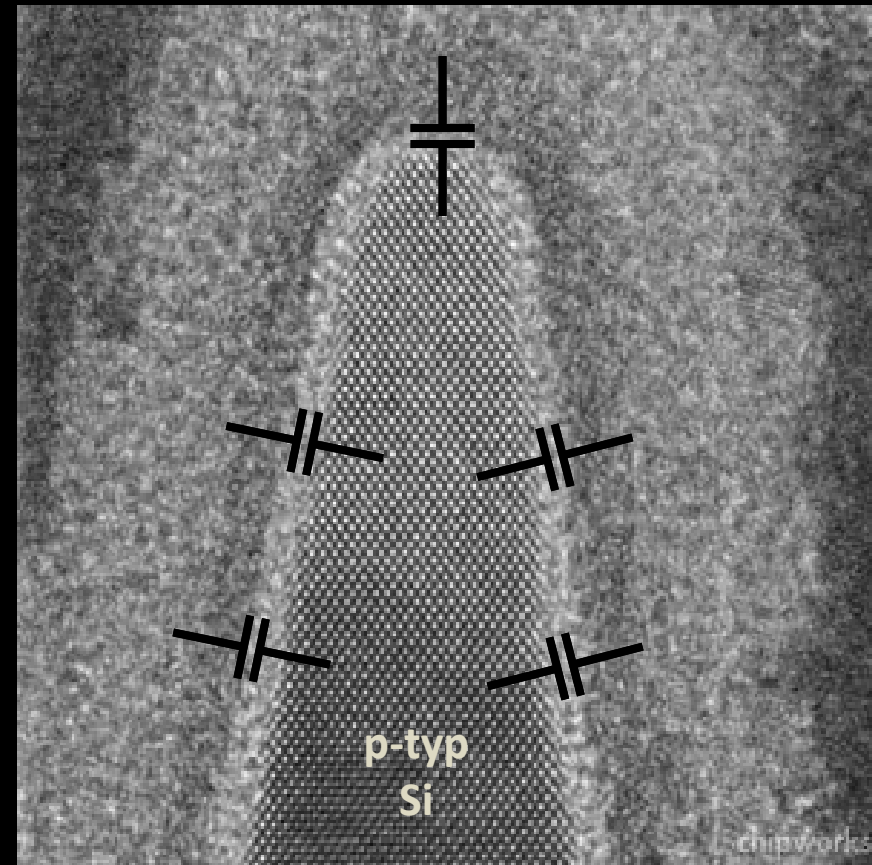
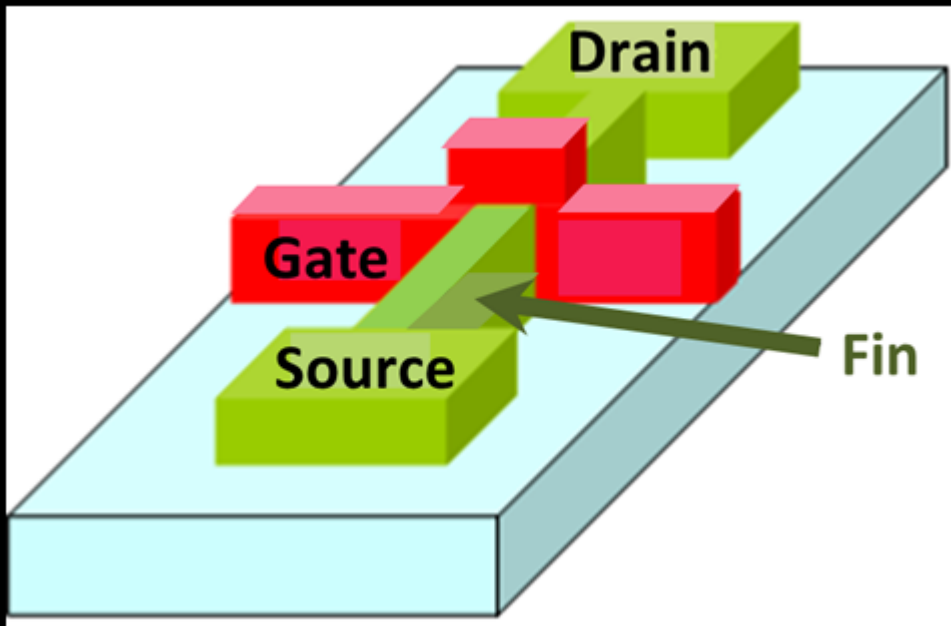
Gate

Drain

Channel / Substrate







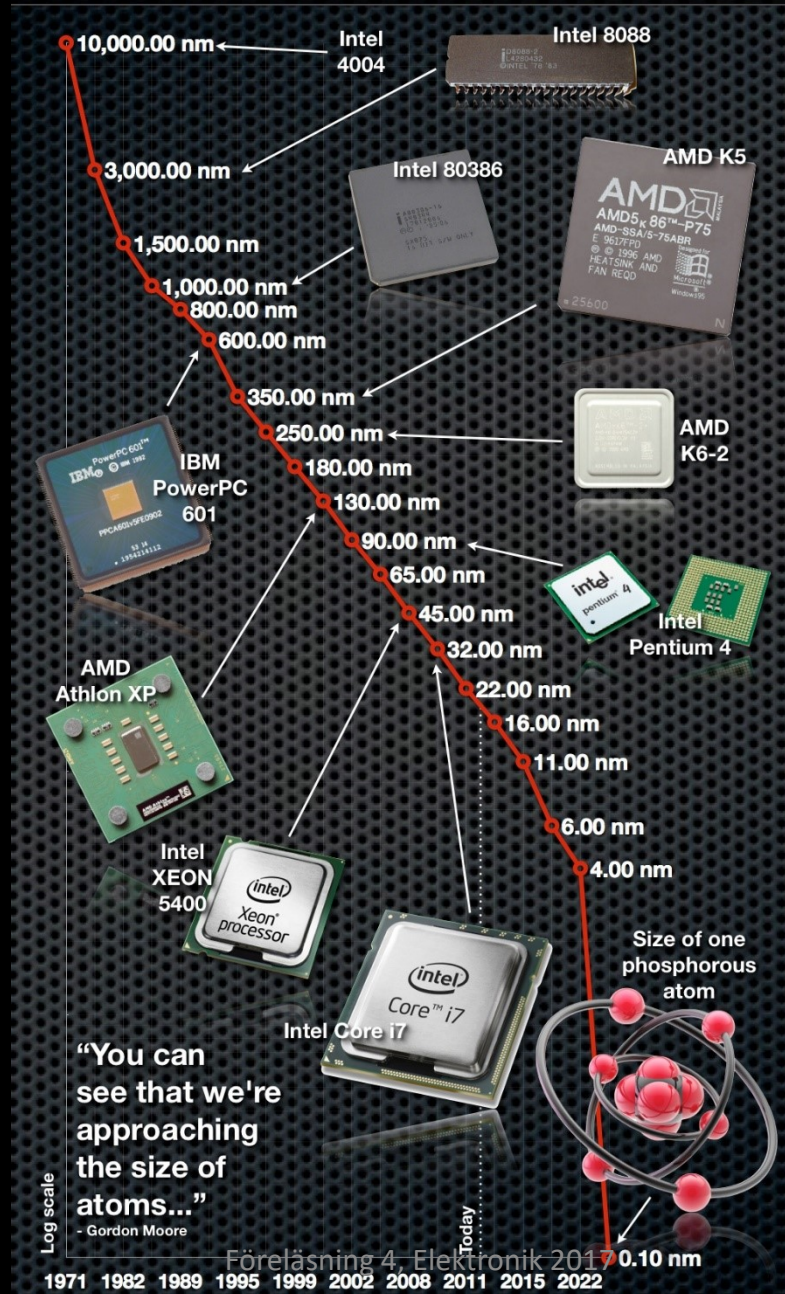
## *FinFETs*

14-22 nm node , Ivy Bridge+



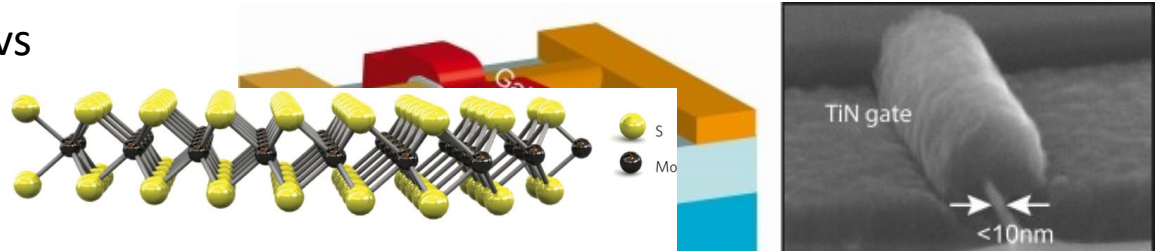
# How small can a transistor be?

The evolution of microprocessor manufacturing processes



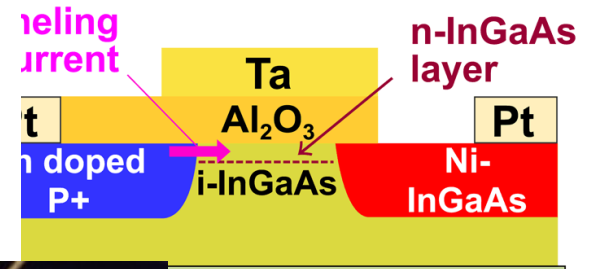
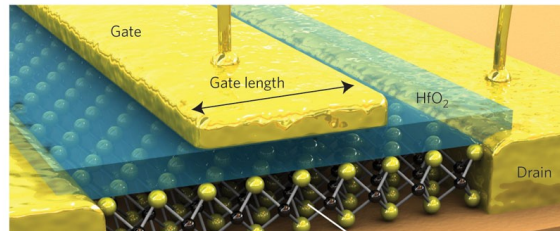
# Nanoelektronik

Hur liten kan transistor bli? Dvs hur få atomer behöver vi använda?



Hur får vi ett så stort  $K$  som möjligt?

Kan vi bygga transistorer som arbetar över 1 THz?



Kvantmekaniska tunneltransistorer?

Hur effektiv kan en solcell bli?

Hur omvandlar vi värme till elektrisk energy?

Kvantdatorer?

