

9.4.03

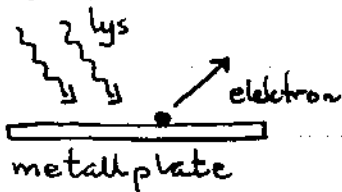
Vekselvirkning med

~~lys~~ lys : Grunnlag for optiske komponenterKlassisk beskrivelse av lys:Elektromagnetiske bølger karakterisert ved $\vec{E}$, $\vec{B}$ og bølgligninger (anta vakuum) (følger av Maxwells ligninger!)

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Dvs: $\vec{E}$ og $\vec{B}$ forplanter seg med hastighet $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Forklarer alle "bølge-relaterte" effekter (diffraksjon, interferens etc.)

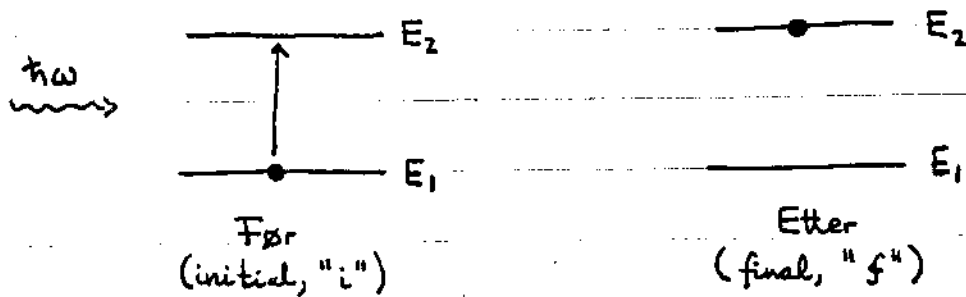
Forklarer ikke fotoelektrisk effekt: $\lambda > \lambda_c \Rightarrow$ ingen elektroner løsnes, uansett lysets intensitet $\lambda < \lambda_c \Rightarrow$ elektroner løsnes, selv med lav intensitet

Einstein, 1905 : Lys (og andre e.m. bølger) er partikler, fotoner, med energi $E = hf = h c / \lambda$, der h = Plancks konstant $= 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, og impuls $p = h / \lambda$ ($= 2\pi \hbar \cdot \frac{k}{2\pi}$), dvs $E = pc$.

[$\Rightarrow$ Nobelpris 1921]

Absorpsjon av fotoner

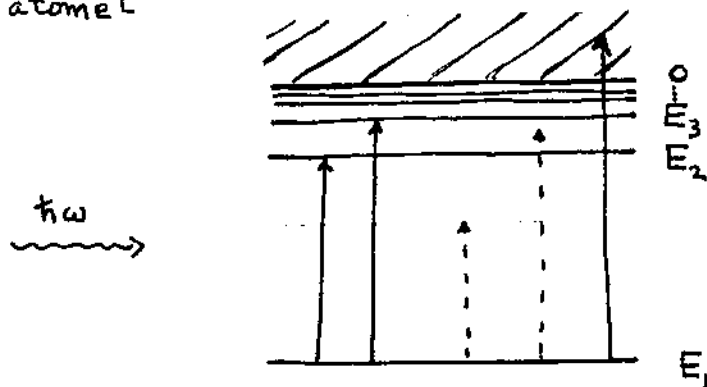
(F.eks. atom med energinivåer E_1 og E_2 for elektron)



$$\text{Energibevarelse} \Rightarrow \underbrace{E_1 + hf}_{E_i} = \underbrace{E_2}_{E_f}$$

$$\Rightarrow hf = 2\pi\hbar \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \hbar\omega = E_2 - E_1$$

Eks: H-atomet



$E > 0$: fritt elektron
("kontinuum")

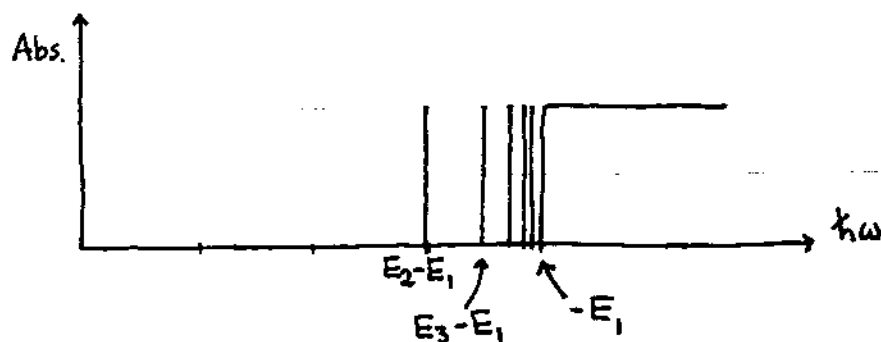
$$\left(E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \right)$$

$$\hbar\omega = E_n - E_1 \Rightarrow \text{absorpsjon mulig} \quad \left(\uparrow \right)$$

$$\hbar\omega \neq E_n - E_1 \Rightarrow \text{ikke mulig} \quad \left(\uparrow \right)$$

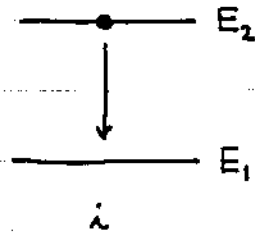
$$\hbar\omega > -E_1 \Rightarrow \text{elektron frigjøres; ionisasjon}$$

Absorpsjonsspektrum:

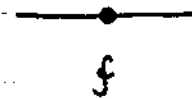


Emisjon av fotoner

Spontan emisjon:

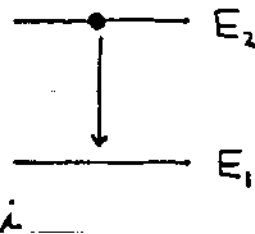


$$\hbar\omega = E_2 - E_1$$



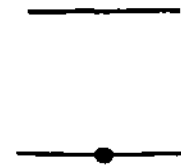
Stimulert emisjon:

$$\hbar\omega = E_2 - E_1$$



$$\hbar\omega$$

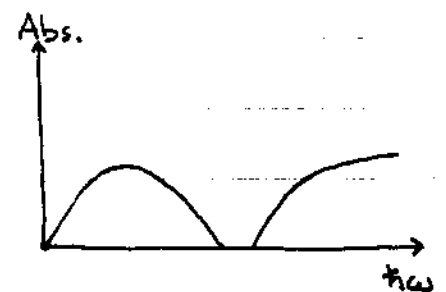
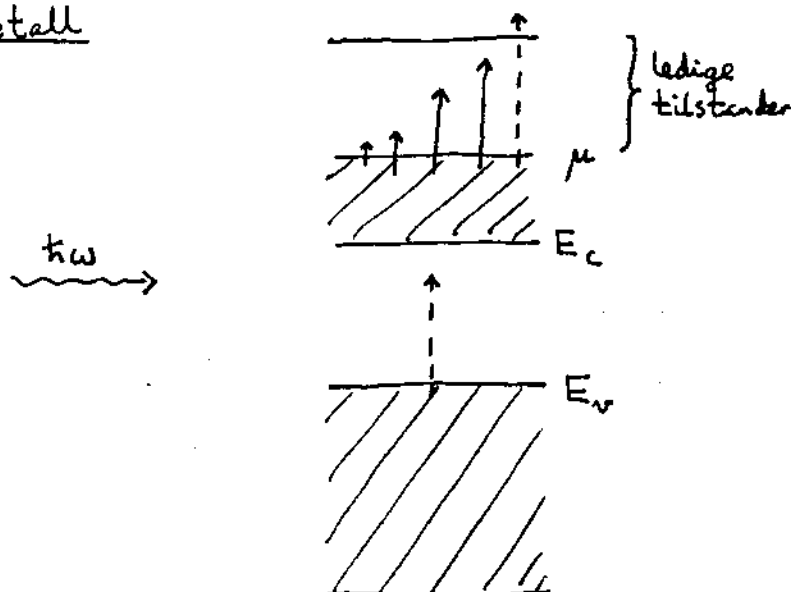
$$\hbar\omega$$

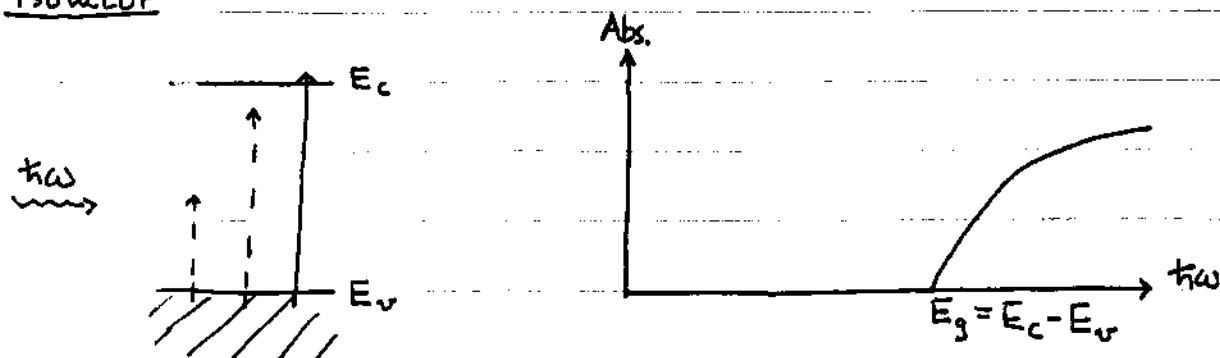


f

Fotoner og faste stoffer

Metall



Isolator

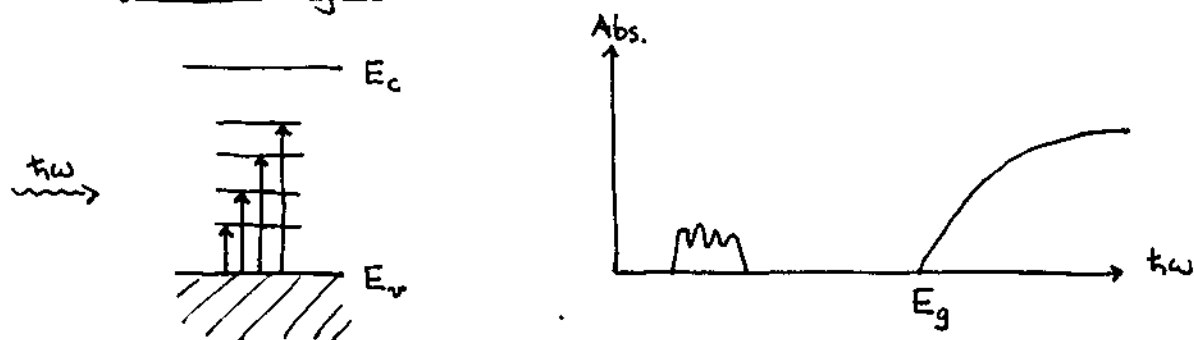
Eks: Al_2O_3 (alumina, corundum)

$$E_g \sim 9 \text{ eV}$$

Synlig lys: $\lambda = 0.4 - 0.8 \mu\text{m} \Rightarrow \hbar\omega = 1.6 - 3.2 \text{ eV}$

$\Rightarrow$ ren Al_2O_3 er gjennomsiktig

Med forurensninger:



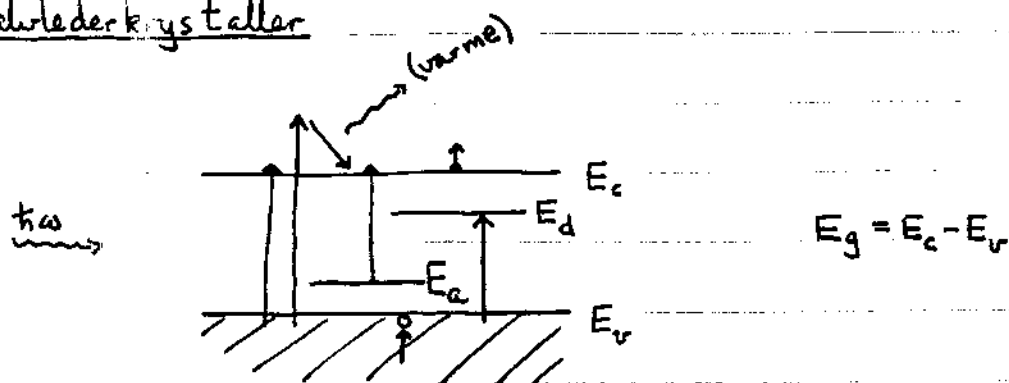
Eks: Al_2O_3 med Cr (rubin)

$\Rightarrow$ sterk absorpsjon ved $\hbar\omega \sim 2.2 \text{ eV} \hat{=} \text{grønt}$

$\Rightarrow$ rubin er rød

[Forenklet forklaring! Farger og fargenyanser involverer også ofte emisjon (luminesens; fosforesens og fluoresens) etter initiell absorpsjon.]

Halvlederkrystaller



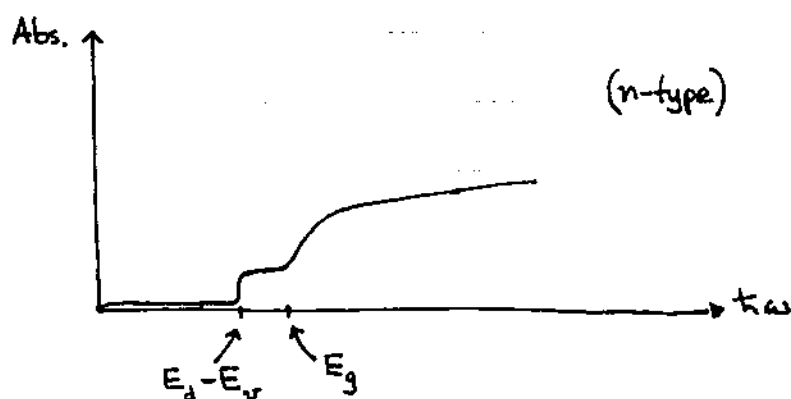
ved $T=0$: må ha $h\nu \geq E_g$ for å få absorpsjon

ved $T=300\text{K}$: har elektroner i ledningsbåndet som kan absorbere fotoner med lav energi

forurensninger $\Rightarrow$ ledig tilstand E_d , okkupert tilstand E_a

$\Rightarrow$ absorpsjon for $h\nu \geq E_d - E_v$ (n-type)

———— " ———— $h\nu \geq E_c - E_a$ (p-type)



Med eksitasjon fra valens- til ledningsbånd: Får dannet elektron-hull par.

Merk: $E_g \sim 1 - 3 \text{ eV}$ for halvledere

dvs: det synlige området av spektrret!

Eks: GaP $\sim 2.3 \text{ eV}$ grønn

SiC $\sim 3.0 \text{ eV}$ fiolett

(Si $\sim 1.1 \text{ eV}$ infrarød, GaAs $\sim 1.5 \text{ eV}$ infrarød)

Sentrale prosesser i

fotodetektor, solcelle: absorpsjon

lysemitterende diode (LED): spontan emisjon

LASER, MASER: stimulert emisjon

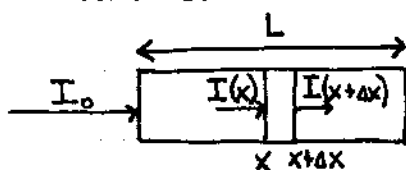
LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

synlig lys, $\lambda \sim 0.4 - 0.8 \mu\text{m}$, $E \sim 1.5 - 3 \text{ eV}$

MASER: Microwave

mikrobølger, $\lambda \sim 0.3 \text{ mm} - 30 \text{ cm}$, $E \sim 10^{-4} \text{ eV}$

Hvor mye absorberes?

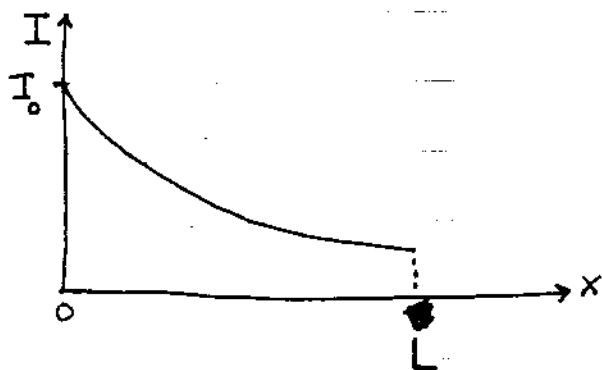


I_0 = innkommende foton-fluks
(= antall fotoner pr tids- og
pr flateenhet)

Anta at antall absorberte fotoner pr lengdeenhet er
proporsjonal med antall fotoner til stede:

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = -\alpha I(x)$$

$$(\Delta x \rightarrow 0) \Rightarrow \frac{dI}{dx} = -\alpha I \Rightarrow \boxed{I(x) = I_0 e^{-\alpha x}}$$

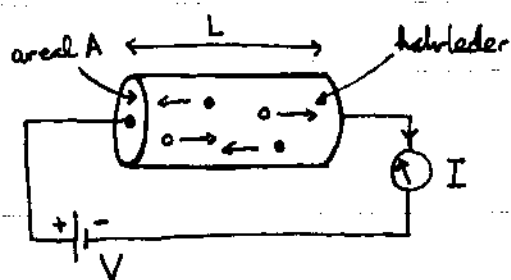


α = absorpsjonskoeffisient

Fotodetektor

Transformerer optisk signal til elektrisk signal:

1. Absorpsjon $\Rightarrow$ genererer ladningsbærere (elektron + hull)
2. Ladningstransport (må få ladningene fram til ytre krets)
3. Måling av strøm i ytre krets



- elektron
- hull

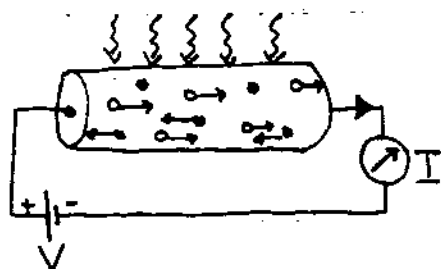
Repetisjon: $\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E}$, $\vec{v}_p = \mu_p \vec{E}$ ($\vec{v}$: driftshastighet)
 $\vec{j}_n = -ne\vec{v}_n$, $\vec{j}_p = pe\vec{v}_p$ (μ : mobilitet)
 $\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = ne\mu_n \vec{E} + pe\mu_p \vec{E}$
 dessuten: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ (σ : konduktiviteten)
 $\Rightarrow \sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$

$$I = j \cdot A, \quad E = V/L \quad \Rightarrow V = E \cdot L = \frac{j}{\sigma} \cdot L = I \cdot \frac{L}{\sigma A}$$

$$\Rightarrow R = \frac{L}{\sigma A}$$

Konduktans: $I = G \cdot V = \frac{1}{R} \cdot V = \frac{\sigma A}{L} \cdot V$

$$\Rightarrow G = \frac{A}{L} \sigma = \frac{Ae}{L} (n\mu_n + p\mu_p)$$



absorpsjon av fotoner

$\Rightarrow$ økning i n og p

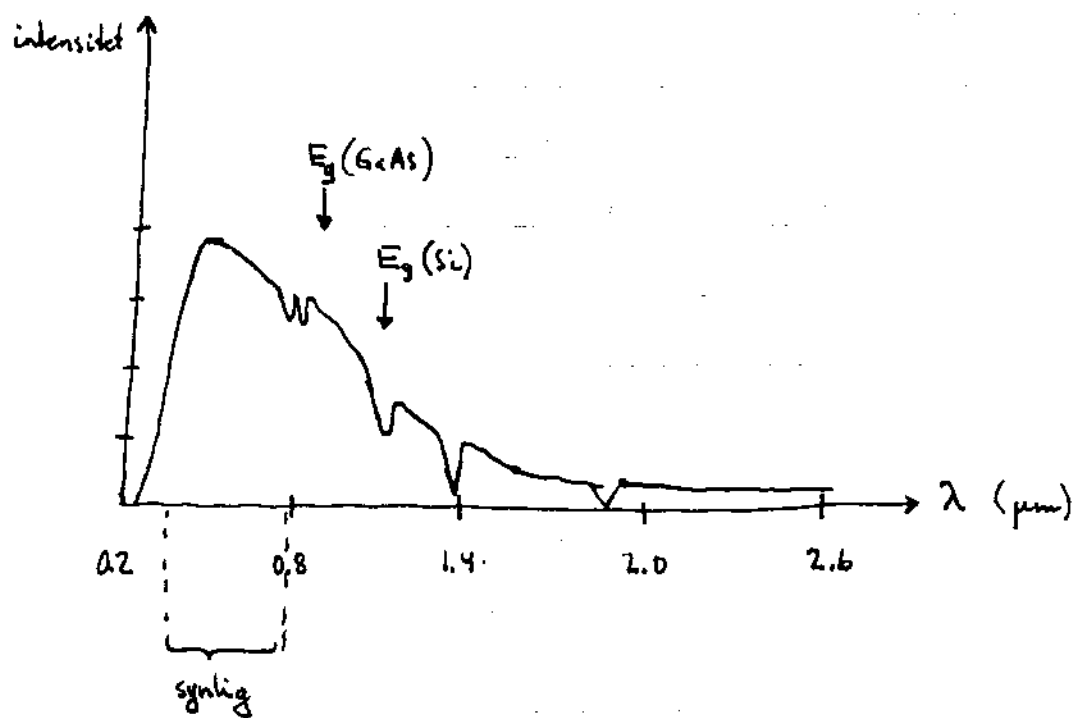
$\Rightarrow$ økning i strømmen I ,
 dvs. fotonene er detektert!

Rekombinasjon? $n(t) = n(0) e^{-t/\tau}$

$\Rightarrow$ må ha $\tau \gg t_0 = L/v = L/\mu E \Rightarrow$ ikke for stor L!

67B

Strålning från solen,
spektrum vid jordoverflatan:

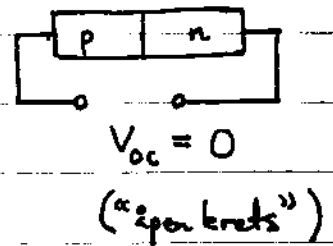
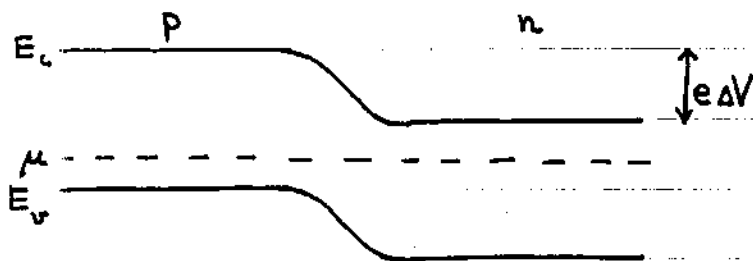


$$\lambda_c(\text{GaAs}) = 0.87 \mu\text{m}$$

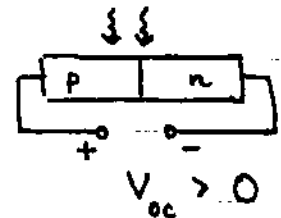
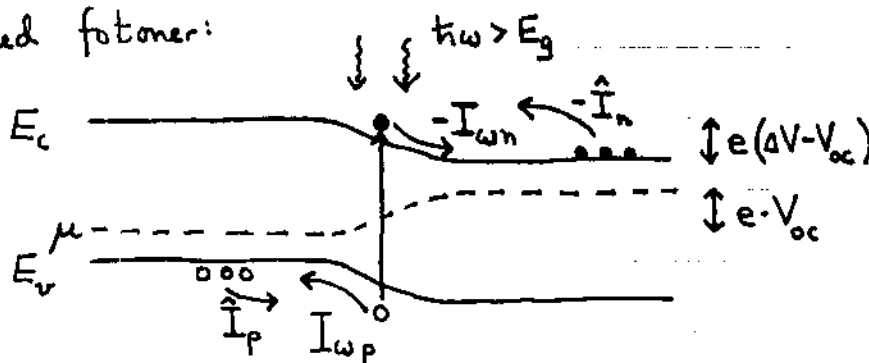
$$\lambda_c(\text{Si}) = 1.1 \mu\text{m}$$

pn - solcelle

uten fotoner:



med fotoner:



Stasjonære forhold (ikke likevekt!) når

$$I_{\omega} = \hat{I}$$

(←) (→)

 $I_{\omega} = I_{\omega n} + I_{\omega p} =$ strøm pga. genererte elektron-hull par

$$\hat{I} = \hat{I}_n + \hat{I}_p = I_0 \left(e^{eV_{oc}/k_B T} - 1 \right) = \text{ideell pn-diode-strøm}$$

når spenningen over pn-overgangen er V_{oc}

[Kommentar: ved stasjonære forhold vil det genereres like mange e-h par som det rekombinerer, men vi har fått en netto økning Δn på n-siden og Δp på p-siden, slik at det innebygde potensialet ΔV (uten lys) delvis utlignes.]

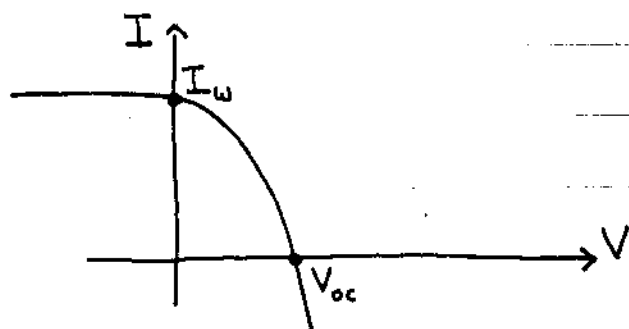
Med åpen krets: $I = I_w - \hat{I} = 0$

$$\Rightarrow I_c = I_o (e^{eV_{oc}/k_B T} - 1)$$

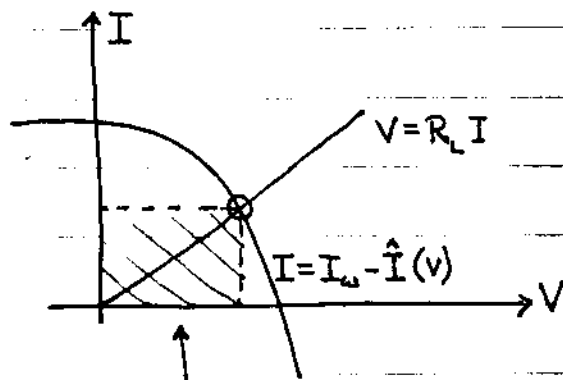
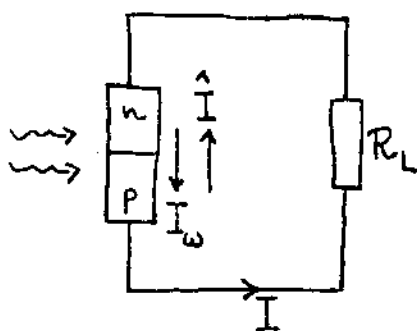
$$\Rightarrow V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_w}{I_o} + 1 \right) \underset{I_w \gg I_o}{\approx} \frac{k_B T}{e} \ln \frac{I_w}{I_o}$$

har som regel

Generelt er $I(V) = I_w - I_o (e^{eV/k_B T} - 1)$

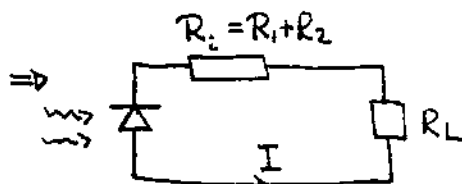
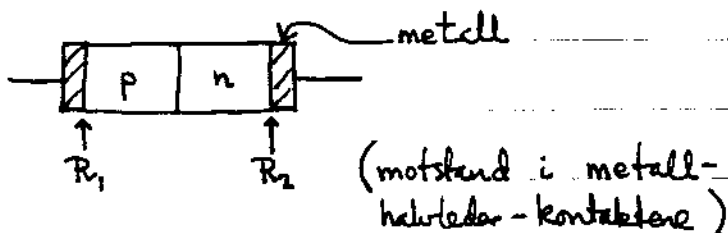


Kobler til "last" R_L (f.eks. lyspære):



Effekt utviklet i R_L : $P = V \cdot I = \text{skravet areal}$

Ikke-ideell solcelle:



$$\Rightarrow \text{"tapt effekt"} = R_i I^2$$

$$\Rightarrow \text{redusert "utgangseffekt"} = R_L I^2$$