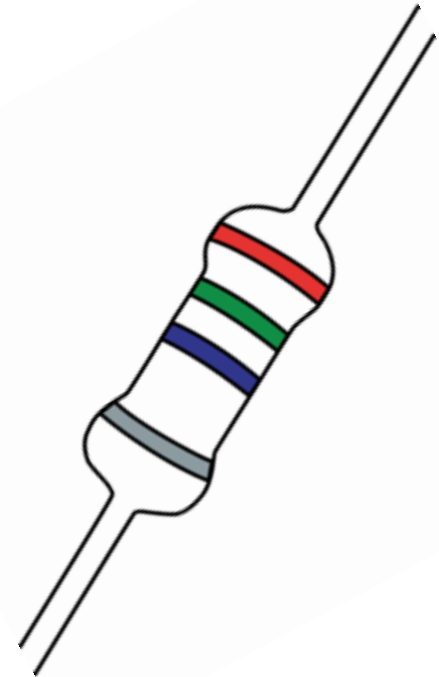


- OP-Amp – Komplex Återkoppling.
- Klippning. Offset. Slewrate
- Avkopplingskondensatorer
- Transistorer - MOSFETs



# 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)

# Schemaändringar

---

- Nästa vecka – jag är i San Francisco
- Föreläsning om Digital Logik (CMOS) och information om projektet av Johannes Svensson
- Kursprogram uppdaterat!



# Undervisningsändring

- Nyskriven text om transistorer & analoga kretsar
- Text och övningar (istället för boken)
- Finns att ladda ner på hemsidan!
- Nya övningsuppgifter om transistorer & enkla analoga kretsar
- Kursprogram uppdaterat!

## nMOSFET och analoga kretsar

Erik Lind

22 november 2018

### 1 MOSFET - Struktur och Funktion

Strukturen för en nMOSFET (vanligtvis bara nMOS) visas i fig. 1(a). Transistorn består av ett p-dopat substrat och två n-dopade regioner kallade source och drain. Gate-elektroden är isolerad gentemot substratet med en isolerande oxid. Gate-metall, isolator och p-typ halvledare bildar en struktur som liknar den vanliga plattkondensatorn. Om vi biaserar gate-elektroden gentemot source-kontakten ( $v_{gs} = v_g - v_s$ ) minskar vi först mängden hål under gate:en, vilket illustreras i fig. 1(b). Det kan inte flyta någon (större) ström mellan source och drain, då n-p-n strukturen motsvarar två dioder kopplade i serie. När vi ökar gate-spänningen minskar vi först...



FEEDBACK  
OPINION  
SUGGESTION  
COMMENT

# 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  $\pm V_{CC}$

Maximal utström:

- Stora spänningar
- Stora strömmar

Offset Voltage:

- Små signaler (mV)

DC biasströmmar  $i_n/i_p > 0$

- Små signaler (mV) och stora resistanser

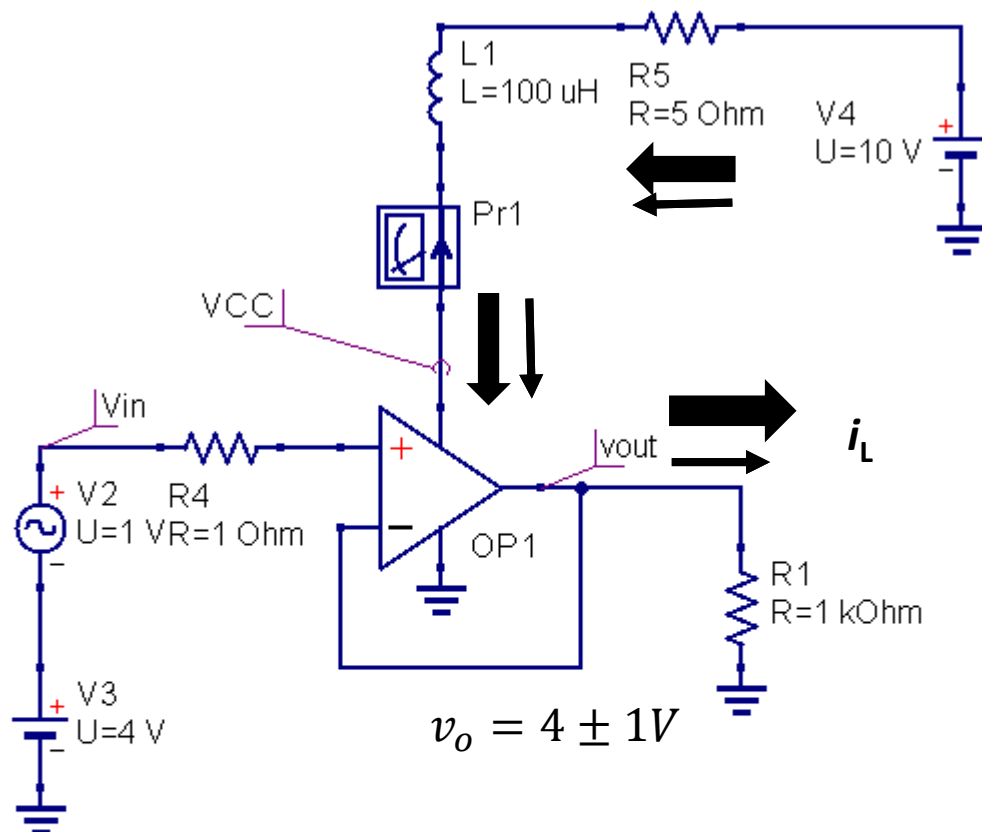
Slew Rate

- Snabba signaler
- Höga frekvenser

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

- Höga frekvenser (kHz-MHz)
- Stora förstärkningar

# 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..)

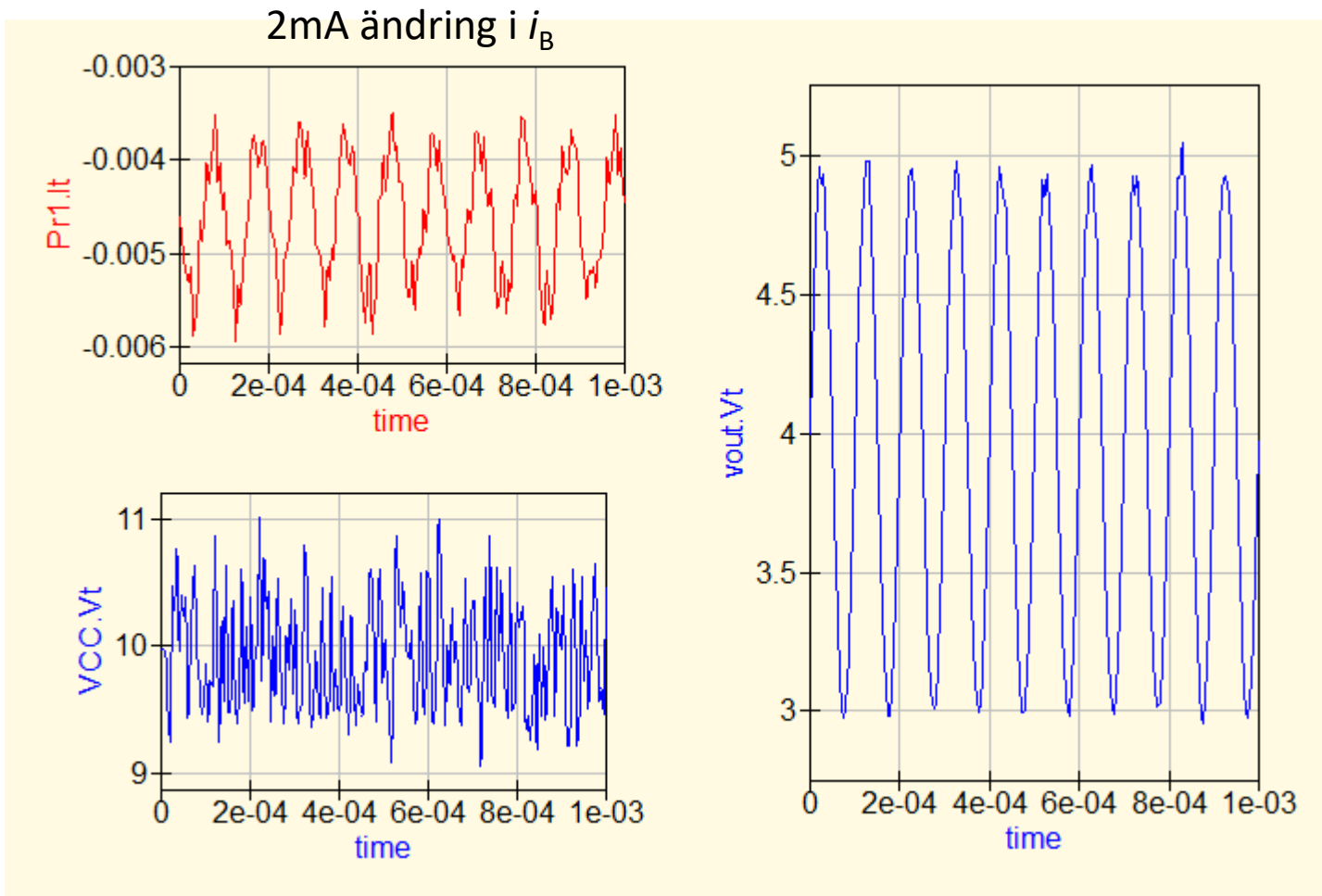
dc-simulering

DC1

transientsimulering

TR1  
Type=lin  
Start=0  
Stop=1ms

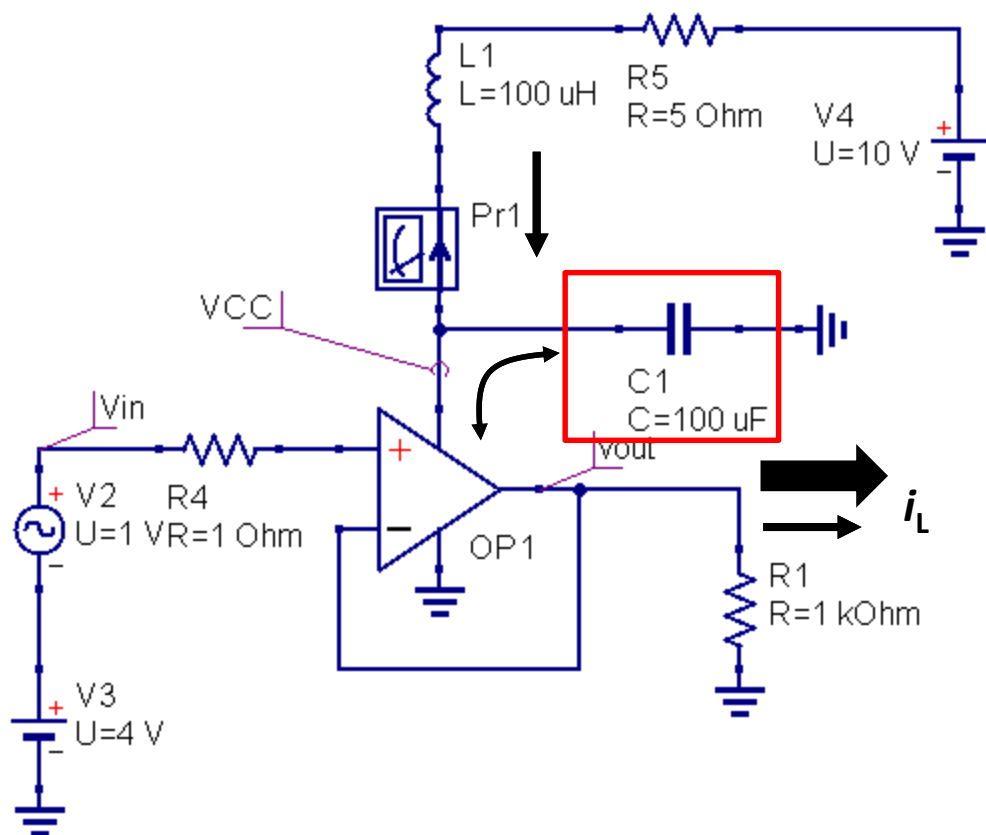
# Avkoppling - Biasering



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

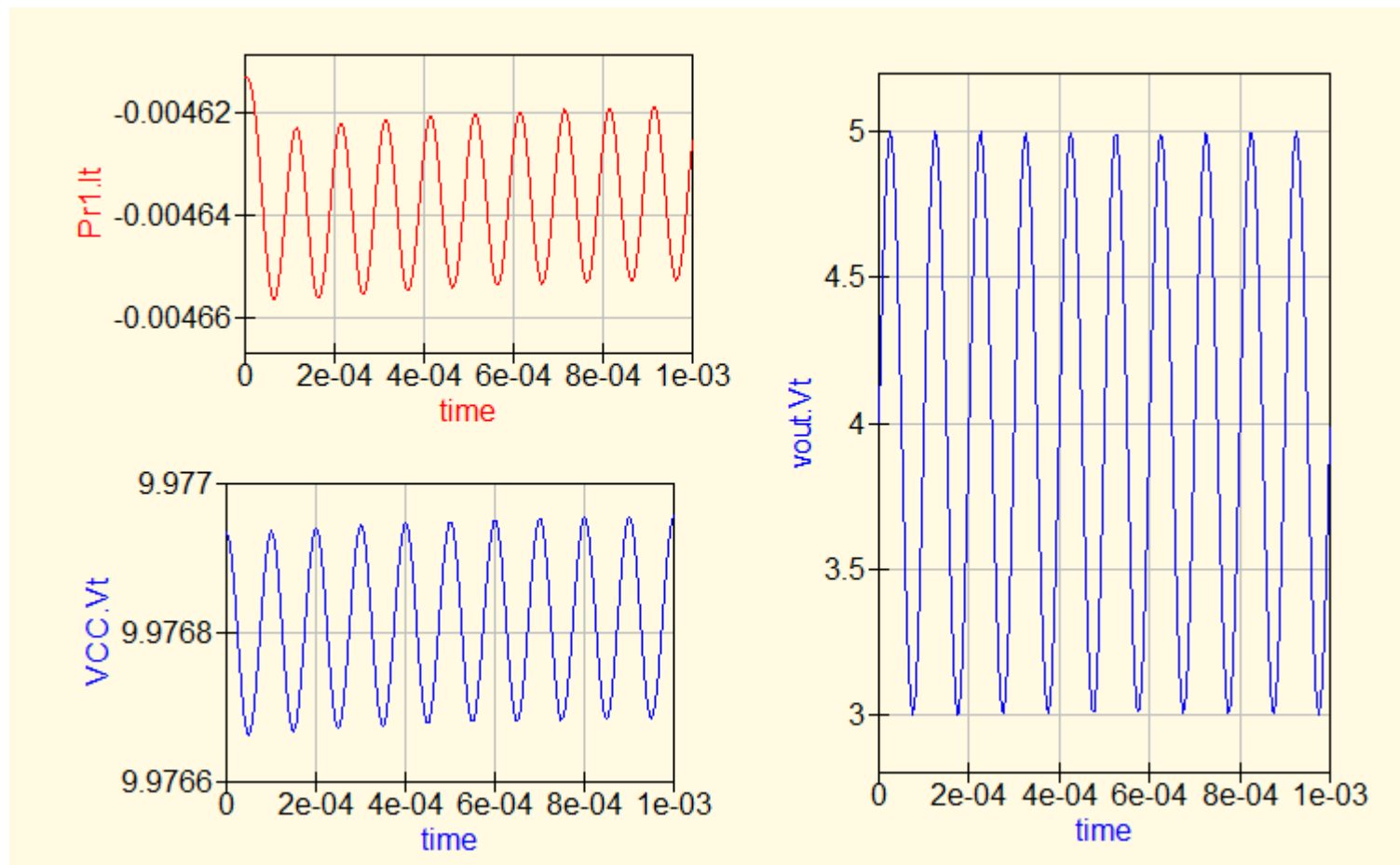
DC1

transientsimulering

TR1  
Type=lin  
Start=0  
Stop=1 ms



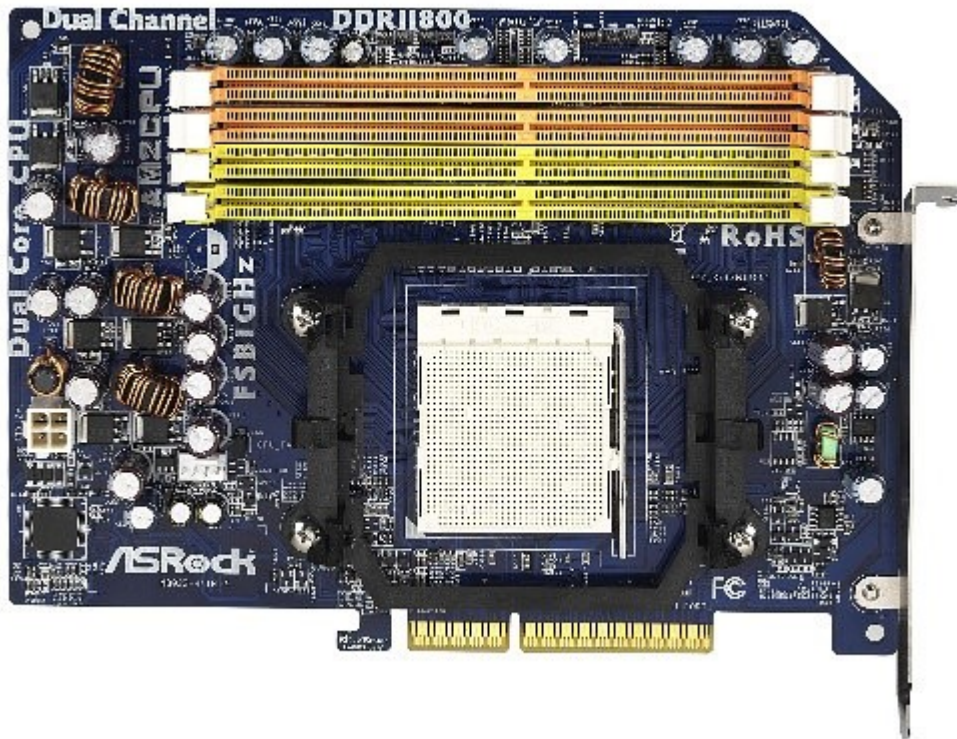
# Avkoppling - Biasering



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

Minimal variation i förstärkning

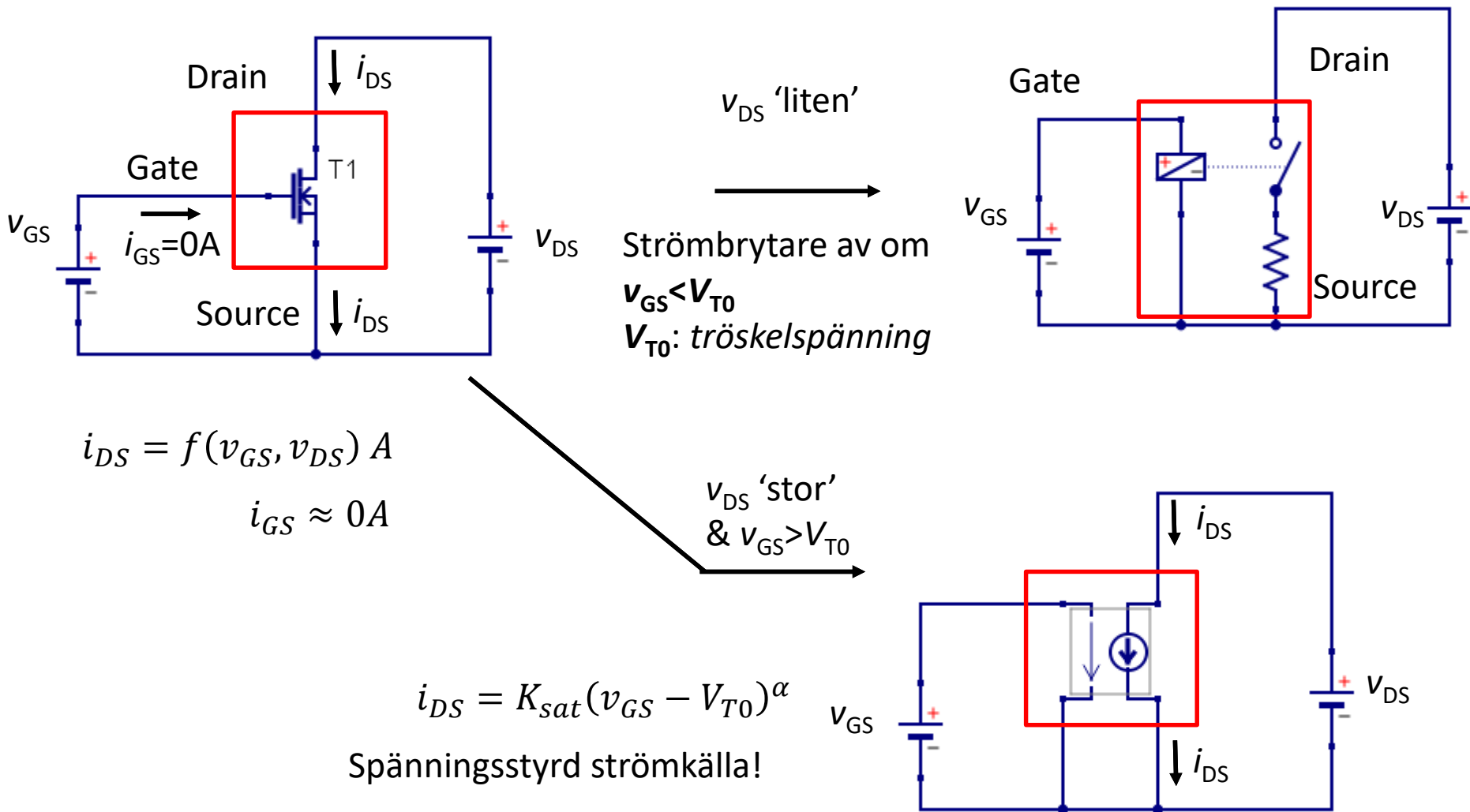
# Avkoppling - Biasering



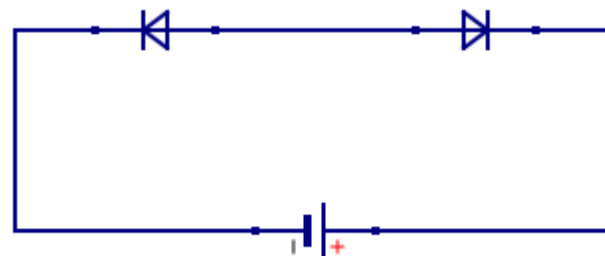
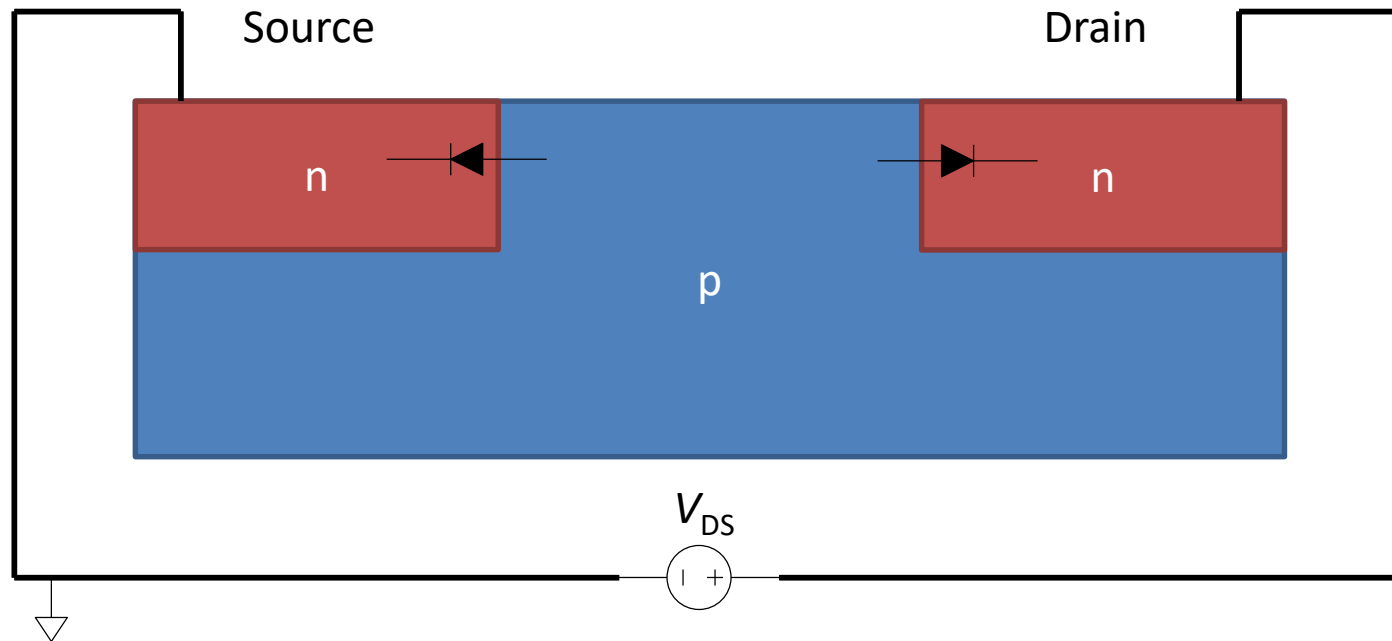
Moderkort – gott om avkopplingskondensatorer..

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

# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

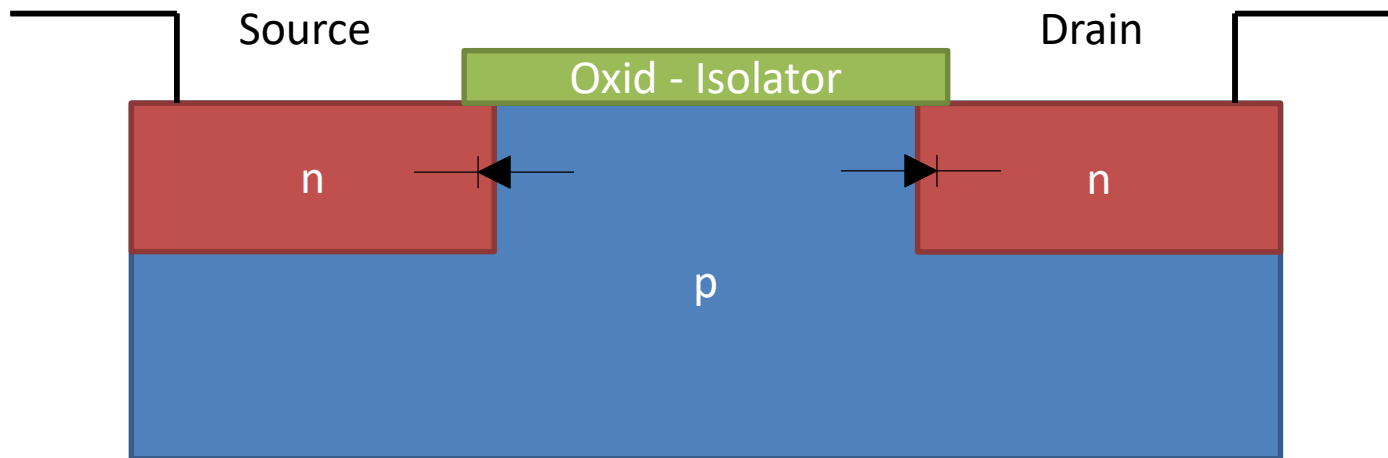


$$i_{DS} \approx 0A$$

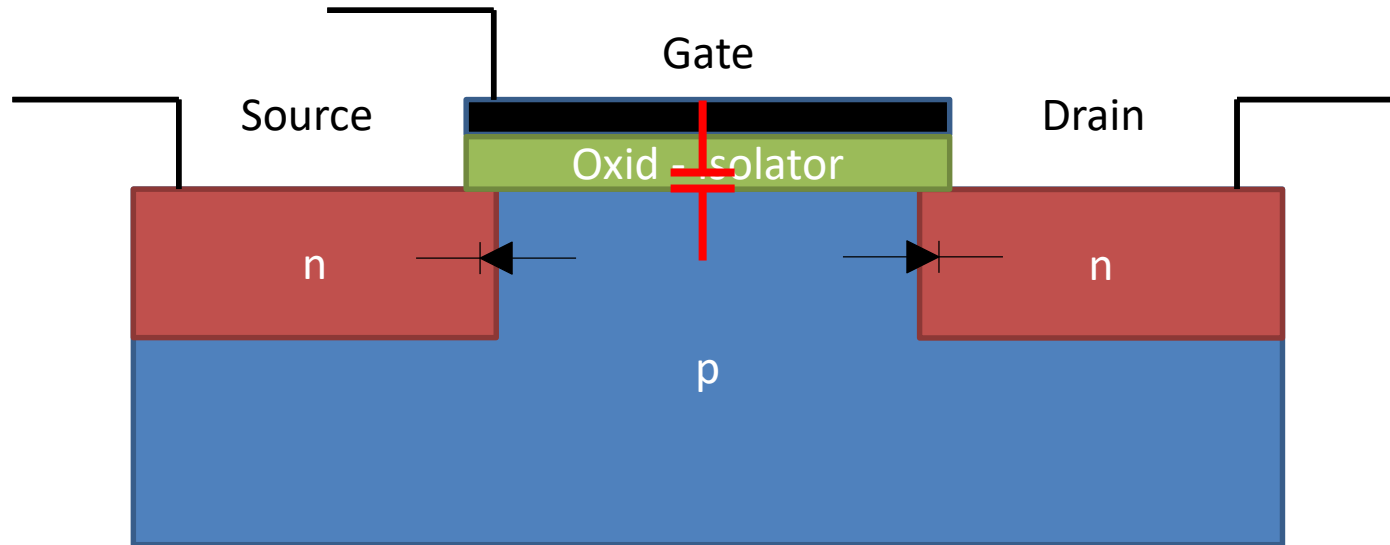
Mindre användbar  
komponent...

# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

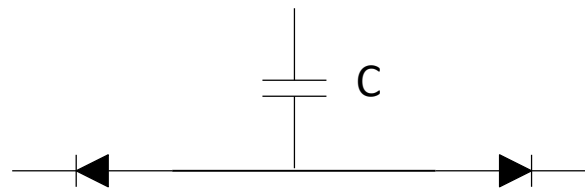
---



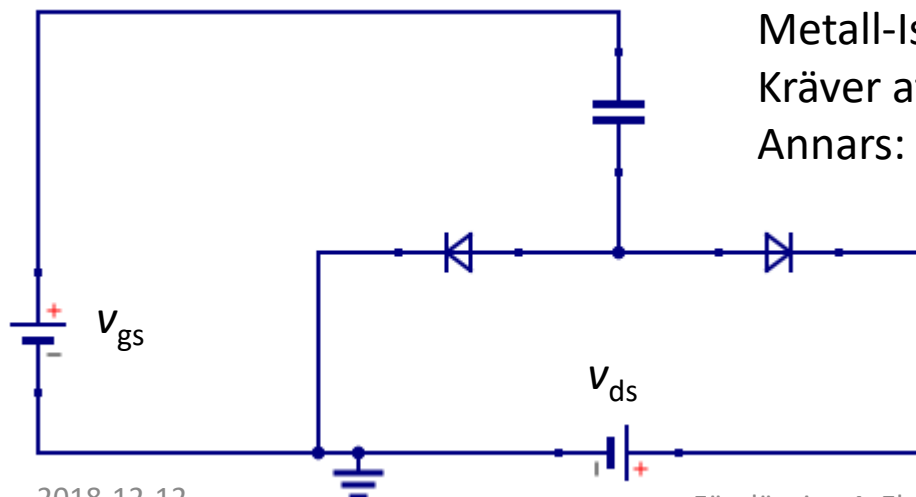
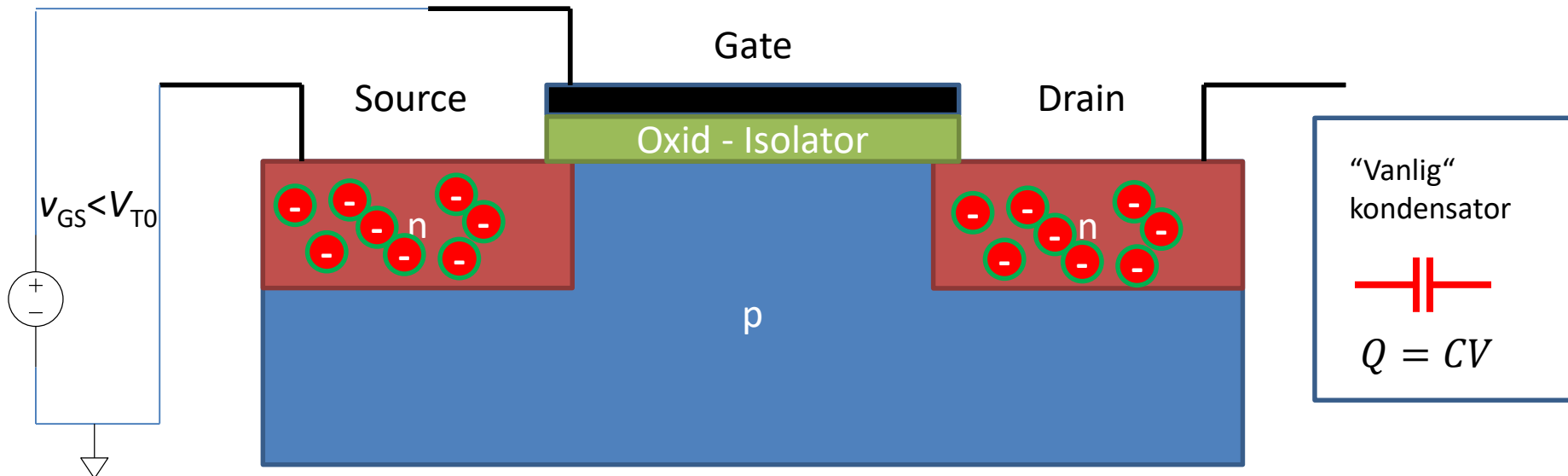
# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



Metall-Isolator-Halvledare: Plattkondensator!

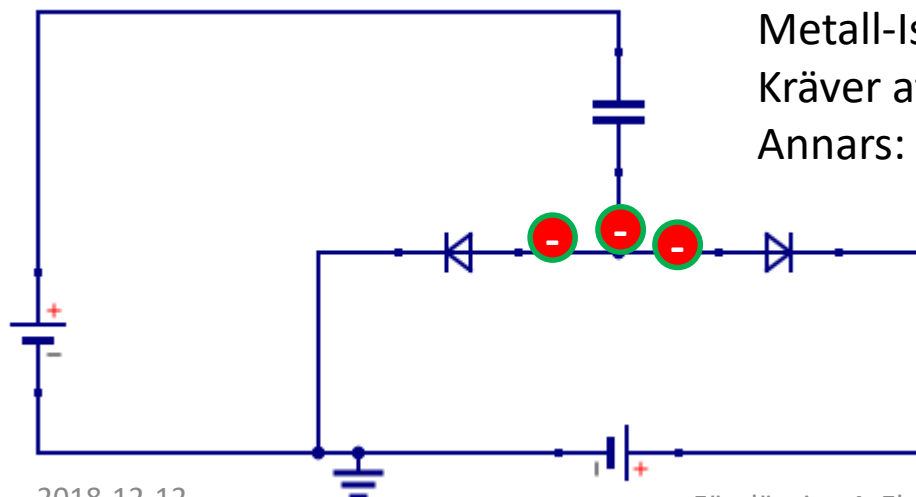
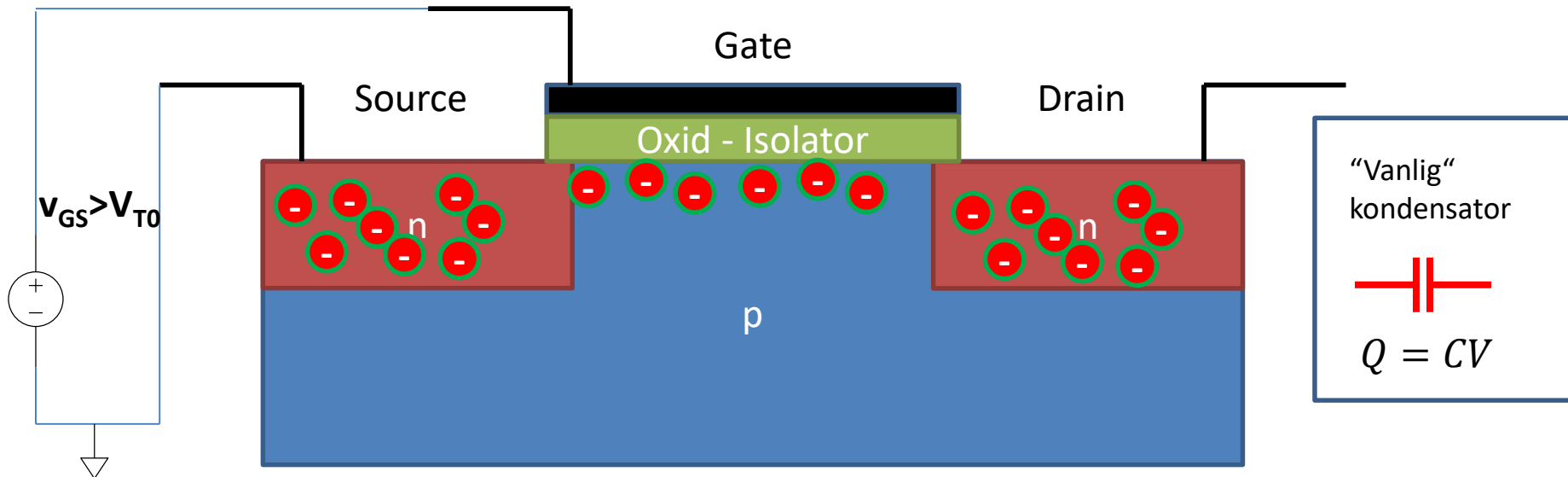


# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



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

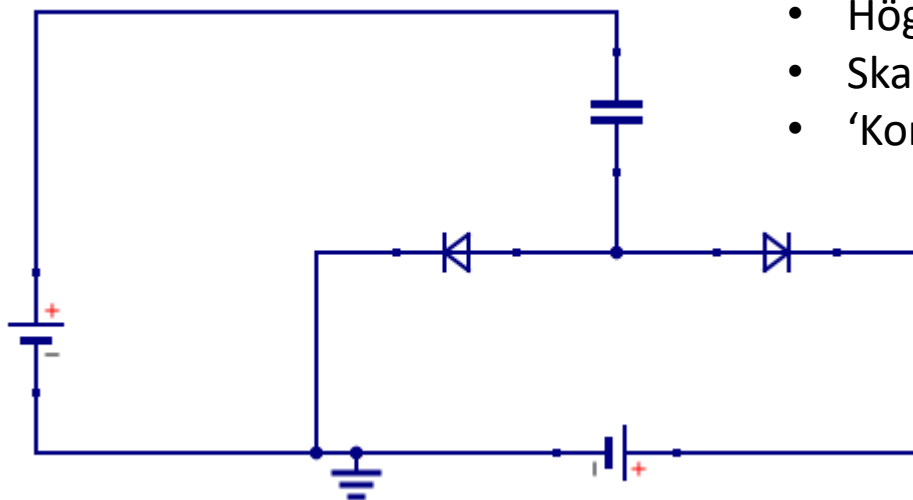
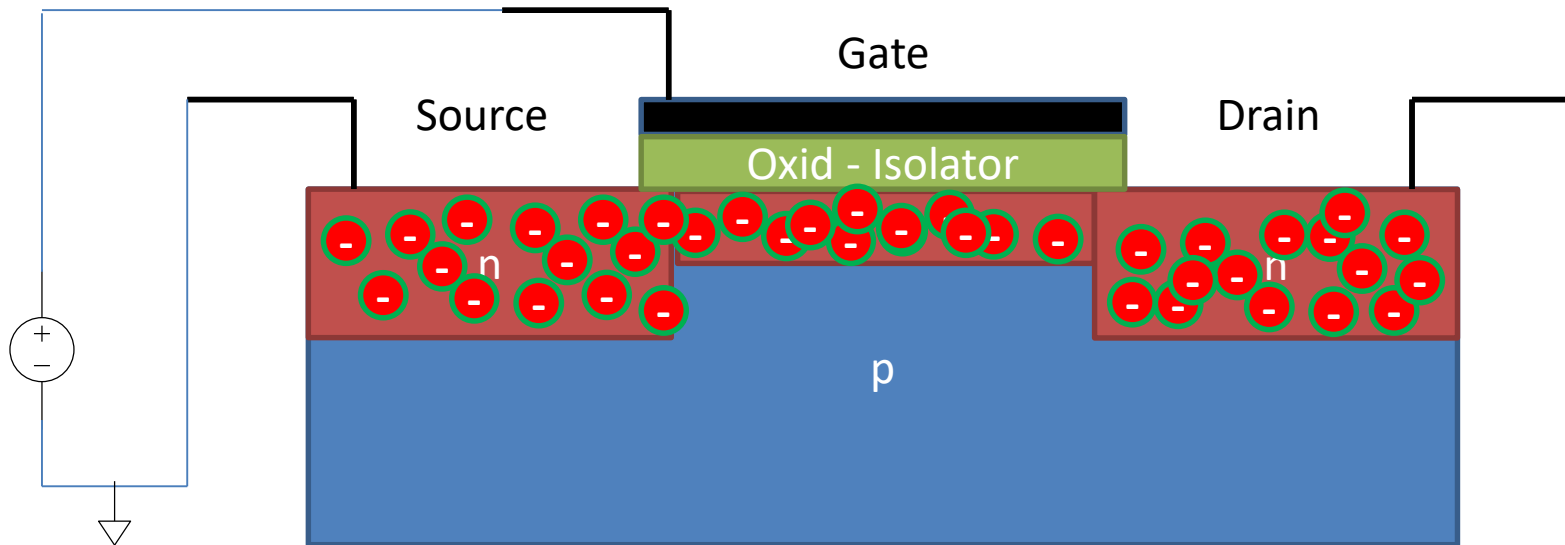


Metall-Isolator-Halvledare struktur:  
 Kräver att  $v_{GS}$  ska vara över tröskelspänningen  $V_{T0}$   
 Annars:  $Q \approx 0 : v_{GS} < V_{T0}$

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



# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

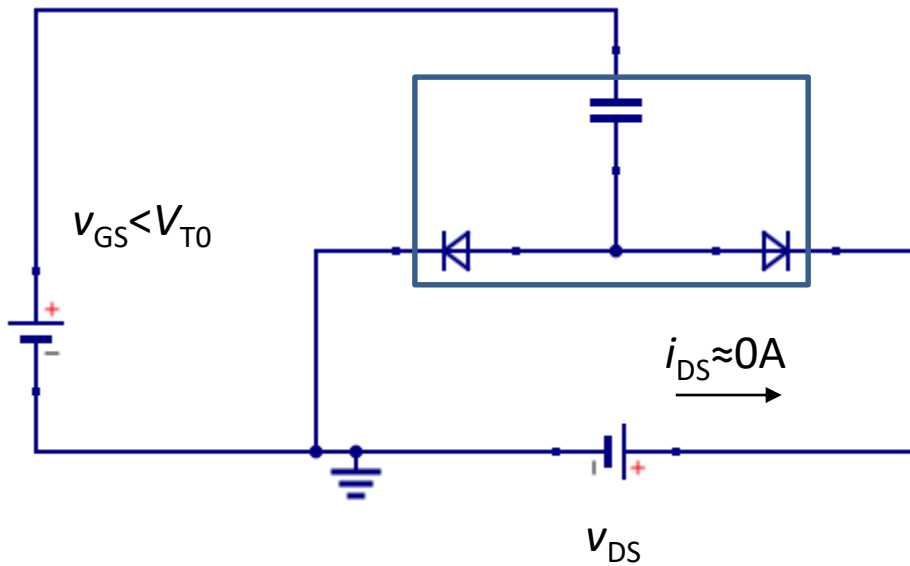


- Hög koncentration av elektroner under gaten
- Skapar ledande kanal
- 'Kortsluter'- pn-övergången

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

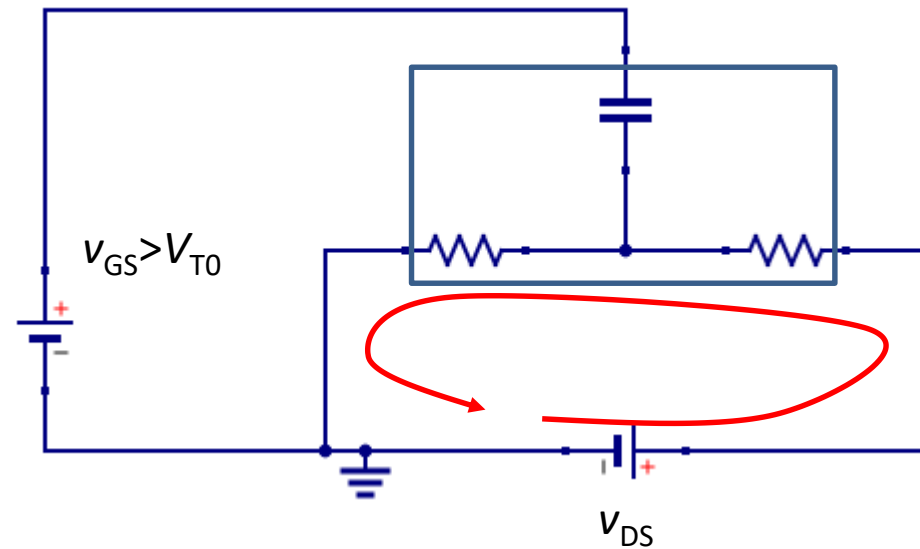
$$R \propto \frac{1}{Q} = \frac{1}{C(V_{GS} - V_T)}$$

# MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



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

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

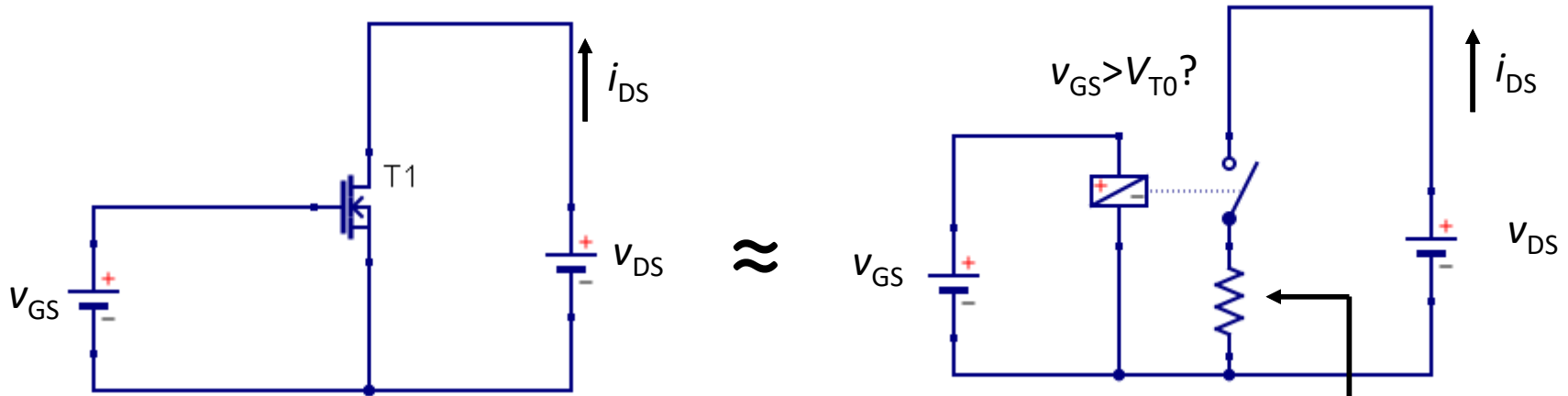


$v_{GS} > V_{T0}$  -> Ledande kanal med elektroner mellan source/drain

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

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

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

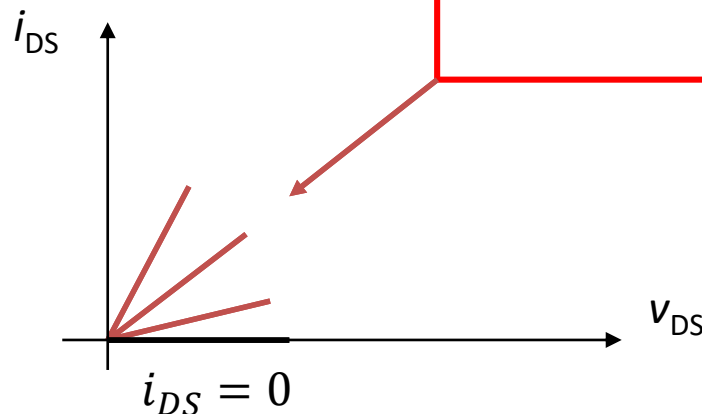


$$i_{DS} = K(v_{GS} - V_{T0})v_{DS}$$

$K$  – mått på hur bra transistorn leder ström

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

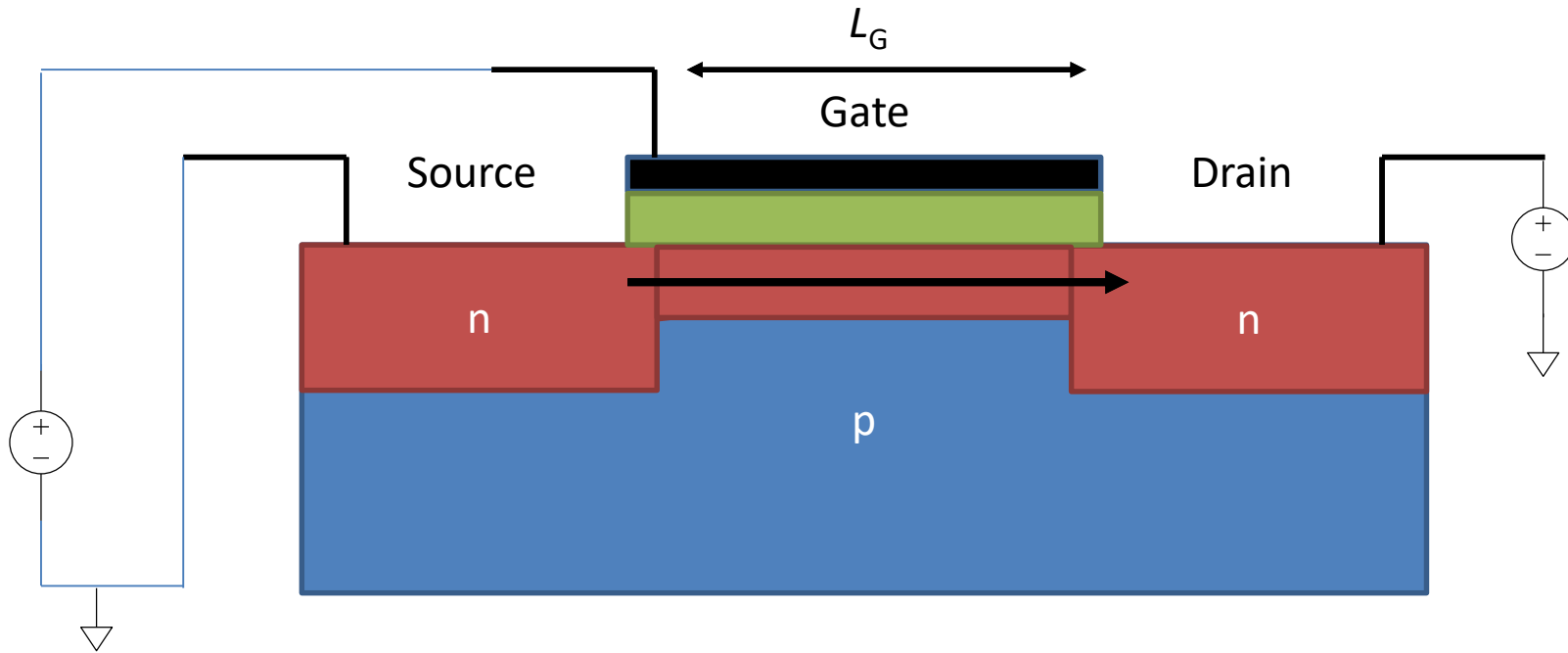
$$i_{DS} = \frac{v_{DS}}{R}$$



Låga  $v_{DS}$ :

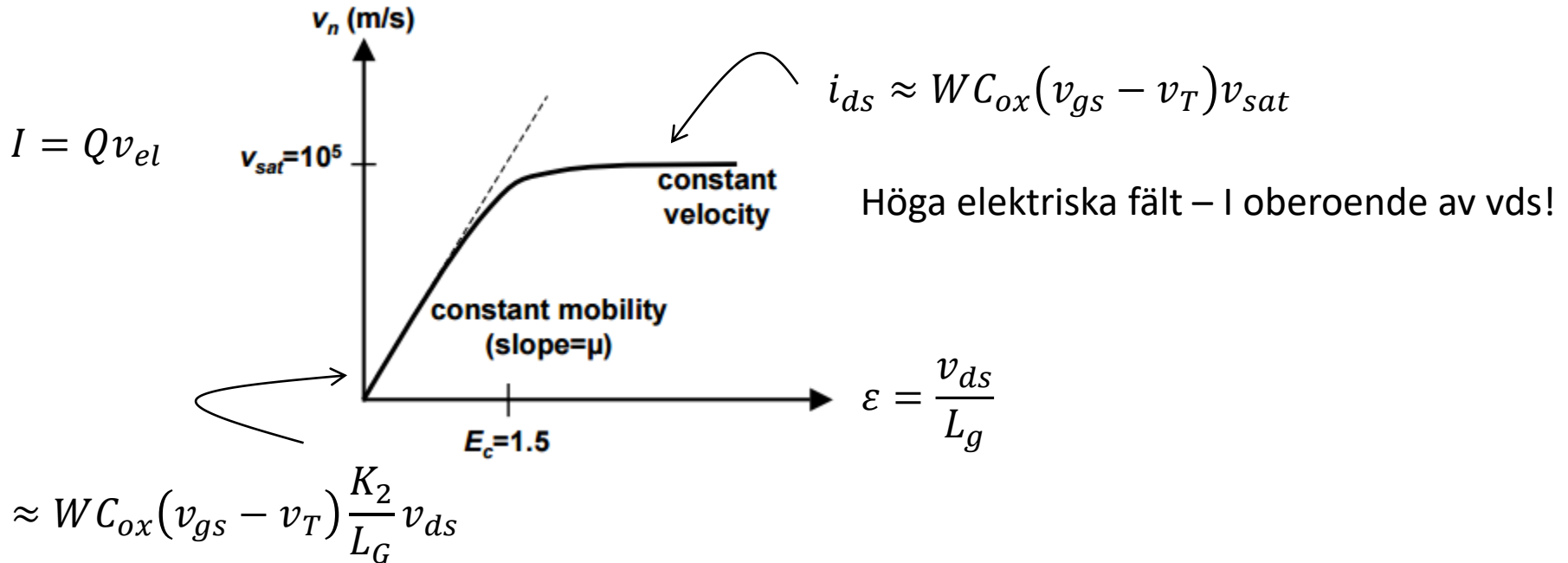
Transistorn fungerar som en variabel resistor!

# “Stora” $v_{DS}$ : Triod/Mättnad



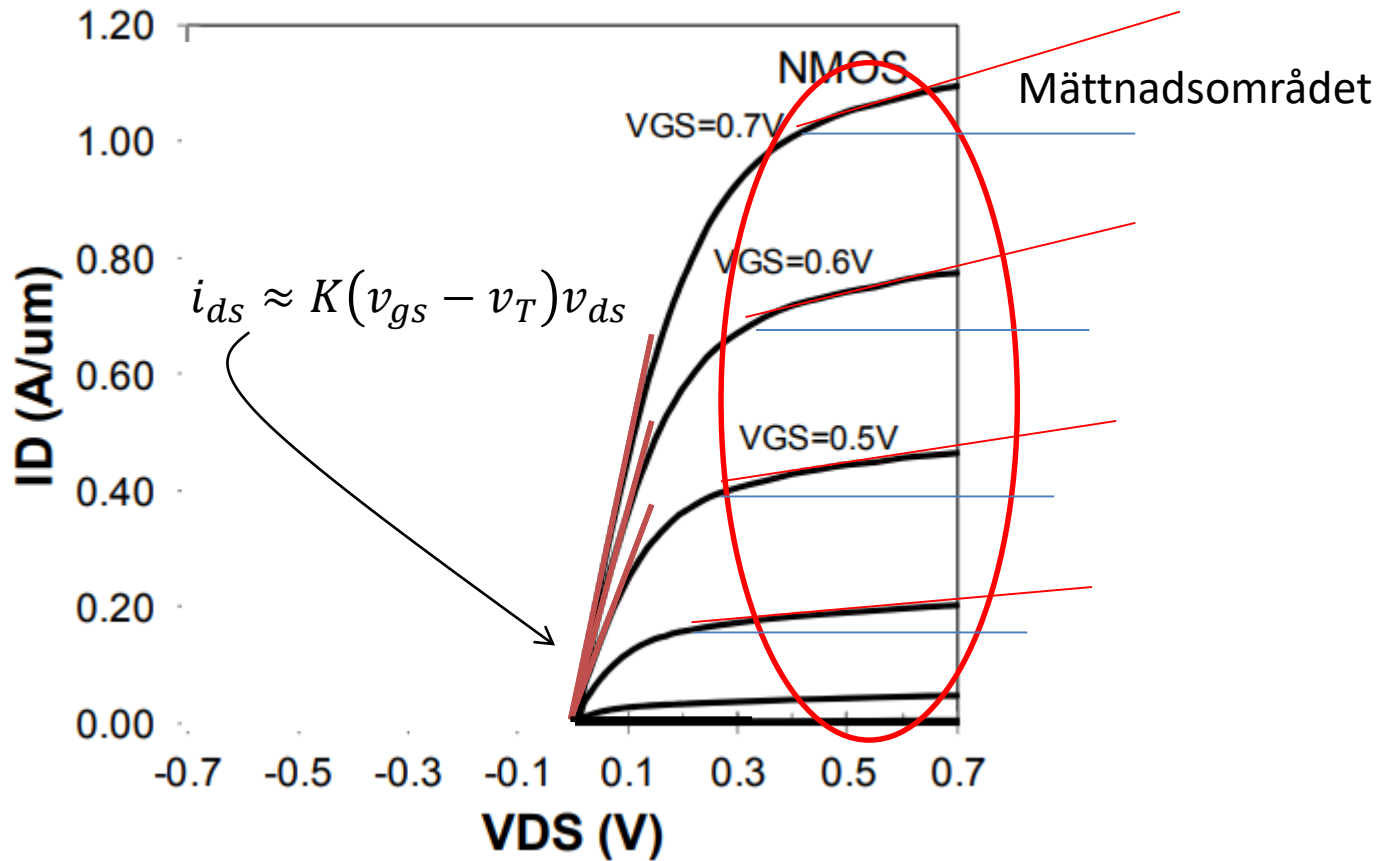
Elektroner rör sig från S → D med hjälp av ett elektriskt fält  $\varepsilon = \frac{v_{ds}}{L_g}$

# “Stora” $v_{DS}$ : Triod -> Mättnad



Små elektriska fält – linjärt beroende  $I(v_{ds})$  – resistans!

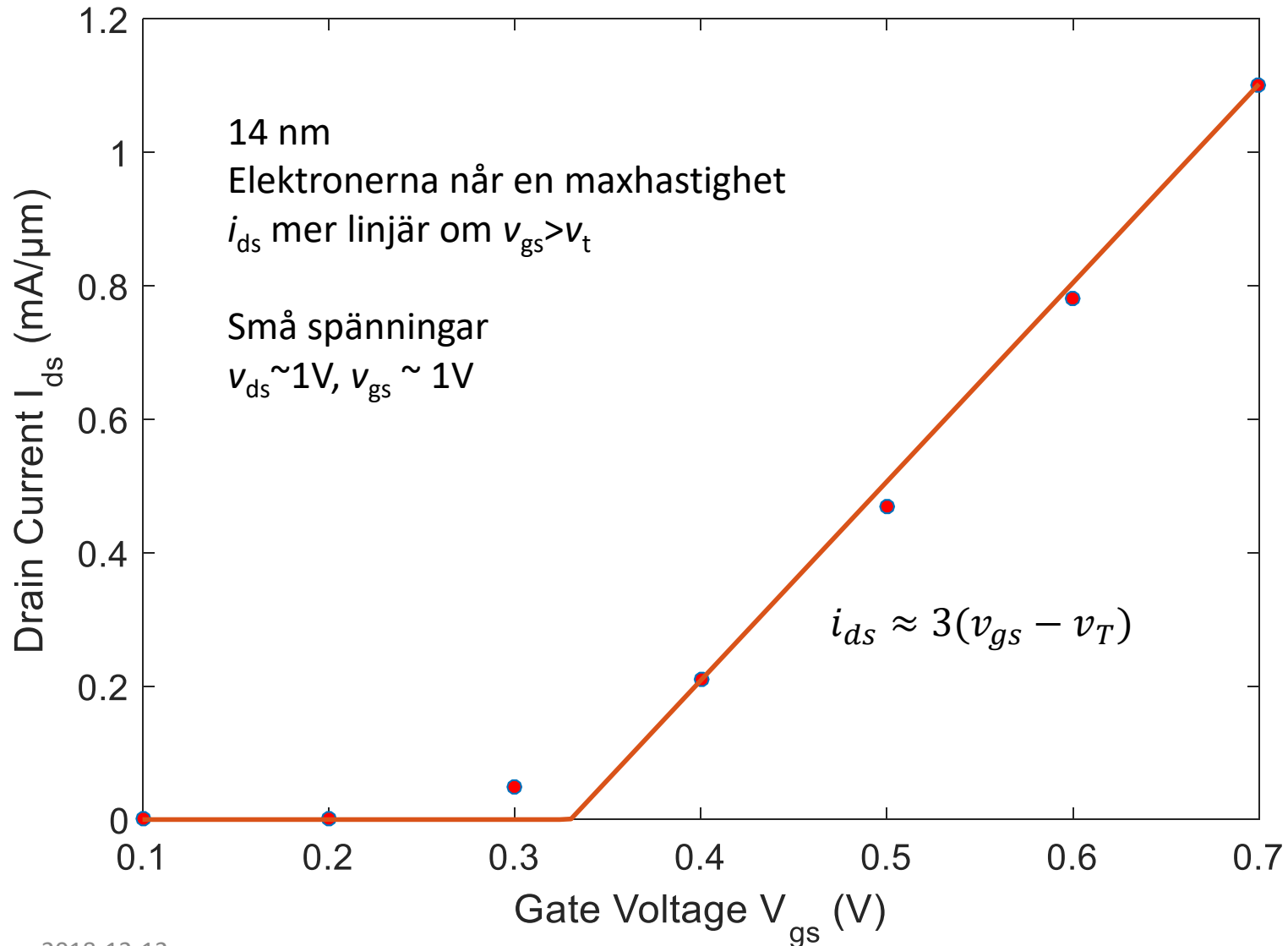
# Modern CMOS-transistor (14 nm)



$$i_{ds} \approx K_{sat}(v_{gs} - v_T)(1 + \lambda v_{ds})$$

$$i_{ds} \approx K_{sat}(v_{gs} - v_T)$$

# Nanoelektronik



# Mikroelektronik

Diskreta Transistorer har “långa”

$$L_g \sim 1-10 \mu\text{m}$$

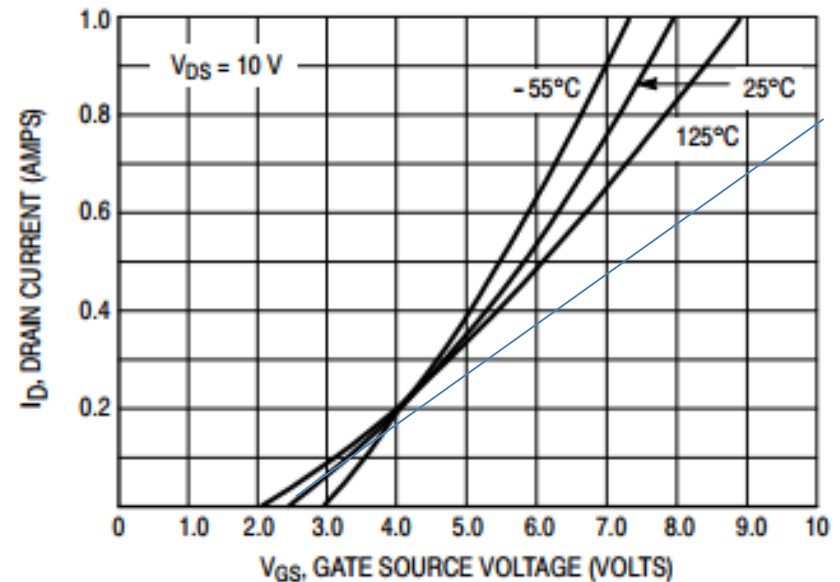
Leder till en kvadratisk ökning av strömmen med  $v_{gs}$

$$i_{ds} \approx K_{diff} C_{ox} (v_{gs} - v_T)^2$$

Detta är standarduttrycket för en nMOS.

(Lite) mer komplicerad matematik – behandlas ofta med småsignalanalys

**Vi använder det linjära uttrycket i denna kursen.**



**Figure 2. Transfer Characteristics**





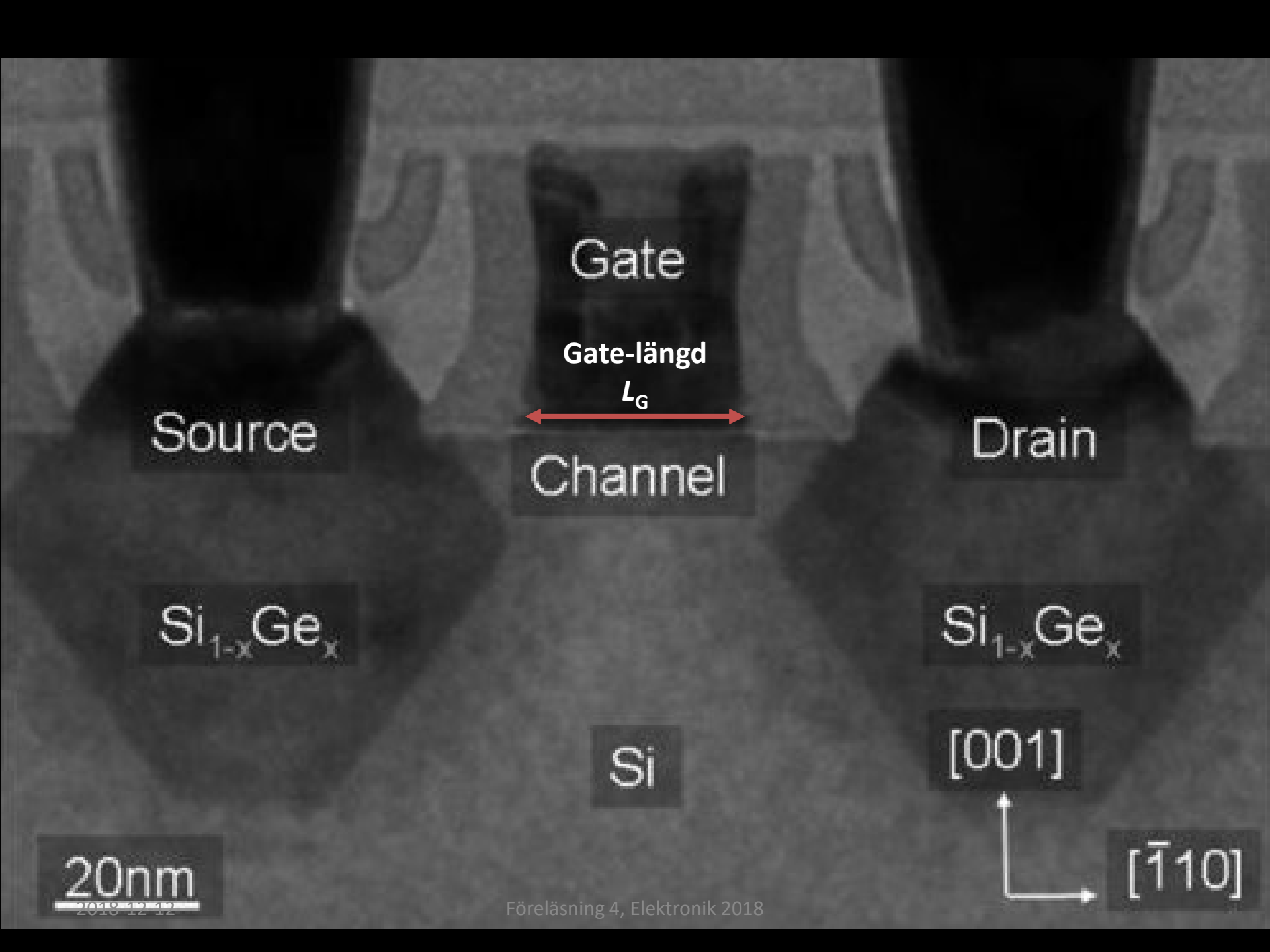
A cross-sectional diagram of a MOSFET. The top part shows a grey substrate with a white channel layer. A red rectangular gate is positioned above the channel. Two dark grey rectangular regions, labeled 'Source' and 'Drain', are located on either side of the channel. The bottom part of the diagram is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

Source

Gate

Drain

Channel / Substrate



Gate

Gate-längd

$L_G$

Source

Drain

Channel

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

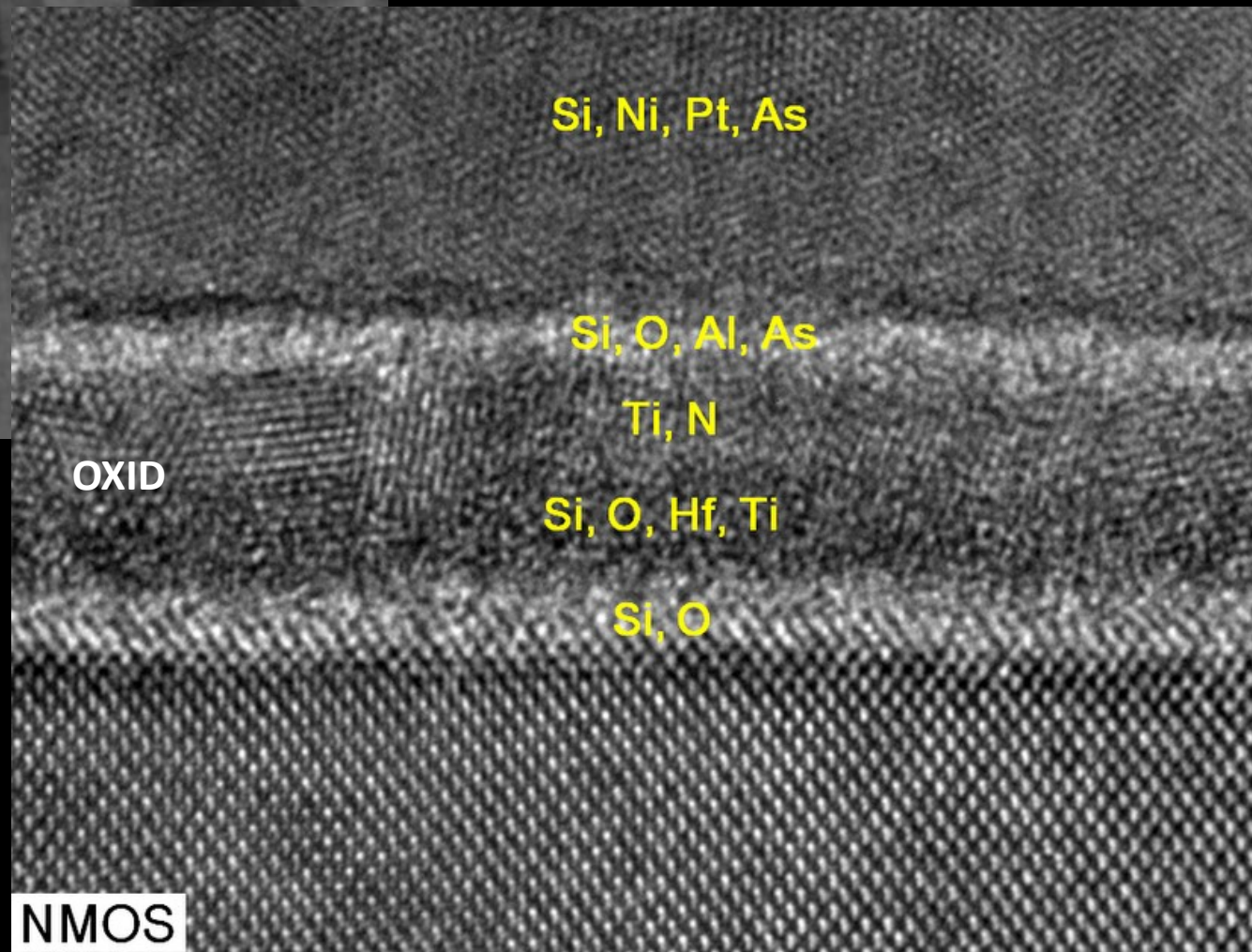
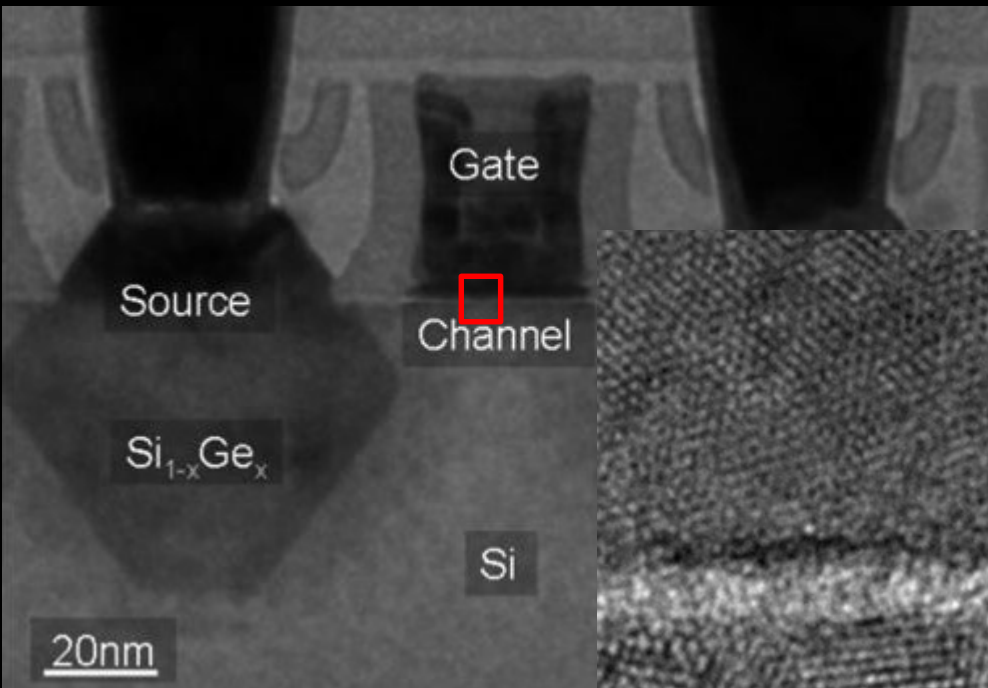
Si

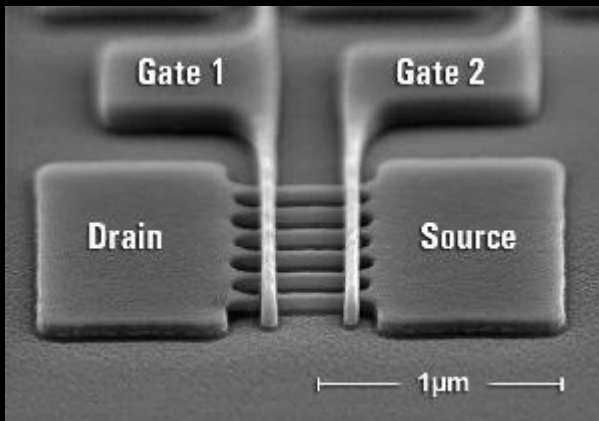
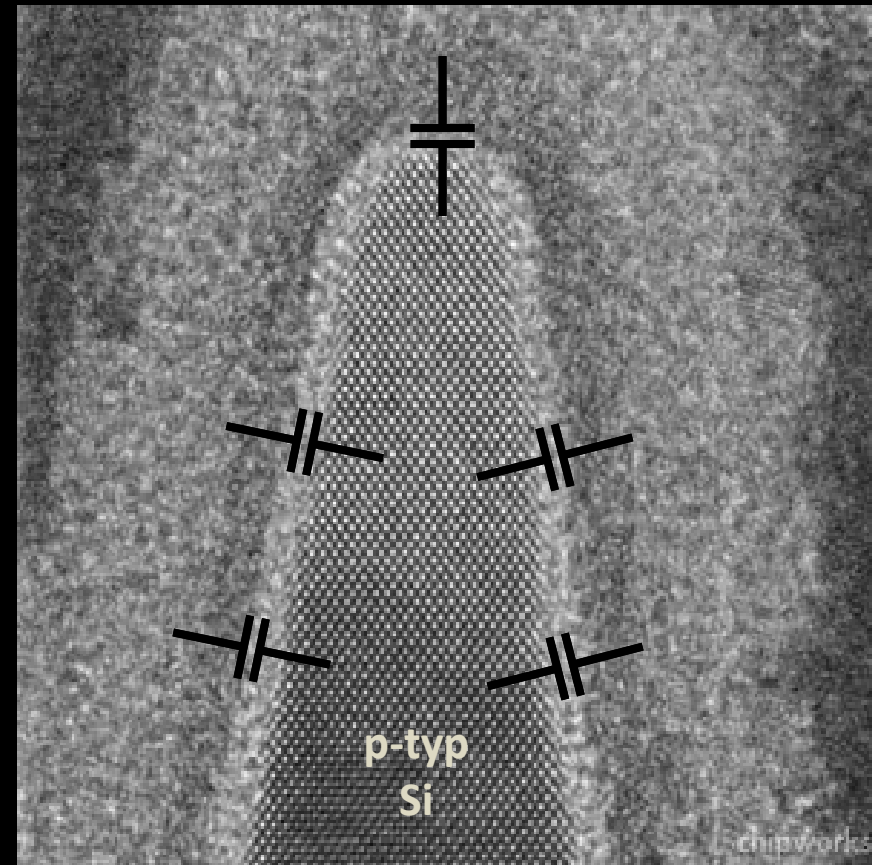
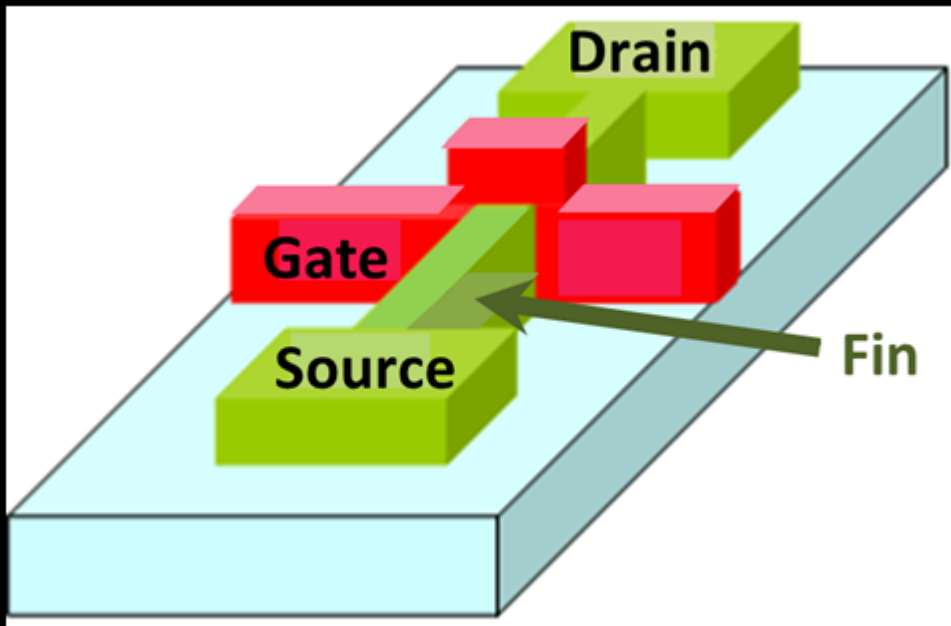
[001]

$[\bar{1}10]$

20nm

2018-12-12



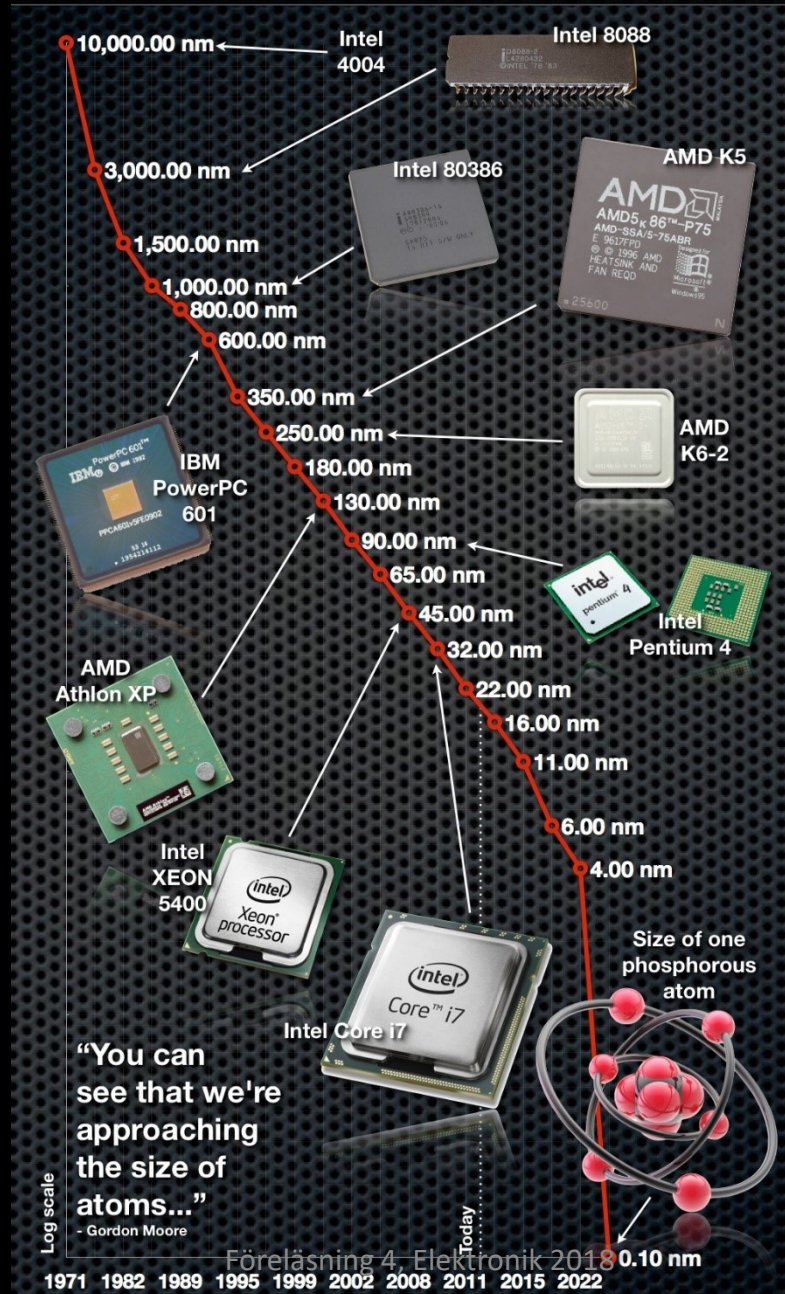


## *FinFETs*

14-22 nm node , Ivy Bridge+

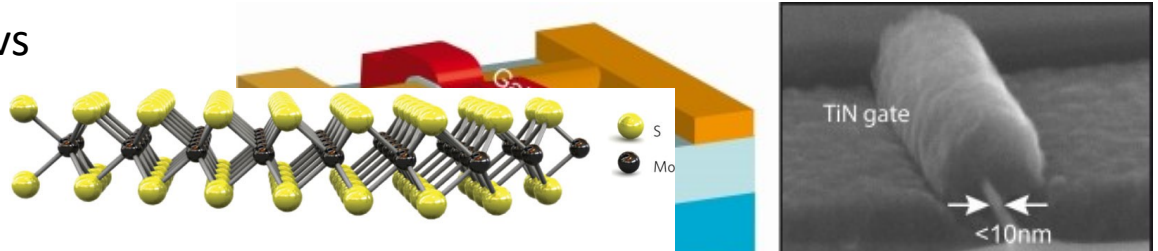
# How small can a transistor be?

The evolution of microprocessor manufacturing processes

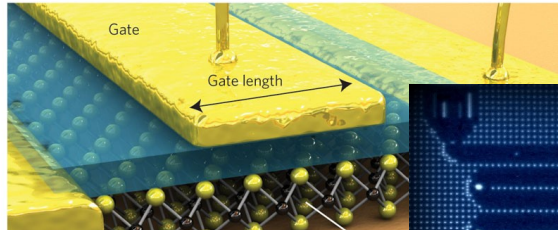


# Nanoelektronik

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



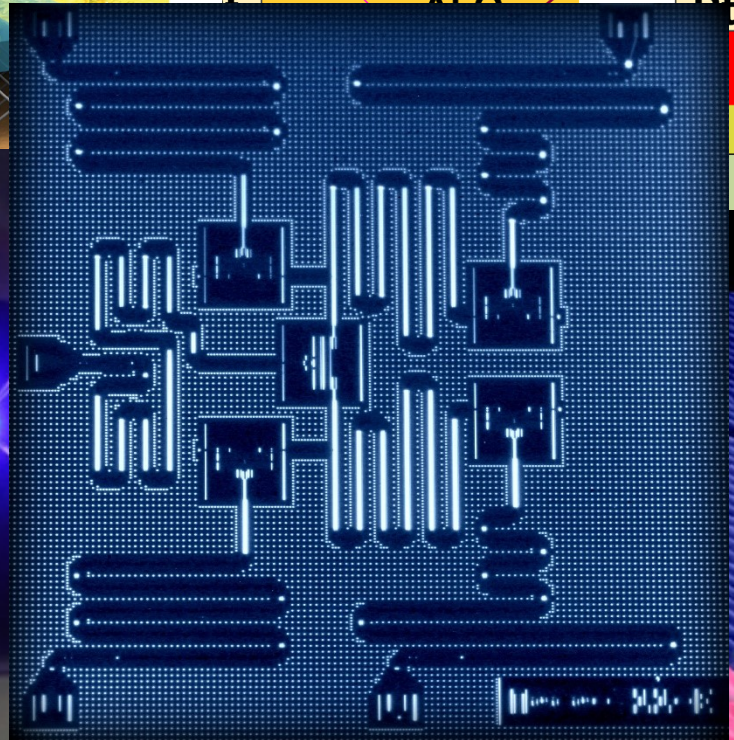
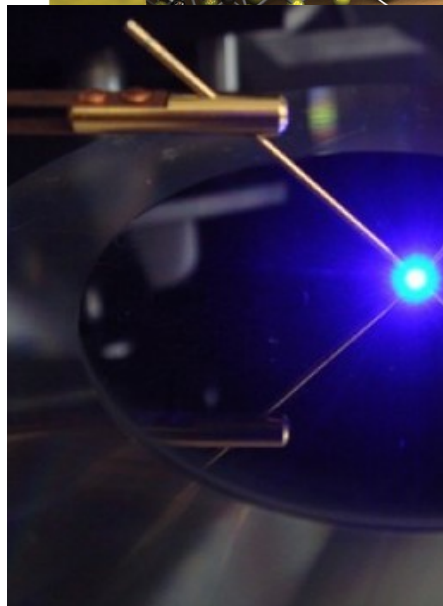
Hur får vi ett så stort  $K$  som möjligt?



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?