

Vekselvirkning med lys og "fotoniske" komponenter

- Klassisk er lys E.M. bølger, der $\vec{E}$ og $\vec{B}$ oppfyller bølgekn.

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

som følger fra Maxwells ligninger (jf FY6020). Dvs, $\vec{E}$ og $\vec{B}$ forplanter seg med fart $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \approx 3 \cdot 10^8$ m/s (i vakuum). Dette forklarer bølgefenomener som interferens og diffraksjon.

- Kvantemekanisk er lys partikler - fotoner - med energi $E = h\nu$ og impuls $p = h/\lambda$, slik at $E = pc$ (da $\nu = c/\lambda$).

Forklarer fenomener som fotoelektrisk effekt og Compton-effekten. Nødvendig for å forklare komponenter som LED, solcelle, Laser osv.

Fotoner er bosoner (med heltallig spinn og symmetriske bølgefunksjoner) uten masse, og antall fotoner i et lukket system er ikke bevart.

Forventet antall bosoner i en tilstand med energi E er

$$\langle N \rangle = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} - 1} \quad (\text{Bose-Einstein-fordelingen})$$

[Sammenlign med Fermi-Dirac-fordelingen, s. 100, for fermioner.]

For fotoner er kjemisk potensial $\mu = 0$, slik at

$$\langle N \rangle = [\exp(E/k_B T) - 1]^{-1} = [\exp(h\nu/k_B T) - 1]^{-1}$$

Eks: Hva er da $\langle N \rangle$ for hhv synlig lys og mikrobølger ved 300K?

- Løsn: Synlig lys $\Rightarrow \lambda = 400-700$ nm $\Rightarrow h\nu = 1.8-3.1$ eV.

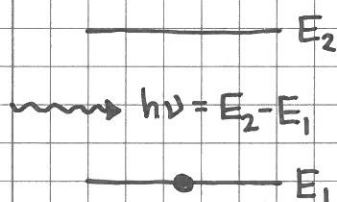
Mikrobølger $\Rightarrow \lambda = 10$ cm (f.eks.) $\Rightarrow h\nu = 12.4$ μ eV

$$k_B T = 26 \text{ meV} \Rightarrow \langle N \rangle_{\text{synlig}} \sim 10^{-30} \text{ til } 10^{-52} ; \quad \langle N \rangle_{\text{mikro}} \sim 2000$$

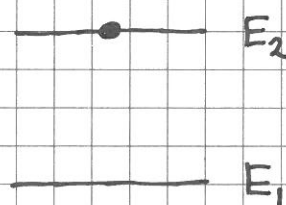
Fotoniske komponenter baserer seg på absorpsjon av fotoner (fotodetektor, solcelle) eller emisjon av fotoner, enten spontan emisjon (LED) eller stimulert emisjon (LASER): [YF 39.3, 39.4]

Absorpsjon: [Anta atom med to energinivåer E_1 og E_2]

Før:

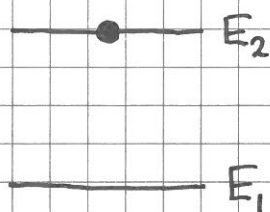


Etter:

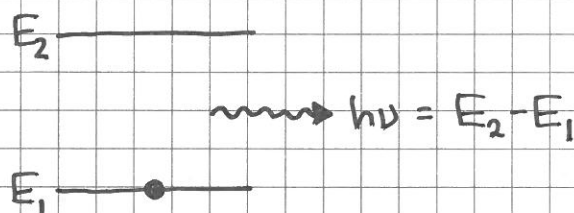


Spontan emisjon:

Før:

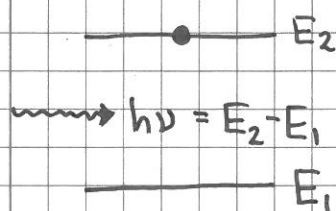


Etter:

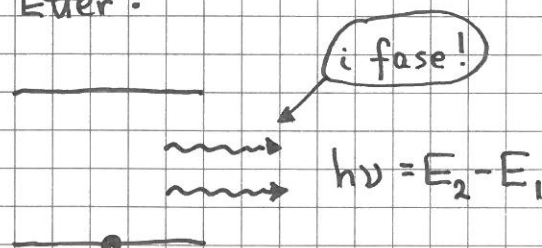


Stimulert emisjon [Einstein, 1917]:

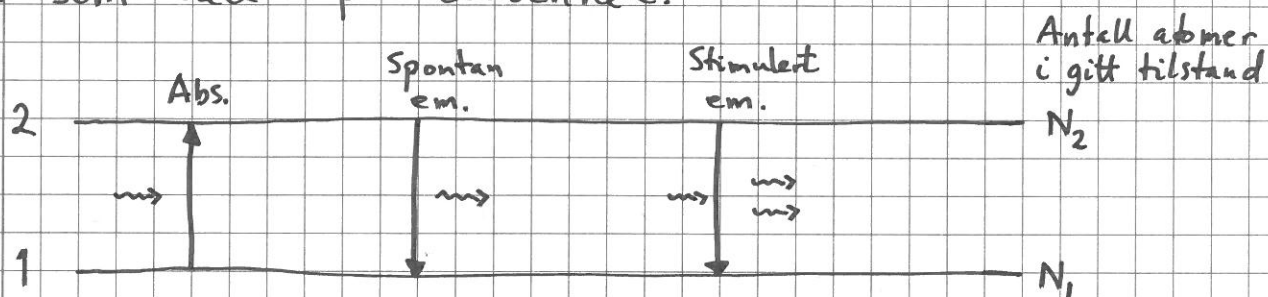
Før:



Etter:



I (dynamisk) likevekt: Like mange overganger
"opp" som "ned" pr tidsenhet.



Sannsynlighet: $B \cdot u(\nu)$

A

$B \cdot u(\nu)$

Rate: $N_1 \cdot B \cdot u(\nu)$

$N_2 \cdot A$

$N_2 \cdot B \cdot u(\nu)$

med $u(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$ = energi pr volum- og frekvensenhet

(dvs Plancks strålingslov, se s. 5)

A, B = Einstein-koeffisientene; $\frac{A}{B} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} = \frac{u(\nu)}{\langle N \rangle}$

der $\langle N \rangle$ = midlere antall fotoner med frekvens ν (se s. 122)

Dermed blir

$$\frac{P(\text{stimulert emisjon})}{P(\text{spontan emisjon})} = \langle N \rangle$$

Med kvanteelektrodynamikk (QED) beregnes at

$$P(\text{emisjon, totalt}) \sim \langle N \rangle + 1$$

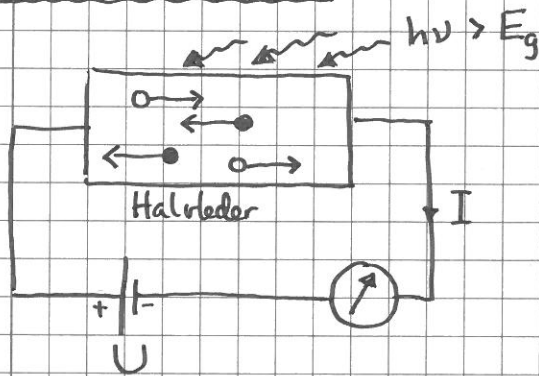
dvs $P(\text{stim. em.}) \sim \langle N \rangle$

og 1-fallet i $\langle N \rangle + 1$ tilsvarer spontan emisjon

Vi skal straks benytte dette i diskusjonen av laseren.

Fotodetektor

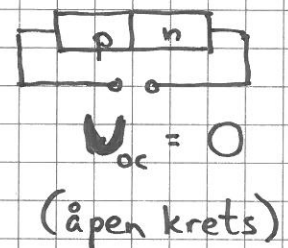
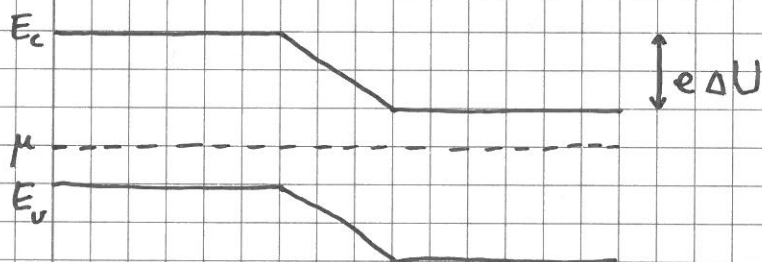
(125)



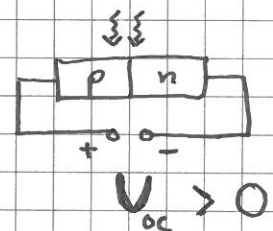
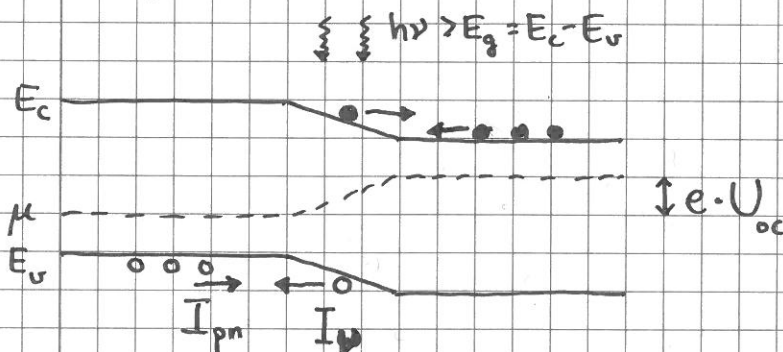
Absorberte fotoner skaper elektron-hull par (hvis $h\nu > E_g$)
 $\Rightarrow$ økning i strømmen I ,
dvs lyset er detektert.

Solcelle

Uten fotoner:



Med fotoner:



I_y = strøm pga genererte elektron-hull par

$I_{pn} = I_0 (e^{eU_{oc}/kBT} - 1)$ = ideell diodesstrøm med
spenning U_{oc} over pn-overgangen

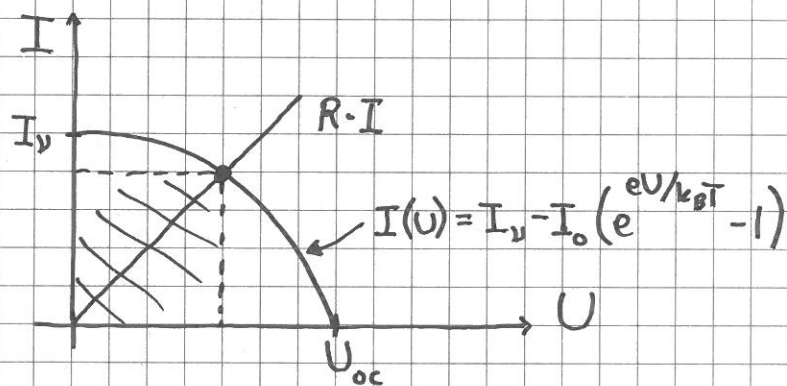
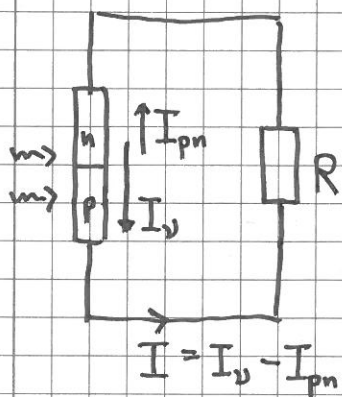
Med åpen krets er $I = I_y - I_{pn} = 0 \Rightarrow I_y = I_{pn}$

$$\Rightarrow U_{oc} = \frac{kBT}{e} \ln \left\{ \frac{I_y}{I_0} + 1 \right\}$$

Med "brukbar innstråling" er som regel $I_y \gg I_0$

$$\Rightarrow U_{oc} \approx \frac{k_B T}{e} \ln \frac{I_y}{I_0}$$

Kobler til (f.eks.) lyspære med motstand R :



Effekt i lyspære: $P = U \cdot I = \text{skravert areal}$

$$= U I_y - U I_0 (e^{eU/k_B T} - 1)$$

Max effekt oppnås når $dP/dU = 0$

$$\Rightarrow I_y + I_0 - I_0 e^{eU/k_B T} - \frac{eU}{k_B T} I_0 e^{eU/k_B T} = 0$$

$$\Rightarrow e^{eU/k_B T} = \frac{I_y + I_0}{I_0 (1 + eU/k_B T)} \approx \frac{I_y}{I_0} \cdot \frac{k_B T}{eU} \quad (\text{når } I_y \gg I_0 \text{ og } eU \gg k_B T)$$

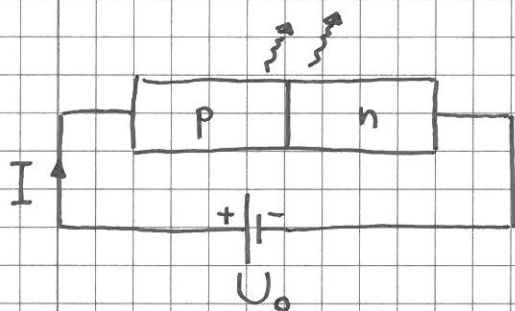
$$\Rightarrow U = \frac{k_B T}{e} \ln \left\{ \frac{I_y}{I_0} \cdot \frac{k_B T}{eU} \right\} = U_{oc} - \frac{k_B T}{e} \ln \left\{ \frac{eU}{k_B T} \right\}$$

(som evt. må løses ^(eller grafisk) numerisk for å bestemme U)

Når U er bestemt, kan f.eks. max effekt $P = UI$ og tilhørende $R = U/I$ fastlegges.

[Øving 6]

Lysemitterende diode (LED)

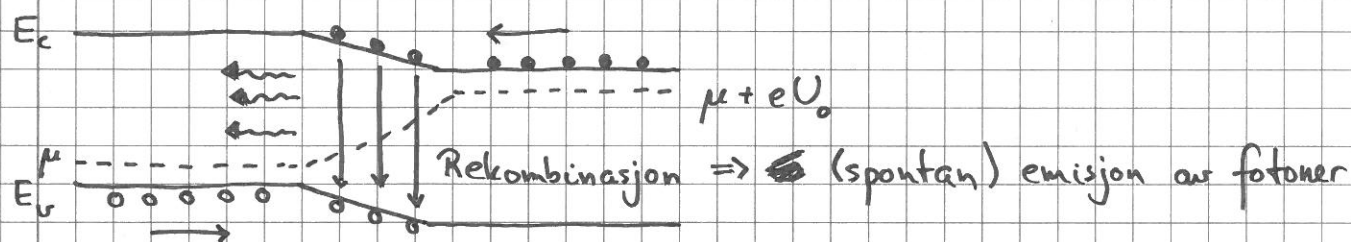


"Positivt forspent" pn-overgang
kan gi fotoner ut!

Betingelser:

- Direkte båndgap
- Passelig stort båndgap (for f.eks. ønsket farge)
- Tilstrekkelig strøm I

Grunnleggende mekanisme:



Ytre spenning $U_0 > 0 \Rightarrow$ tilførsel av ledningsbærere i "sperreresonen", elektroner i ledningsbåndet ($\bullet$) og hull i valensbåndet ($\circ$). Hvis "mange nok", så vil mange elektroner "falle ned" og rekombinere med hull, med utsendelse av fotoner, med energi $h\nu \approx E_c - E_v = E_g = \text{energigapet}$.

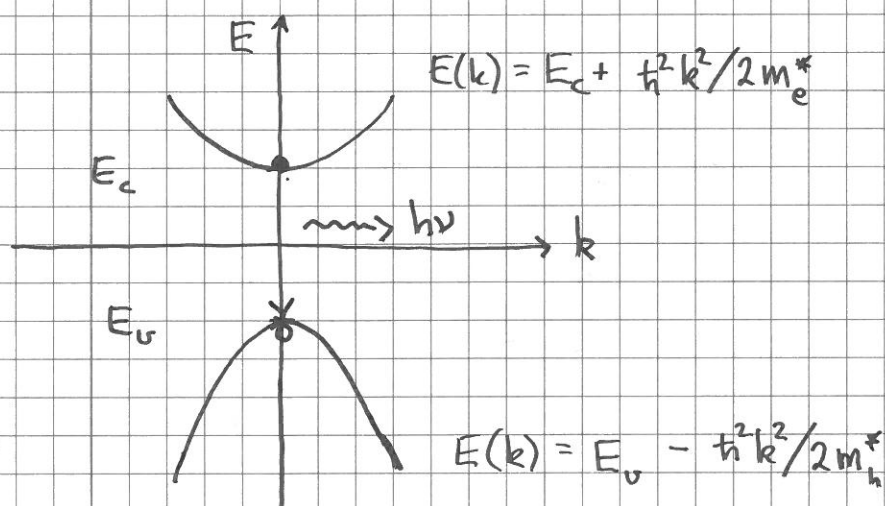
Dvs: Lysets farge bestemmes av båndgapet E_g .

[Blå LED essensielt for utvikling av LED-belysning;
Nobelpris i fysikk 2014 (Akasaki, Amano, Nakamura)]

Hva er direkte og indirekte båndgap?

Og hvorfor direkte båndgap i LED-materialer?

Fra s. 104 og 114:



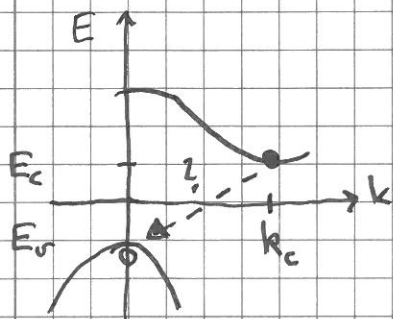
Direkte båndgap: Bunnen av ledningsbåndet (E_c) og toppen av valensbåndet (E_v) ved samme k -verdi, som regel $k=0$. [Husk: $\hbar k$ = elektronets impuls]

Spontan emisjon av foton via rekombinasjon av elektron og hull er en fysisk prosess der både impuls og energi må være bevart.

Typisk fotonimpuls: $p_\nu = E_g/c \sim 1 \text{ eV} / 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \sim 5 \cdot 10^{-28} \text{ kg m/s}$

Dvs at elektronets ($\bullet$) impuls p_e og hullets ($\circ$) impuls p_h ikke kan være mer forskjellige enn $p_\nu \sim 5 \cdot 10^{-28} \text{ kg m/s}$, som tilsvarer at $\Delta k = |k_e - k_h| \sim p_\nu / \hbar \sim 5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$.

Si er et eks. på halvleder med indirekte båndgap:



Her er $k_v = 0$, mens $k_c \approx \pi/a$, der a er gitterkonstanten i Si, $a \sim 5 \text{ Å}$; det gir $k_c \sim 6 \cdot 10^9 \text{ m}^{-1} \gg p_\nu / \hbar$. Dermed: Impulsbevarelse ikke mulig kan med fotonemisjon!

Rekombinasjon mellom elektron ~~hull~~ i tilstand med $k = k_c \approx \pi/a$ og hull i tilstand med $k = k_v \approx 0$ kan skje med emisjon av foton, hvis vi samtidig får "hjelp" av vibrasjonsenergien i ionegitteret ("fononer").

Men slike prosesser er mye mindre sannsynlige enn direkte overganger fra $k = k_c = 0$ til $k = k_v = 0$, uten assistanse fra fononer.

Derfor: Direkte båndgap i LED!

Eks: GaAs (IR), GaP (rød, oransje), ..., InGaN (blå)

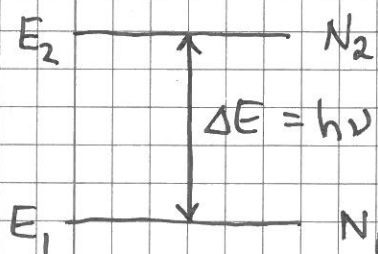
LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Dvs: Stimulert emisjon er her den grunnleggende fysiske mekanismen.

Fra s. 123 og 124 er det klart at vi må få til et per betingelser:

- Tilstrekkelig mange atomer (ent elektroner) i en gitt eksisert tilstand
- Tilstrekkelig mange fotoner til stede, med "riktig" energi og frekvens

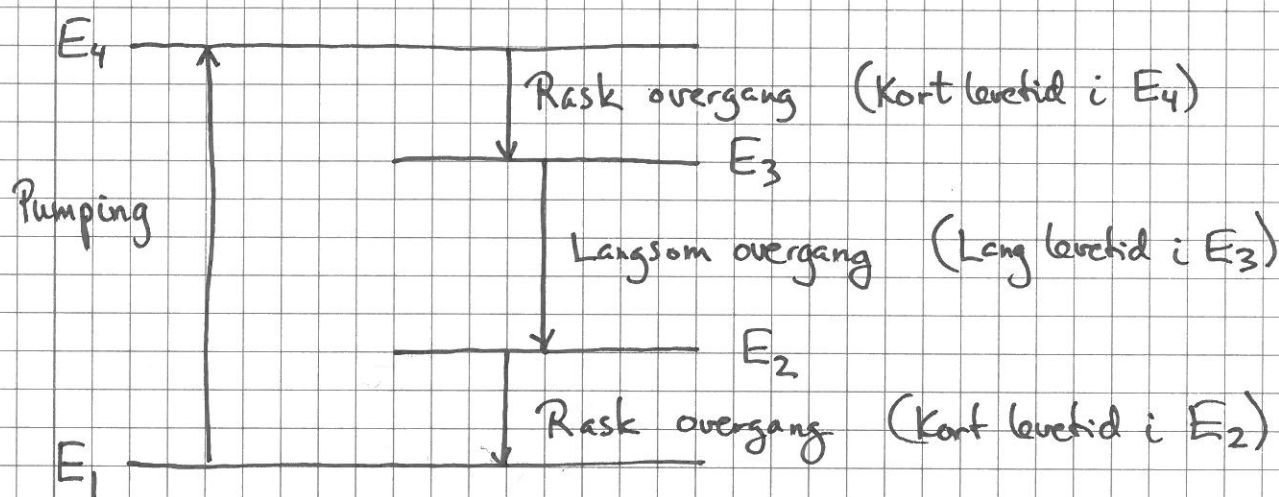


I likerekt vet vi at N_2 er en (Boltzmann-)faktor $\exp(-h\nu/k_B T)$ mindre enn N_1 .

Da vil sannsynligheten være (mye) større for absorpsjon enn for (stimulert) emisjon av et foton med energi $h\nu$.

Hvis stimulert emisjon skal bli dominerende prosess, må vi skape populasjonsinversjon, dvs $N_2 > N_1$.

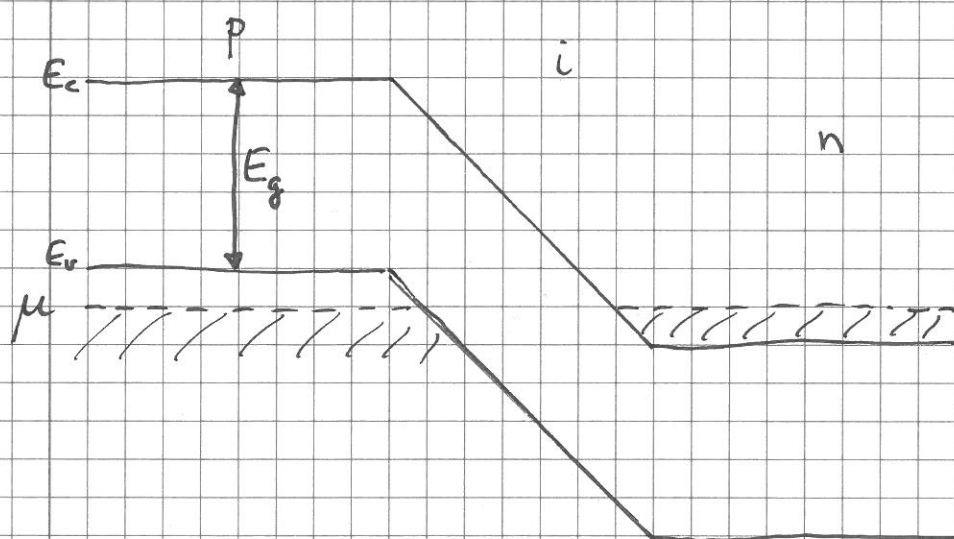
Eksempelvis slik, med 4 nivåer:



$\Rightarrow N_3 > N_2$ blir nå mulig!

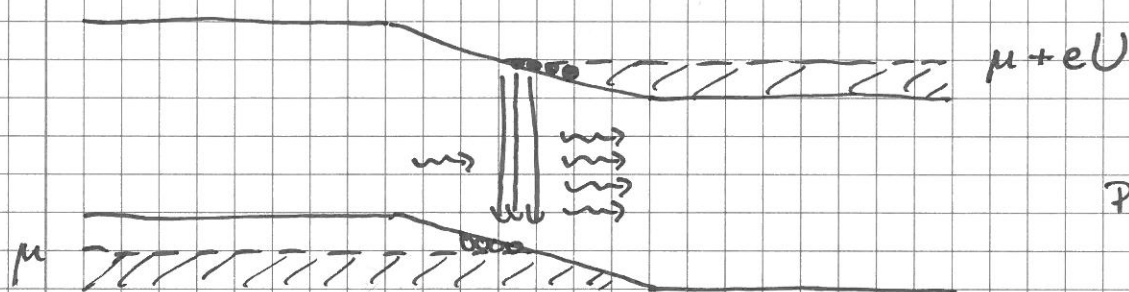
Ved å sørge for at det hele tiden er fotoner til stede i systemet med energi $h\nu = E_3 - E_2$ kan en stimulere et stort antall overganger fra E_3 til E_2 ; dvs Laser-virkning!

Laser-diode: Typisk en p-i-n-struktur med
 høj grad af doping i p- og n-områderne; i =
 intrinsisk (udøjet område).



Sterk doping
 $\Downarrow$
 Fermi-niveau μ
 under E_v i p
 og over E_c i n

Termisk ligevægt



Positiv U

Med tilstrækkelig positiv ydre spænding U vil mange elektroner
 i ledn.båndet befinde sig ramlig i samme område som
 mange hull i valensbåndet. Tilstedeværende fotoner med
 energi $h\nu \approx E_g$ (fås enten fra "optisk pumping" eller
 fra spontan emission) kan da stimulere emission via
 elektron+hull rekombination $\Rightarrow$ Laservirkning!

Også her: Direkte båndgap er påkrævet!