

Onsdag 7.1.04

- Halleffekt : s 20-21 i Bok I, Vår 2003, MNFFY103
- Lynkurs i energibånd og halvledere (orienteringsstoff) :

Klassisk mekanikk : $T + U = E$

$$T = \text{kinetisk energi} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m} \quad \text{impuls: } (\vec{p} = m\vec{v})$$

$$U = \text{pot.} \quad \text{" - "}$$

$$E = \text{total} \quad \text{" - "}$$

Kvantemekanikk :

$$\vec{p} \text{ erstattes av "operator" : } \vec{p} \rightarrow -i\hbar \nabla$$

$$i = \sqrt{-1}$$

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$$

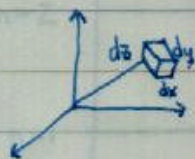
$$\hbar = h/2\pi = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad (\text{Plancks konstant})$$

$$T = \frac{p^2}{2m} \rightarrow \frac{(-i\hbar \nabla)^2}{2m} = \frac{i^2 \hbar^2 \nabla^2}{2m} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2$$

$$= -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

Partikler, f.eks. elektroner i atomer/molekyler/faste stoffer, beskrives med bølgefunksjon $\Psi(\vec{r})$, med fysisk betydning:

$|\Psi(x,y,z)|^2 dx dy dz = \text{sannsynligheten for at partikkelen befinner seg i volumenelementet } (x, x+dx; y, y+dy; z, z+dz)$



Klassisk energiligning, $T + U = E$, erstattes av Schrödingerligningen ("bølgligningen")

$$\boxed{-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U \Psi = E \Psi} \quad (\text{2. ordens differensial-} \\ \text{ligning})$$

som gir tillatte • tilstander Ψ med tilhørende energi E .

Hvor mange elektroner i hver tilstand ?

Klassisk : ingen begrensning

Kvantemekanisk : ikke mer enn ett elektron p- tilstand
(=Pauliprinsippet)

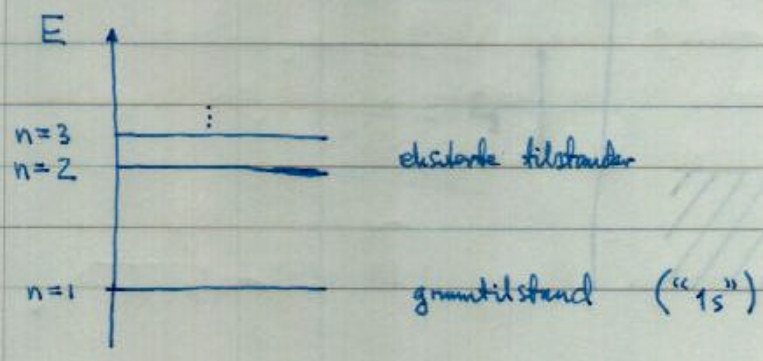
Atomer : Kjerne med ladning $+Ze$ (Z = atomnummer)
 Z elektroner med ladning $-e$

Eks: hydrogen (H) $Z=1$ $\oplus \xrightarrow{\vec{r}} \ominus$

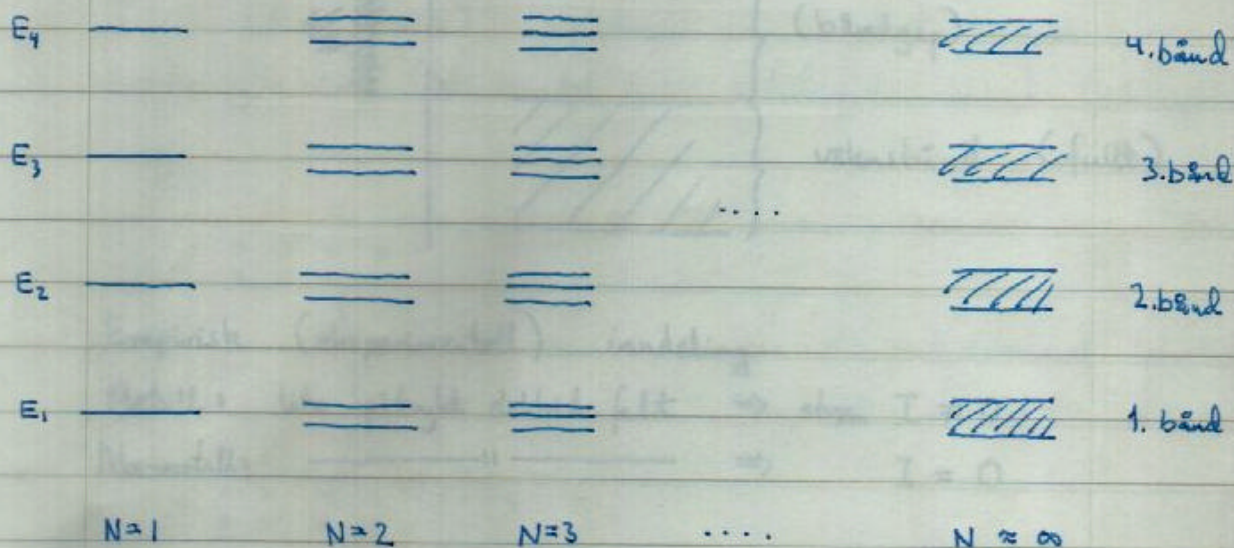
$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (r = \text{avstand fra kjerne til elektron})$$

$$\Rightarrow -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \Psi = E \Psi$$

Løsning gir $\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2 (4\pi\epsilon_0)^2}$
 $E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (n=1,2,..)$



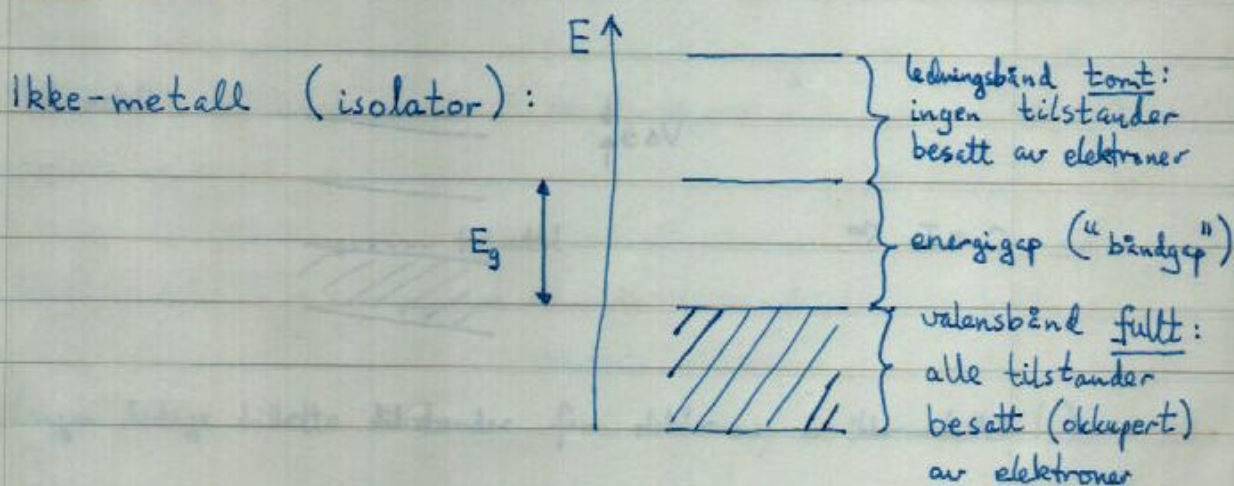
Fra atomer til krystall (= ordnet gitter av atomer):

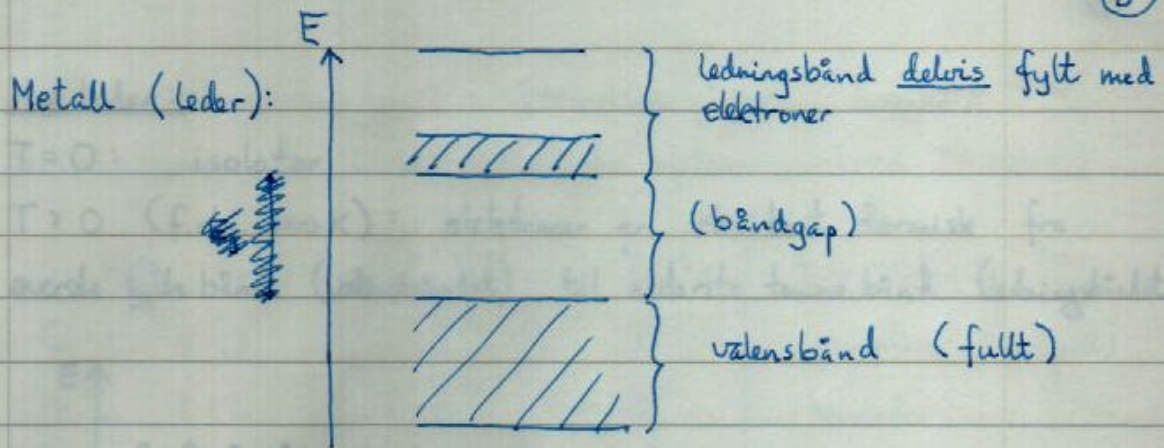


I krystallen fås energibånd, dvs ~~no~~ intervaller langs "energiesksen" med tilfette tilstander for elektronene,

Mellom tilfette energibånd: Forbudte energigap, ingen elektroner kan ha energi i disse områdene

Klassifiserer nå ulike krystallinske materialer med basis i denne båndstrukturen:



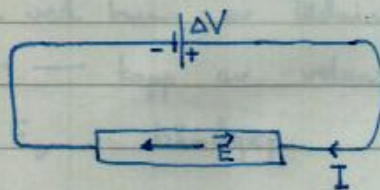


Empirisk (eksperimentell) inndeling:

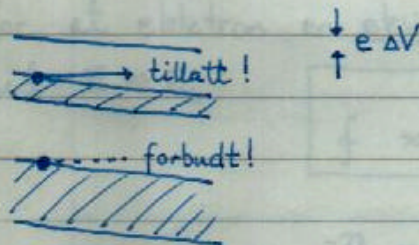
Metall: lite påtrykt elektrisk felt \Rightarrow strøm $I \neq 0$

Ikke-metall: " " $\Rightarrow I = 0$

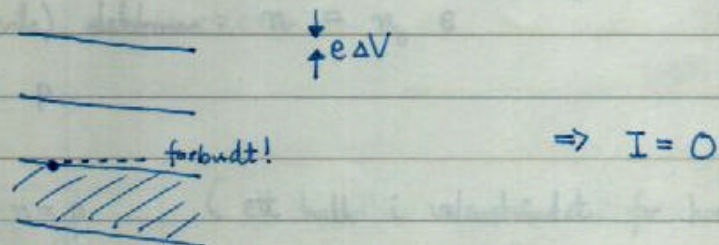
Forklaring via båndstruktur:



Metall:

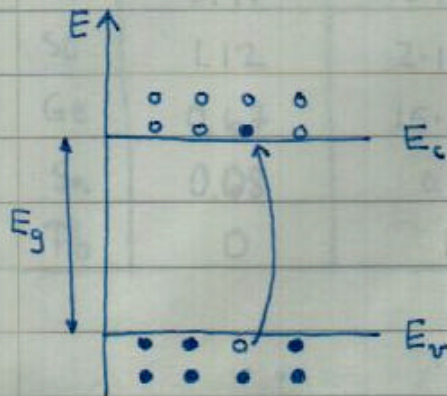


Ikke-metall:



(ingen ledige tillatte tilstander for elektroner i ikke-metallet!)

(6)

Halvleder: $T=0$: isolator $T > 0$ (f.eks. 300K): elektroner er eksitert termisk fra øverste fylte bånd (valensbåndet) til nederste tomme bånd (ledningsbåndet)

- okkupert tilstand (elektron)
- ledig —" — (hull)

 E_c : energi ved bunn av ledningsbånd E_v : —" — topp av valensbånd $E_g = E_c - E_v$: båndgap

Sannsynlighet for at elektron er eksitert fra tilstand med $E \approx E_v$ til tilstand med $E \approx E_c$:

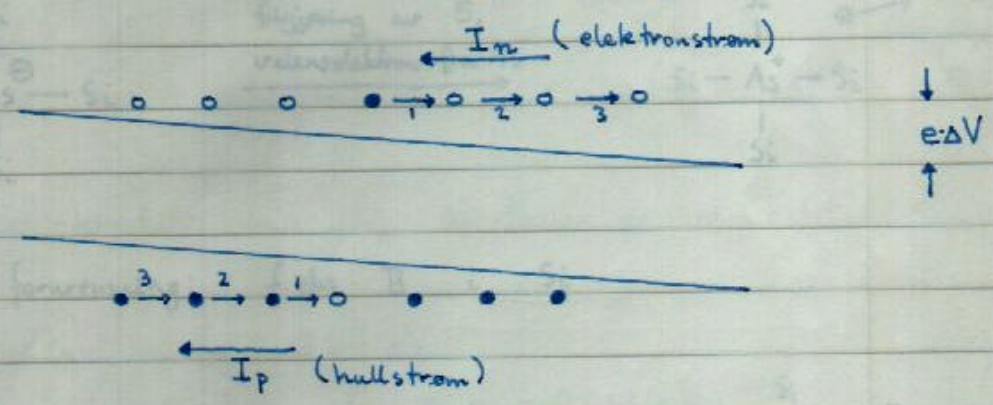
$$f \approx e^{-E_g/2k_B T}$$

 k_B = Boltzmanns konstant = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/KTetthet av (eksiterende) elektroner: $n = n_0 e^{-E_g/2k_B T}$ ($n_0 \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)Tetthet av hull: p Ren halvleder: $n = p$ (ett hull i valensbåndet for hvert eksiterte elektron)

Isolator eller halvleder? Størrelsen på E_g avgjør!
Ser på gruppe IV i det periodiske system: (ved $T=300\text{ K}$)

	E_g (eV)	$e^{-E_g/2k_B T}$	n (cm^{-3})	type materiale
C	5.47	$3 \cdot 10^{-48}$	0	isolator (diamant)
Si	1.12	$2 \cdot 10^{-10}$	$\sim 10^{10}$	halvleder
Ge	0.67	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$\sim 10^{14}$	— " —
Sn	0.08	0.2	$\sim 10^{19}$	— " —
Pb	0	1	$\sim 10^{20}$	metall

Halvleder i elektrisk felt (påtrykt spenning ΔV):



Total strøm: $I = I_n + I_p$

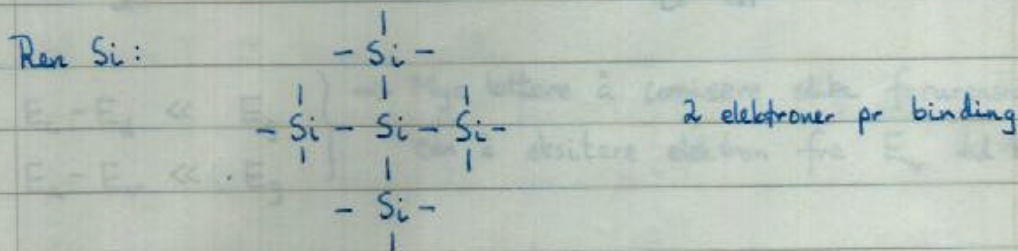
Fravær av elektroner i tilstander i valensbåndet muliggjør forflytning av de andre elektronene.



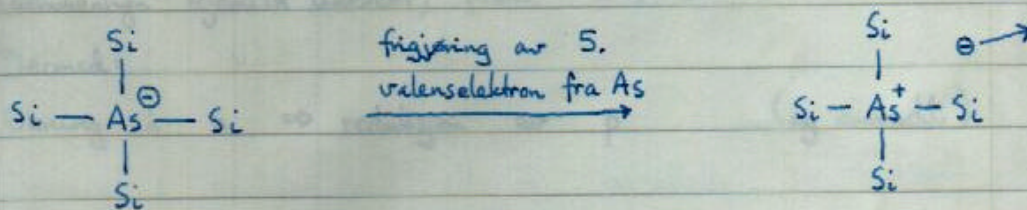
luftbobler oppover tilsvarende vann nedover

Dopede halvledere

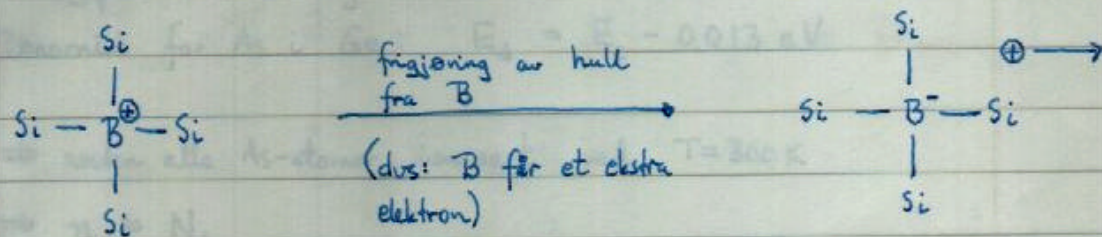
Si, Ge :	4	valenselektroner	(gruppe IV)
Al, B :	3	"	("-"- III)
P, As :	5	"	("-"- V)



Donor-forurensning : f.eks. As i Si

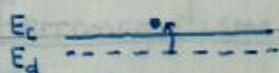


Akseptor-forurensning: f.eks B i Si



E_d = energi til 5. valenselektron på donoratomet ("donornivå")

E_a = energi til ledig tilstand på akseptoratomet ("akseptornivå")



"n-type" halvleder



"p-type" halvleder

$$\left. \begin{array}{l} E_c - E_d \ll E_g \\ E_a - E_v \ll E_g \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Mye lettere \AA} \text{ konsidere slike forurensingsatomer} \\ \text{enn \AA} \text{ eksitere elektron fra } E_v \text{ til } E_c$$

Halvlederligningen ("Massevirkningsloven"):

$$n \cdot p = \text{konstant (for gitt } T)$$

(sammenlign kjemisk likevekt, f.eks. $[H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$ ved $25^\circ C$ i rent vann)

Dermed:

Økning i $n \Rightarrow$ reduksjon av p (og omvendt)

Eks: Ge-krySTALL med N_d As-atomer pr volumenet

Båndgap i Ge: $E_g = 0.67 \text{ eV}$

Donornivå for As i Ge: $E_d = E_c - 0.013 \text{ eV}$

\Rightarrow nesten alle As-atomer ionisert ved $T = 300 \text{ K}$

$\Rightarrow n \approx N_d$

Ren Ge ved 300 K : $n = p = n_i \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

Dersom $n \approx N_d \gg n_i$ blir $n \gg p$ (fordi $n \cdot p = \text{konstant}$): n-type

Omvendt (f.eks. Ge med Na B-atomer pr volumenet):

Dersom $p \approx N_a \gg n_i$ blir $p \gg n$: p-type halvleder