

Forelesning nr.9 INF 1411

Elektroniske systemer

Transistorer
MOSFET
Strømforsyning



Dagens temaer

- Radiorør
- Transistorer
- Moores lov
- Bipolare transistorer
- Felteffekttransistorer
- Digitale kretser: AND, OR og NOT

Introduksjon

- Transistoren er den viktigste typen halvleder
- En transistor er en strøm- eller spenningsstyrt strømkilde som brukes i både analog og digital elektronikk
 - I analog elektronikk: forsterkere og filtre
 - I digital elektronikk: logiske porter (AND, OR og NOT)
- Med transistorer kan man også lage
 - Dioder
 - Kondensatorer
 - Resistorer

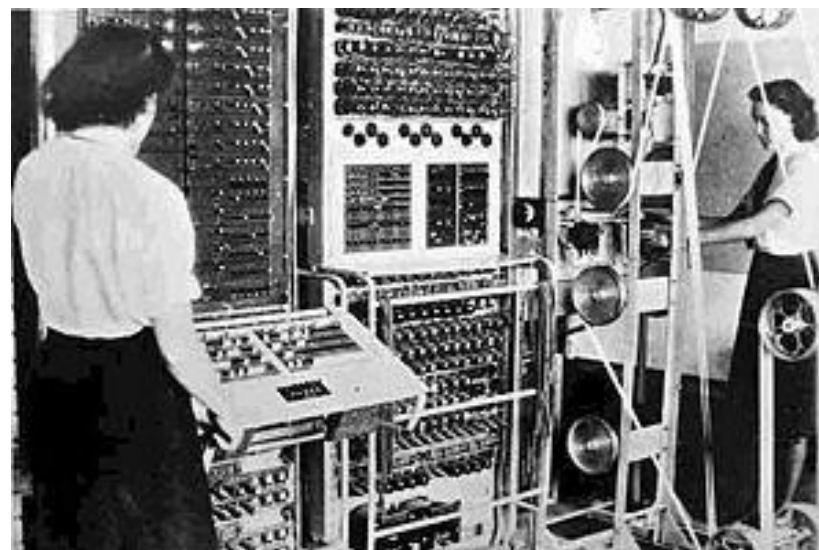
Radorør

- Radiorøret er forgjengeren til transistoren
 - Oppfunnet tidlig på 1900-tallet
 - Radiosendinger over større avstander ble mulig fordi man kunne forsterke radiosignalene
- Radiorøret brukes enten som forsterker eller diode, og baserer seg på elektroner som beveger seg i et vakuum



Vakuumrør (forts)

- Radiorøret var enerådende i elektronikk frem til 50-tallet
- Den første moderne datamaskinen (von Neumann-arkitektur) var Colossus M1 som bestod av rundt 1500 radiorør
- Colossus ble brukt til kryptoanalyse av britene i 2. verdenskrig
- Strømforbruket var på 15kW



Radiator (forts)

- Radiator brukes fortsatt i noen anvendelser, bla i høy-kvalitets audioforsterkere og radiosendere med høy effekt
- Radiator har en rekke ulemper:
 - Stor fysisk størrelse og stort varmetap
 - Upålitelig (glasset sprekker og vakuum ødelegges)
 - Blir dårligere over tid (bla sot på innsiden av glasskolben)
 - Treg oppstart (trenger oppvarming)
 - Langsomme som digitale brytere

Transistoren

- Transistoren avløste radorøret på slutten av 50-tallet
- Transistorens halvlederegenskaper baserer seg på elektriske egenskaper i overganger mellom ulike materialer, f.eks silisium, germanium eller silisiumkarbid mot bor, arsen eller silisium
- Transistorer er mye mindre enn radorør
 - mange transistorer får plass på samme chip (et par milliarder)
 - Effektforbruket synker
 - Hastigheten øker (tiden det tar å slå av/på strømmen minker)

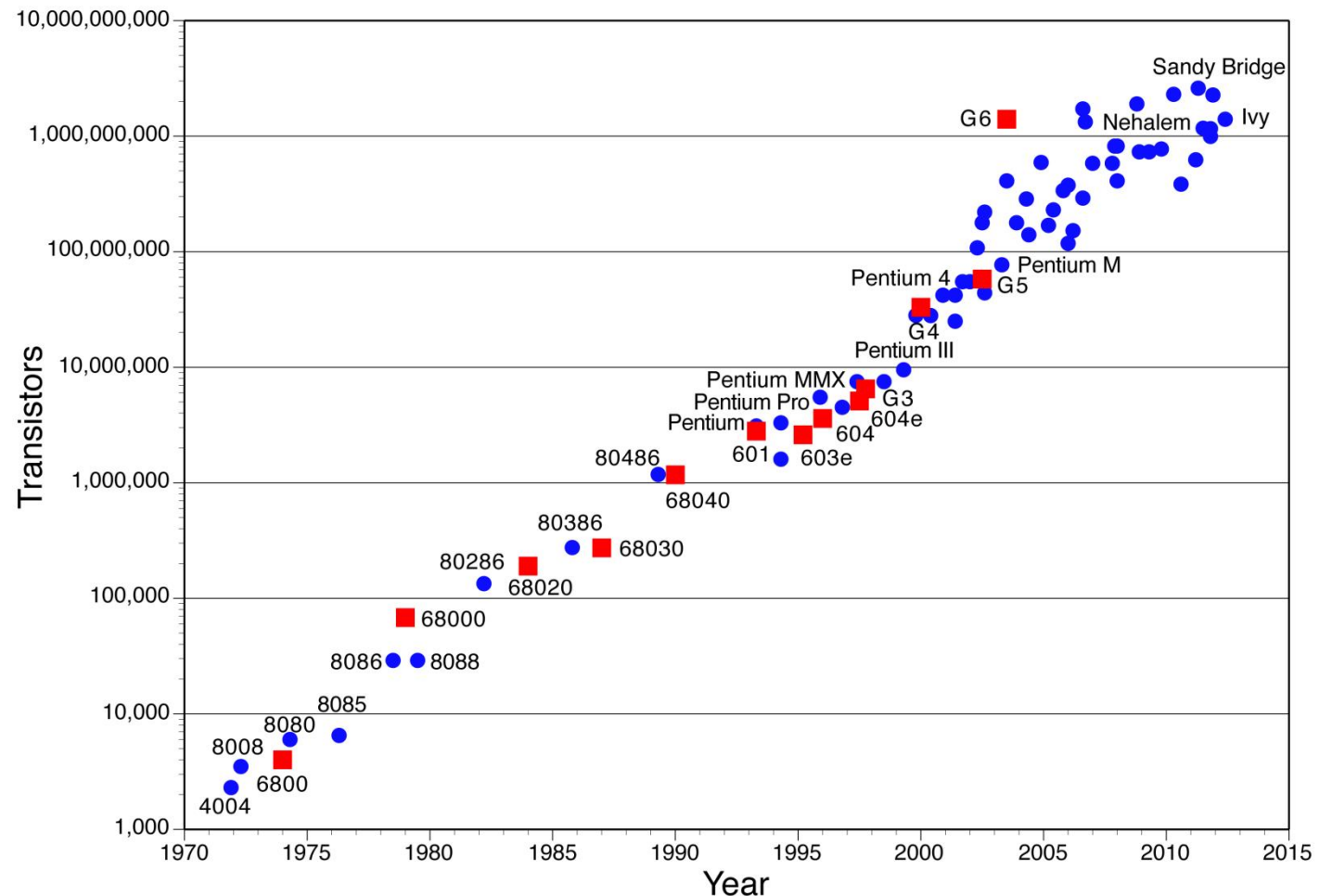
Transistoren (forts)

- Transistoren avløste radorøret på slutten av 50-tallet
- Transistorens virkemåte baserer seg på elektriske egenskaper i overganger mellom ulike materialer, f.eks silisium, germanium eller silisiumkarbid mot bor, arsen eller silisium
- 18 milliarder transistorer får plass på 2x2cm
- Transistoren en lang rekke fordeler:
 - Liten størrelse og vekt
 - Lav arbeidsspenning (3.3 v eller lavere)
 - Ingen oppvarmingstid, lavt effektforbruk og lite varmetap
 - Høy pålitelighet og fysisk robust
 - Lang levetid
 - Tåler mekanisk sjokk og vibrasjon



Transistoren – Moores lov

- Moores lov fra 1956:
Antall transistorer på
en integrert krets vil
dobles hvert annet år
- Regnekraft og
tilgjengelig
hukommelse dobles
ca hver 18.måned
- Begge deler betyr
eksponentiell vekst



Transistoren – Moores lov i praksis

- Bærbar fra 1982 med 4MHz CPU vs iPhone5 2012 med 1.3 GHz dual core CPU
 - 100 ganger tyngre
 - 500 ganger større volum
 - 10 ganger dyrere (justert)
 - 1/325 av klokkefrekvensen

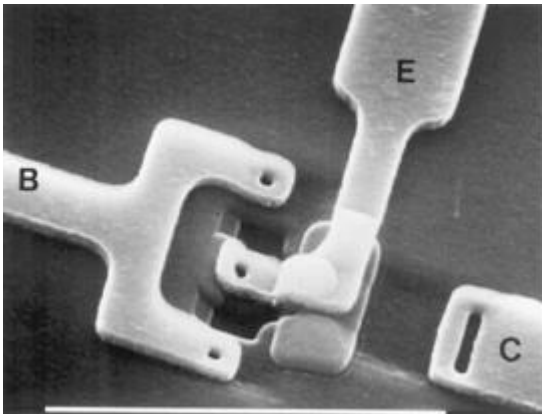
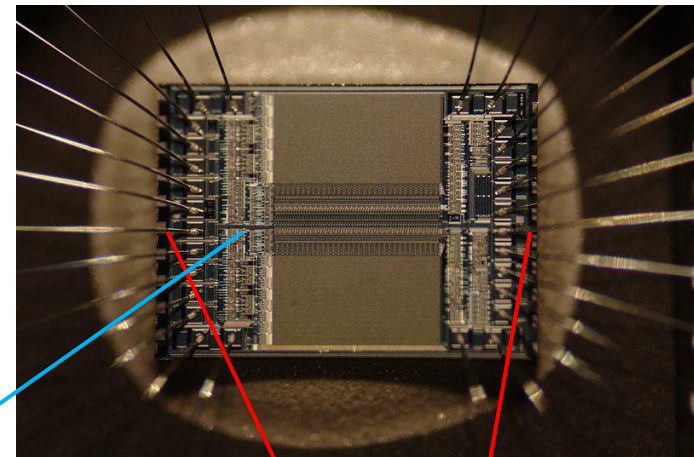
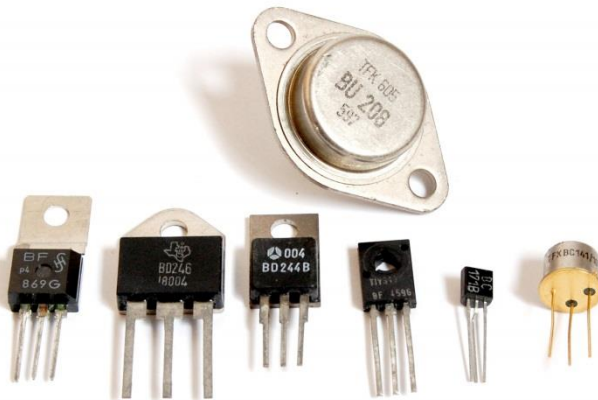


Transistoren (forts)

- Transistoren har også noen ulemper sammenlignet med radorør
 - Kan operere på maks 1000 volt
 - Vanskelig å lage transistorer for både høy frekvens og høy effekt samtidig (f.eks ved kringkasting)
 - Transistorer er mer følsomme for kraftig stråling og elektriske utladninger i omgivelsene
 - Ikke mulig å bytte ut enkelt-transistorer hvis de feiler; Hele kretsen må kastes

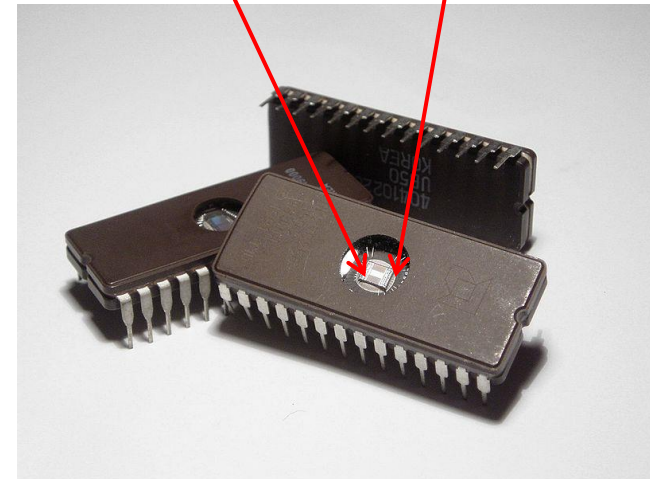
Produksjon av transistorer

- Transistorer lages enten som diskrete komponenter eller integrerte kretser



13.03.2018

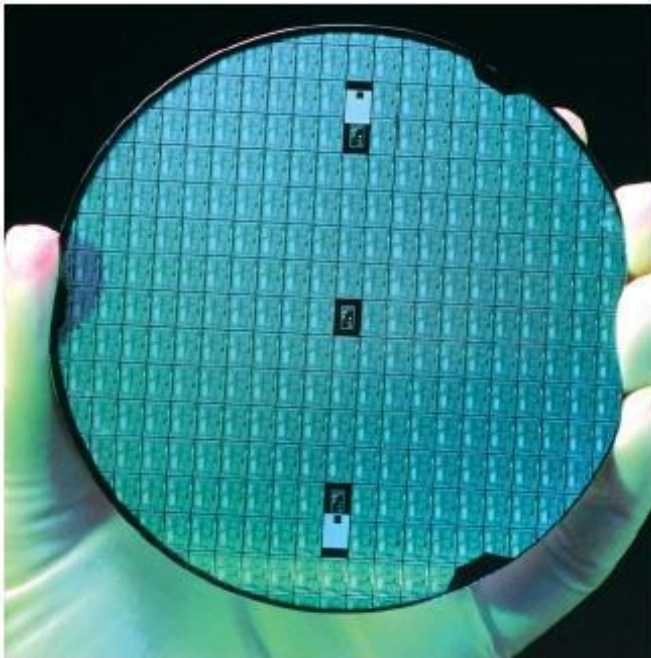
IN 1080



12

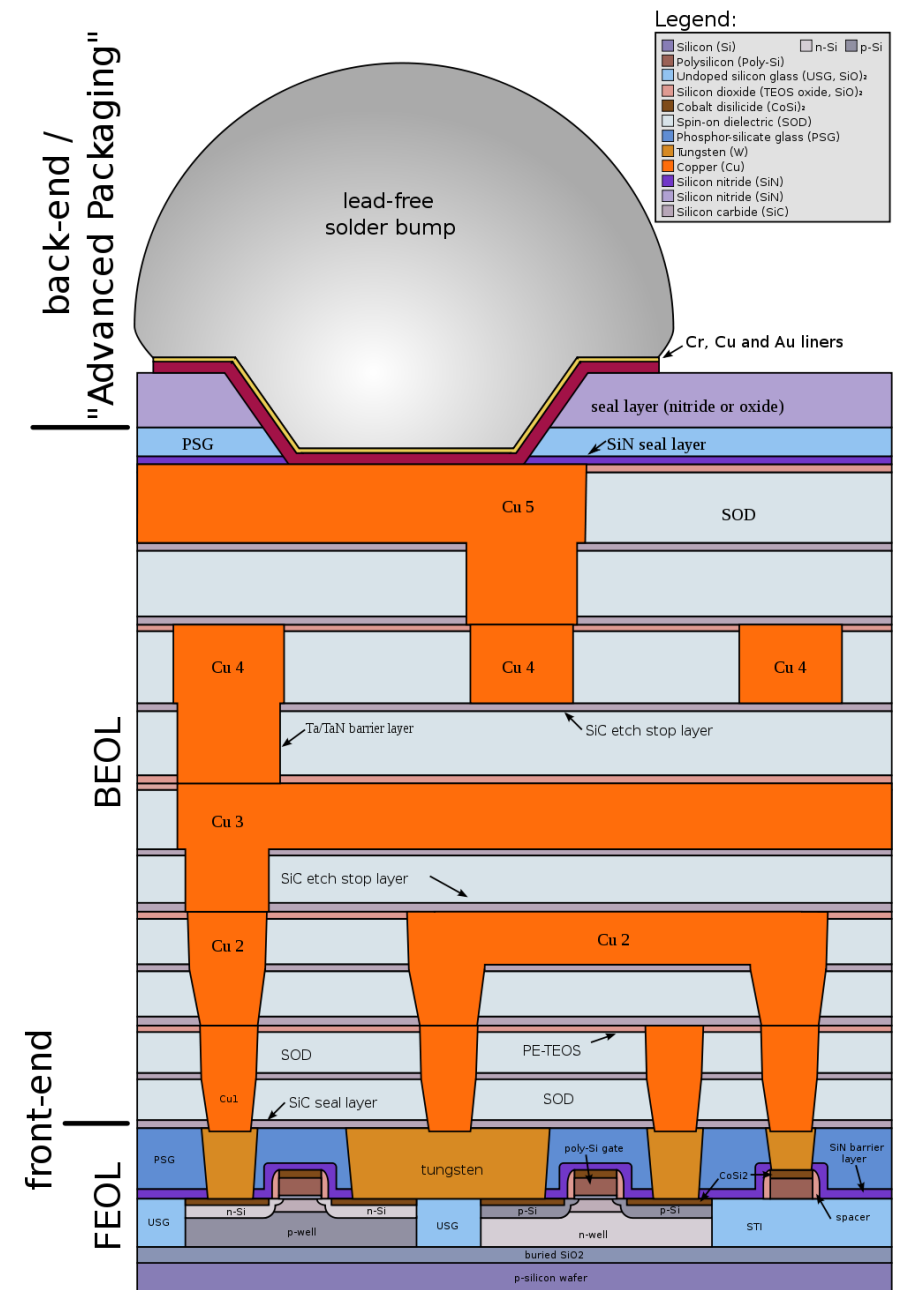
Produksjon av transistorer

- Transistorer på integrerte kretser består av mange lag
- En «wafer» består av mange integrerte kretser



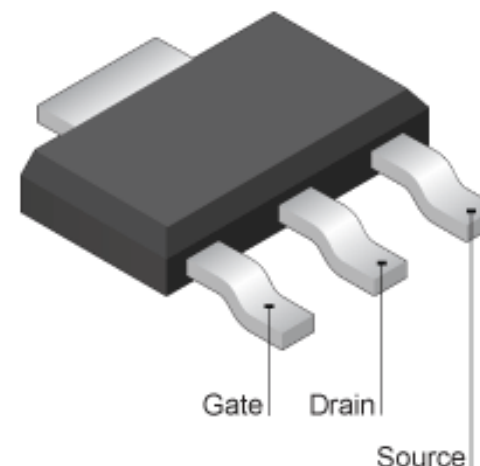
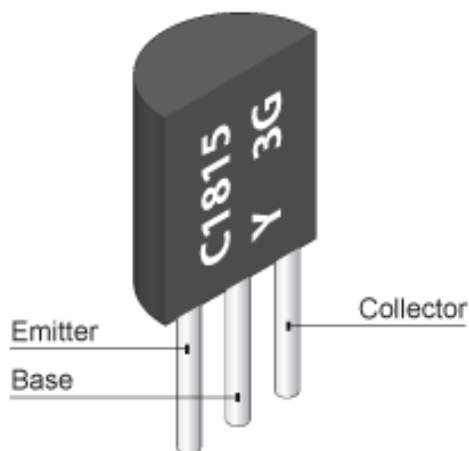
13.03.2018

IN 1080



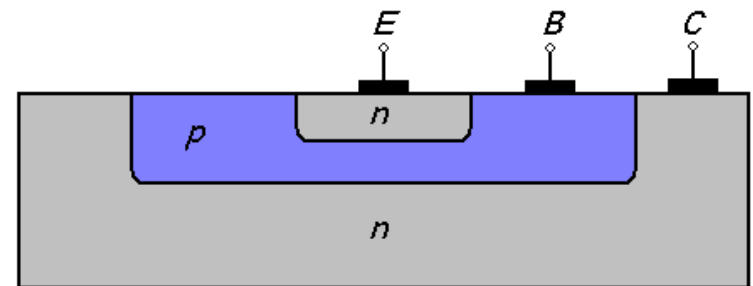
Transistorens hovedanvendelser

- Transistorer lages i mange ulike teknologier og for ulike typer bruk
 - **Bipolare** (BJT) brukes hovedsaklig til forsterkere i analoge kretser
 - **Felteffekttransistorer** (FET) er mest brukt, bla i logiske porter i digitale kretser, i likerettere, strømforsyninger og styring av av elektriske motorer



Bipolare transistorer (BJT)

- Bipolare transistorer (BJT) kan tenkes på som strøm-kontrollerte strømkilder
- BJTer finnes både som diskrete transistorer og på integrerte kretser
- En BJT består av tre terminaler: *Base*, *emitter* og *kollektor*
- En BJT er to dioder med koblet sammen, med enten felles p- eller n-region



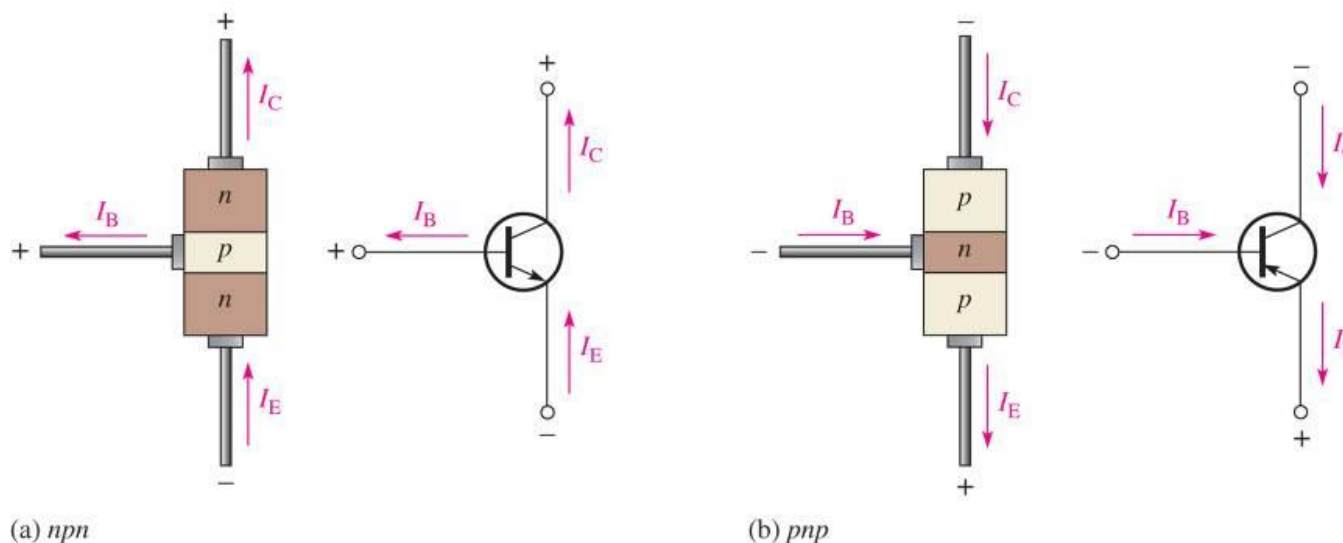
Strømmer i bipolare transistorer

- Kirchhoffs strømlov gir følgende sammenhenger mellom strømmene

$$I_C = \beta I_B \quad I_E = I_C + I_B \quad I_C = \alpha I_E$$

der $\alpha = I_C/I_E$ og $\beta = I_C/I_B$

- Typiske verdier for α er 0.950-0.995, mens β er 20-300 (strømfor



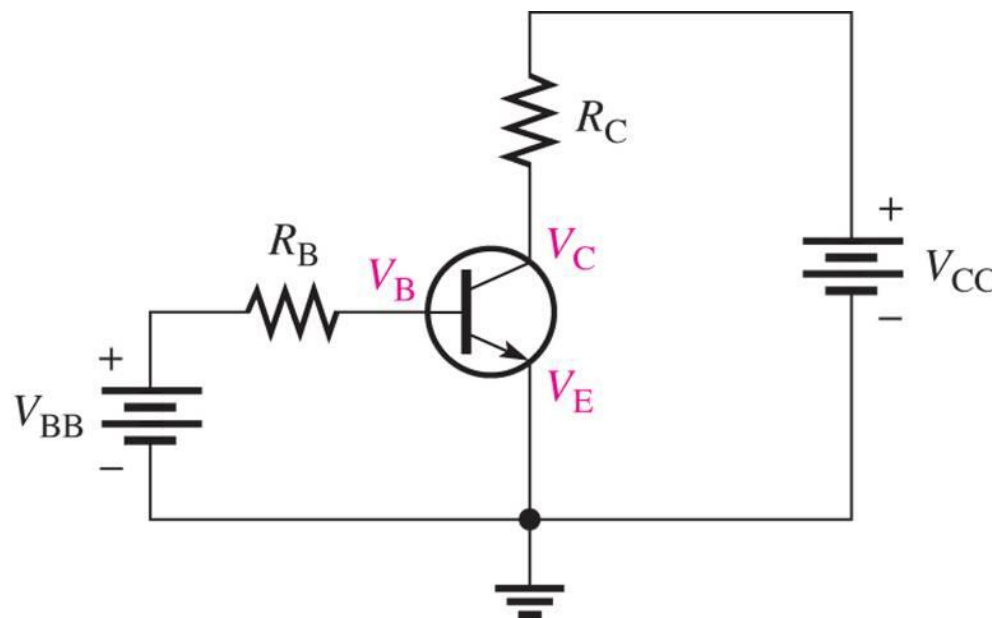
Spenninger i bipolare transistorer

- For en BJT som er i korrekt operasjonsområde, er spenningene gitt av (KVL gjelder)

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

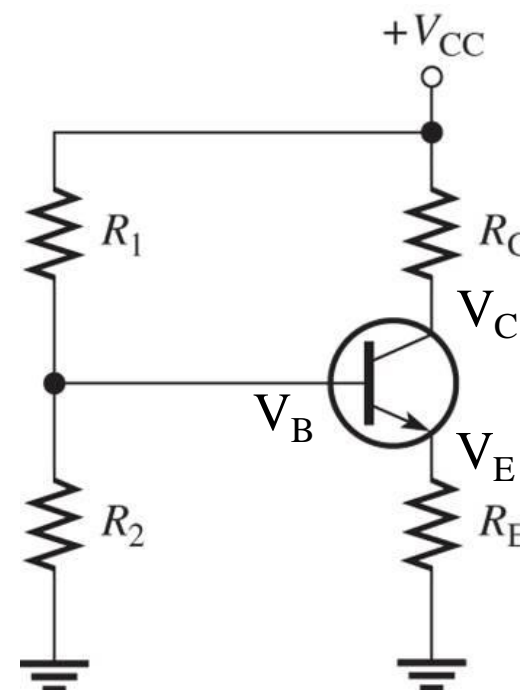
$$V_B = V_E + V_{BE}$$

- R_B og R_C reduserer I_B og I_C slik at transistoren ikke ødelegges



Spenninger i bipolare transistorer (forts)

- For at en transistor skal fungere som strømforsterker, må V_B , V_C og V_E ligge i innenfor bestemte intervaller, f.eks. Med en spenningsdeler av motstander
- Motstandsverdiene velges slik at transistoren opererer i det ønskede området



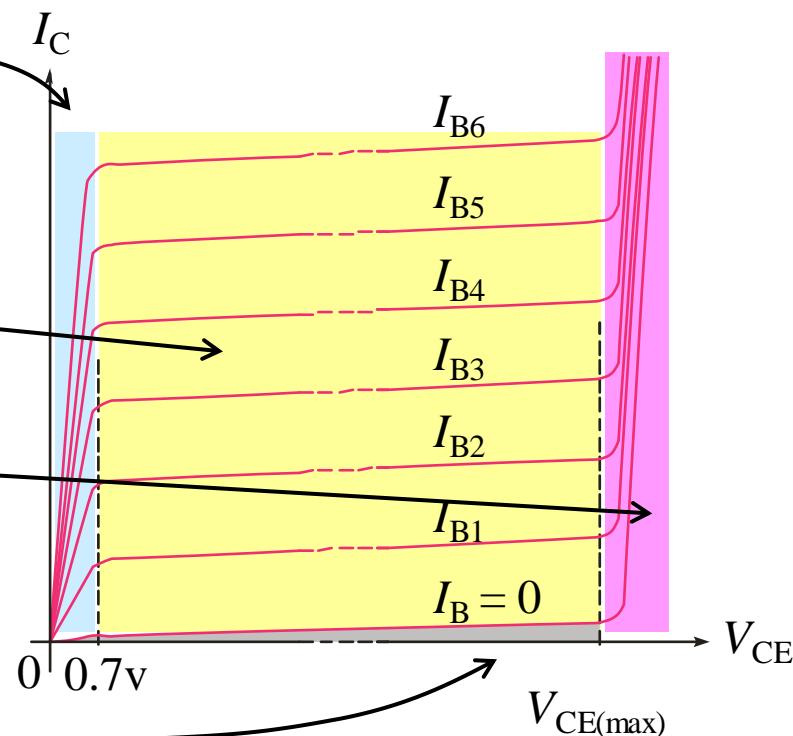
Operasjonsområder

- En transistor må jobbe innenfor korrekt operasjonsområde
- Hva som er korrekt område avhenger av anvendelsen, f.eks. om transistoren skal være analog forsterker eller digital bryter
- En transistor opererer normalt i ett av tre områder:
 - Avstengt («Cut-off»)
 - Lineært («Linear»)
 - Metning («Saturation»)
- I tillegg kan den være i *breakdown*, men da kan den bli ødelagt av for høye strømmen og smelte

Sammenheng strøm-spenning

- Operasjonsområde og strømforsterkning er bestemt av I_C som er funksjon av V_{CE} og I_B

- Metning:** Liten økning i V_{CE} gir stor økning i I_C
- Lineært:** I_C er nesten ikke avhengig av V_{CE} , kun av I_B
- Breakdown:** I_C er svært stor og ikke lenger avhengig av I_B
- Avstengt:** $I_B=0$ og I_C veldig liten

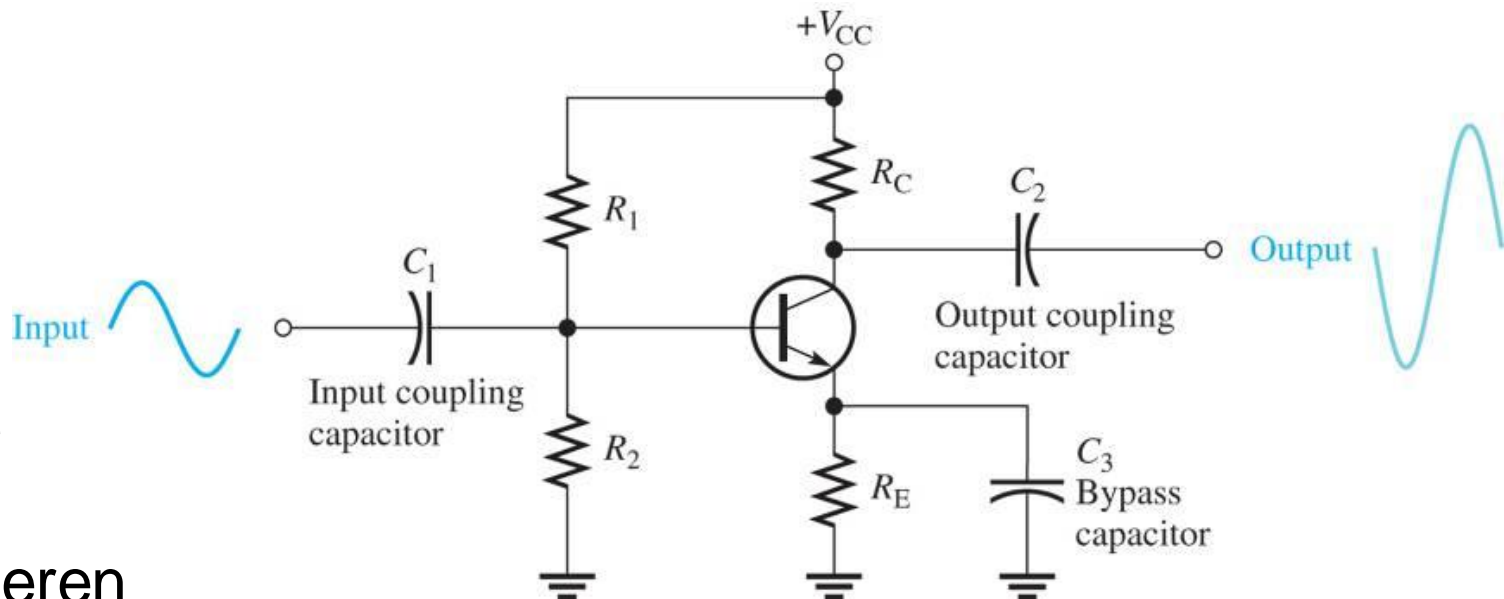


Felles emitter-forsterker

- En felles-emitter forsterker (CE) isolerer forsterkeren både fra input og output DC-last vha kondensatorer
- I tillegg gjør en *bypass*-kondensator at spenningsforsterkningen øker

$$A_v = \frac{R_c}{r_e}$$

r_e er den indre motstanden gjennom emitteren

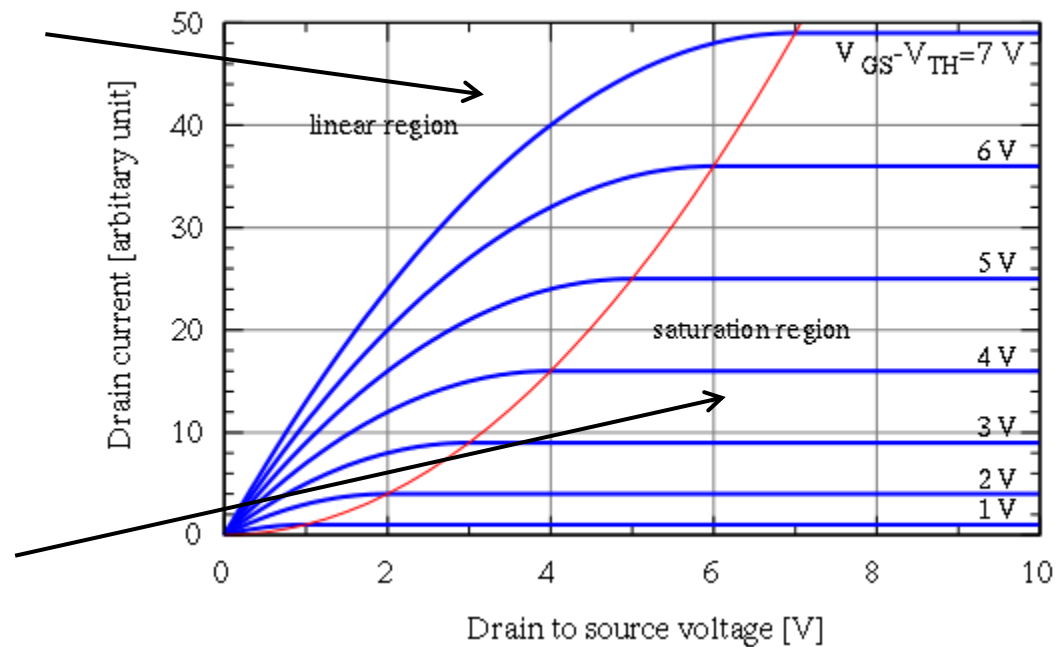


Felteffekttransistorer (FET)

- En FET er en spenningsstyrt strømbryter
- De tre terminalene heter hhv Drain (tilsv. Collector), Gate (tilsv. Base) og Source (tilsv. Emitter)
- Av FET finnes to hovedgrupper:
 - Junction FET (JFET)
 - Metal-Oxide Semiconductor FET (MOSFET)
- MOSFET-varianter er de vanligste transistorene i digitale integrerte kretser

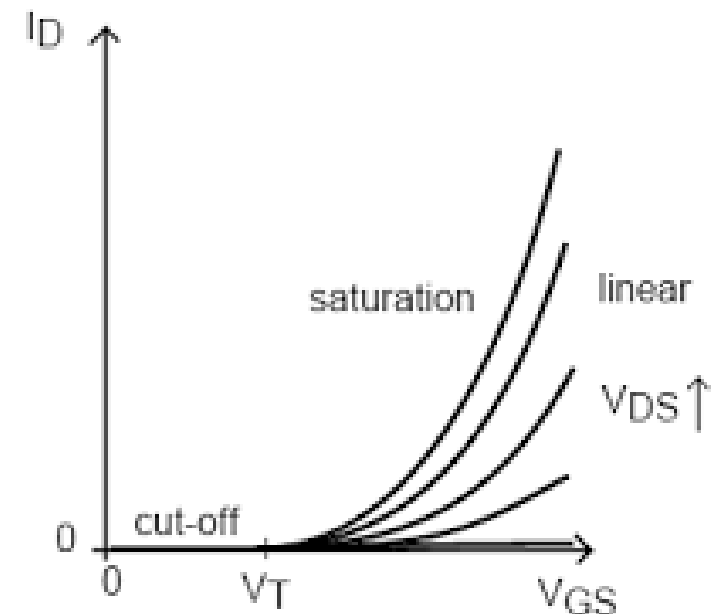
FET karakteristikk (1)

- I det *lineære* området vil endring i drain-source spenningen V_{DS} føre til en endring i drain-strømmen I_{DS} (dvs. fast resistans)
- I metningsområdet vil endring i spenningen V_{DS} *ikke* føre til en endring i drain-strømmen I_{DS} (dvs. variabel resistans)



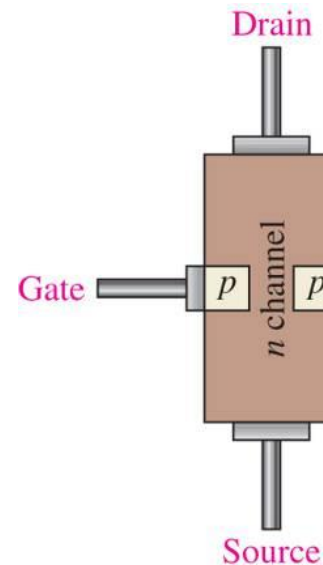
FET karakteristikk (2)

- I_{DS} bestemmes av V_{GS} forutsatt tilstrekkelig høy V_{DD}
- Hvis V_{GS} er lavere enn terskelspenningen V_T vil transistoren ha meget høy motstand og det vil ikke gå noe strøm I_{DS}

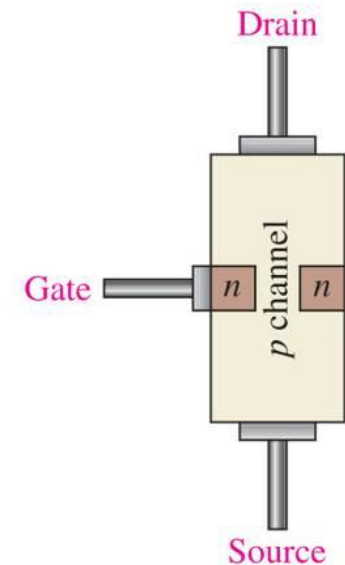


JFET

- JFET har en ledende kanal med source og drain-tilkobling i hver ende av kanalen
- Strømmen i kanalen kontrolleres av spenningen på gaten
- Som for en BJT finnes to typer JFET, kalt hhv n-type eller p-type, avhengig av hva som er majoritetsbærer i kanalen
- Gatespenningen regulerer motstanden i kanalen under gaten



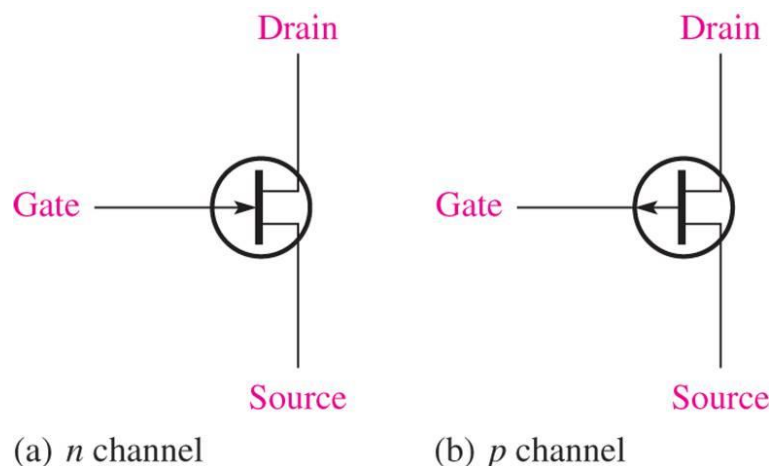
(a) *n* channel



(b) *p* channel

JFET (forts)

- Avhengig av om kanalen er p- eller n-type, er symbolene



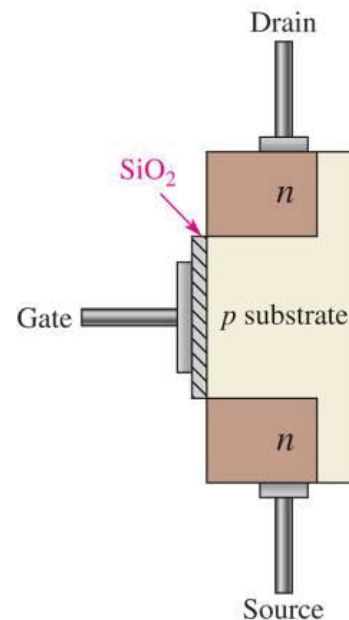
- For *n*-type må gate-spenningen være høyere enn source-spenningen for at JFET skal lede, mens gate-spenningen må være lavere enn drain-spenningen for at en *p*-type skal lede

MOSFET

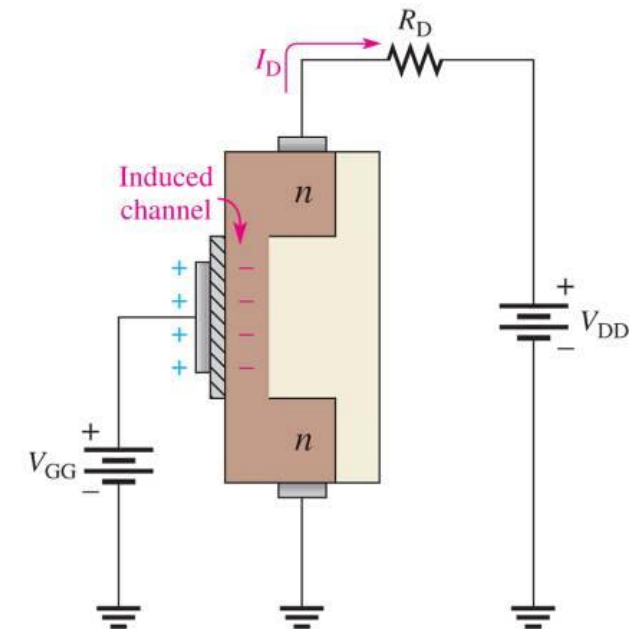
- En MOSFET har ingen pn-overganger som JFET, BJT og dioder
- Gaten på en MOSFET er elektrisk isolert fra drain-source vha et tynt lag med silisiumdioksyd
- MOSFET kommer i to hovedkategorier
 - Depletion-mode
 - Enhancement-mode
- MOSFET er den aller vanligste transistorer i digitale kretser; den kan også brukes som spenningskontrollert motstand eller som kondensator, i f.eks hukommelsesceller (RAM)

Enhancement(E) MOSFET

- En E-MOSFET har ingen permanent fysisk kanal som kan lede strøm
- Isteden vil det dannes en ledende kanal når gate-spenningen er over et visst nivå i forhold til source-spenningen



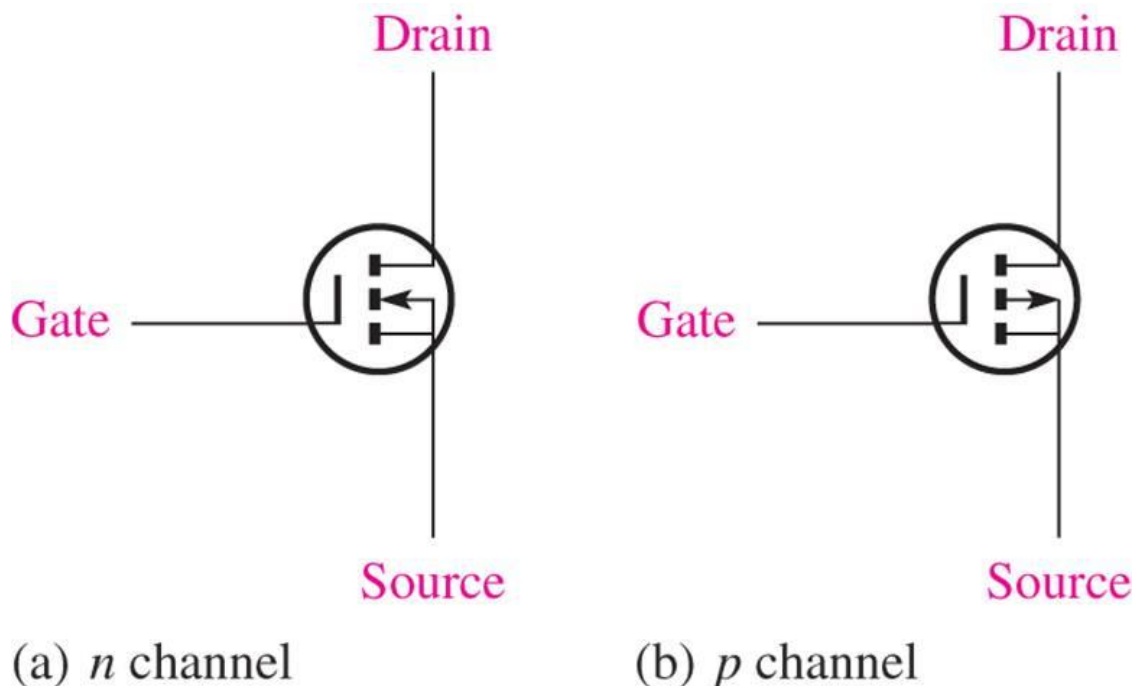
(a) Basic construction



(b) Induced channel ($V_{GS} > V_{GS(th)}$)

Enhancement(E) MOSFET (forts)

- En av de største fordelene med E-MOSFET er at det går svært lite strøm når den er i cutoff og at det går nesten ingen strøm gjennom gaten uansett operasjonsområde ($\sim \text{pA}$)

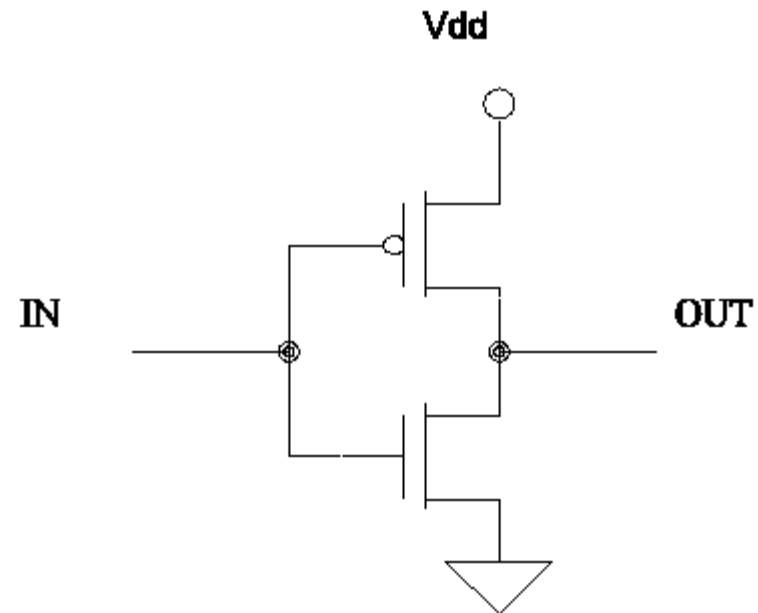


Power MOSFET

- I digitale kretser er det ikke behov for mye strøm mellom drain og source
 - Man ønsker at det skal gå så lite som mulig for å redusere strømforbruk/effektforbruk og dermed behov for kjøling
 - Blir I_{ds} for stor vil transistoren bli ødelagt
- Ønsker man å styre (slå av/på) store strømmen (mange ampère) i f.eks motorstyringer, bruker man power MOSFET
- Disse er konstruert for å tåle store strømmen uten å bli ødelagt
- Power MOSFET skal brukes i den 3. labøvelsen

CMOS

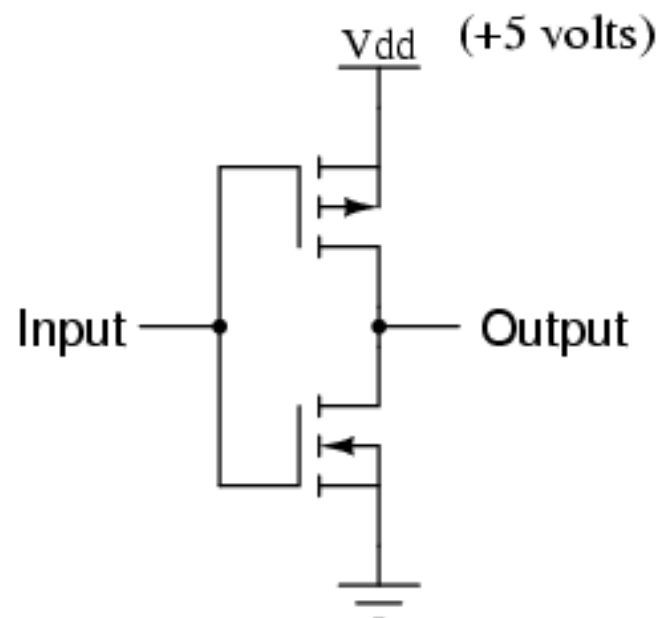
- CMOS er en spesiell type MOSFET hvor man produserer både p- og n-kanaltype på samme krets
- CMOS er svært utbredt i digitale kretser bla fordi man får høy transistoritetthet kombinert med lavt effektforbruk, og fordi man kan lage noe nær ideelle svitsjer



Digitale porter: inverter

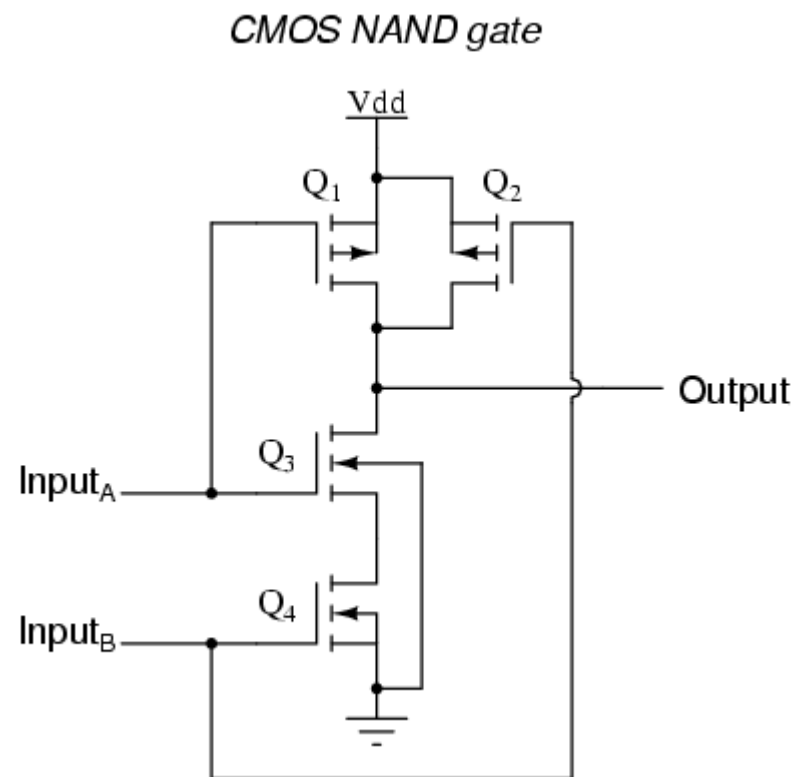
- En inverter tar som input et signal som enten er lavt (0v) eller høyt (5v) og produserer et utsignal som er det inverterte av innsignalet

Inverter circuit using IGFETs



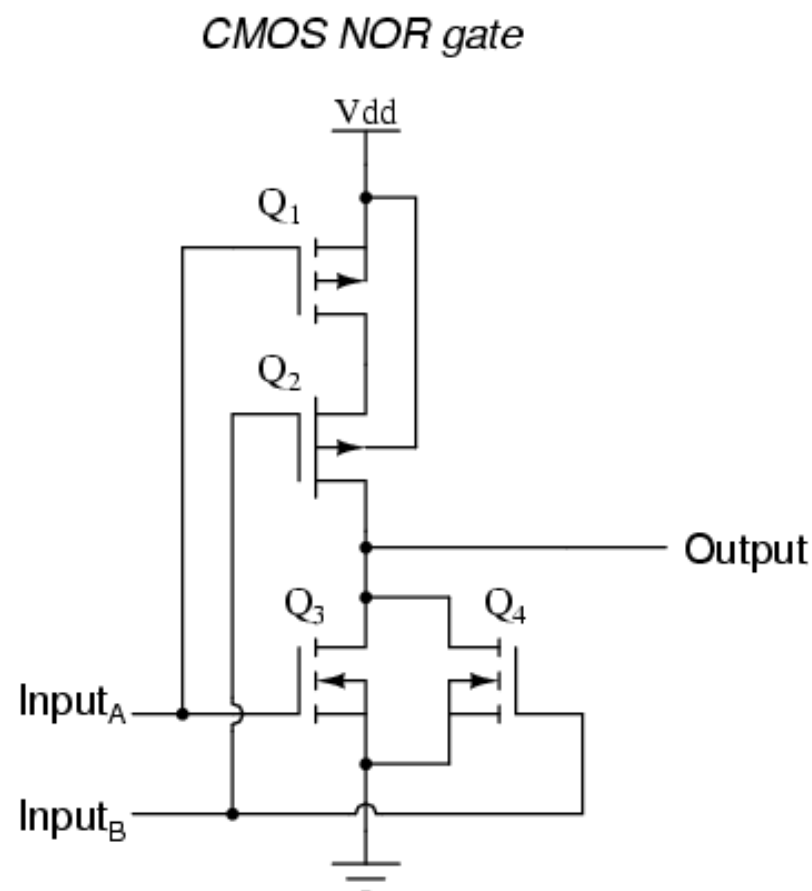
Digitale porter: NAND-port

- En NAND-port utfører en logisk NAND-operasjon mellom to binære inputsignal (dvs signal som har kun to diskrete signalnivåer)



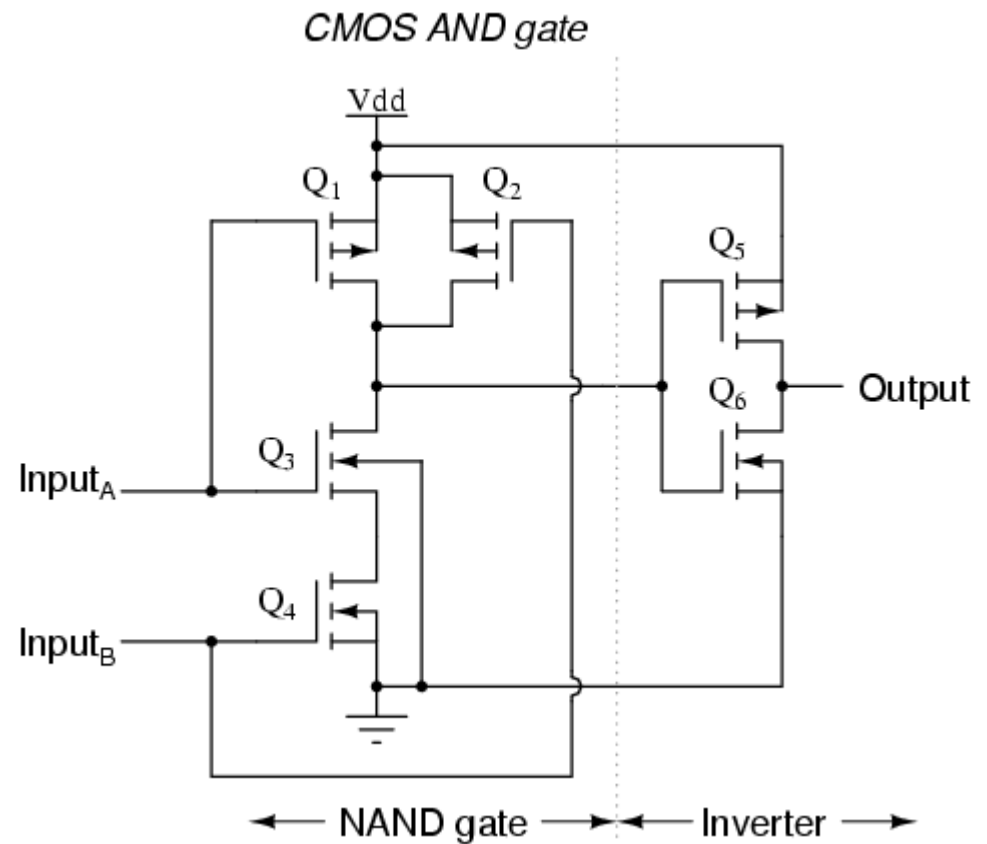
Digitale porter: NOR-port

- En NOR-port utfører en logisk NOR-operasjon mellom to binære inputsignal (dvs signal som har kun to diskrete signalnivåer)



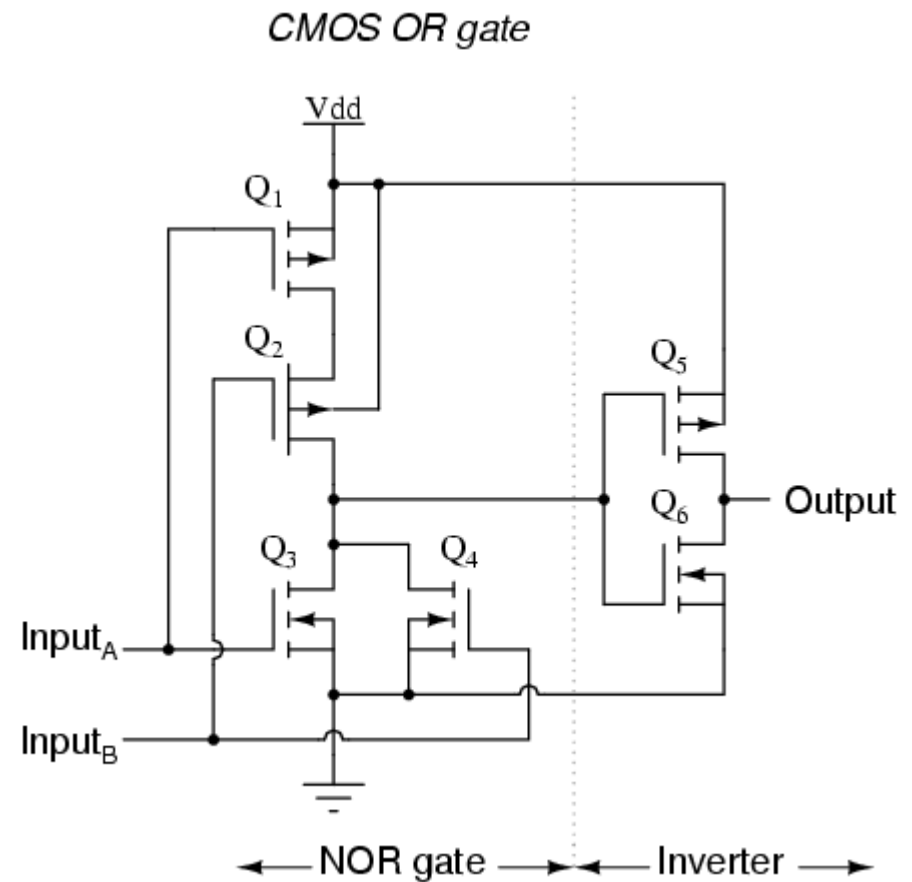
Digitale porter: AND-port

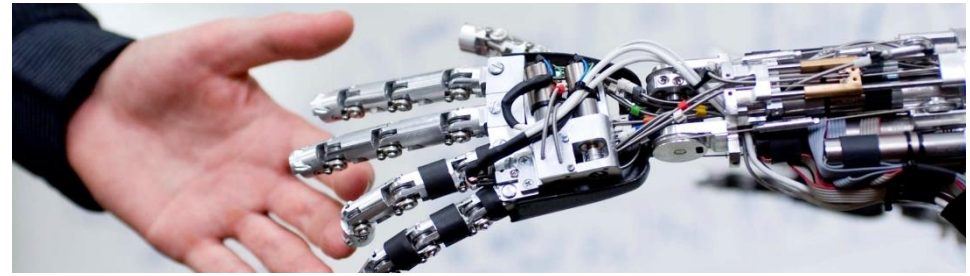
- En AND-port konstrueres vha en NAND-port og en inverter



Digitale porter: OR-port

- En OR-port konstrueres vha en NOR-port og en inverter





Oppsummeringsspørsmål

Kapittel 16

