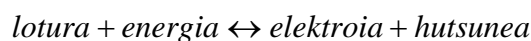


4. SORRERA ETA BIRKONBINAKETA

Sorrera eta birkonbinaketa orekatik kanpo gertatzen diren prozesu nagusietakoak dira. Hona kontrako bi prozesu horien definizio zehatza:

- Sorрera eramaileak sortzen dituen prozesua da. Hau da, elektroi askeak (e^- edo e_{aske}) eta hutsuneak (h^+) pareka sortzen dituen erreakzioa da.
- Birkonbinatzea eramaileak pareka desagerrarazten dituen prozesua da. Hau da, lotura kobalenteak berreraikitzen dituen erreakzioa da.



Erreakzio osagarriak direnez, askotan prozesu bakartzat (G-R) jotzen ditugu.

Energia -banden teorian, elektroi baten balentziako bandatik eroapeneko bandarako trantsizioa da sorрera (horretarako, E_G baino energia handiagoa eman behar diogu elektroiari). Birkonbinaketa elektroia ren kontrako trantsizioari dagokio (eroapeneko bandatik balentziako bandara pasatzean, E_G energia askatuko da).

Sorrerarako behar den energia materialari emateko, edo birkonbinaketa-prozesuaren energia askatzeko, hainbat bide daude: tenperatura igotzea (sorrera-birkonbinaketa termikoak); materiala argizatze edo argia igotzea (fotosorrera eta fotobirkonbinaketa,

non: $lotura + fotoia \leftrightarrow e^- + h^+$); beste partikula batzuek materiala bonbardatzea (elektroi, neutroi edo X izpiak erabiliz) ...

Denbora unitateko eta bolumen unitateko sorreren kopurua edo kontzentrazioa erdieroalearen eta tenperaturaren menpe dago, besteak beste: $G = G$ (materiala, T ...). Birkonbinaketa, horietaz gain, eramaileen kontzentrazioaren menpe dago: $R = R$ (materiala, T, n, p ...) zeren birkonbinaketa elektroi batek eta hutsune batek elkar topatzeko probabilitatearen menpe baitago eta probabilitate hori kontzentrazioaren menpe baitago. Kontuan hartu behar da sorrera eta birkonbinaketa termikoak etengabe gertatzen ari direla. Oreak termodinamikoan, sorrera eta birkonbinaketaren abiadurak berdinak dira, eta, beraz, eramaileen batez besteko kontzentrazioek konstante irauten dute: $G_{th} = R_{th} = k \cdot n_i^2$.

Bai sorrera bai birkonbinaketa erdieroalearen bolumenean edo gainazalean gerta daitezke; azken kasu horretan izaten dituzten berezitasunak direla-eta, *gainazaleko sorrera* eta *gainazaleko birkonbinaketa* deitzen diogu.

Sorrerak eta birkonbinaketak zeharkako eragina dute erdieroaleetan agertzen diren korranteetan, atoiko eta barreiapeneko prozesuetan parte hartzen duten eramaileen kontzentrazioak aldatzen baitituzte.

4.1 Birkonbinaketaren abiadura oreka termodinamikoetik kanpo

Erdieroaleetan, *masa-ekintzaren legea* puntu guztietan betetzea orekaren ezaugarria da. Hau da, n_0 eta p_0 orekako elektroi eta hutsuneen kontzentrazioak badira:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

Orekatik kanpo gaudenean (kanpoko eragin bat erdieroalean aplikatzen ari bagara edo aspaldiko kitzikapen baten efektuak oraindik badirau), elektroi eta hutsuneen kontzentrazio berriak izango ditugu: n eta p, eta, orain: $n \cdot p \neq n_i^2$

Zehazkiago:

- Kanpoko kausa batek eramaileen injekzioa eragin badu $\rightarrow n \cdot p > n_i^2$
- Kanpoko kausa batek eramaileak atera baditu $\rightarrow n \cdot p < n_i^2$

Kanpoko kausa eten ondoren, egoera *dinamikoan* gaude, zeinean materialaren barneko erreakzioa bakarrik geratuko baita. Erreakzio hori materiala oreka egoerara itzularazten saiatuko da.

Sorrera-birkonbinaketa prozesuak matematikoki karakterizatzeko, soberakinekin lan egiten da, elektroi eta hutsuneen kontzentrazio osoekin lan egin ordez:

$$\Delta n = n' = n - n_0$$

$$\Delta p = p' = p - p_0$$

eta $p' = n'$ (kargaren neutraltasuna betetzeko)

Hau da, n' eta p' orekarekin konparatuta dauden soberako kontzentrazioak edo soberakinak dira.

Argi dagoenez, $n' < 0$ eta $p' < 0$ izateak esan nahi du kanpoko kausa dela eta eramaileen falta edo eskasia dugula.

INJEKZIO MAILAK: INJEKZIO BAXUA ETA INJEKZIO ALTUA

Kasu interesgarri askotan, soberako urrienak oreka termodinamikoan dauden ugariak baino askoz gutxiago izaten dira (p motakoa bada, $n' \ll p_0$; n motakoa bada, $p' \ll n_0$) eta injekzio baxuan (IB) gaudela esango dugu. Bestela, injekzio ertainean edo altuan (IA) egongo gara.

Injekzio baxuan izendapen orokorragoa aplikatuz:

$$m' \ll M_0$$

$$m = m_0 + m'$$

$$M = M_0 + M' \quad \text{eta, kargaren neutraltasunaz, } m' = M',$$

$$\text{Injekzio baxuan: } M = M_0 + m' \approx M_0$$

Askotan, $M_0 \gg m' \gg m_0$ betetzen da, eta orduan $m \sim m'$.

Hau da, injekzio maila baxuan ugarienen kontzentrazioa ia aldatzen ez den arren, urrienen kopurua hainbat bider handitu ohi da. Horren ondorioz, injekzio baxuan (hau da, gure ohiko egoeran), urrienen soberakinarekin lan egiten dugu.

Oreka termodinamikoetik kanpo:

$$R \neq R_{th} \quad (\text{egoera iragankorrean nahiz geldikorrean})$$

Hau da, kanpoko kausak sorreraren eta birkonbinaketaren arteko balantzea apurtzen du. Kanpoko kausari aurre egiteko, materiala oreka termodinamikora itzultzen saiatzen da. Materialaren erantzuna -oreka edo, hobeto esanda, egonkortasuna bilatzeko materialak egiten duen ahalegina- neurtzeko, *U*, *Birkonbinaketaren Abiadura Garbia* (laburtuz, askotan birkonbinaketa izango dena) erabiltzen da, eta honela definitzen:

$$U = R - R_{th} \quad \text{Birkonbinaketa Osoa} - \text{Birkonbinaketa (edo sorrera) termikoa}$$

- $U > 0$ denean, ($R > R_{th}$), kanpoko kausa eramaileak injektatzen ari da (edo, orain, *gutxi* eragiten aritu da eta efektua oraindik nabaritzen da) eta, laginean, eramaileen birkonbinaketa areagotzen da (orekan zegoena baino handiagoa da).
- $U < 0$ denean, ($R < R_{th}$), kanpoko kausa eramaile-falta bat sortzen ari da (edo eragin izan du) eta sistemak eramaileen birkonbinaketa gutxituz egiten dio aurre (sorrera areagotu dela ematen du, zeren eta sorrera termikoa ez baita aldatzen).

Aipatu denez, bai sorrera bai birkonbinaketa askotariko mekanismoz gerta daitezke. Banda-banda prozesuetan, elektroien trantsizioak zuzenean gertatzen dira balentziako bandako eta eroapeneko bandako egoeren artean. Hala ere, erdieroaleetan, ohiko prozesuak zeharkako prozesuak (bitarteko zentroen bidezko prozesuak) izaten dira, eta Shockley-Read-Hall delako birkonbinaketa eragiten dute. Ikuspuntu fisikotik, bitarteko zentro (edo sorrera-birkonbinaketa-gune) hauek ezpurutasun berezien atomoak dira (silizioaren kasuan, urrea, burdina eta kobrea izaten dira) edo sare kristalinoaren akatsak (atomo baten falta, adibidez). Erdieroalearen debekatutako bandaren erdiaren inguruan energi maila baimenduak sartzea da haien ezaugarririk garrantzitsuenak, eta horrek trantsizio elektronikoak errazten ditu, bai eroapeneko bandarantz, bai balentziako bandarantz.

Esan dugunez, U eramaileen kontzentrazioen funtzioa da, topaketaren probabilitatea p eta n kontzentrazioekin aldatzen delako. $U = U(n,p)$ funtzioa ez da batere erraza eta, modelatzeko, adierazpen matematiko konplexu ugari daude (bai banda-banda, bai zeharkako prozesuentzat).

Injekzio baxuan, fenomenoak adierazpen nahiko simple batez adieraz daitezke:

$$U = \frac{m'}{\tau_m}$$

Hau da,

$$n \text{ motako laginetan } U = \frac{n'}{\tau_p} = \frac{p'}{\tau_p}$$

$$\text{eta } p \text{ motakoetan } U = \frac{n'}{\tau_n} = \frac{p'}{\tau_n}$$

non τ_m (s) **urrienen erdibizitza edo batez besteko biziraupena** baita.

Siliziozko dispositibo gehienetan, $0.1 \mu\text{s} < \tau_m < 1000 \mu\text{s}$.

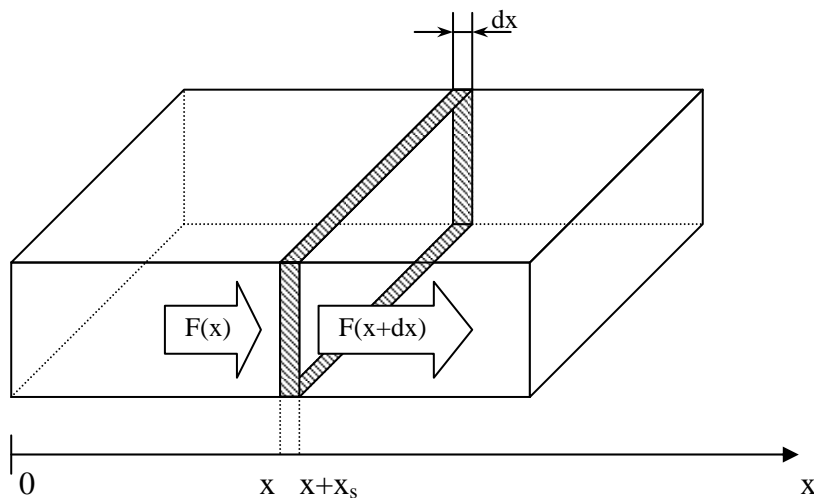
4.2 Gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera

Kasu batzuetan, erdieroalearen eskualde oso meharretan, sorrerako edo birkonbinaketako prozesu askoz indartsuagoak agertzen dira gainontzeko bolumenean baino. Kasu horietan, gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera erabili ohi dira prozesuen analisi matematikoa errazteko asmoz.

GAINAZALEKO BIRKONBINAKETAREN ETA SORRERAREN JATORRIA

Gainazal batzuetan, ezpurutasunak eta, batez ere, sarearen akatsak ugariak izaten dira. Bitarteko energi maila ugari horiek oso birkonbinaketa-abiadura handia ekartzen dute; hau da: eskualde oso mehe batean –gainazal batean- pare ugari birkonbinatzen dira cm^3 eta segundo bakoitzeko. Fenomenoari **gainazaleko birkonbinaketa** deitzen diogu eta, analisi matematikoa errazteko, bertan cm^2 eta segundo bakoitzeko birkonbinatzen diren eramaileen berri ematen duen U_S ($\text{pare}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) (gainazaleko birkonbinaketa-abiadura) erabili ohi da.

Antzeko prozedura erabiltzen da eskualde oso meheetan bolumeneko sorrera oso handia denean: orduan, G_S ($\text{pare}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) gainazaleko sorrera definitzen da.



4.1 Irudia. Gainazala eskualde mehe baten bidez adierazita

ANALISI MATEMATIKOA (Injekzio baxuan)

Gainazalean, **birkonbinaketa-abiadura** izendapena **hiruzpalau kontzeptu** adierazteko erabiliko dugu:

- Gainazala bolumen txikitzat hartuz, bolumen-unitate bakoitzean birkonbinatzen diren pareak ($\text{pare}/\text{s}/\text{cm}^3$) orain arteko birkonbinaketa da:

$$U \text{ (pare} \cdot \text{cm}^{-3}/\text{s)}$$

Hori **bolumeneko birkonbinaketaren abiadura** da.

- Gainazalean, guztira, segundo bakoitzean birkonbinatzen diren pareak gainazaleko birkonbinaketa osoaz adierazten ditugu:

$$U_s \text{ osoa} = U \cdot x_s \cdot A \text{ (pare/s)}$$

Normalean, horren dentsitatearekin (cm^2 eta segundo bakoitzeko birkonbinatzen diren pareekin) lan egiten da:

$$U_s = U \cdot x_s \text{ (pare} \cdot \text{cm}^{-2}/\text{s)}.$$

$$\text{Eta, injekzio baxuan, } U_s = U \cdot x_s = \langle IB \rangle = \frac{m'}{\tau_m} \cdot x_s$$

Hori **gainazaleko birkonbinaketaren abiadura** da.

- Erosoago lan egiteko ($x_s \sim 0$, $\tau_m \sim 0$ direnez),

$$S = \frac{x_s}{\tau_m} \text{ (cm/s) definitzen da, eta}$$

$$\text{eta, orain, } U_s(x_s) = m'(x_s) \cdot S_m \text{ (I.B.)}$$

Horrek ere, gainazalean gertatzen den birkonbinaketaren berri ematen digu, eta, gainera, ohiko abiaduraren unitateak ditu. Hori dela-eta, S parametroari **gainazaleko birkonbinaketaren abiadura zinetikoa** deritzo.

Analisi bera errepika daiteke gainazaleko sorrerarako:

$$G \cdot x_s = G_s \text{ pare/cm}^2 \cdot \text{s} \text{ **gainazaleko sorrera** da}$$

baina hemen ez da sorrera zinetikorik definitzen.

Gainazaleko prozesuak dituen gainazal batean, hura zeharkatzen duen fluxua analizatuz (ikus 4.1 Irudia):

$$F_{irteten} = F_{sartzen} + G_s - U_s$$

$$\text{edo } \Delta F_{\text{eskuin-ekzer}} = G_s - U_s$$

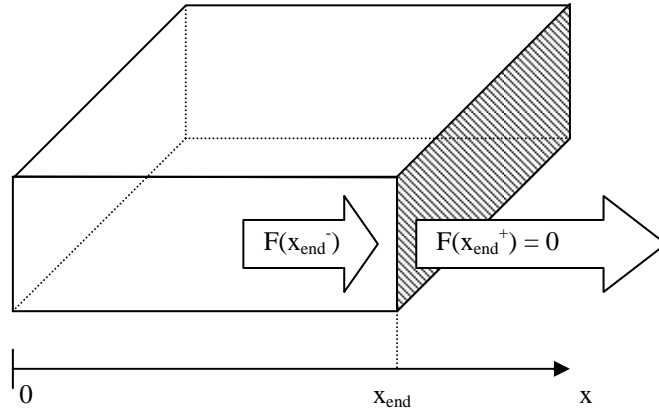
Hau da:

$$F(x_{\text{gainazal}}^+) = F(x_{\text{gainazal}}^-) + G_s - U_s$$

$$\text{edo } F_{\text{eskuin}} = F_{\text{ekzer}} + G_s - U_s$$

KASU BEREZIA: MATERIALAREN MUTURRAK

Materialaren aurpegieta –adibidez, kontaktuetan- fluxuetako bat nulua izango da (ezkerreko muturra bada, sarrerakoa, eta, eskuinekoa bada, irteerakoa).



4.2 Irudia. Gainazaleko birkonbinaketa laginaren eskuineko muturrean: $x > x_{end}$ eskualdean, fluxua nulua da

Adibidez, 4.2 Irudiko eskuineko muturra hartuz:

$$F(x_{end}^+) - F(x_{end}^-) = G_s - U_s$$

$$0 - F(x_{end}^-) = 0 - U_s \Rightarrow F(x_{end}^-) = U_s$$

Eta injekzio baxuan bagaude:

$$F(x_{end}^-) = U_s = \langle IB \rangle = S_m \cdot m'(x_{end})$$

Analogoki, ezkerreko muturretan, injekzio baxuan:

$$U_s = S \cdot m'(x_{ezk}) = -F(x_{ezk})$$

----- **Oharrak** -----

- Ikasgai honetan, injekzio baxuko birkonbinaketaren adierazpen sinplifikatua erabili da. Adierazpen hori honela arrazoi daiteke, $R = K_1 \cdot p \cdot n$ onartuz (hurbilketa bat baita):

$$U = R - R_{th} = K_1 \cdot p \cdot n - K_1 \cdot p_0 \cdot n_0 = K_1 \cdot (p \cdot n - p_0 \cdot n_0) = K_1 \cdot (p \cdot n - n_i^2)$$

Injekzio baxuan $m = m_0 + m'$ eta $M \sim M_0$ direnez:

$$U = K_1 \cdot (m \cdot M - m_0 \cdot M_0) = K_1 \cdot [(m_0 + m') \cdot M_0 - m_0 \cdot M_0] = K_1 \cdot m' \cdot M_0$$

$$\text{Eta, beraz: } U = \frac{m'}{\tau_m} \quad \text{non } \tau_m = \frac{1}{K_1 \cdot M_0}$$

Hau da: zenbat eta dopaketa handiagoa, orduan eta τ_m txikiagoa (normalean).

➤ **Sorrera eta birkonbinaketaren mugak**

- A) Sorrerak ez du (ia) mugarik, zeren eta kontzentrazioak nahi bezain altuak izan baitaitezke (silizioan, lotura kobalenteen kontzentrazioa $20 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ da).
- B) U, birkonbinaketa garbia, positiboa eta negatiboa izan daiteke, baina R, birkonbinaketa osoa, beti positiboa izango denez (gutxienez, nulua), U-ren balio minimoa $-R_{th} = -G_{th}$ da. Hau, eramaileen kontzentrazioetako bat hutsa izatean agertuko da ($p \cdot n = 0$ denean, ez dago birkonbinaketarik $\rightarrow R = 0$).

➤ **Banda-banda sorrera eremu elektriko indartsuen ondorioz** ere gerta daiteke:

- A) Lotura kobalenteak eremuak berak hauts ditzake, zuzenean (**tunel efektua**).
Horretarako eremu itzela behar da.
- B) Eremuak energia zinetiko handia ematen badio eramaile bati, honek sare kristalinoaren kontrako talketan lotura kobalenteak hauts ditzake (**ausaren bidezko biderketa**).
- **Auger birkonbinaketa** delakoa da beste birkonbinaketa mota bat. Horretan, hiru eramailek hartzen dute parte eta, ondorioz, eramaile-kontzentrazio handia behar da birkonbinaketa hori gertatzeko probabilitatea aintzat ez hartzeko modukoa ez izateko. Beraz, bakarrik izango da nabaria dopaketa altua bada edo injekzio altuan bagaude.