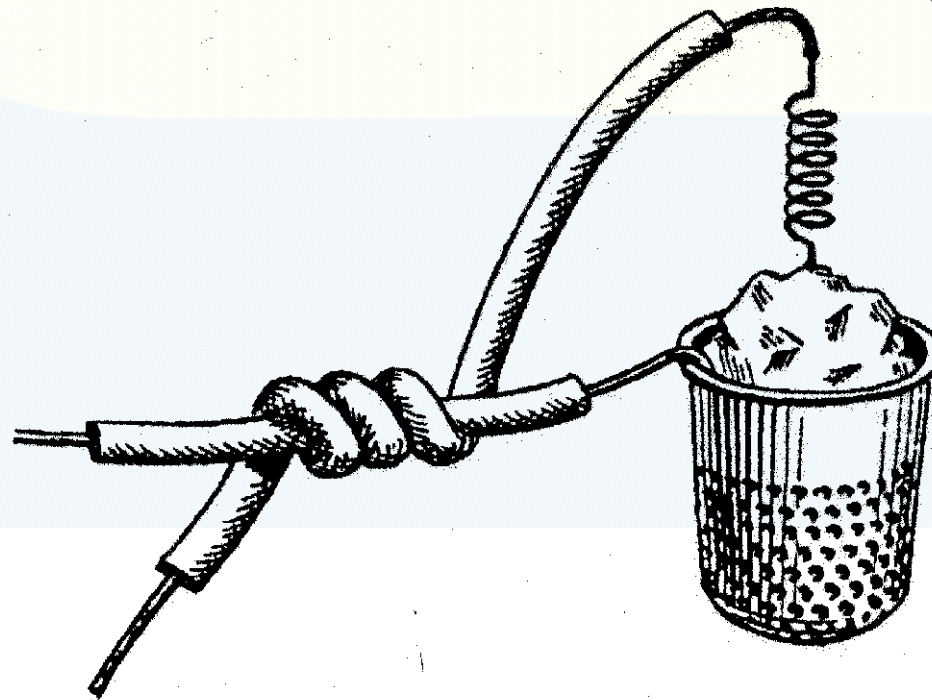


Introduktion till halvledarteknik

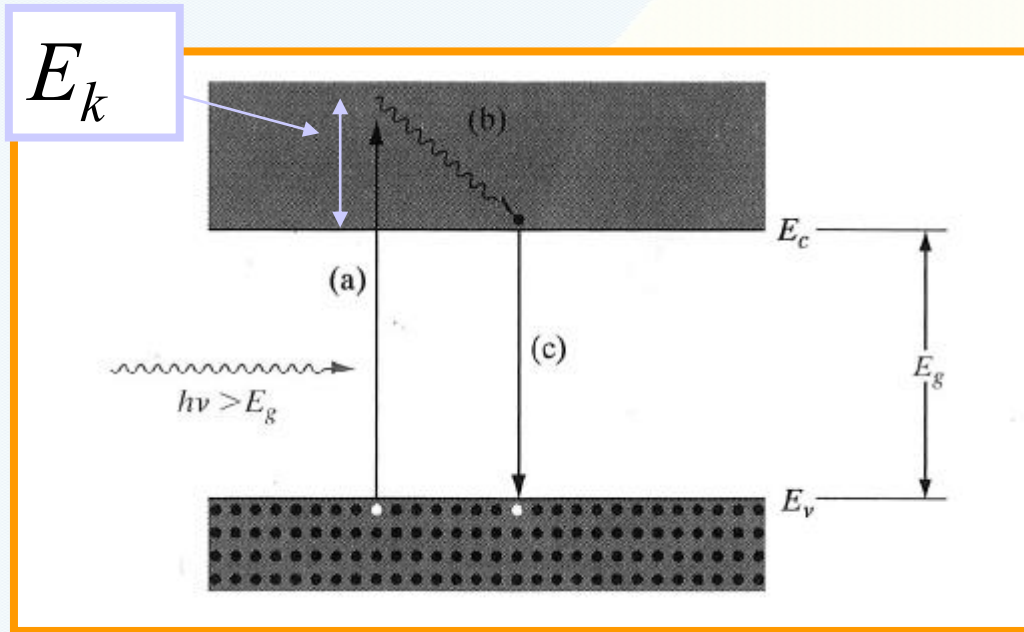


Innehåll

- **4 Excitation av halvledare**
 - Optisk absorption och excitation
 - Luminiscens
 - Rekombination
 - Diffusion av laddningsbärare



Optisk absorption och excitation

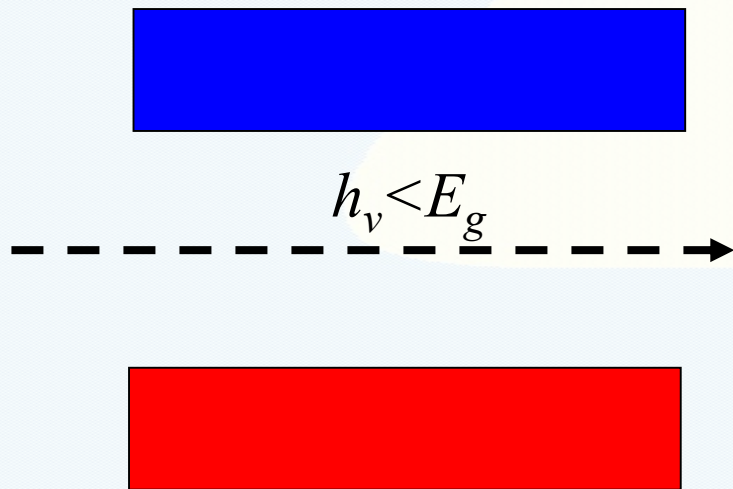


$h\nu > E_g$ för generering av ett ehp, energin som överstiger E_c blir till kinetisk energi. För fotonenergies med storleksordningen E_g genereras ett ehp. När fotonenergin ökar får elektronen som bildas en kinetisk energi som resulterar i stötjonisation dvs fler än ett ehp skapas. När elektronen relaxerat i ledningsbandet kan den rekombinera tillbaka till valensbandet (c).



Optisk absorption och excitation

För fotonenergier lägre än bandgapet är halvledaren transparent. Mätning av optisk absorption är ett sätt att bestämma bandgapet.

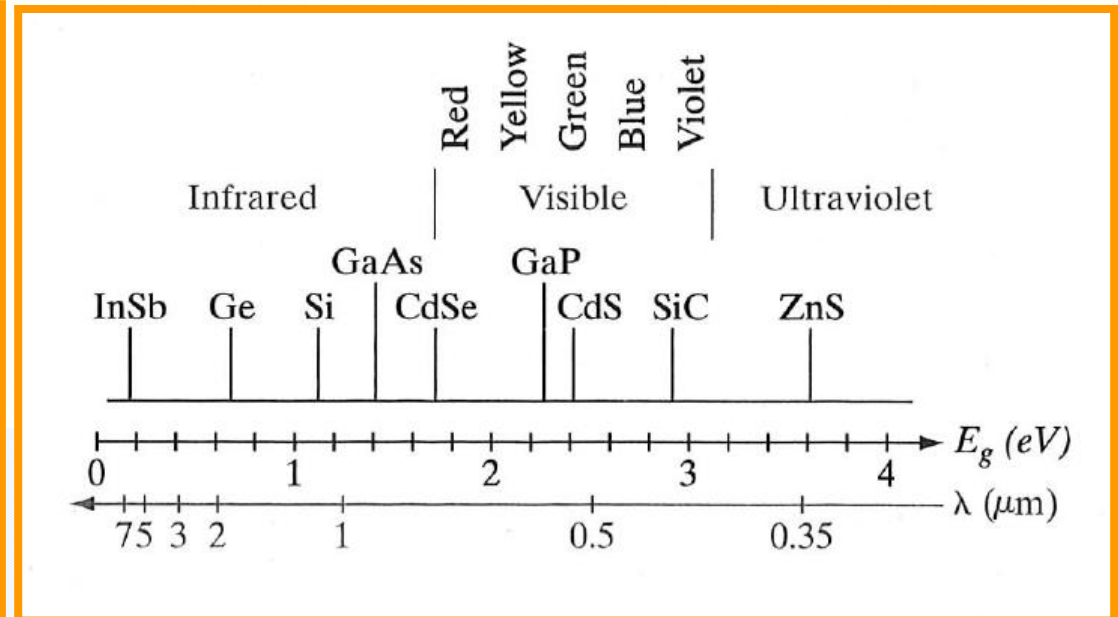
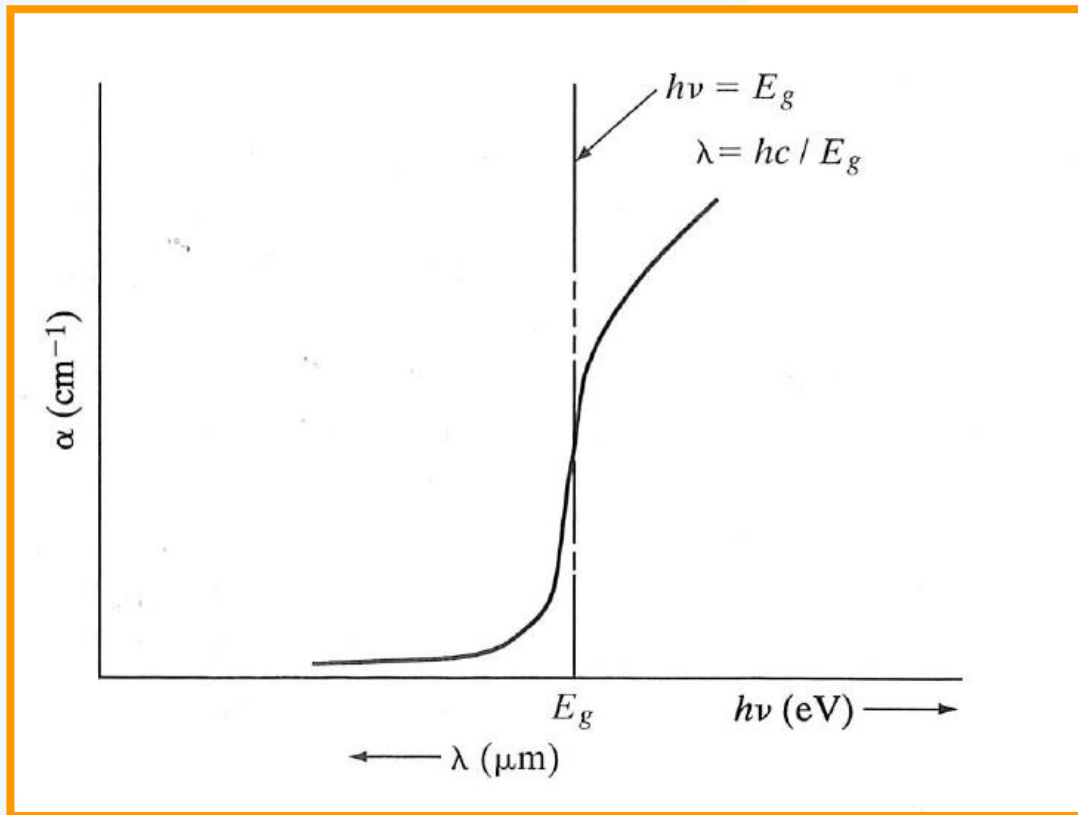


$$I_t = I_0 e^{-\alpha l}$$

α är då absorptionkoefficienten

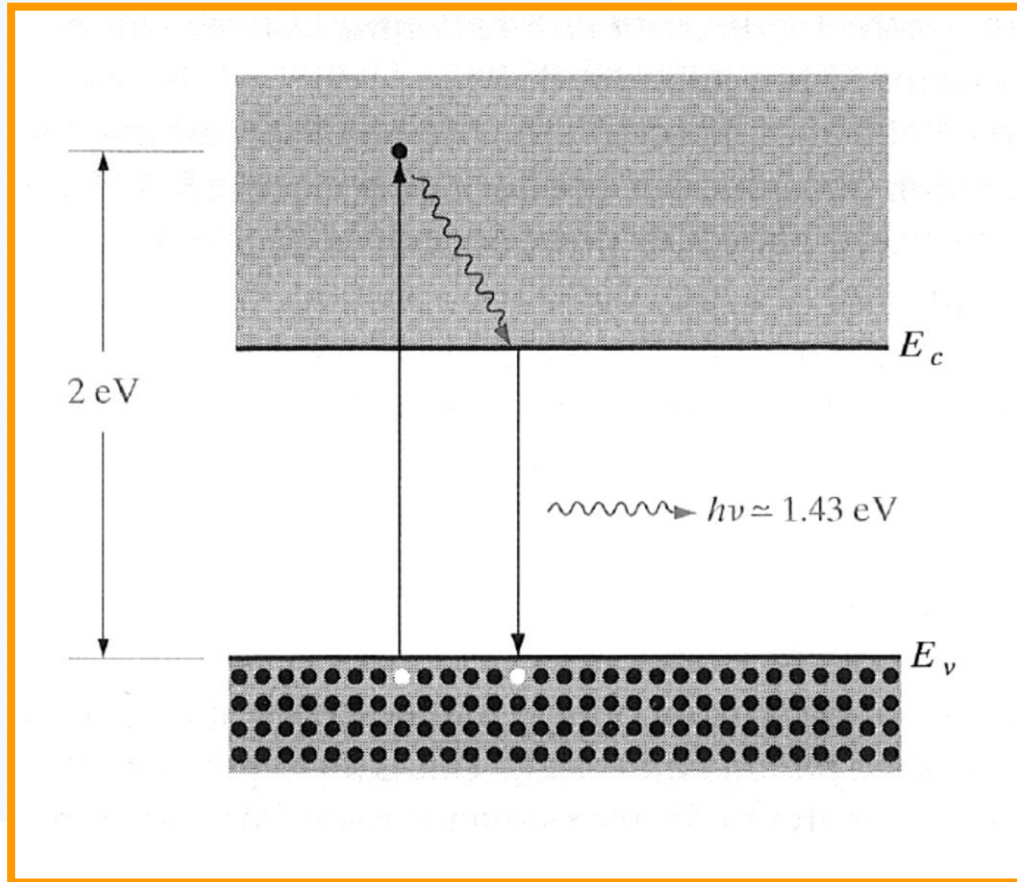


Optisk absorption och excitation



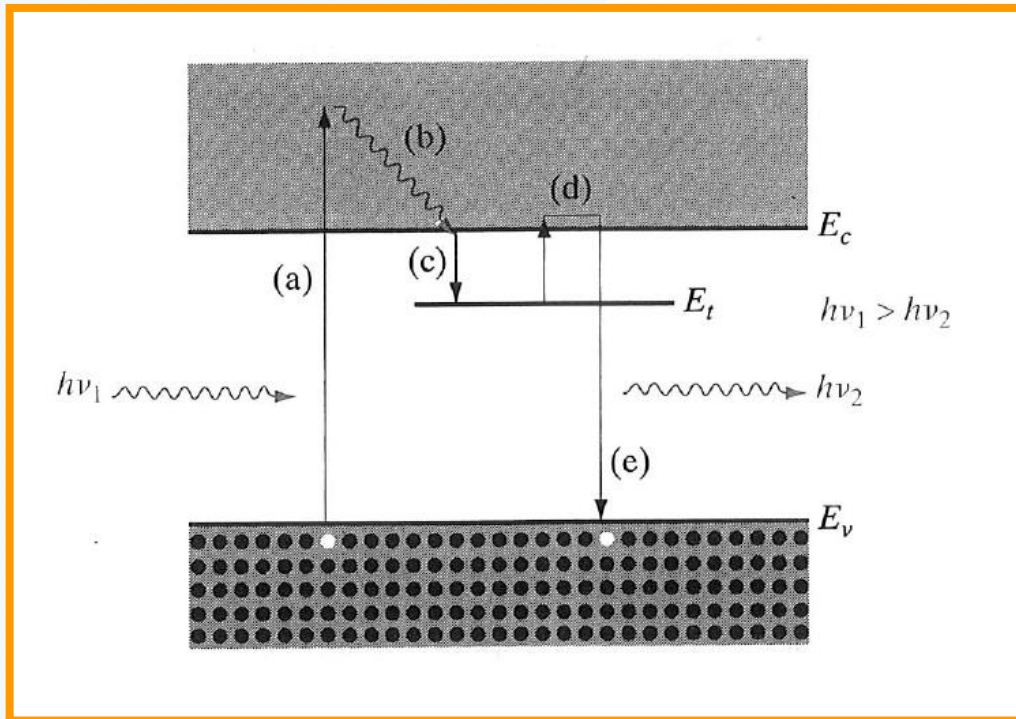
Luminiscens

- Fotoluminiscens (snabb emission)



Luminiscens

- Fosforluminiscens
(fördröjdprocess via en fälla i bandgapet)
- Elektroluminscens injektion av minoritetsbärare, krävs en pn-övergång, LED



Direkt rekombination (i direkt bandgap ex GaAs)

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_r n_i^2 - \alpha_r n(t)p(t)$$

rekombination

Generation
termisk

$$\begin{aligned}\frac{d\delta n(t)}{dt} &= \alpha_r n_i^2 - \alpha_r [n_0 + \delta n(t)][p_0 + \delta p(t)] \\ &= -\alpha_r [(n_0 + p_0)\delta n(t) + \delta n^2(t)]\end{aligned}$$

Generation av ehp med
exempelvis en kort ljuspuls

p_0 och n_0 är koncentrationerna
vid jämvikt

$$\delta n(t) = \delta p(t)$$



Direkt rekombination (i direkt bandgap ex GaAs)

P-typ mtr har $p_0 \gg n_0$ och ekvationen blir då

$$\frac{d\delta n(t)}{dt} = -\alpha_r p_0 \delta n(t)$$

Med lösningen

$$\delta n(t) = \Delta n e^{-\alpha_r p_0 t} = \Delta n e^{-t/\tau_n}$$

$$\delta n(t) = \Delta n \text{ då } t=0$$

$$\tau_n = (\alpha_r p_0)^{-1}$$

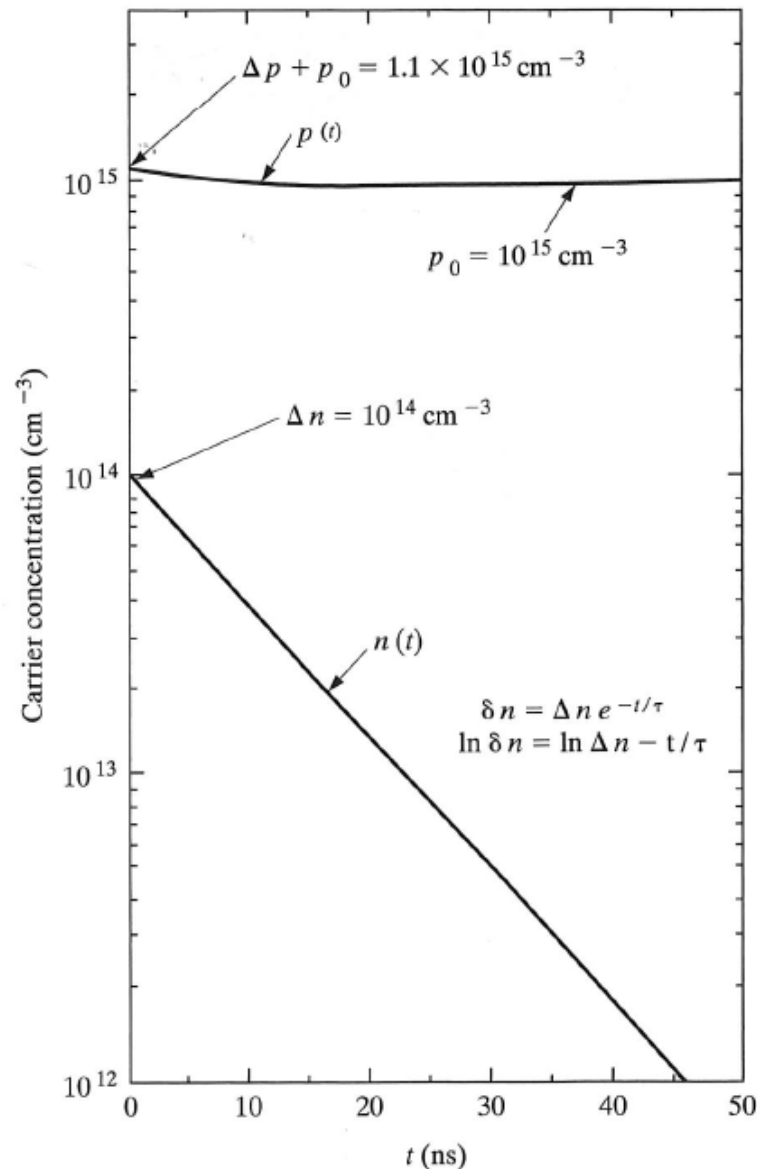
Kallas för minoritets bärarlivslängd

$$\tau_p = (\alpha_r n_0)^{-1}$$

Då $n_0 \gg p_0$



Direkt rekombination (i direkt bandgap ex GaAs)

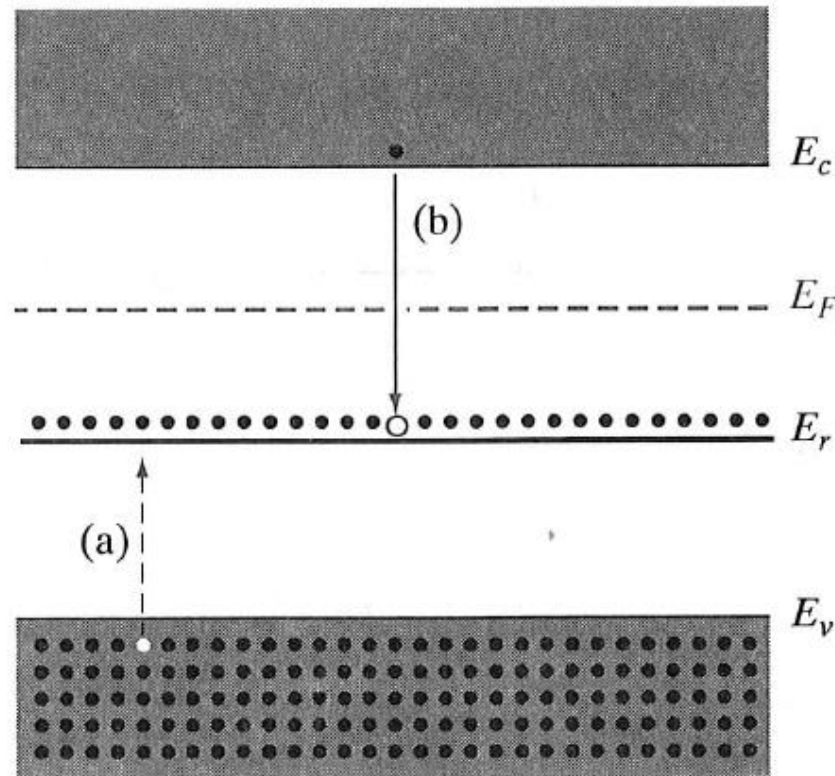


P-typ mtr med dopning 10^{15} cm^{-3}
GaAs med $n_i=10^6 \text{ cm}^{-3}$ resulterar
i $n_0=10^{-3} \text{ cm}^{-3}$!!

Vid $t=0$ genereras 10^{14} ehp/cm^3



Indirekt Rekombination (indirekt bandgap)



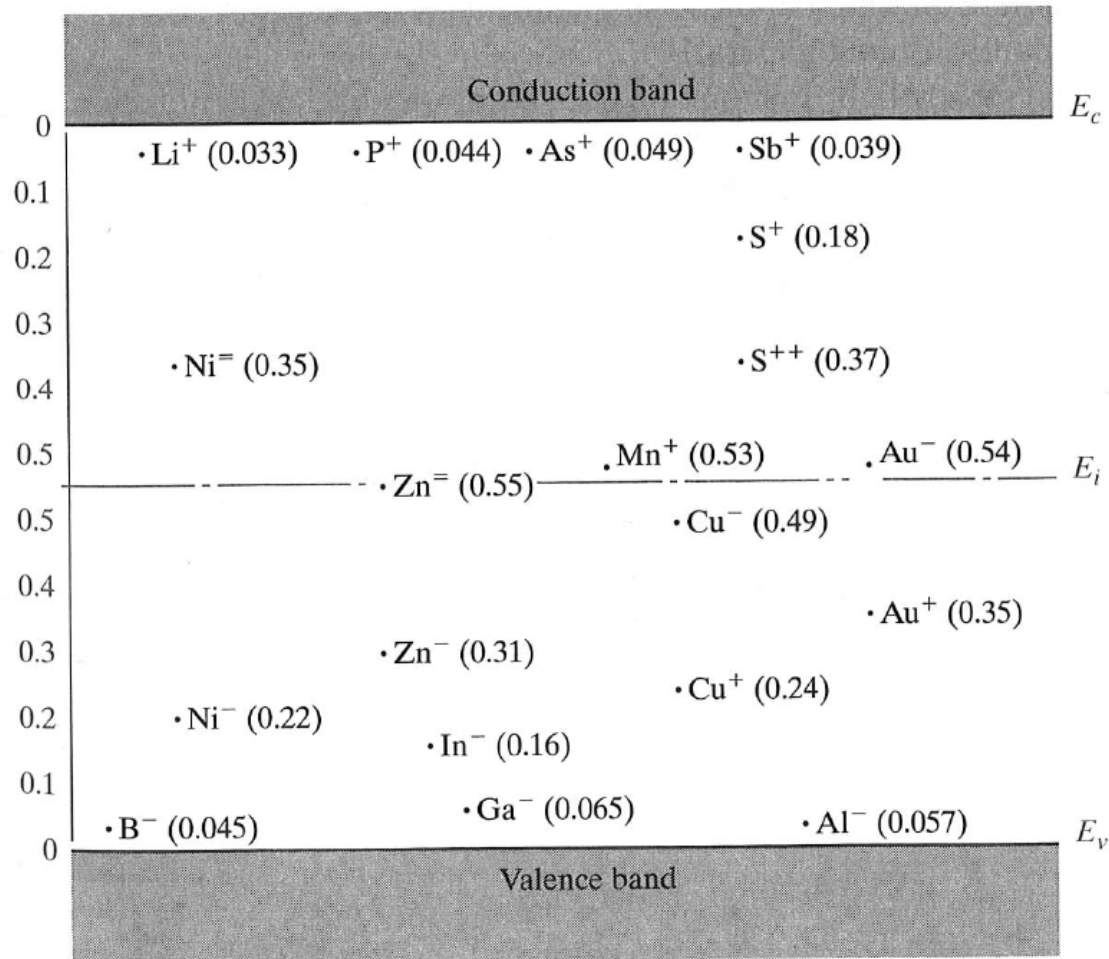
Direkt rekombination är osannolik process i indirekta halvledare exempelvis Si och Ge

I stället sker rekombination (hål och elektron förintas) via störnivåer i bandgapet

En störnivå som tar upp en elektron temporärt och sedan emitterar elektronen igen utan rekombination kallas "trap" nivå



Indirekt Rekombination (indirekt bandgap)



Halvledaren exciteras med ljuspuls och ledningsförmågan mäts upp som fkn av tiden för bestämning av en effektiv rekombination

$$\sigma(t) = q[n(t)\mu_n + p(t)\mu_p]$$



Generation i jämvikt samt vid konstant överskotts av laddningsbärare

$$g(T) = \alpha_r n_i^2 = \alpha_r n_0 p_0 \text{ i jämvikt}$$

$g(T) + g_{op} = \alpha_r np = \alpha_r (n_0 + \delta n)(p_0 + \delta p)$ med konstant överskott av laddningsbärare, ex optisk excitation (fotogeneration)



Kvasi Fermi nivåer

Kvasi Fermi nivåer används då halvledaren ej är i jämvikt.

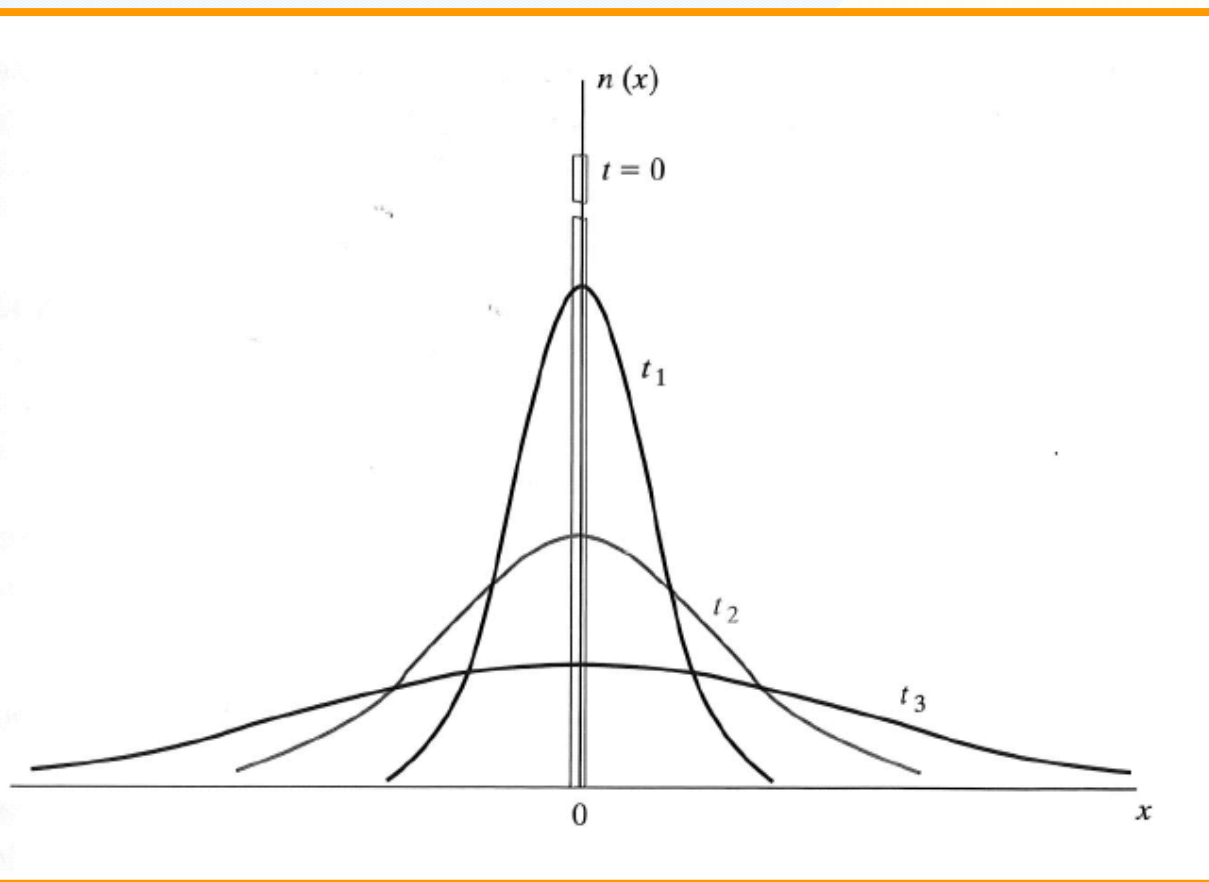
Kvasi Fermi nivåer beskriver då elektron och hål koncentrationer vid exempelvis fotogeneration och injektion av minoritetsbärare (PN-övergång)

$$\begin{aligned}n &= n_i e^{(F_n - E_i)/kT} \\ p &= n_i e^{(E_i - F_p)/kT}\end{aligned}$$

0 borta då koncentration ej är i jämvikt, massverkans lag gäller ej



Diffusion av laddningsbärare



En ljuspuls skapar en koncentrationsgradient av ehp. Drivkraften är att laddningsbärarna rör sig i riktning mot lägre koncentration för att jämna ut skillnaderna, vilket benämns diffusion

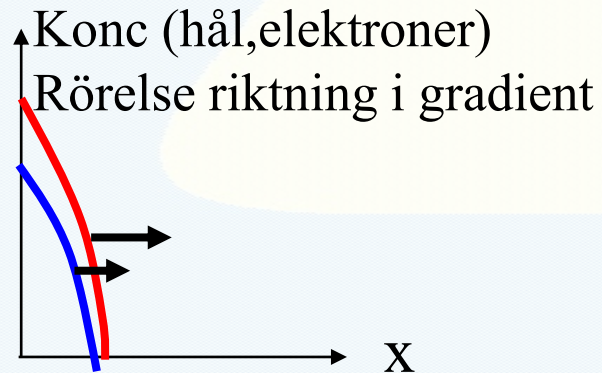
Diffusion av laddningsbärare

Flödet av elektroner

$$\phi_n(x) = -D_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$\phi_p(x) = -D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Diffusions koefficient



Diffusionströmtätheten

$$J_n(\text{diff.}) = -(-q)D_n \frac{dn(x)}{dx} = +qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p(\text{diff.}) = -(+q)D_p \frac{dp(x)}{dx} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$



Diffusion och drift av laddningsbärare

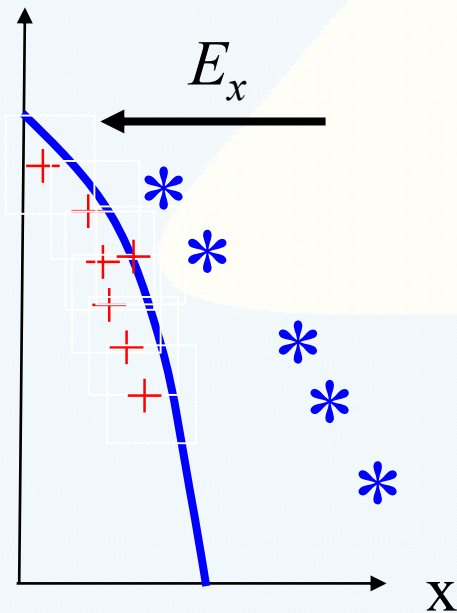
Drift och diffusions komponenter,
för elektron resp. hål strömtäthet

$$\begin{aligned} J_n(x) &= \underbrace{q\mu_n n(x)\mathcal{E}(x)}_{\text{drift}} + \underbrace{qD_n \frac{dn(x)}{dx}}_{\text{diffusion}} \\ J_p(x) &= q\mu_p p(x)\mathcal{E}(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \end{aligned}$$

Totala strömtätheten

$$J(x) = J_n(x) + J_p(x)$$

Diffusion och drift av laddningsbärare



Dopprofil med fosfor,
nettoladdningen är 0

Vi har en dopgradient, elektronerna
vill diffundera för att jämna ut
gradienten

Men elektronerna lämnar efter sig
fasta positiva joner i gittret som
resulterar i ett elektriskt fält, vilket
balanserar diffusionen

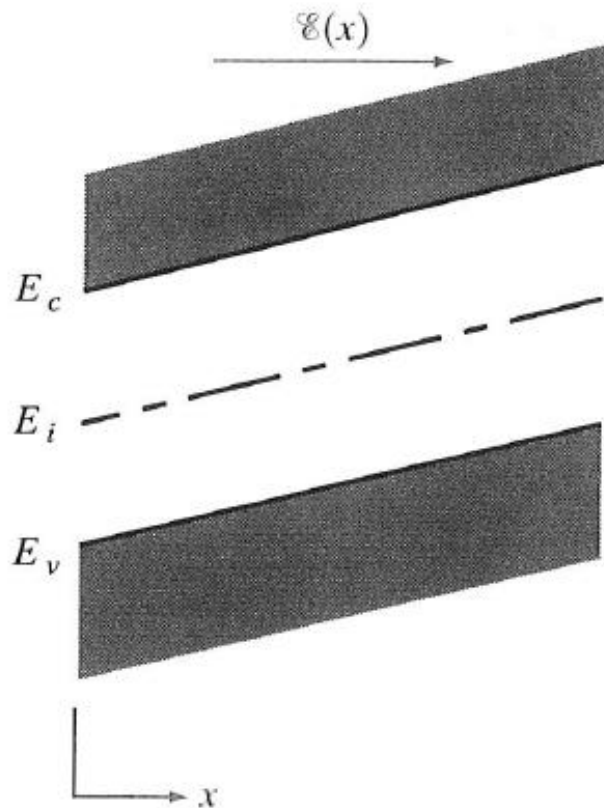
$$J_n(x) = q\mu_n n(x) \mathcal{E}(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} = 0$$

$$\bar{E}(x) = - \frac{D_n}{\mu_n n(x)} \frac{dn(x)}{dx}$$



Diffusion och drift av laddningsbärare

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{dV(x)}{dx} = -\frac{d}{dx}\left[\frac{E_i}{(-q)}\right] = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$



$$V(x) = E(x)/(-q).$$

$V(x)$ Potentiell energi per enhetsladdning

$$\vec{E}(x) = \frac{D_p}{\mu_p p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

Vid jämvikt gäller

$$\vec{E}(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{kT} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

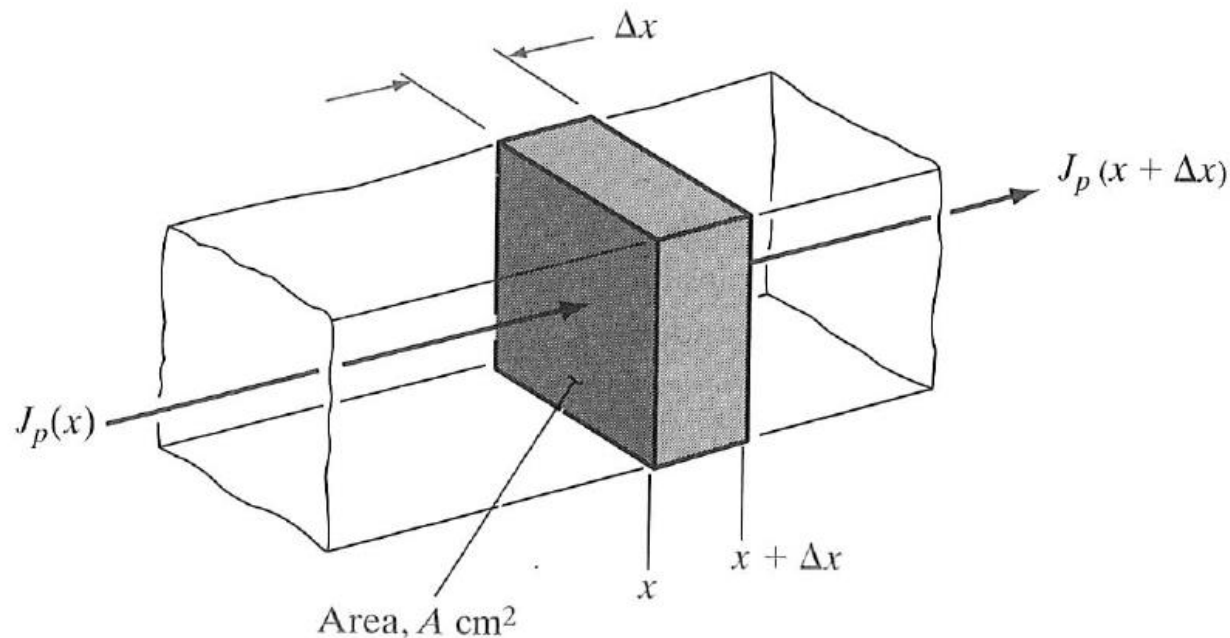
$$\frac{dE_F}{dx} = 0$$

$$\frac{dE_i}{dx} = \vec{E} \cdot q$$

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

Einsteins relation

Diffusion och Rekombination, Kontinuitetsekvationen



$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial \delta p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\delta p}{\tau_p}$$

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\delta n}{\tau_n}$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{x \rightarrow x + \Delta x} = \frac{1}{q} \frac{J_p(x) - J_p(x + \Delta x)}{\Delta x} - \frac{\delta p}{\tau_p}$$

Rate of hole buildup = $\frac{\text{increase of hole concentration in } \delta x A \text{ per unit time}}{\text{recombination rate}}$

Partiell differentialekvation



Diffusion och Rekombination, Diffusionsekvationen

$$J_n(\text{diff.}) = qD_n \frac{\partial \delta n}{\partial x}$$

Utan drift "försumbart elektriskt fält"

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} - \frac{\delta n}{\tau_n}$$

$$\frac{\partial \delta p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} - \frac{\delta p}{\tau_p}$$

Vid stationärt tillstånd
"tidsderivatan=0"

$$\frac{d^2 \delta n}{dx^2} = \frac{\delta n}{D_n \tau_n} \equiv \frac{\delta n}{L_n^2}$$

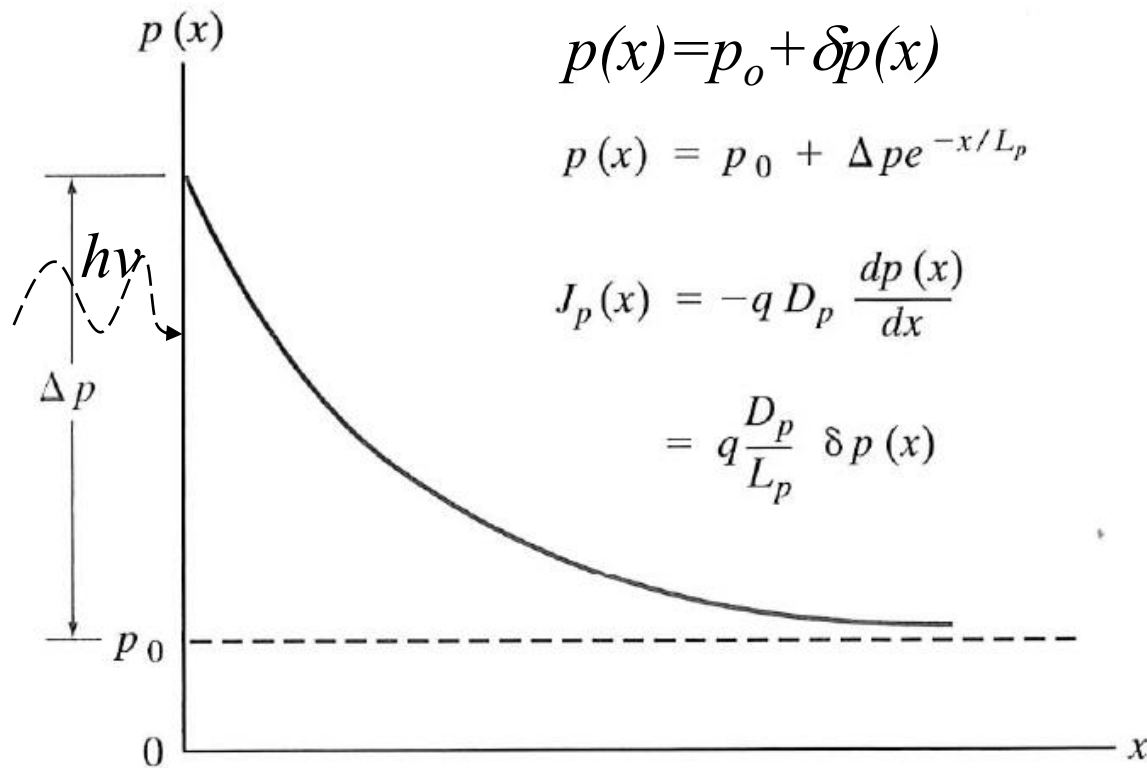
$$\frac{d^2 \delta p}{dx^2} = \frac{\delta p}{D_p \tau_p} \equiv \frac{\delta p}{L_p^2}$$

Diffusionslängd för
elektroner

$$L_n \equiv \sqrt{D_n \tau_n}$$



Diffusion och Rekombination, Diffusionsekvationen



$$p(x) = p_0 + \delta p(x)$$

$$p(x) = p_0 + \Delta p e^{-x/L_p}$$

$$J_p(x) = -q D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

$$= q \frac{D_p}{L_p} \delta p(x)$$

$$\delta p(x) = \Delta p e^{-x/L_p}$$

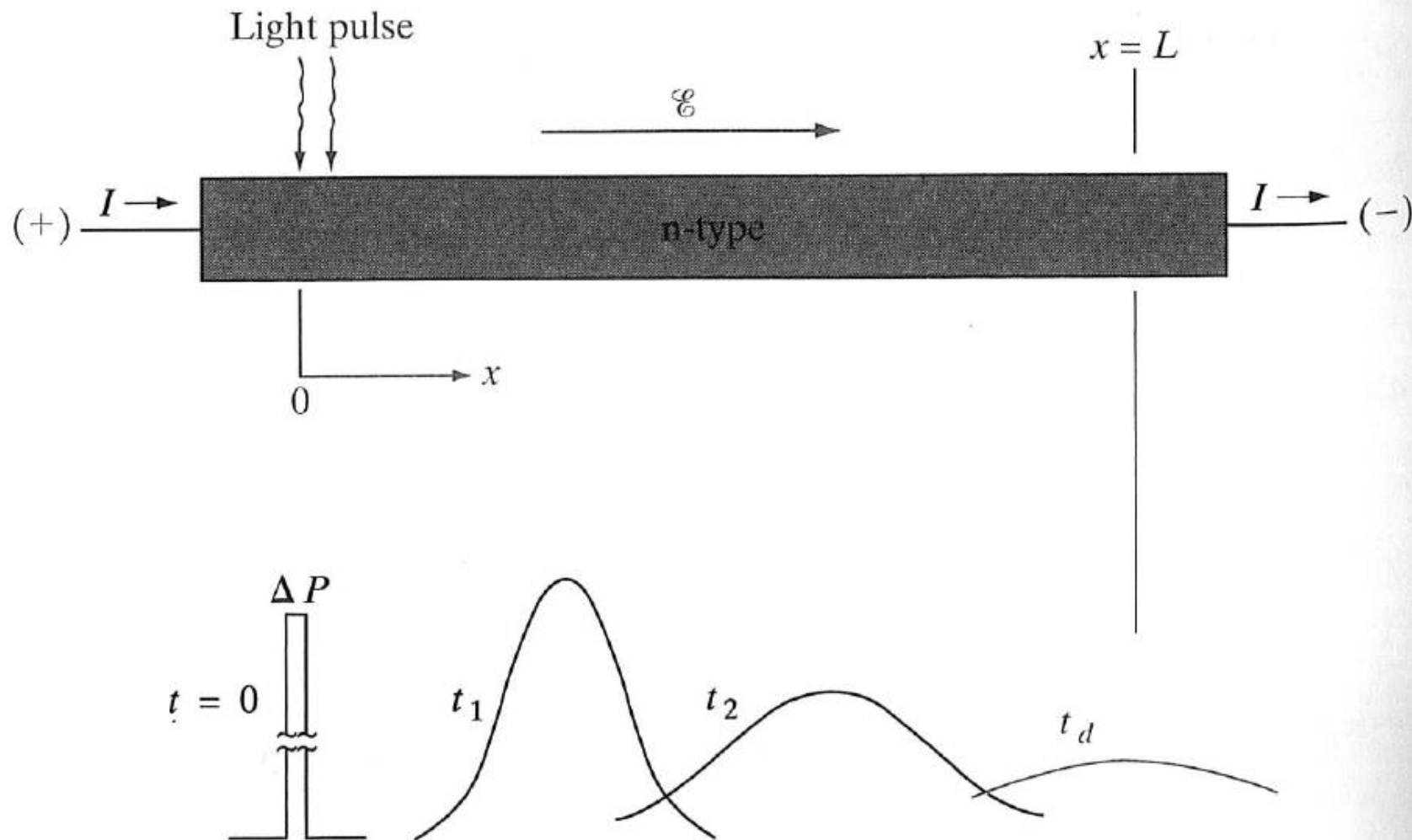
$$\langle x \rangle = \int_0^\infty x \frac{e^{-x/L_p}}{L_p} dx = L_p$$

$$J_p(x) = -q D_p \frac{dp}{dx} = -q D_p \frac{d\delta p}{dx} = q \frac{D_p}{L_p} \Delta p e^{-x/L_p} = q \frac{D_p}{L_p} \delta p(x)$$

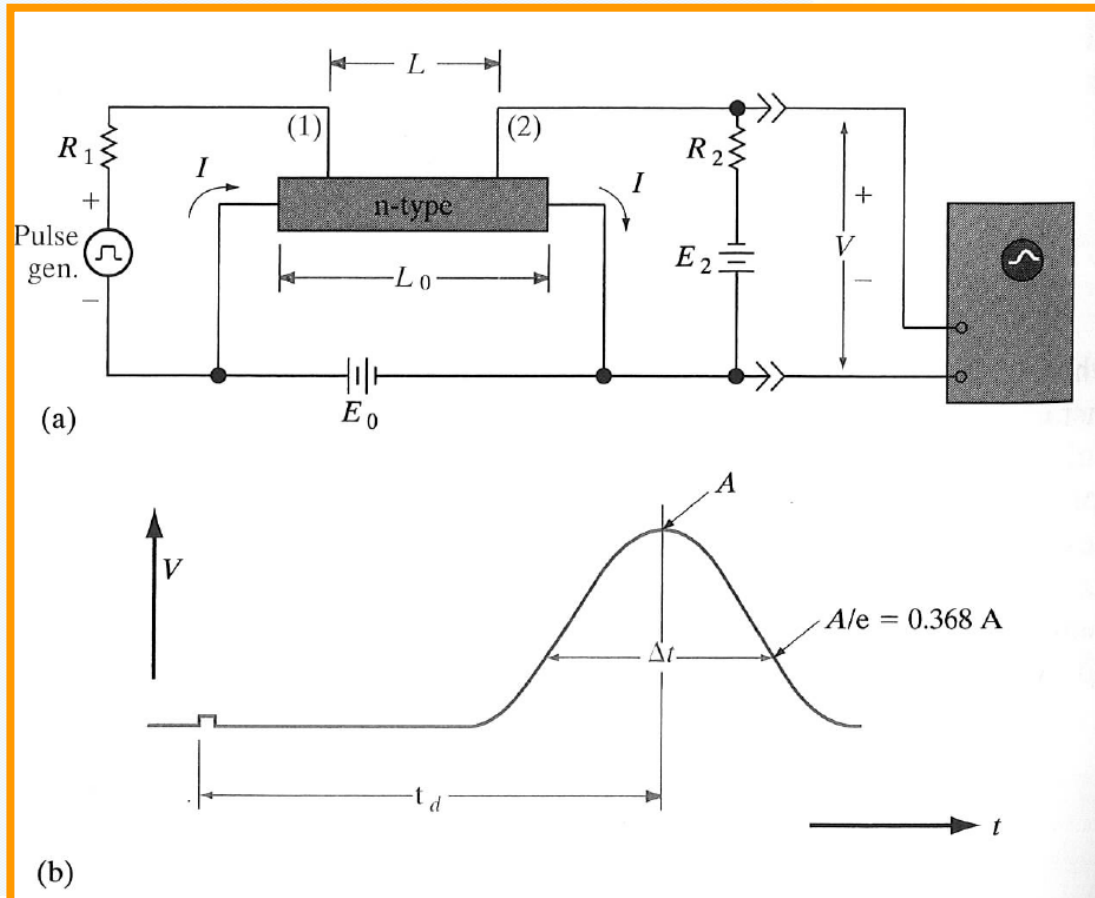


Haynes-Shockley Experimentet

Medger mätning av minoritets bärare mobilitet och
diffusions koefficient



Haynes-Shockley Experimentet



$$v_d = \frac{L}{t_d}$$

$$\mu_p = \frac{v_d}{\mathcal{E}}$$

$$\frac{\partial \delta p(x, t)}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \delta p(x, t)}{\partial x^2}$$

Partiell differentialekvation med lösning

$$\delta p(x, t) = \left[\frac{\Delta P}{2\sqrt{\pi D_p t}} \right] e^{-x^2/4D_p t}$$

ΔP är antal hål/area

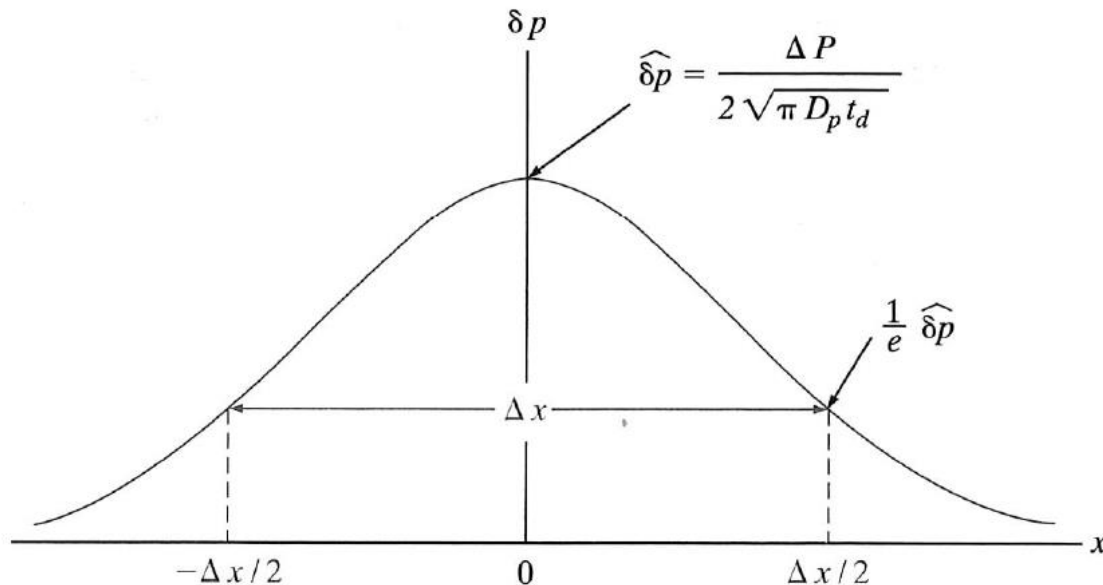


Haynes-Shockley Experimentet

$$e^{-1} \delta \hat{p} = \delta \hat{p} e^{-(\Delta x/2)^2 / 4 D_p t_d}$$

$$D_p = \frac{(\Delta x)^2}{16 t_d}$$

$\Delta x/2$ medför att gaussfördelningen sjunkit till e^{-1}



$$\Delta x = \Delta t v_d = \Delta t \frac{L}{t_d}$$

Δt , t_d och L mäts



Haynes-Shockley Experiment

An n-type Ge sample is used in the Haynes-Shockley experiment shown in Fig. 4-20. The length of the sample is 1 cm, and the probes (1) and (2) are separated by 0.95 cm. The battery voltage E_0 is 2 V. A pulse arrives at point (2) 0.25 ms after injection at (1); the width of the pulse Δt is 117 μs . Calculate the hole mobility and diffusion coefficient, and check the results against the Einstein relation.

$$\mu_p = \frac{v_d}{\mathcal{E}} = \frac{0.95 / (0.25 \times 10^{-3})}{2/1} = 1900 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$$

$$\begin{aligned} D_p &= \frac{(\Delta x)^2}{16t_d} = \frac{(\Delta t L)^2}{16t_d^3} \\ &= \frac{(117 \times 0.95)^2 \times 10^{-12}}{16(0.25)^3 \times 10^{-9}} = 49.4 \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{49.4}{1900} = 0.026 = \frac{kT}{q}$$

