Rafeindatækni fastra efna:

Gleypni og ljómun í hálfleiðurum

Kafli 8

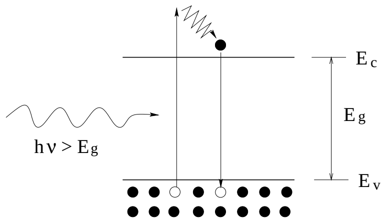
Jón Tómas Guðmundsson
tumi@hi.is

23. október 2000

Umfram hleðsluberar í hálfleiðurum

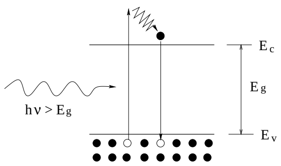
- Virkni flestra hálfleiðaratóla byggir á myndun hleðslubera umfram þá sem eru til staðar við varmajafnvægi
- Þessa umfram hleðslubera má framkalla með ljósörvun eða rafeindahríð eða þeim er spýtt inn yfir framspennt p-n-skeyti.
- Þessir umfram hleðsluberar geta orðið ráðandi í leiðni hálfleiðandi efna

Gleypni ljóseinda



- Hálfleiðari getur gleypt ljóseind með orku $h\nu \geq E_g$
- Þar eð í gildisborða sitja margar rafeindir og leiðniborði hefur fjölda ósetinna ástanda, sem örva má rafeindir upp í, eru líkur á gleypni háar fyrir $h\nu \geq E_g$
- Rafeind sem örvuð er upp í leiðniborða með gleypni á ljóseind getur haft mun hærri orku en algengt er af rafeindum í leiðniborða (nær allar hafa orku E_c nema hálfleiðarinn sé þeim mun meira íbættur)

Gleypni ljóseinda



- Örvaða rafeindin tapar hluta orkunnar til grindarinnar, með útgeislun **hljóðeinda** þar til hún er í varmajafnvægi við aðrar rafeindir í leiðniborða
- Rafeindir og holur sem eru myndaðar með þessu gleypniferli eru **umfram hleðsluberar** þar eð þeir eru í ójafnvægi við umhverfi sitt og munu óhjákvæmilega sameinast
- Meðan umframhleðsluberarnir eru til hafa þeir áhrif á leiðni efnisins

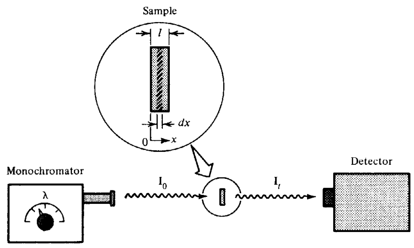
Gleypni ljóseinda

- Ljóseind með orku sem er minni en E_g getur ekki örvað rafeind úr gildisborða upp í leiðniborða
- Í hreinum hálfleiðara er óveruleg gleypni á ljóseindum með orku neðan við E_g
- Vegna þess eru sum efni gegnsæ fyrir tilteknum bylgjulengdum
- Við sjáum í gegnum suma einangrara eins og t.d. góða NaCl kristalla vegna stórrar orkugeilar
- Ef orkugeilin er um 2 eV fara aðeins langar bylgjulengdir (innrauðar) og rauði hluti bylgjurófsins í gegn
- Orkugeil um 3 eV hleypir öllu sýnilega rófinu í gegn

Gleypni ljóseinda

- Ef að ljóseindageisli með orku $h\nu > E_\mathrm{g}$ fellur á hálfleiðara eru miklar líkur til þess að ljóseind sé gleypt.
- Það ræðst af eiginleikum hálfleiðarans hver gleypnin er
- Við væntum þess að hlutfall ljóss sem fer í gegn og ljóssins sem efnið gleypir ráðist af bylgjulengd ljóssins og þykkt sýnisins
- Gerum ráð fyrir að ljóseindageisla af styrk I_0 (ljóseindir/cm^2 s) sé beint að sýni af þykkt ℓ
- Geislinn samanstendur af ljóseindum af tiltekinni bylgjulengd λ sem valin er með litrófsgreini (e. monochromator)

Gleypni ljóseinda

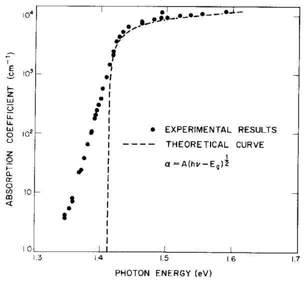


- Þegar geislinn fer um sýnið þá má reikna ljósstyrkinn við x með því að gera ráð fyrir gleypni ljóseinda innan dx
- Þar eð ljóseindin sem hefur ferðast fjarlægðina x frá yfirborðinu hefur ekkert minni eru líkurnar á því að hún sé gleypt á vegalengdinni dx fasti

Gleypni ljóseinda

- Skerðing í ljósstyrk er því í réttu hlutfalli við ljósstyrkinn í x
$$-\frac{\mathrm{d}I(x)}{\mathrm{d}x} = \alpha I(x)$$
- Lausn þessarar jöfnu er þess vegna
$$I(x) = I_0 \exp[-\alpha x]$$
- Þá er styrkur ljóssins sem ferðast í gegnum þykkt sýnisins ℓ
$$I(\ell) = I_0 \exp[-\alpha \ell]$$
- Stuðullinn α er nefndur **gleypnistuðull ljóss** eða **ísogsstuðull** (e. absorption coefficient) og er gefinn í m^{-1}
- Gleypnistuðullinn er háður bylgjulengd og efni því sem á er lýst

Gleypni ljóseinda

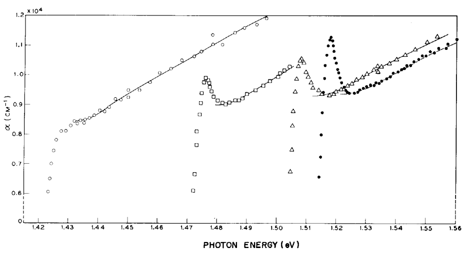


- Í hálfleiðurum er gleypni óveruleg fyrir langar bylgjulengdir ($h\nu$ lágt) en all veruleg fyrir ljóseindir með orku sem er hærri en orkugeilin E_g
- Samband milli orku ljóseinda og bylgjulengdar er gefið með

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda}$$

gefur E í eV þegar λ er gefið í míkrómetrum.

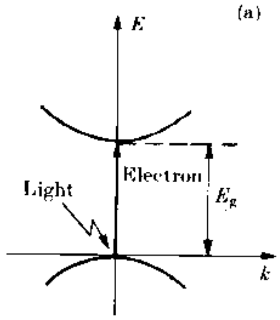
Gleypni ljóseinda



- Gleypni í GaAs við 294 K, 186 K, 90 K og 21 K.
- Orkugeilin dregst saman við aukið hitastig

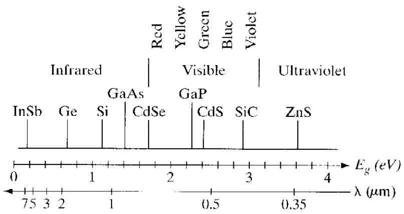
M. D. Sturge, Phys. Rev., **127** (1962) 768

Gleypni ljóseinda



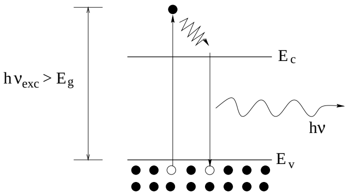
- Þetta á sér sannarlega stað í hálfleiðurum sem hafa **beina orkugeil** (t.d. GaAs)
- Ef orkugeilin er bein er $E - k$ borðamyndin eins og sýnt er á mynd (a) hér að neðan, þar sem stærsta gildi gildisborða kemur við sama k -gildi og lágmark leiðniborða

Gleypni ljóseinda



- Á myndinni sést samanburður á orkugeil nokkurra algengra hálfleiðara og til samanburðar er sýnt sýnilega svið rófsins
- GaAs, Si, Ge og InSb liggja í innrauðu, utan við sýnilega sviðið
- Aðrir hálfleiðarar eins og GaP og CdS hafa orkugeil sem er nægilega víð til að hleypa í gegn sýnilegu ljósi
- Athuga ber að hálfleiðari gleypir ljóseindir með orku sem er jöfn orkugeilinni og hærri

Ljómun



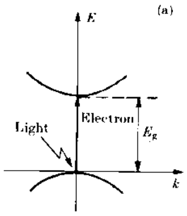
- Þegar rafeinda-holupar er myndað í hálfleiðara eða þegar hleðsluberi er örvaður upp í hærra veiluástand þá getur orðið ljósútgeislun í efninu
- Margir hálfleiðarar henta vel til ljósútgeislunar og þá einkum samsettir hálfleiðarar með beina orkugeil (t.d. GaAs og GaN)
- Eiginleikinn að gefa frá sér ljós er nefndur **ljómun**

Ljómun

Ljómun má flokka:

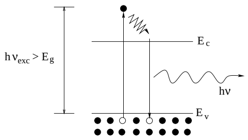
- Ef hleðsluberar eru örvaðir þegar þeir gleypa ljóseindir þá er útgeislunin sem stafar af samruna örvaðra hleðslubera nefnd **ljósljómun** (e. photoluminescence)
- Þegar örvaðir hleðsluberar eru framkallaðir með háorkurafeindahríð höfum við **bakskautsljómun** (e. cathodeluminescence)
- Þegar örvunin stafar af rafstraum höfum við **rafskautsljómun**
(e. electrodeluminescence)

Ljósljómun



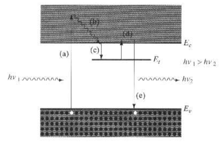
- Einfaldasta tilfelli ljósútgeislunar frá hálfleiðara er bein örvun og samruni rafeinda-holu pars
- Þegar samruninn verður beinn, frekar en um veiluástand, er útgeislunin ljós með orku orkugeilar
- Fyrir stöðuga örvun verður samruninn á sama hraða og örvunin, einni ljóseind er geislaða út fyrir hverja ljóseind sem er gleypt

Ljósljómun



- Beinn samruni er hratt ferli, meðallíftími rafeinda-holupars er að jafnaði af stærðargráðunni 10^{-8} s eða minni
- Þetta segir að útgeislun ljóseinda hættir um það bil 10^{-8} s eftir að örvun er hætt
- Svo hröð ljómunarferli eru gjarnan nefnd **flúrljómun** (e. fluorescence)
- Í sumum efnum getur ljósútgeislun varað í sekúndur eða mínútur eftir að örvun er hætt
- Þessi hægu ferli eru gjarnan nefnd **fosfórljómun** (e. phosphorescence) og efnin **fosfórefni**

Ljósljómun-Hægt ferli



- Efnið inniheldur veilu (gildru) (t.d. vegna íbótar) í orkugeilinni sem hefur sterka tilhneigingu til að grípa rafeind úr leiðniborðanum
- Ferlið sem myndin sýnir:

  (a) Ljóseind með orku $h\nu_1 > E_g$ er gleypt og myndar við það rafeinda-holu par

  (b) Örvaða rafeindin gefur orkuna frá sér til grindarinnar (útgeislun hljóðeindar) þar til hún situr í neðri hluta leiðniborða (d)

  (e) Að lokum verður beinn samruni þegar rafeindin fellur í tómt ástand í gildisborða og gefur frá sér ljóseind með orku $h\nu_2$, nálega orku orkugeilarinnar

Ljósljómun

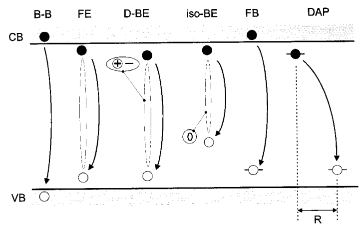
- Töfin á milli örvunar og samruna getur verið tiltölulega löng ef líkurnar á endurörvun upp úr gildrunni í leiðniborða á ný eru litlar
- Ef líkurnar á að rafeind sé hremmd af veilu eru meiri en líkur á samruna þá getur rafeindin farið nokkrum sinnum milli gildru og leiðniborða áður en samruni á sér stað
- Í slíku efni varir fosfórljómun tiltölulega lengi eftir að örvun er hætt
- Litur ljóssins sem fosfórefni geislar út ræðst að verulegu leyti af íbót efnis, þar eð margar útgeislandi færslur eru frá veiluástöndum í orkugeil
- Þetta skiptir t.d. máli við framleiðslu skjáa fyrir litasjónvörp

Ljósljómun-Flúrlampi

- Flúrlampar byggja á ljósljómun
- Slíkur lampi er gasfyllt rör (t.d. blanda af argon og kvikasilfri), með fosforljómandi húð á innra byrðinu
- Rafgas er myndað með rafspennu og örvuðu atómin í gasinu geisla frá sér ljóseindum, sem eru að mestu í sýnilega og útfjólubláa hluta litrófsins
- Ljóseindirnar eru gleyptar af fosfórhúðinni, sem að senda út ljóseindir á sýnilega sviðinu
- Nýtni þessara lampa er mun meiri en í hefðbundnum ljósaperum
- Litrófið frá slíkum lampa má ákvarða með vali á fosfórefni

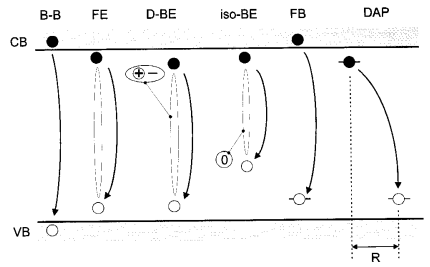
$\Longrightarrow$ Dæmi 8.1.

Ljósljómun



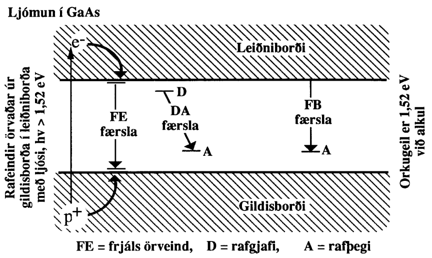
- Þegar rafeindin er komin neðst í leiðniborðan getur hún sameinast holu í gildisborða beint (e. band-to-band (B-B)) eða tekið aukaskref
- Þar eð rafeind og hola hafa gagnstæðar hleðslur dragast þær að hvor annarri vegna Coulombkraftsins og mynda bundið ástand
- Þetta ástand má líta á sem **sýndareind** sem nefnd er **örveind**
- Örveind er frjáls að því að ferðast um kristallagrindina og því gjarnan nefnd **frjáls örveind** (e. free exciton (FE))

Ljósljómun



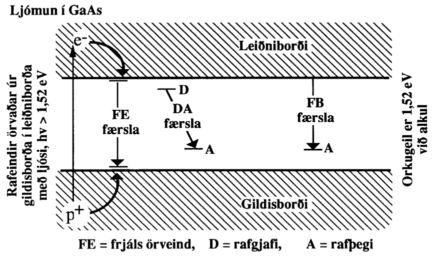
- Örveind getur einnig staðið fyrir sýndareind sem er staðbundin við tiltekna veilu. Þá er hún nefnd **bundin örveind** (e. bound exciton (BE))
- Bundnar örveindir geta einnig verið tengdar rafgjafa (D-BE) eða rafþega (A-BE) veilu

Ljósljómun



- Samruni frjálsrar eindar við bundna (e. Free to bound (FB)) er þegar rafeind (hola) í leiðniborða (gildisborða) rennur saman við holu (rafeind) sem bundin er við rafþega (rafgjafa)
- Samruni rafeindar, sem er bundin við rafgjafa, við holu, sem bundin er rafþega er þá samruni rafgjafa-rafþega pars (e. donor-acceptor pair (DAP))

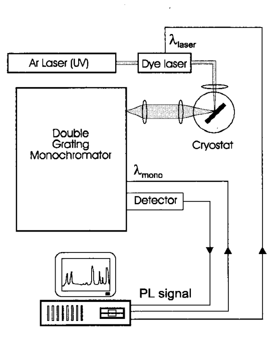
Ljósljómun



- Rafgjafinn og rafþeginn eru hlutlausir fyrir samrunann en sitja svo hlaðnir á eftir
- Þess vegna er Coulomb víxlverkun á milli þeirra. Coulomb orkan sem vinnst leggst við útgeislaða orku og orka útgeislaðrar ljóseindar ræðst því af fjarlægðinni milli rafgjafa og rafþega, R

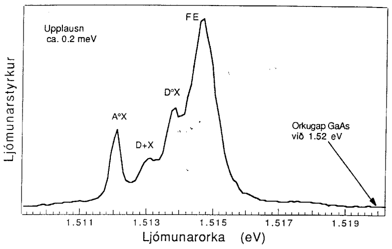
$$h\nu \approx E_{\mathrm{g}} - (E_{\mathrm{D}} + E_{\mathrm{A}}) + \frac{e^2}{\epsilon R}$$

Ljósljómun-mælitækni



- Á sýnið er lýst með argon jónaleysi eða stillanlegum litleysi, sem þá er pumpaður með argonleysinum
- Hluta af ljómuninni frá sýninu er safnað og beint á litrófsgreini
- Ljósið frá litrófsgreininum er numið og sent á tölvu sem stjórnar mælingunni og safnar gögnunum
- Oftast eru sýnin kæld niður í 2 – 14 K

Ljósljómun



- Dæmigerð ljómun frá GaAs við orkugeilina
- Frjáls örveind er táknuð með FE og bundnar örveindir með D^+X og D^0X eftir gerð veilu
- A stendur fyrir rafþega (e. acceptor) og D fyrir rafgjafa (e. donor)

I. S. Hauksson og H. P. Gíslason, Eðlisfræði á Íslandi V, (1991)

Ljósljómun

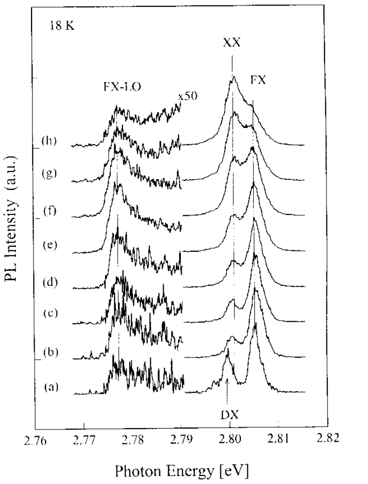
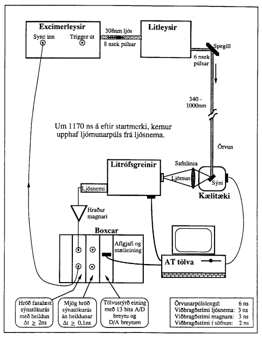


FIG. 1. Integrated photoluminescence emission spectra taken under picosecond excitation at 3.18 eV (390 nm). The excitation densities are: (a) 1, (b) 10, (c) 25, (d) 50, (e) 100, (f) 190, (g) 380, (h) 800 nJ/cm².

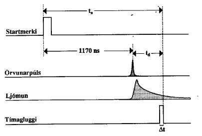
- Ljómun frá ZnSe við orkugeilina

I. S. Hauksson et al. J. Appl. Phys, **83** (1998) 2035

Ljósljómun



- Uppstilling tækja til tímauppleystrar mælingar á ljómun



J. Pétursson et al., Eðlisfræði á Íslandi V, (1991)

Rafskautsljómun

- Í **ljóstvisti** (e. light emitting diode (LED)) veldur rafstraumur innspýtingu víkjandi bera inn á svæði innan kristalls þar sem þeir sameinast ríkjandi berum, sem veldur útgeislun
- Þegar orkugeilin er óbein eins og í kísli og german fer orkan sem losnar sem varmi til grindar
- Ef orkugeilin er bein getur töluverð útgeislun komið frá framspenntum samskeytum
- Rafskautsljómun er því afar notadrjúg og notkun ljóstvista er all almenn
- **Hálfleiðaraleysirinn** er önnur hagnýting á samruna í framspenntum p-n-skeytum

Beinn samruni

- Rafeindir í leiðniborða hálfleiðara geta runnið saman við holur í gildisborða bæði beint og óbeint
- Breyting á rafeindaþéttleika í leiðniborða er þá mismunur varmamyndunar $\alpha_{\mathrm{r}} n_{\mathrm{i}}^2$ og samrunahraða eða

$$\frac{\mathrm{d}n(t)}{\mathrm{d}t} = \alpha_{\mathrm{r}} n_{\mathrm{i}}^2 - \alpha_{\mathrm{r}} n(t) p(t)$$

- Gerum nú ráð fyrir því að umfram rafeinda-holupör séu mynduð við $t = 0$, t.d með ljósblossa, og upphafs ummframþéttleiki rafeinda og hola Δn og Δp sé jafn
- Þegar rafeindir og holur síðan samaeinast í pörum , er augnabliksgildi umframþéttleika þeirra $\delta n(t)$ og $\delta p(t)$ einnig jafn

Beinn samruni

- Við ritum því heildarþéttleikann sem fall af jafnvægis gildum rafeinda- og holuþétleika n_0 og p_0 og umframhleðsluberaþéttleika $\delta n(t) = \delta p(t)$

$$\frac{\mathrm{d}n(t)}{\mathrm{d}t} = \alpha_{\mathrm{r}} n_{\mathrm{i}}^2 - \alpha_{\mathrm{r}} \left[n_0 + \delta n(t)\right]\left[p_0 + \delta p(t)\right]$$
$$= -\alpha_{\mathrm{r}} \left[(n_0 + p_0)\delta n(t) + \delta n^2(t)\right]$$

- Þetta er ólínuleg diffurjafna sem erfitt getur verið að leysa óbreytta
- Ef umframhleðsluberaþéttleiki er lítill má sleppa liðnum $\delta n^2(t)$
- Ef efnið er íbætt (e. extrinsic), þá er liðurinn sem lýsir jafnvægisgildi minnihlutabera óvera. T.d. ef efnið er af $p-$gerð ($p_0 \gg n_0$) þá er jafnan

$$\frac{\mathrm{d}n(t)}{\mathrm{d}t} = -\alpha_{\mathrm{r}} p_0 \delta n(t)$$

Beinn samruni

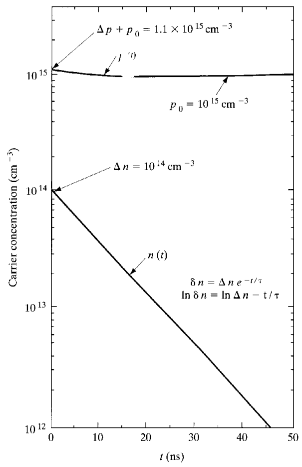
- Lausn þessarar jöfnu er veldisdeyfing frá upphaflegum umframhleðsluberaþéttleika Δn

$$\delta n(t) = \Delta n \exp\left(-\alpha_{\mathrm{r}} p_0 t\right) = \Delta n \exp\left(-t/\tau_{\mathrm{n}}\right)$$

- Umframhleðsluberar rafeindir í $p-$gerð af hálfleiðara sameinast með deyfistuðlinum $\tau_{\mathrm{n}} = (\alpha_{\mathrm{r}} p_0)^{-1}$, sem nefndur er líftími samruna
- Þar sem hér er líftíminn reiknaður út frá víkjandi berum er τ_{n} einnig oft nefndur **líftími víkjandi bera** eða **líftími minnihlutabera**

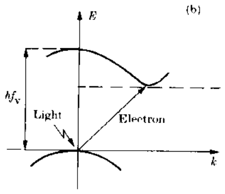
$\Longrightarrow$ Dæmi 8.2.

Beinn samruni



- Fækkun umframrafeinda og hola með samruna, með $\Delta n = \Delta p = 0.1 p_0$, þar sem n_0 er óvera og $\tau = 10$ ns

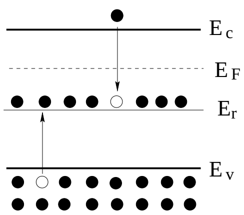
Óbeinn samruni



- Hálfleiðarar úr IV dálki lotukerfisins og sumir samsettir hálfleiðarar hafa **óbeina orkugeil**
- Þá eru líkur á beinum samruna rafeinda-holupars fremur litlar
- Flest samrunaferli í efnum með óbeina orkugeil eiga sér stað um samrunastöðvar, sem þá eru veiluástönd í orkugeilinni
- Orkutapið er þá oftast í formi varmaflutnings til grindar fremur en útgeislun ljóseinda

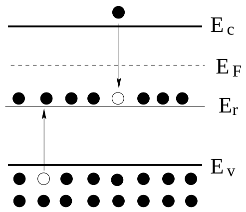
Óbeinn samruni

- Hvaða íbótar- eða grindarveila sem vera vill getur þjónað sem samrunastöð
- Hún þarf aðeins að geta tekið við hleðslubera af einni gerð og jafnframt hremma andstæðan hleðslubera og þannig eyða pari



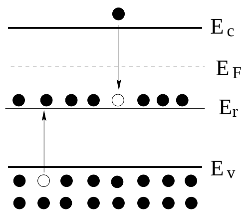
- Dæmi um samrunastöð með orku E_r sem er neðan við E_F og þess vegna full af rafeindum

Óbeinn samruni



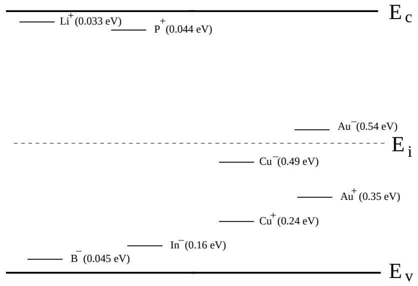
- Þegar umfram rafeindir og holur eru myndaðar í þessu efni, þá sameinast sérhver rafeinda-holupar við E_r í tveimur skrefum
  - Fyrst er hola gripin
  - Síðan er rafeind gripin
- Að hola sé gleypt af samrunastöðinni jafngildir því að rafeind við E_r falli niður í gildisborða og skilji eftir ósetið ástand í samrunastöðinni
- Við það að samrunastöðinn gleypi holu, tapast orka sem varmi til grindar

Óbeinn samruni



- Á svipaðan hátt tapast orku þegar rafeind fellur niður úr leiðniborða niður í samrunastöðina og fyllir ósetna ástandið
- Þegar báðum þessum ferlum er lokið er samrunastöðin í sínu upphaflega ástandi (fullsetin rafeindum) og rafeinda-holupar er horfið
- Samrunastöðin er þá tilbúin að taka þátt í öðru slíku ferli

Íbótarveilur í kísli



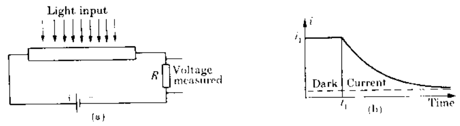
- Íbótarveilan er ýmist rafgjafi (jákvæð) eða rafþegi (neikvæð) þegar hún er jónuð
- Sumar veilur geta myndað mörg orkustig í orkugeilinni eins og t.d. gull
- Au myndar rafgjafaástand (Au^+) 0.34 eV ofan við gildisborða og rafþegaástand (Au^-) 0.54 eV neðan við leiðniborða

Líftími hleðslubera

- Venjulega höfum við meiri áhuga á líftíma víkjandi bera
- Þetta er vegna þess að innspýting eða sköpun með ljósi eykur þéttleika víkjandi bera umtalsvert á meðan þéttleiki ríkjandi bera breytist óverulega
- Þéttleiki víkjandi bera getur því verið verulega meiri en hann er við varmajafnvægi
- Gerum ráð fyrir kísli með 10^{22} full jónuð íbótaratóm á rúmmetra
- Nú er $n_{\rm i}$ fyrir kísil um 10^{16} m^{-3} við stofuhita, þannig að $p \approx 10^{10}$ m^{-3}
- Gerum ráð fyrir að með ljósi séu framkölluð 10^{15} rafeinda-holu pör á hvern rúmmetra
- Holuþéttleikinn í kíslinum hefur þá aukist 10^5 fallt en breyting á rafeindaþéttleika er óveruleg

Líftími hleðslubera

- Það er því auðvelt að sjá breytingu í holustraumnum
- Samruna og hremmingu má skoða með því að mæla **ljósleiðnihnignun** (e. photoconductive decay)



- Lýst er á hálfleiðarann, slökkt á ljósinu við $t = t_1$, straumurinn um viðnámið R fellur og út frá því má ákvarða líftíma hola í kíslinum
- Fjöldi umframhleðslubera fellur með tilteknum deyfistuðli sem er einkennandi fyrir samrunaferlið
- Leiðni sýnis hlýtir jöfnunni

$$\sigma(t) = e\,[n(t)\mu_{\rm n} + p(t)\mu_{\rm p}]$$

Sýndar-Fermiástand

- Gerum ráð fyrir að við höfum hálfleiðara þar sem varmamyndun rafeinda-holupara er með hraðanum $g(T) = g_{\rm i}$
- Þessi myndun er í jafnvægi við samruna hleðslubera svo að jafnvægis þéttleika hleðslubera n_0 og p_0 er við haldið

$$g(T) = \alpha_{\rm r} n_{\rm i}^2 = \alpha_{\rm r} n_0 p_0$$

- Við þessa samrunajöfnu má bæta áhrifum veiluástanda eða örvun milli borða
- Ef lýst er á sýni í æstæði bætist við liður sem lýsir myndun vegna ljósörvunar $g_{\rm op}$ og hleðsluberaþéttleikinn n og p nær nýjum æstæðum gildum
- Nú má rita jöfnuna sem

$$g(T) + g_{\rm op} = \alpha_{\rm r} n_0 p_0 + \alpha_{\rm r}(n_0 + \delta n)(p_0 + \delta p)$$

Sýndar-Fermiástand

- Í æstæðum samruna þar sem eru engar gildrur er $\delta n = \delta p$ eða

  $g(T) + g_{\mathrm{op}} = \alpha_{\mathrm{r}} n_0 p_0 + \alpha_{\mathrm{r}} \left[(n_0 + p_0)\delta n + \delta n^2 \right]$

- Liðurinn $\alpha_{\mathrm{r}} n_0 p_0$ lýsir varmamyndunarhraðanum $g(T)$
- Við lága örvun er δn^2 lítil stærð og

$$g_{\mathrm{op}} = \alpha_{\mathrm{r}} \left[(n_0 + p_0)\delta n \right] = \frac{\delta n}{\tau_{\mathrm{n}}}$$

- Því má rita umframhleðsluberaþéttleikann sem

$$\delta n = \delta p = g_{\mathrm{op}} \tau_{\mathrm{n}}$$

- Hugtakið Fermiorkustig hefur aðeins merkingu þegar engir umframhleðsluberar eru til staðar

$\Longrightarrow$ Dæmi 8.3.

Sýndar-Fermiástand

- Rita má jöfnur fyrir æstæðan þéttleika á sama formi og áður með því að skilgreina sýndar-Fermiorkustig E_{Fn} og E_{Fp} fyrir rafeindir og holur
- Hleðsluberaþéttleiki er þá

$$n = n_{\mathrm{i}} \exp\left[(E_{\mathrm{Fn}} - E_{\mathrm{i}})/kT \right]$$

$$p = n_{\mathrm{i}} \exp\left[(E_{\mathrm{i}} - E_{\mathrm{Fp}})/kT \right]$$

- Fjarlægðin milli sýndar-Fermiástandanna $E_{\mathrm{Fn}} - E_{\mathrm{Fp}}$ er beinn mælikvarði á það hve mikið frávik er frá jafnvægisástandi $E_{\mathrm{Fn}} = E_{\mathrm{Fp}} = E_{\mathrm{F}}$

$\Longrightarrow$ Dæmi 8.3.

$\Longrightarrow$ Dæmi 8.4.

Ljósleiðnitól

- Það má nýta tól, sem breyta leiðni sinni við það að á þau sé lýst, til ýmissa hluta
- Þau geta sett af stað lýsingu þegar rökkvar eða nýst sem ljósnemar í myndavélum
- Þegar velja á ljósleiðnitól í tiltekið verk þarf að huga að því á hvaða bylgjulengarbili það vinnu, hve hratt það svarar og ljósnæmni efnis
- Þannig er CdS ($E_{\mathrm{g}} = 2.42$ eV) notaður sem ljósnemi á sýnilega sviðinu og Ge (0.67 eV) og InSb (0.18 eV) á innrauða sviðinu

Heimildir

[1] Ben G. Streetman og Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed., Prentice Hall, 2000, kaflar 4.1 – 4.3

[2] J. I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*, Dover Publications, 1975

[3] Jón Pétursson, Bjarki A. Brynjarsson og Hafliði P. Gíslason, Líftímar ljómunar í III-V hálfleiðurum, í *Eðlisfræði á Íslandi V*, Eðlisfræðifélag Íslands, 1991

[4] Ísak S. Hauksson og Hafliði P. Gíslason, Ljómunarmælingar á tvívíðum GaAs-AlGaAs sýnum, í *Eðlisfræði á Íslandi V*, Eðlisfræðifélag Íslands, 1991

[5] Tryggvi Egilsson, *Bound Ecitons in Silicon Carbide*, PhD Thesis, Linköping University, 1999