

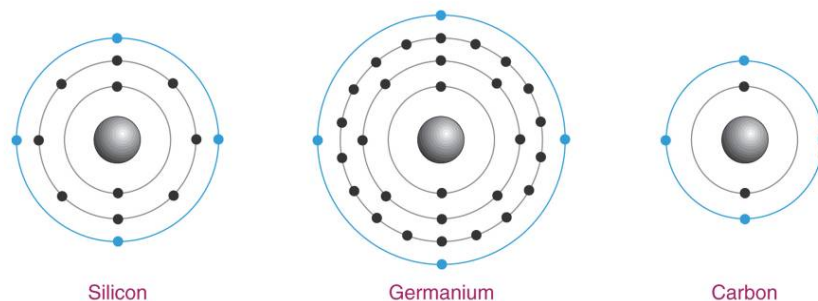
# Kapittel 17

## Introduksjon til “Solid State Components: Diodes”

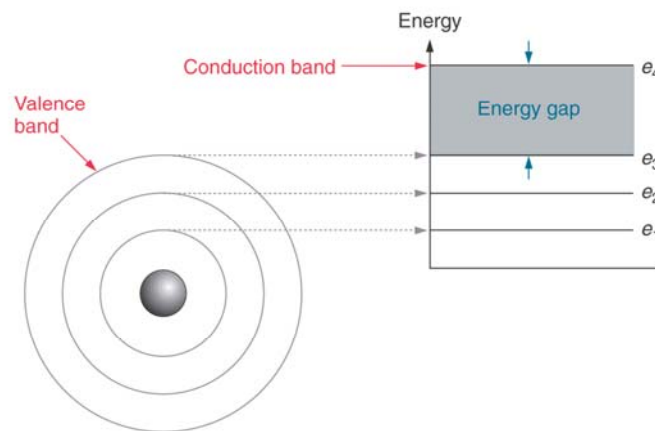
Revidert versjon januar 2012 T.Lindem – figurene er delvis hentet fra Electronics Technology Fundamentals Conventional Flow Version, Electron Flow Version, by Robert T. Paynter and B.J. Toby Boydell

- Halvledere – Semiconductors
- Atomer med 4 valenselektroner
- Mange materialer kan opptre som halvledere:

SiC, PbS, InAs, GaAs, GaN, ZnO ...

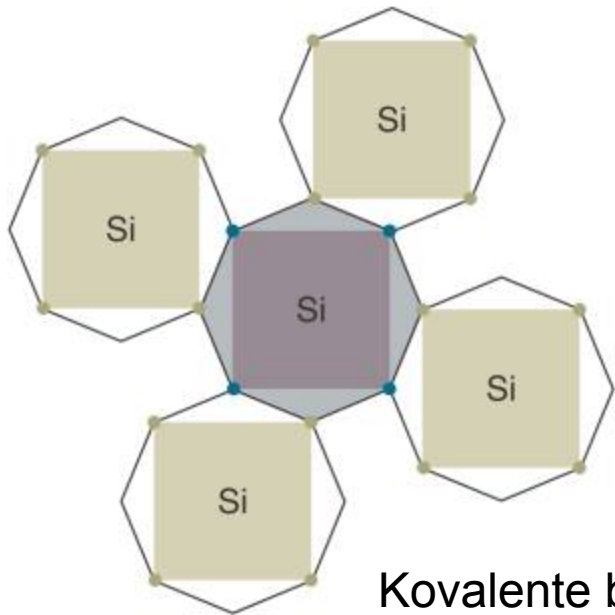


- Ladning og ledning – Charge and Conduction
  - Conduction Band – “Lednings - bånd” - Energitilstand over valens-båndet
  - Et elektron som absorberer energi og “hopper” fra valensbåndet til ledningsbåndet sier vi er i eksitert tilstand (*excited state*)

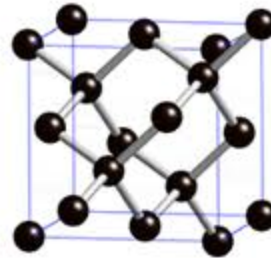


# 17.1 Semiconductors

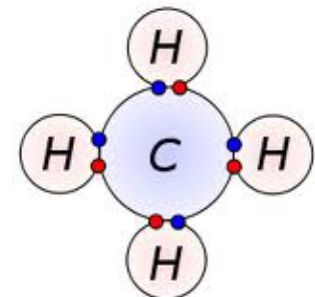
- **Covalent Bonding** – struktur som enkelte atomer bruker for å komplettere “valensbåndet” til 8 elektroner. Det utveksles elektroner med naboatomene -
- Silisium med 4 valenselektroner danner en “diamantstruktur”. Det utveksles elektroner med naboatomene slik at det dannes en konfigurasjon med 8 elektroner rundt hvert atom.



Kovalente bindinger hos C og Si danner sterke krystallstrukturer



Kjemiske forbindelser søker også en konfigurasjon med 8 elektroner

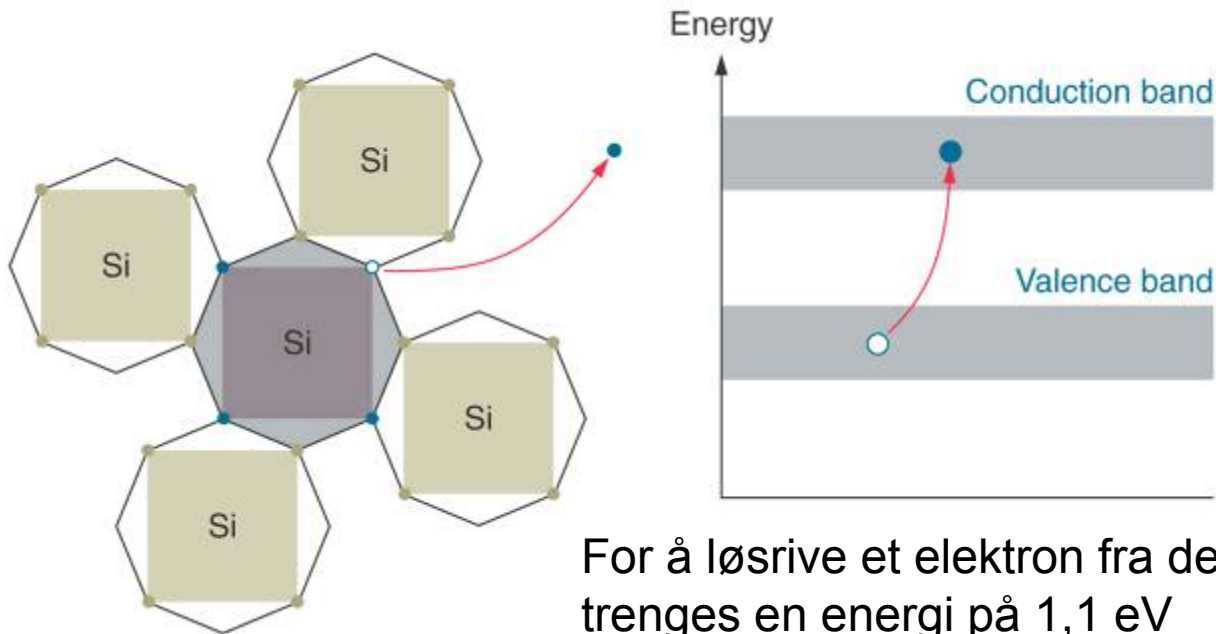


Metan  $\text{CH}_4$

# 17.1 Semiconductors

## ■ Conduction – Ledning i rene halvledere

- **Electron-Hole Pair** - Når det tilføres energi i form av varme/stråling løftes et elektron fra valensbåndet opp i ledningsbåndet.
- **Recombination** – Når et fritt elektron i ledningsbåndet “faller ned” i et ledig “hull” i valensbåndet. Energien frigjøres enten som varme eller elektromagnetisk stråling



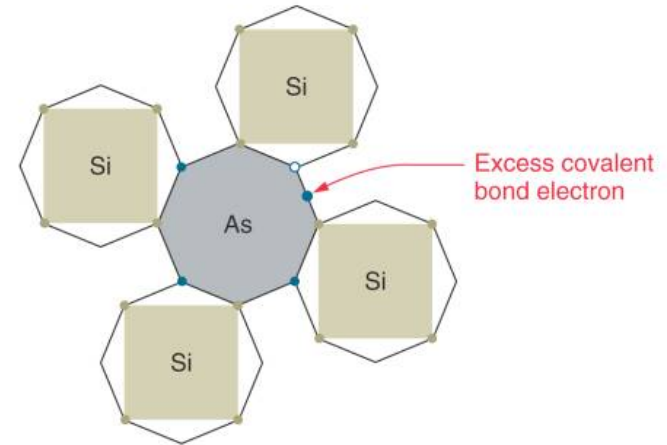
## 17.2 Doping

- Doping – En prosess hvor vi “forurenseser” rent (intrinsic) silisium ved å tilsette *trivalente* og *pentavalente* grunnstoffer. Dette gjør vi for å øke ledningsevnen (conductivity) til silisiumkrystallen. Ca 1 “forurensningsatom” pr.  $10^6$  silisiumatomer
  - Trivalent Grunnstoff med 3 elektroner i valensbåndet (ytre skall)
  - Pentavalent Grunnstoff med 5 elektroner i valensbåndet

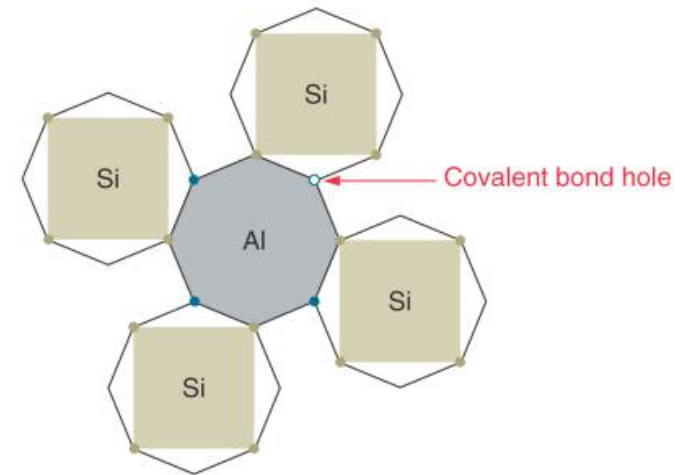
| <i>Trivalent Impurity</i> | <i>Pentavalent Impurity</i> |
|---------------------------|-----------------------------|
| Aluminum (Al)             | Phosphorus (P)              |
| Gallium (Ga)              | Arsenic (As)                |
| Boron (B)                 | Antimony (Sb)               |
| Indium (In)               | Bismuth (Bi)                |

## 17.2 Doping

- **N-Type Materials** – vi “forurenses” med et stoff som har 5 valenselektroner. Vi får et ekstra elektron som ikke blir med i den kovalente bindingen.
  - Electrons – majority carriers
  - Holes – minority carriers
  
- **P-Type Materials** Vi tilfører et stoff med 3 valenselektroner. Det betyr at strukturen ikke fylles – det mangler et elektron i den kovalente bindingen.
  - Holes – majority carriers
  - Electrons – minority carriers



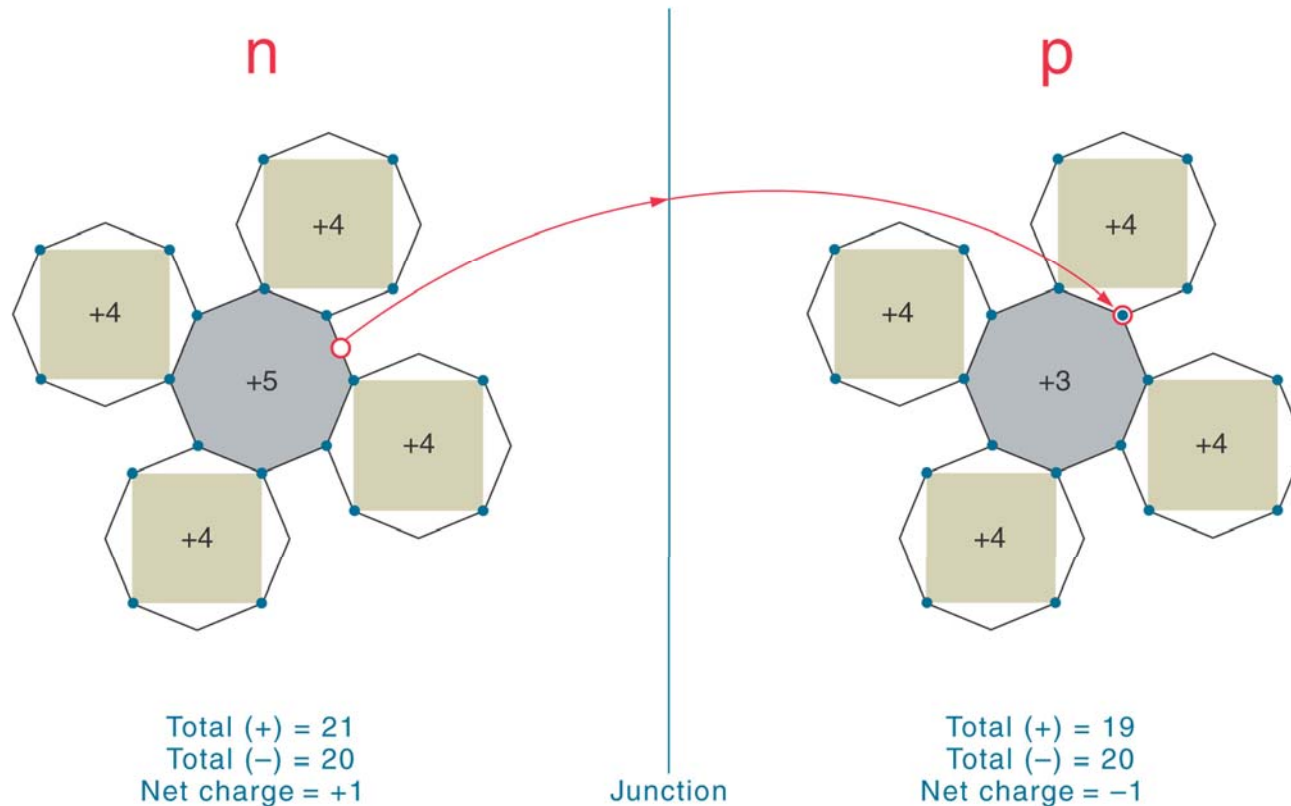
Det skal lite energi til før dette elektronet frigjøres - ca 0,05eV



## 17.2 Doping

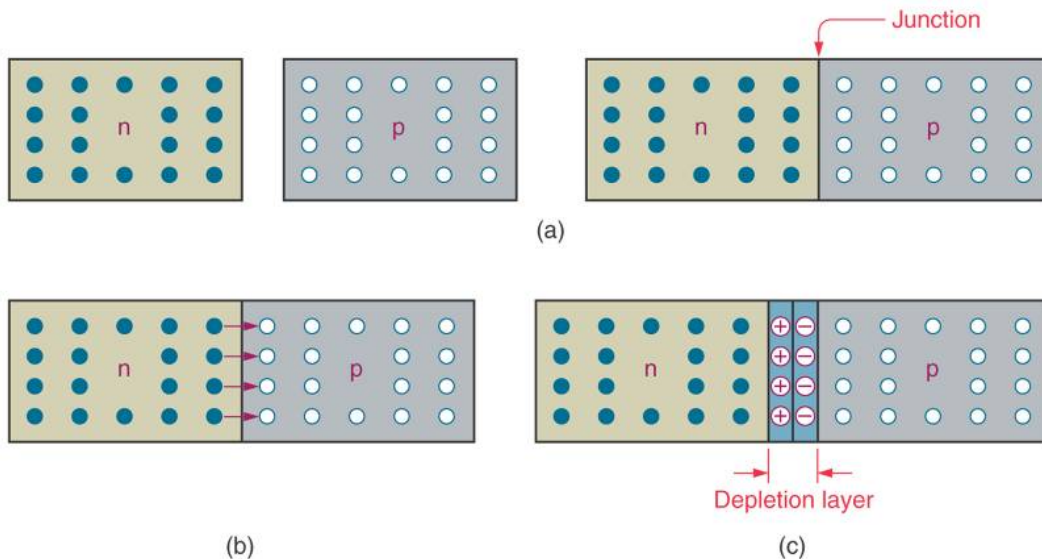
Setter vi et n-dopet silisium sammen med p-dopet silisium får vi en diffusjon av elektroner fra n-siden over til p-siden.

( Diffusjon = En drift av elektroner fra et område med høy elektrontetthet til et område med lav elektrontetthet )



## 17.3 The PN Junction – P1

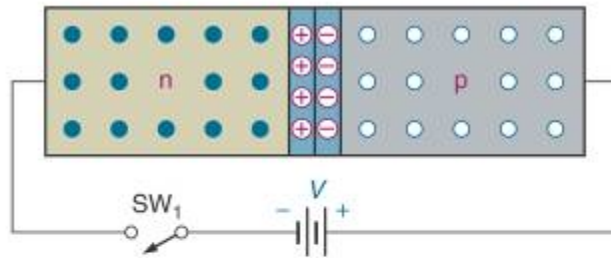
- *PN* Junction – vi setter sammen *n*-type og *p*-type materialer
  - Frie elektroner i *n*-området vil pga. diffusjon vandre over til *p* – hvor de rekombinerer med "hull". Elektronene etterlater seg et positivt ladet område i *n*, - og der de rekombinerer med hull for vi et negativt ladet område på *p*-siden.
  - Det dannes et sperresjikt (depletion layer = område uten frie ladningsbærere) mellom de to materialene som straks stopper videre ladningstransport fra *n* – over til *p*.



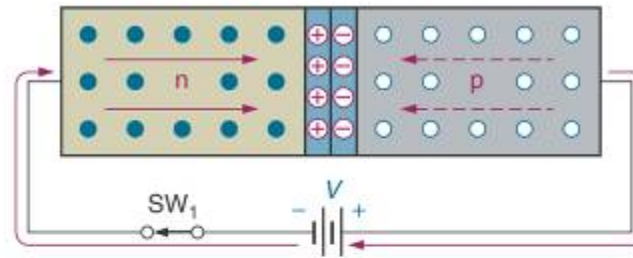


## 17.4 Bias – P1

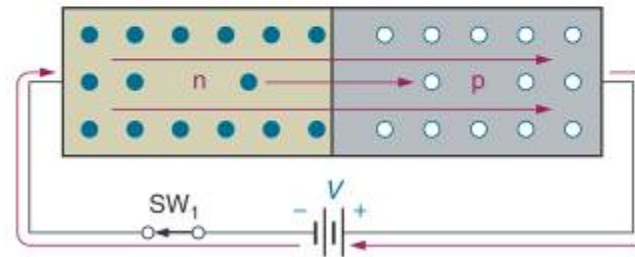
- Bias eller forspenning – et potensial som tilføres  $pn$  junction fra en utvendig spenningskilde (f.eks. batteri). Denne bias-spenning bestemmer bredden på depletion layer
- Forward Bias – Tilført spenning motvirker det interne sperrefeltet. Dette åpner for elektrontransport fra  $n$  til  $p$



(a) An unbiased  $pn$  junction



(b) Majority carrier motion at the moment  $SW_1$  is closed.

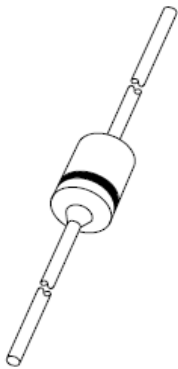


(c) Conduction increases as the depletion layer breaks down.

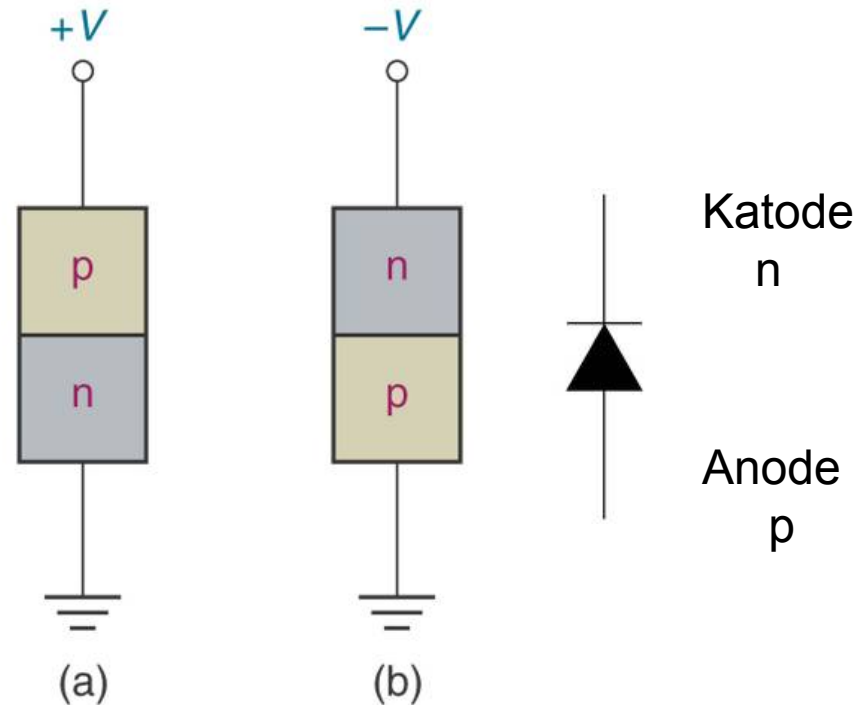
## 17.4 Bias – P2

### ■ Forward Bias (Continued)

- Bulk Resistance ( $R_B$ )
- $V_F \cong 0.7$  V for silicon
- $V_F \cong 0.3$  V for germanium

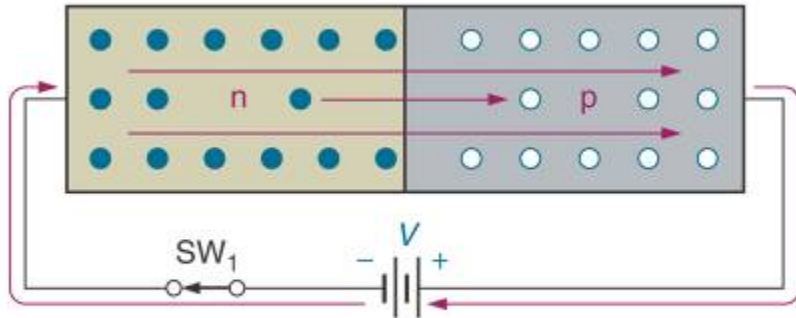


På vanlige dioder vil katoden ofte være merket med en ring eller prikk

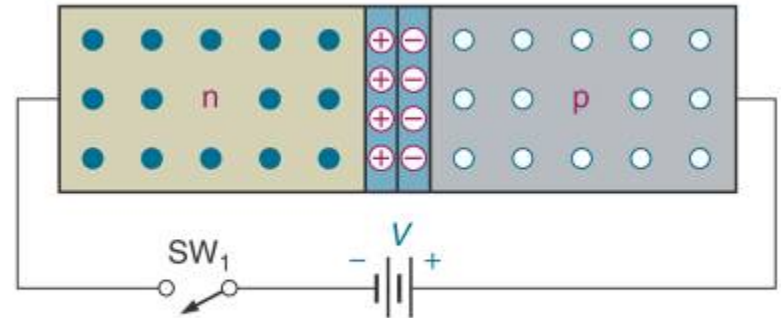


## 17.4 Bias – P3

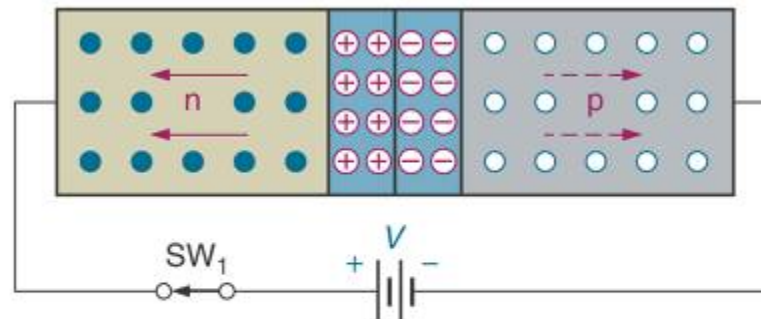
- **Reverse Bias** Tilført spenning virker sammen med det interne sperrefeltet. Dette sperrer for elektrontransport fra  $n$  til  $p$



(a) A conducting  $pn$  junction



(b) A depletion layer forms when the current path is broken.



(c) When the polarity of  $V$  is reversed, the depletion layer widens.

# 17.5 PN Junction Diodes – P1

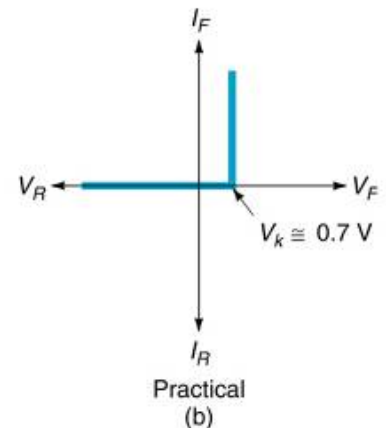
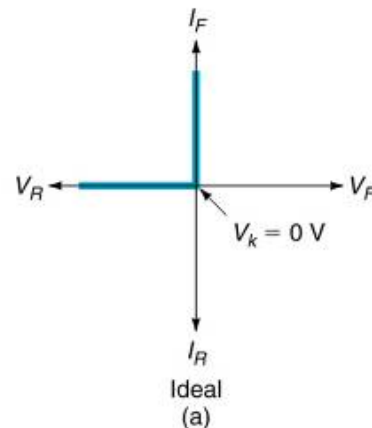
- Diode – en komponent som leder strøm i en retning
- Elektroner vandrer fra Katode til Anode når dioden er forspent i lederetning.



Ideal Diode Characteristics – would act as a simple switch

**Reverse Biased (Open Switch)** – has infinite resistance, zero reverse current, and drops the applied voltage across its terminals

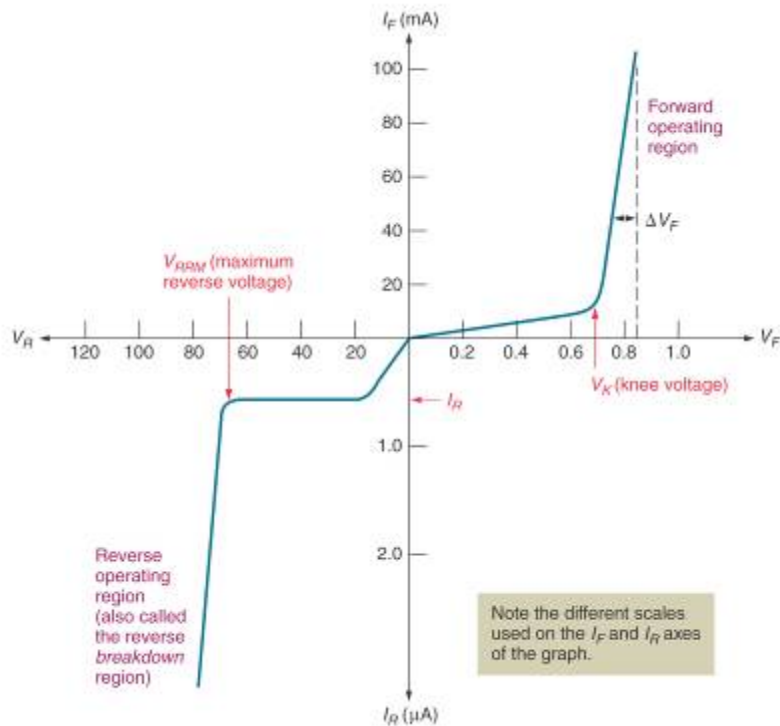
**Forward Biased (Closed Switch)** – has no resistance, and therefore, no voltage across its terminals



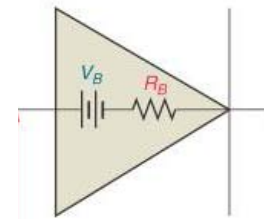
# 17.7 Other Diode Characteristics – P1

## ■ Bulk Resistance ( $R_B$ )

- Den “naturlige” motstanden i diodematerialet for  $p$ -type og  $n$ -type
- Denne motstanden får betydning når dioden leder strøm



$$V_F = 0,7v + I_F \cdot R_B$$



$$I_D = I_R (e^{V_D/nV_T} - 1)$$

$I_D$  = diodestrømmen

$I_R$  = Reverse Current ( lekkasjestrøm )

$V_D$  = diodespenningen

$V_T$  = termisk spenning = 25mV

$n$  = 1 ev. 2

## 17.7 Other Diode Characteristics – P3

- Reverse Current ( $I_R$ ) ( lekkasjestrøm – noen bruker betegnelsen  $I_S$  )
  - En liten strøm av minoritetsbærere (elektroner i p-området) vil lekke over sperresjiktet (depletion layer) når dioden er forspent i sperreretning
  - $I_R$  består av to uavhengige strømmer
    - Reverse Saturation Current ( $I_R$ ) for Si =  $10^{-15}$  A for Ge =  $10^{-7}$  A
    - Surface - Leakage Current ( $I_{SL}$ ) varierer med overflatens størrelse

Det korrekte uttrykk for strømmen i dioden er gitt av likningen

$$I_D = I_R \left( e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

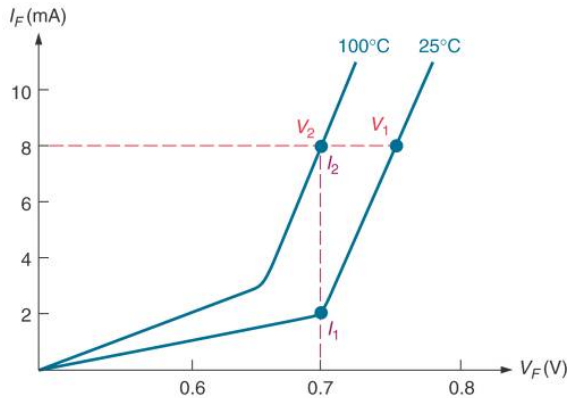
$V_D$  = spenningen over dioden

$V_T$  = den termiske spenningen = 25mV  
ved 300° Kelvin (se komp. fys.elektr)

$$V_T = \frac{\bar{k} \cdot T}{q} = \frac{T}{11600} = 0,0259 \text{ volt}$$

# 17.7 Other Diode Characteristics – P5

## ■ Temperature Effects on Diode Operation

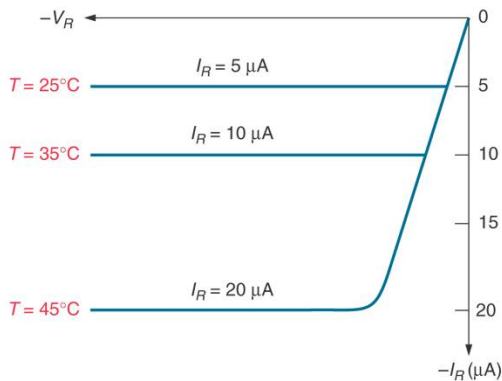


NB! Husk disse kurvene er eksponentialfunksjoner. Bokas fremstilling er ikke helt korrekt..

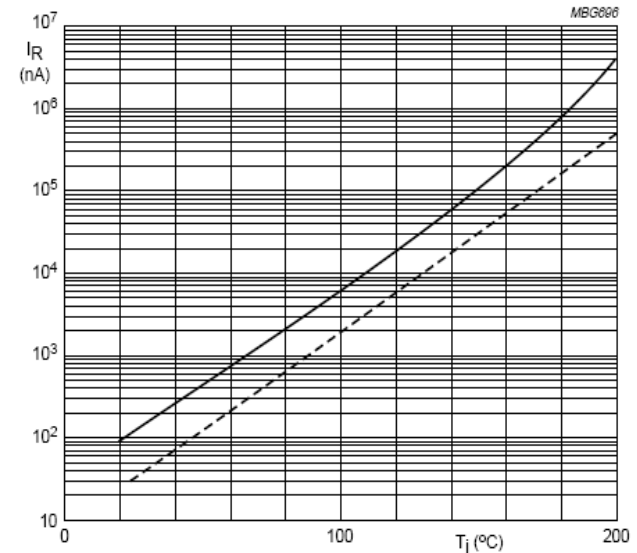
$$I_F \approx I_R \cdot e^{V_D/V_T} \quad \text{Hvor}$$

$$V_T = \frac{\bar{k} \cdot T}{q} = \frac{T}{11600} = 0,0259 \text{ volt}$$

Ved 300° Kelvin



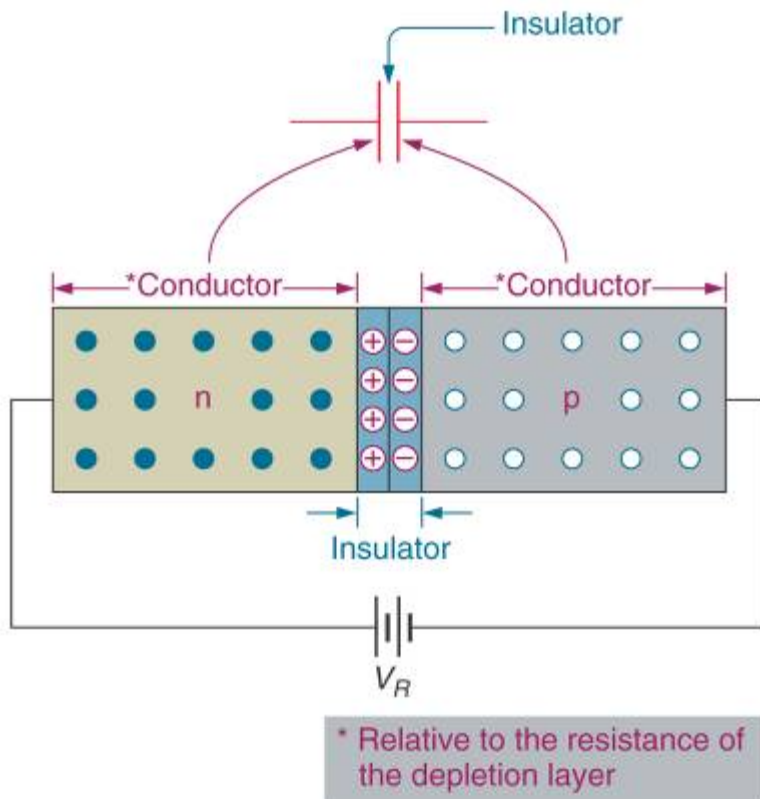
”Revers-strømmen”  $I_R$  vil også øke med temperaturen. Legg merke til at  $I_R$  holder seg konstant selv om ”revers-spenningen” ( $-V_R$ ) øker ... Strømmen bestemmes kun av antall termisk eksiterte elektroner.



Reverse Current  $I_R$  som funksjon av temperatur ( dioden BAX 12 )  
 Stiplet linje = typisk verdi  
 - hel linje = max verdi iht. datablad

## 17.7 Other Diode Characteristics – P4

### ■ Diode Capacitance



Depletion layer virker som en isolator mellom anode og katode. Vi ser at dioden kan betraktes som en kondensator når den er forspent i sperre- retning.

Hvis spenningen i sperre- retning økes - vil tykkelsen på depletion layer øke.

Det betyr at dioden i sperre- retning kan brukes som en variabel kondensator.

Det lages spesielle dioder til slikt bruk – ”varicap-dioder”

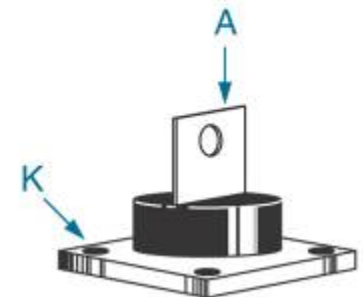
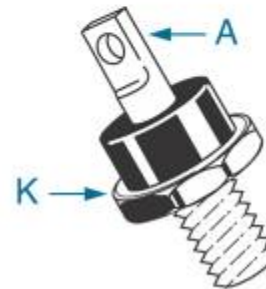
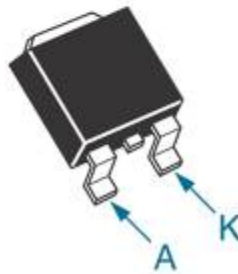
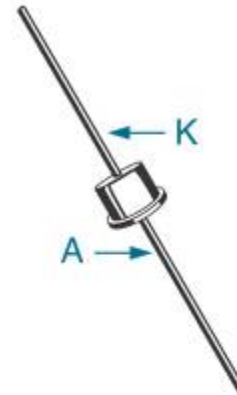
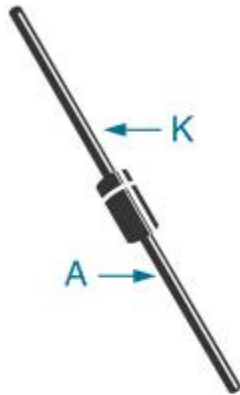
Brukes ofte i radiomottakere til frekvens- innstilling (stasjonsvalg)

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_S}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \cdot V_0$$

Typiske verdier for  $W_{dep} = 0,1 - 1 \mu\text{m}$

# 17.8 Diode Specifications – P3

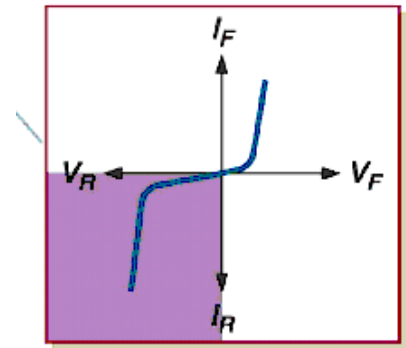
- Diode Identification



## 17.9 Zener Diodes – P1

- Zener Diode – a type of diode that is designed to work in the reverse breakdown region of its operating curve
  - Reverse Breakdown Voltage ( $V_{BR}$ )
  - Application: Voltage Regulator
  - Zener Voltage ( $V_Z$ )

Zener operating curve

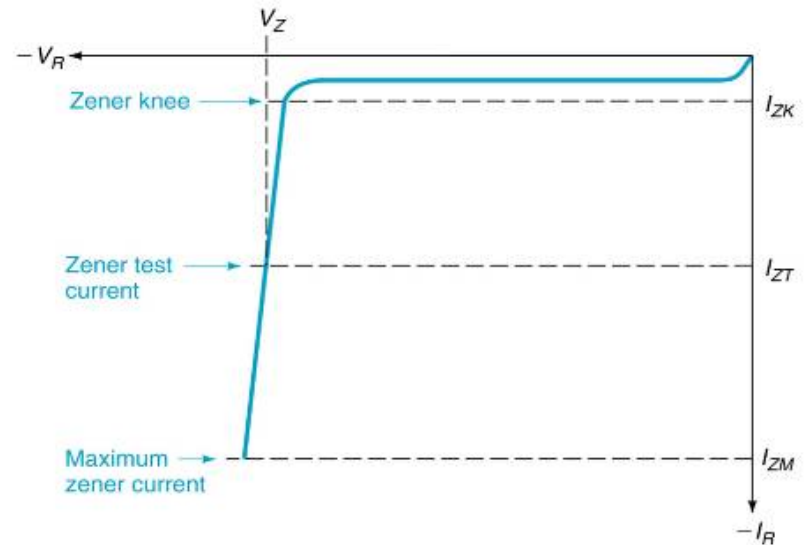


To effekter gir grunnlag for zener-diodens karakteristikk

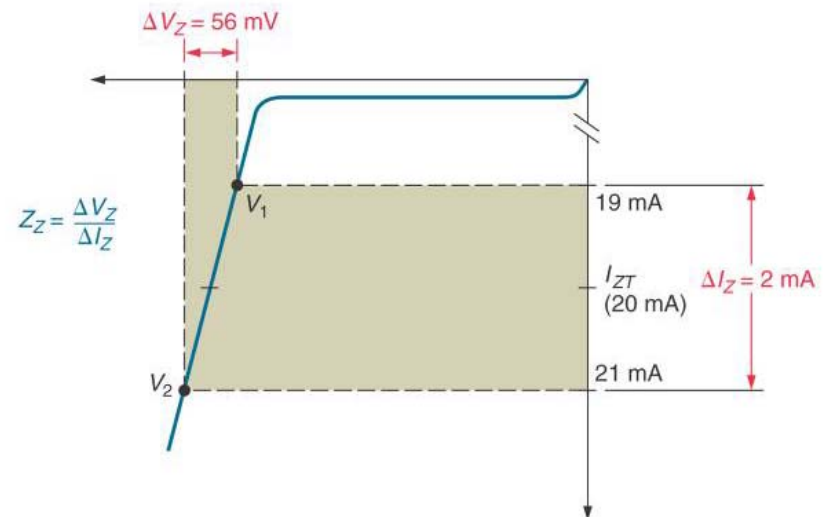
1. Avalanche (skred) Frie ladninger akselereres – disse kolliderer med Si-strukturen og frigjør nye ladninger
2. Zener-effekt (kvantemekanisk tunneling) E-feltet er så sterkt at elektroner rives løs fra de kovalente bindingene
3. Avhengig av doping-graden vil en eller begge disse effektene bestemme zenerdiodens "breakdown voltage"

# 17.9 Zener Diodes – P3

- Zener Operating Characteristics
  - Zener Knee Current ( $I_{ZK}$ )
  - Maximum Zener Current ( $I_{ZM}$ )
  - Zener Test Current ( $I_{ZT}$ )
  - Zenerspenningen vil være temperaturavhengig – dioder med en spenning på ca. 5,6 volt vil være temperaturstabile. Vi kaller ofte slike dioder – referansedioder

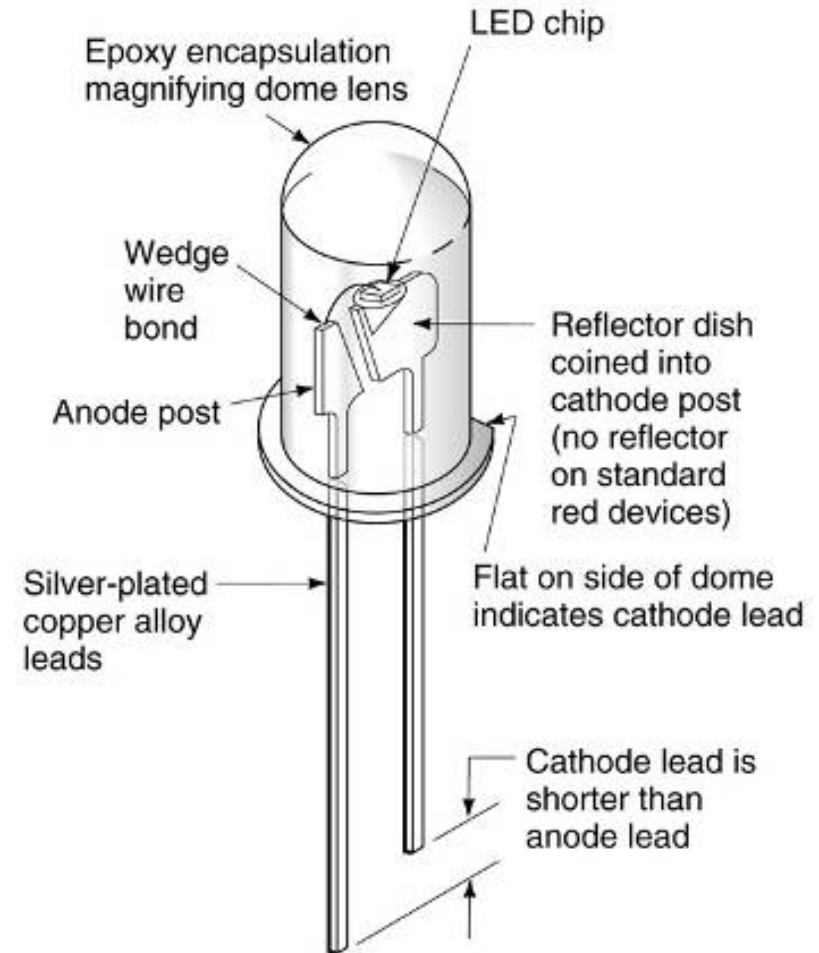
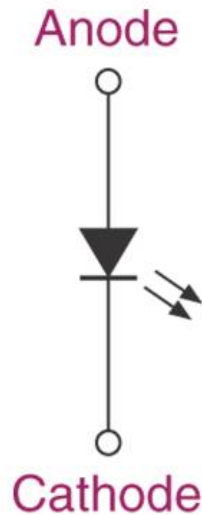


Zener Impedance ( $Z_Z$ ) – the zener diode's opposition to a change in current



# 17.11 Light-Emitting Diodes – P1

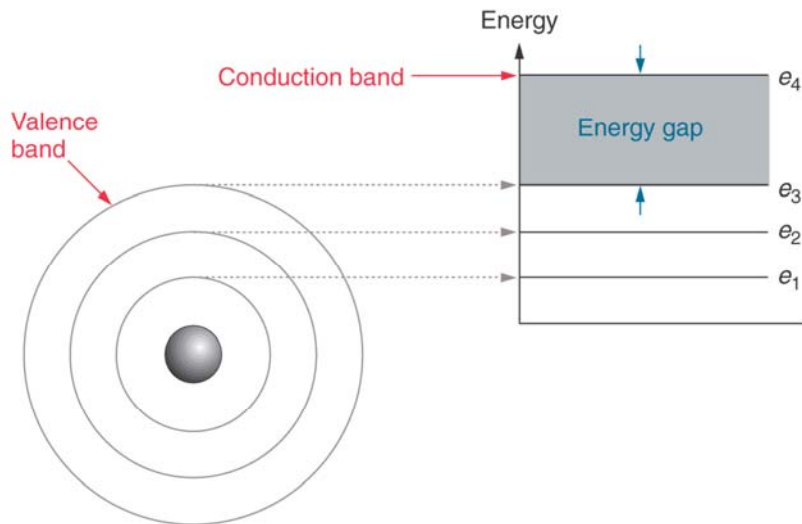
- Light-emitting diodes (LEDs) – lysdioder er dioder som kan sende ut lys når de får riktig bias



# 17.11 Light-Emitting Diodes – P2

## ■ LED Characteristics

- Forward Voltage: +1.2 to +4.3 V (typical)
- Reverse Breakdown Voltage: -3 to -10 V (typical)



Et fritt elektron som rekombinerer med et "hull" vil avgis energi  $E$ . Avhengig av materialene som benyttes vil denne energien bli avgitt som varme – eller som elektromagnetisk stråling med en frekvens ( $f$ ) vi oppfatter som lys.

$$E = h \cdot f \quad h = \text{Planck's konstant}$$

Gallium Arsenid

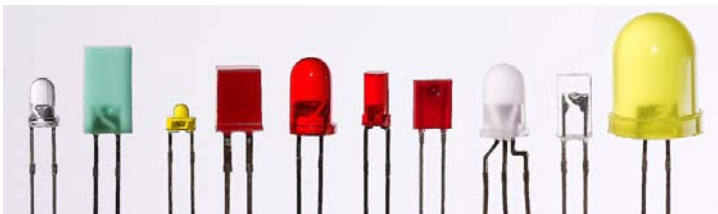
GaAs – infrarødt lys  $\lambda \approx 900\text{nm}$

Gallium Arsenid-fosfid ,

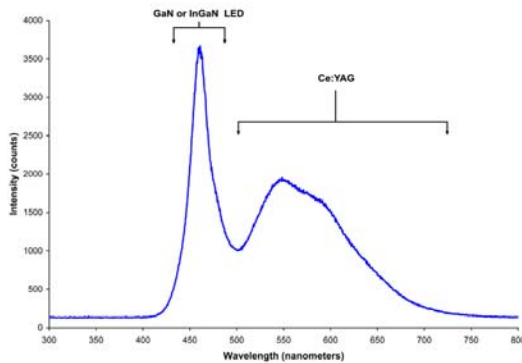
**GaAsP RØDT LYS** - ca. 2,0 volt

**GaP – GRØNT LYS** - ca.

**GaN – BLÅTT LYS**

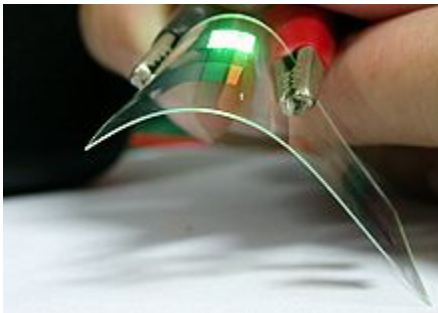


# Hvite lysdioder *mm.*



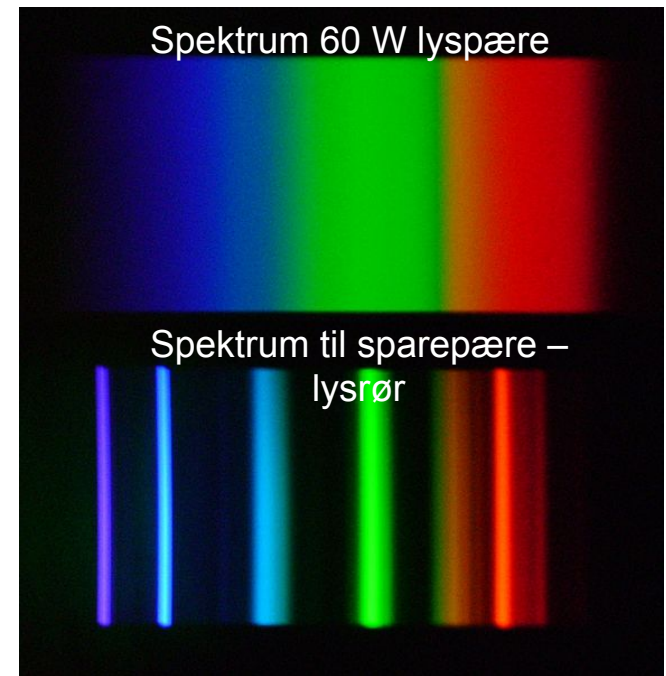
Fosfor-basert LED

-UVLED dekkes med 'gult' fosfor  
-- Stokes shift



OLED

Organic light-emitting diode



LYSRØR (lysstoffrør) – fylt av kvikksølv damp !

– avgir kraftig ultrafiolett lys med bølgelengde 253,7nm (ikke synlig lys)

Røret er fylt med et pulver som med høy virkningsgrad omformer UV-lyset fra kvikksølv dampen til bredspektret lysstråling (fluorescens). Dessuten reduserer det flimringen i UV-lyset. UV-lyset slukker periodisk hver gang strømmen passerer null, ved at pulveret gir tilstrekkelig "etterlysning". (fosforescens).

Ulike blandingsforhold av "lysstoffpulverets" komponenter gir forskjellige fargetoner

# Spesielle dioder

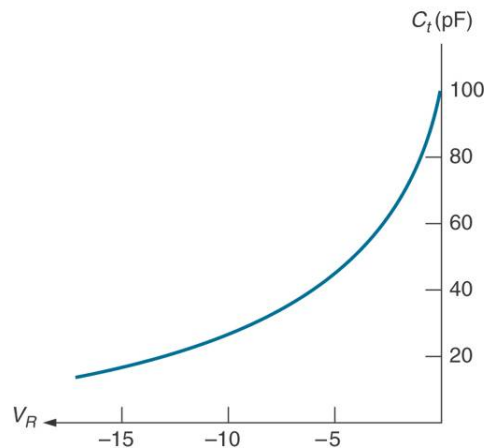
## Varicap-diode – Varactor diode - Variable capacitance diode

Dioden brukes som variabel kondensator i for eksempel resonanskrets (LC-krets)

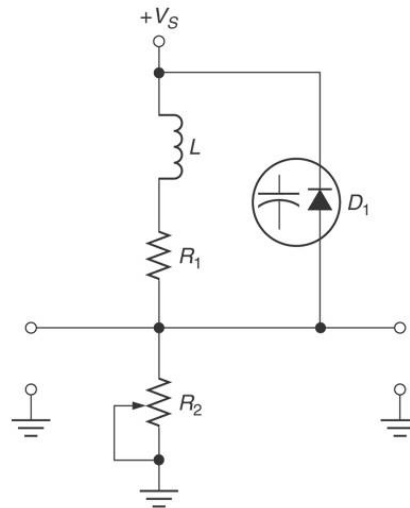
Kretsens resonansfrekvens bestemmes av spenningen over dioden.

Sperresjiktets tykkelse varierer med spenningen som legges over dioden.

Brukes i radioapparater for å stille inn frekvens til ønsket radiokanal. ( NRK P1 Tryvann 88,7 MHz, NRK P1 Halden 94,8 MHz )



Spenning i sperreretning



Resonanskrets

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz}$$

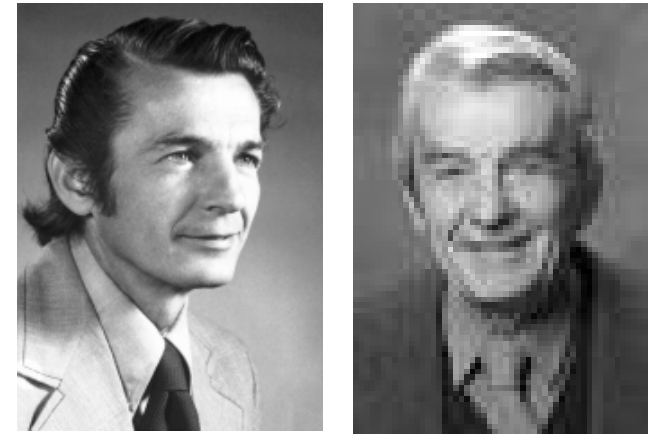
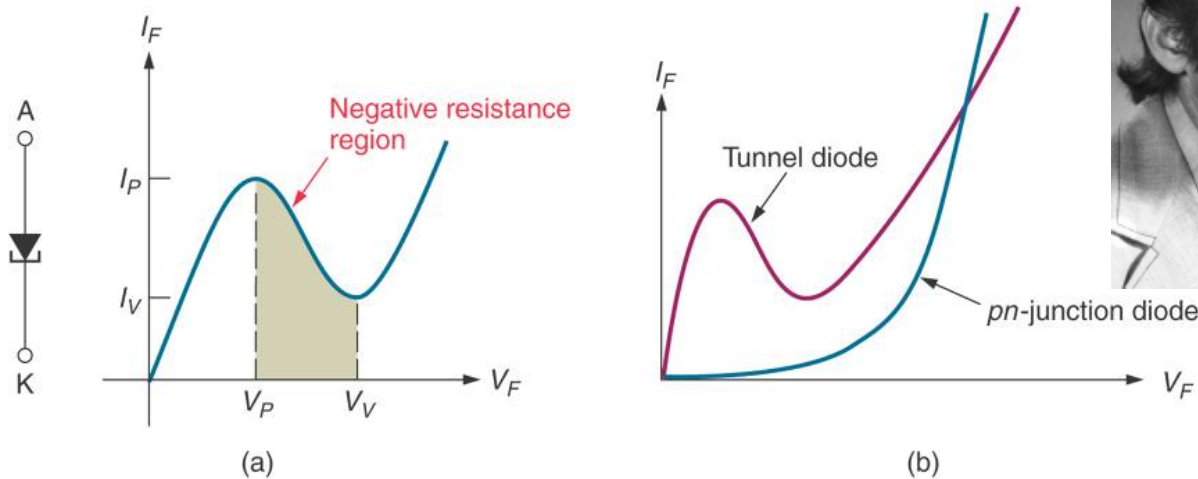
$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \cdot V_0$$

Typiske verdier for  $W_{dep} = 0,1 - 1\mu\text{m}$

# Spesielle dioder

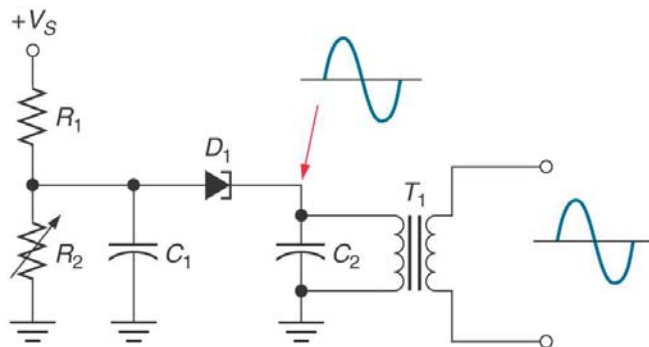
## Tunnel diode (Esaki-diode)

Ivar Giæver - nobelprisvinner i fysikk 1973 – prof. UiO 1989



Leo Esaki, Ivar Gjæver og B.D.Josphson for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors,

Ved sterk doping kan spenningen over sperresjiktet bli så høy at de kovalente bindingene brytes. Det oppstår frie elektroner – først når vi påtrykker en tilstrekkelig ytre spenning i lederetning vil kovalente bindinger etableres – strømmen avtar (negativ motstand). Deretter følger strømmen en eksponentialfunksjon – litt forskjellig fra en vanlig pn-junction diode. Slike dioder brukes i hovedsak til UHF og mikrobølge applikasjoner



## Tunell diode oscillator

Det er innenfor et lite spenningsområde neg. motstand opptrer ( 0,2 -0,5 volt ). Signalspenningen begrenses derfor til ca. 300mV. Vi bruker ofte en transformator slik at signalspenningen tilpasses etterfølgende kretser.

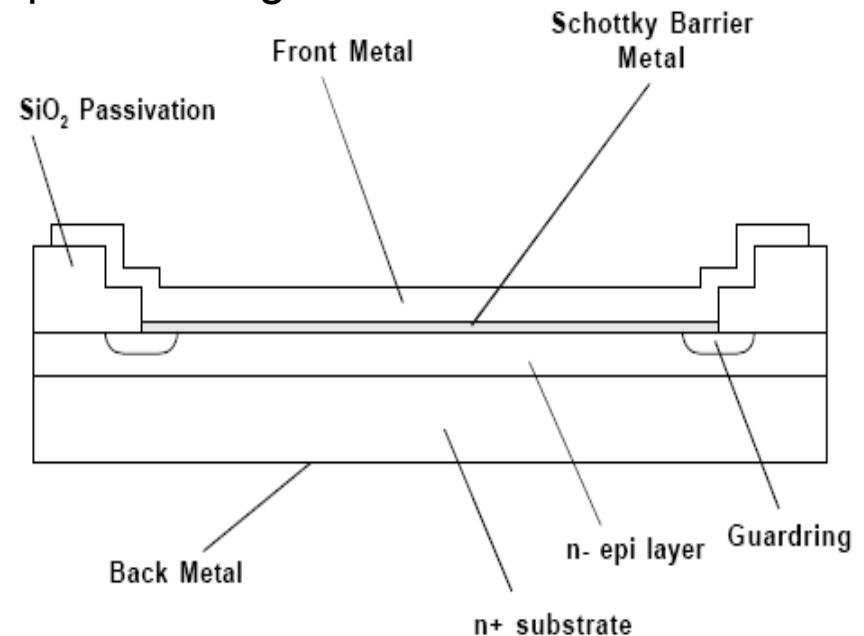
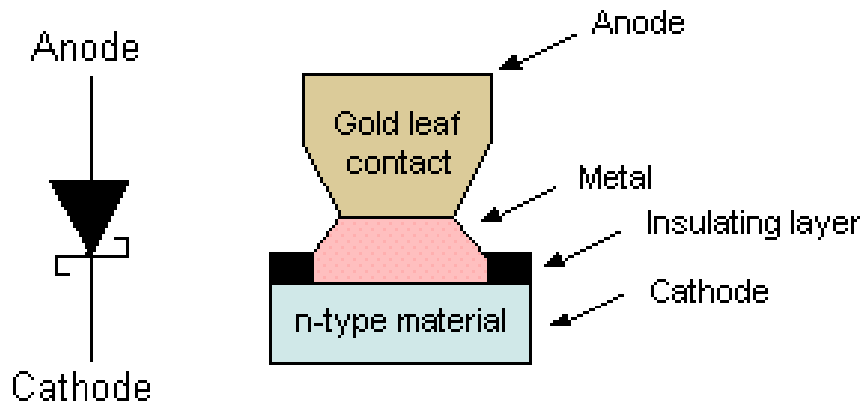
# Spesielle dioder

## Schottky diode

Diode med ekstremt liten kapasitans over "junction". Det betyr at dioden kan arbeide med meget høye frekvenser. Vi har erstattet  $p$ -halvlederen med et metall. Dvs. vi har ingen normal  $pn$ -junction – derfor liten "junction" kapasitans. Bare majoritetsbærere (elektroner) deltar i ladningstransporten.

Schottky dioder har lavt spenningsfall i lederetning – ca 0,15 – 0,45 volt hvor Si  $pn$ -junction har ca 0,7 - 1 volt

Ulempe – relativt høy lekkasjestrøm i sperreretning

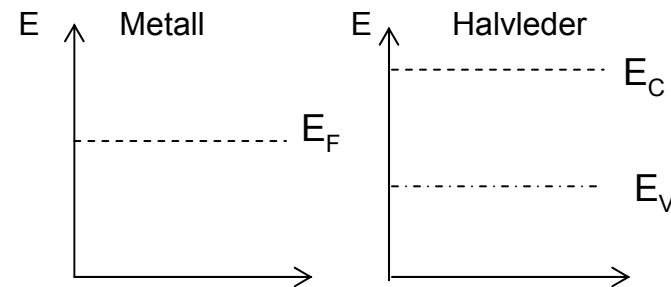
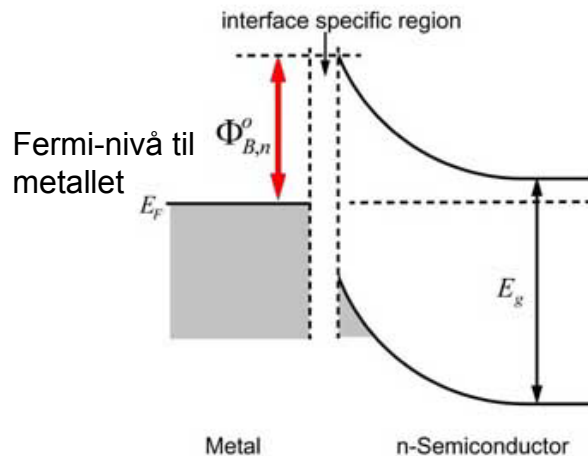


# Spesielle dioder

## Schottky diode

Når man setter en halvleder sammen med et metall kan det oppstå en "Schottky Barriere". Høyden på denne barrieren bestemmes av energinivået i ledningsbåndet i halvlederen  $E_C$  og Fermi-nivået til metallet,  $E_F$ . Hvor stort barrierespennet faktisk blir - har vært diskutert i lang tid..

Kjennskapet til **Fermi-Dirac-statistikk** har vært av grunnleggende betydning for forståelsen av metallers elektriske og termiske ledningsevne, - for elektronemisjon, - for studier av atom- og molekylstrukturer m.m. Spesielt interesserte henvises til kurs i halvledermaterialer og kvantemekanikk



Båndgapet til halvlederen  $E_G$   
Energien til elektroner i ledningsbåndet  $E_C$   
- minus energien til valenselektronene  $E_V$

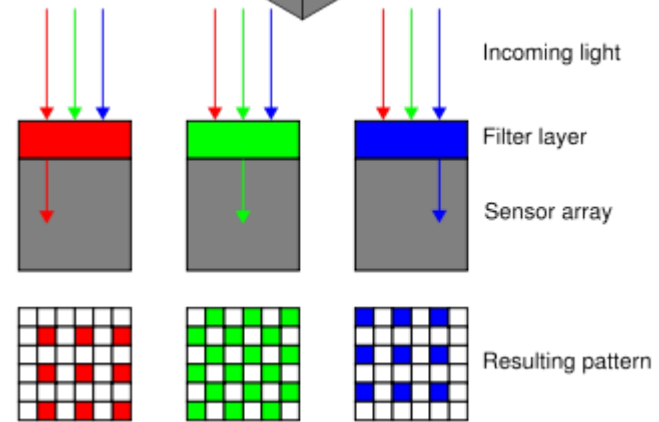
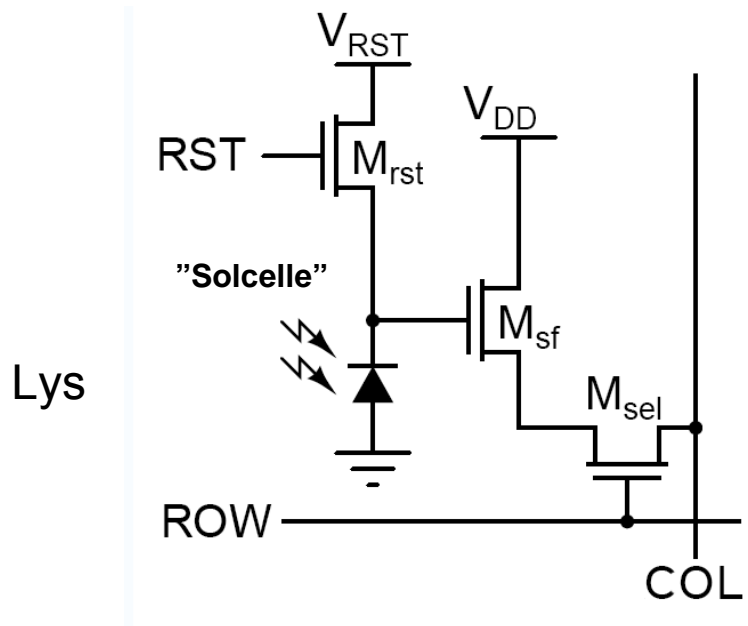
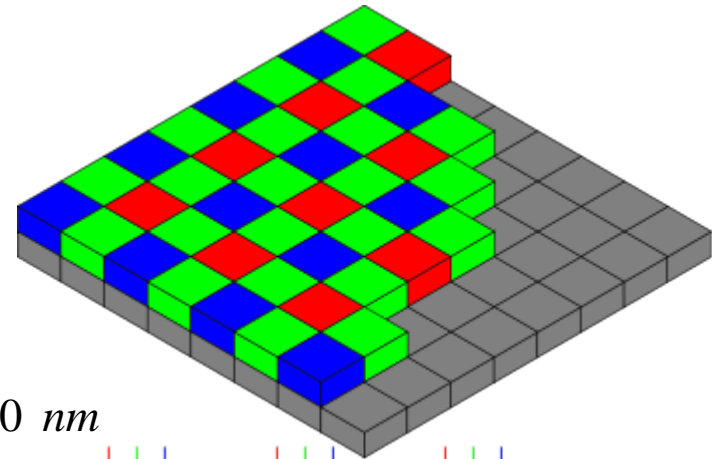
# Digitalt kamera

Planck  $w = h \cdot f$

$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

$w_g(\text{Si}) = 1,1 \text{ eV} \quad h \cdot f > w_g \quad f = c/\lambda$

$\lambda < \frac{h \cdot c}{w_g} \quad \lambda < 1100 \text{ nm} \quad \text{lys} \cong 380 - 740 \text{ nm}$



**Bayer filter**

End