LEHENENGO MULTZOA:

SARRERA ETA ERDIEROALEA

1. DISPOSITIBOAK **1**

1.1 Oinarrizko kontzeptuak 3

1.2 Dispositiboen ereduak 6

1.3 Dispositiboen ezaugarri-kurbak: korronte-tentsio eta transferentzi kurbak 8

1.3.1 Ate bakarreko osagaiak: I-V ezaugarri-kurba 8

1.3.2 Bi ateko dispositiboak: sarreraren, irteeraren eta transferentziaren ezaugarrikurba 10

2. ERDIEROALEEN EZAUGARRIAK **13**

2.1 Materialen sailkapena 13

2.2 Berezko erdieroaleak edo erdieroale intrintsekoak. Egitura kristalinoa. 16

2.3 Erdieroale estrintsekoak: ezpurutasun emaile eta hartzaileak. 20

2.3.1 N motako erdieroaleak: ezpurutasun emaileak 20

2.3.2 P motako erdieroaleak: ezpurutasun hartzaileak 21

2.4 Kontzentrazioaren kalkulua: *Masa-ekintzaren legea* eta *Kargaren neutraltasuna*. Kontzentrazioen bilakaera tenperaturareren arabera 22

2.5 Eramaileei buruzko terminologiaren laburpena 24

3. KORRONTEAREN EROAPENA **25**

3.1 Korrontearen eroapenaren mekanismoak 26

3.2 Atoiaren bidezko eroapena: Ohmen legea 26

3.3 Barreiapeneko eroapena 32

3.4 Einsteinen erlazioa 33

3.5 Guztizko korronteak 34

4. SORRERA ETA BIRKONBINAKETA **35**

4.1 Birkonbinaketaren abiadura oreka termodinamikotik kanpo 36

4.2 Gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera 39

Oharrak 42

5. EKUAZIO OROKORRAK **43**
5.1 Jarraitutasunaren ekuazioak 44
5.2 Egoeraren ekuazioak 46
5.3 Eramaileen denborarekiko aldaketa: erdibizitza 47
5.4 Eramaileen posizioarekiko aldaketa: barreiapeneko luzera 50
5.5 Gainazaleko birkonbinaketa 52
Eranskina: ebatzi beharreko ekuazio diferentzialak 55

ERDIEROALEARI BURUZKO ARIKETAK **57**

1. DISPOSITIBOAK

ELEKTRONIKA ZER DEN ETA NOLA KOKATZEN DEN HISTORIAN

Gaurko hiztegi entziklopediko batzuek azaltzen dutenez, **elektronika** "**elektroi askeek esku hartuz jazotzen diren gertakariak aztertzen dituen fisikaren atala eta jakintza horren ondoriozko teknologia" da** (Elhuyar).

Beste entziklopedia batzuetan agertzen den definizio honek dioenez, **elektronika gasetan, hutsean edo erdieroaleetan gertatzen den kargen mugimenduari buruzko zientzia eta teknologia da**. Beraz, metaletako kargen mugimendua ez da sartzen elektronikan, elektrikan baizik. Baina metalak elektronikan ere erabiltzen dira, noski. Elektronika eta elektrika definizio bakar batez bereiztea ez da, beraz, erraza.

Edonola ere, gaur egun, **elektronika informazioa garraiatzen duten seinale elektrikoak prozesatzeko behar diren sistema fisikoekin lotzen da**.

Elektronikak, XIX mendearen azken urteetan eta XX. mendearen hasieran egin zituen lehenengo urratsak, garai hartako hainbat gertakizun nabarmenen bitartez: elektroiaren aurkitzea (1897), lehenengo osagai elektronikoak fabrikatzea (izpi katodikoen hodia -1897-, hutseko diodoa –1904- eta triodoa –1906-) eta elektronikaren hain lotuta dagoen Irrati Difusioaren sortzea (1922).

Baina gaur egungo elektronika ahalbidetzen duen aurrerapena XX. mendearen erdialdeko urteetan gertatu zen: egoera solidoko elektronika sortu zen, material erdieroaleen ezaugarrietan oinarrituz. Gaurko elektronika guztien oinarria den **transistorea asmatzea** (1947) izan zen mugarri nagusia.

Hortik aurrera, dispositibo eta zirkuituen garapena oso azkarra izan bazen ere, **zirkuitu integratua** (1958) izan zen hurrengo mugarri nagusia . Horrek oinarri bakarrean osagai anitz fabrikatzea eta trinkotasun espazial izugarria ekarriko ditu. Haren garapenean ezinbestekoa izan zen plano bakarreko teknologia ia berehala sortu zen, eta lehenengo zirkuitu integratuak 1961an saldu ziren.

70eko hamarkadan, elektronikak azken urrats kualitatiboa egin zuen: INTEL etxeak lehenengo prozesadorea sortu zuen, 2.300 transistore txip bakarrean integratuz.

Ordutik hona, fabrikazio-teknologien garapena dela eta, integrazio eskala ikaragarriro handitu da: gaur egungo prozesadoreetan, 125 milioi transistore/cm^2 baino gehiago eraikitzen dira (eta 2016. urterako aurreikuspena 3.000 milioi transistore/cm^2 da).

ELEKTRONIKA TITULAZIOAN ETA TELEKOMUNIKAZIOETAKO INGENIARIAREN LANBIDEAN NON KOKATZEN DEN

Telekomunikazioek elektronikarekin harreman estua izan dute beti, eta beren baliabideak, elektronikarik gabe, pentsaezinak lirateke. Eta ez hori bakarrik: telekomunikazioa elektronikaren aplikazio (eta motibazio) nagusietakoa izan da. Hala, ingeniari elektronikoa eta telekomunikazio-ingeniaria sinonimoak izaten ziren XX. mendearen azken laurdeneraino.

Gaur egun, telekomunikazio-ingeniarien profilean, beste arlo “berriago” batzuk ere sartu dira (telematika eta seinaleen prozesatzea, besteak beste), baina elektronikak titulazioaren oinarrietako bat izaten jarraituko du.

Testuinguru horretan, Oinarrizko Elektronikako Laborategiarekin batera, Telekomunikazio Ingeniaritzako ikasleek Elektronikarekin duten lehenengo harremana izaten da irakasgai hau. Gero, beste hamar irakasgai *elektroniko* ikasten dira nahitaez. Gainera, irakasgai *ez elektroniko* batzuek elektronikan garaturiko kontzeptuak -eta zer esanik ez, aparatu elektronikoak- erabiliko dituzte.

Lehenengo ikasturteko irakasgaien artean, Zirkuituen Teoria da irakasgairik antzekoena, baina haren helburuak eta Dispositiboen Elektronikarenak oso ezberdinak dira. Zirkuituen Teorian, osagaiak nahiko sinpleak izaten dira eta konplexutasuna, normalean, zirkuituen ebazpenean datza. Bertan, besteak beste zirkuitu abstraktuak ebazteko bideak azaltzen dira. Dispositiboen Elektronikan, aldiz, osagai elektroniko batzuen ezaugarriak ondorioztatuko dira, gero -Zirkuituen Teorian oinarrituz- zenbait zirkuitu elektroniko

analizatzeko asmoz. Elektronikaren oinarriari eskainiko diogu gure arreta, eta erdieroaleen ezaugarriak, diodoa eta transistoreak analizatuko ditugu.

Geroago etorriko diren ikasgai *elektronikoetan*, zirkuitu analogiko mamitsuak analizatuko dira: anplifikadore operazionala, elikadura iturriak, osziladoreak, seinale-modulatzaileak ... eta, orobat, zirkuitu eta osagai elektroniko digital interesgarriak : seinale-digitalizatzaileak, mikroprozesadoreak, memoriak, dispositibo logiko programagarriak. Bide horretan, praktika ugari egingo dira, askotariko tresneria erabiliz.

Lanbide batzuetan, aparatu elektronikoak erabiltzeko, barneko funtzionamendua jakitea ez da beharrezkoa izaten. Eta nola dabilen jakiteko, osagai bakoitzaren barneko egitura edo funtzionamendua zehazki ezagutzea ere ez da beharrezkoa izaten. Baina hori jakitea beti dira komenigarriak.

Azaleko erabileran ez bagara geratzen eta, adibidez, zirkuitu berriak diseinatzen baditugu, zehazki kontrolatu behar dugu osagaien erabilera. Eta horrek oinarri fisikoak jakitea eskatu ohi du. Zer esanik ez dispositiboen fabrikazioan, garapenean edo ikerkuntzan lan egiteko: orduan, barneko ezagutza hori, nahitaezko bilakatzen da.

1.1 Oinarrizko kontzeptuak

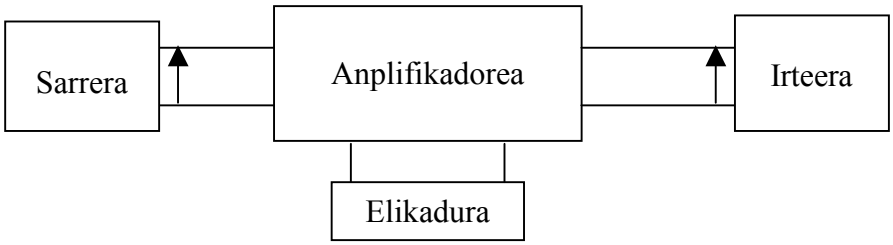
SISTEMAK: SARRERA, IRTEERA ETA POLARIZAZIOA

Bai zirkuitu elektroniko sinpleenetan bai sistema konplexuetan, informazio fluxuari dagokionez, zirkuituak *funtzio-kutxen* bidez ordezkatzen dira. Normalean, seinalea ezkerraldetik sartzen da eta, prozesatu eta gero, emaitza eskuinaldetik irteten da. Sistema konplexuak funtzio jakineko kutxa multzo batez osatzen dira.

Gure seinaleek izaera elektrikoa izaten dute -tentsio edo korronteak izaten dira- baina bestelako itxura ere har dezakete. Sistema batean seinaleek egiten duten ibilbidea nahiko luzea eta korapilatsua gerta liteke, eta izaera ezberdinak har ditzake.

Adibidez, telebista-sistema batean, sarrera (sarrerako seinalea) objektuen argia izango da. Gero, kamarak argi hori tentsio bilakatzen du eta, egokitu ondoren, transmisio-sistemak uhin elektromagnetikoaren formarekin igortzen du antenatik. Mendiko errepikagailuak iristen zaion seinalea handitu, prozesatu, eta etxeetarantz barreiatzen du. Etxeko azpi-sistemak uhin elektromagnetikoa antenatik jaso, seinale elektriko bihurtu eta anplifikatzen du, eta, azkenean telebistara helarazten du. Bertan, argi bilakatzen da prozesatzearen amaieran, eta, fotoiek begietan seinale nerbiosoa eragin ondoren, burmuinean sentsazio egokia sortzen da. Telekomunikazio-sistemaren irteera (irteerako seinalea), kasu honetan, argia izango da (telebista irudia).

Igorlean, errepikagailuan, etxeko sisteman, telebistan,... ia edonon, anplifikadoreak topatzen ditugu. Haien erabileraren eskemarik sinpleena 1.1 Irudikoa da.



1.1 Irudia. *Anplifikadore baten eskema*

Anplifikadorearen eginkizuna seinalea handitzea da, eta, horretarako, oinarria transistoreetan duten zirkuituak erabiltzen dira. Baina irteera sarrera baino handiagoa izateko (potentzia edo energia gehiago izateko) ez da nahikoa zirkuitu anplifikadorea erdian jartzea: Zirkuitu hori elikatu behar da, ohiko indar elektrikoaz, bateria-sistema batez, gasoliozko sorgailu batez edo sorgailu fotovoltaikoez. Egokiro lan egiteko, kanpotik jarri behar den energia iturria, *elikadura-iturri* edo *elikadura* izendatuko dugu.

Sarrera: Sarrerako seinalea sorgailu eta serieko inpedantzia (erresistentzia) batez adierazten da normalean. Fisikoki sistema oso bat izan daiteke, baina baita transduktore sinple bat ere (tenperatura-sentsorea da transduktorearen adibide bat. Horrek, behin elikatuz gero, tenperaturarekiko proportzionala den tentsioa ematen du; -adibidez, 10 mV/ºC-).

Anplifikatze zirkuitua eta polarizazioa: Sarrerak (transduktoreak, adibidez) ematen duen seinalea oso txikia izaten denez, erabili baino lehen anplifikatu behar izaten dugu. Horretarako erabiltzen den zirkuitu anplifikadorea era askotakoa izan daiteke: transistore batez eta bi erresistentziaz antola dezakegu, zirkuitu integratuak erabil daitezke, edo sistema nahiko konplexu bat egin daiteke. Lorturiko anplifikatze-irabazia 10-100.000 ingurukoa izan daiteke, baina, edozein kasutan, zirkuitua kanpotik elikatu beharko dugu. Zirkuitua *polarizatu* behar dugu.

Irteera: Irteerako seinalea sarrerakoa baino egokiagoa da lan egiteko eta, adibidez, mikrokontrolagailu batera sartzeko prest legoke (nolabait, deskribatzen ari garen irteera hau, hurrengo etaparen sarrera da) Irteerako seinaleak aurkituko duen zirkuitua (kasu honetan, mikrokontrolagailua) inpedantzia batez adierazten da. Inpedantzia horri *karga* deitzen diogu.

SEINALE JARRAITUAK ETA SEINALE ALTERNOAK

Badira denboran zehar aldatzen ez diren seinaleak. Seinale horiei **jarraituak** edo **zuzenak** deritze. Adibidez, 1.5 volteko pila baten bi terminaletan edo tenperatura neurtzen duen sentsore baten irteeran dagoen tentsioa (voltmetroa jartzen badugu, neurketa gutxi aldatzen da momentu batetik bestera).

Aldiz, ahotsari dagokion seinalea (hau da, mikrofonotik lortzen den tentsioa), adibidez, oso azkar aldatzen da. Tentsio edo korronte horri **seinale alterno** deitzen diogu. Seinale baten batez besteko balioa nulua denean, berriz, **alterno garbia deritzogu**

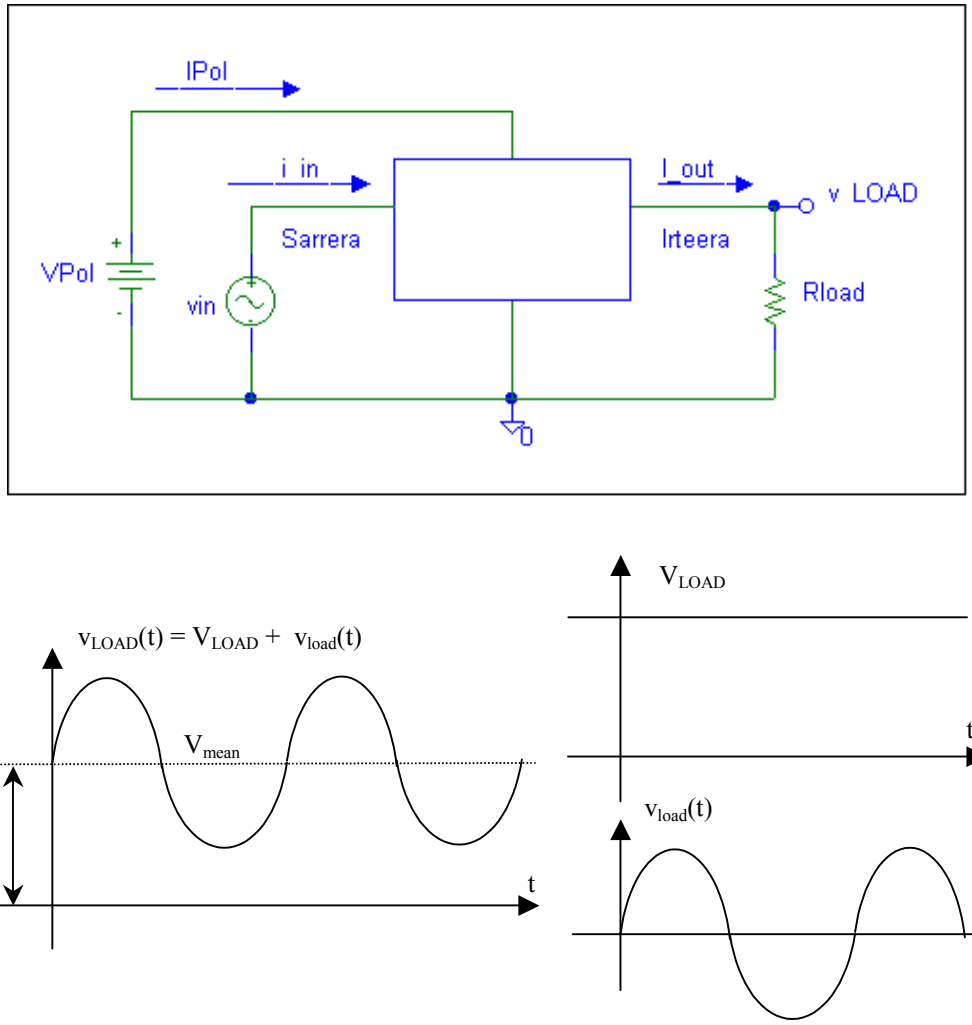
Askotan, errazago lan egitearren, seinale osoak oinarrizko bi osagaitan deskonposatzen ditugu: batetik, jarraitua (seinalearen batez besteko balioa) eta, bestetik, alternoa (seinale osoari batez bestekoa kenduz lortzen dena: forma bereko seinalea, baina batez besteko balio hutsekoa). Informazioa, gehienetan, osagai alternoan ageri da.

Bereizteko asmoz, seinalearen osagaiak honela adierazten dira:

- Jarraituko osagaiak, letra larriz eta azpi-indize larriz.
- Alternoko osagaiak, letra xehez eta azpi-indize xehez.
- Seinale osoak, letra xehez eta azpi-indize larriz.

1.2 Irudiko eskeman, sarrerako tentsioa (v_i), seinale alternoa da; polarizaziokoa (V_{PP}), aldiz, jarraitua; eta irteerako seinaleak bi osagai ditu, jarraitua eta alternoa (tentsioari dagokionez, V_L –zuzena- eta v_l –alternoa-; korrontearen bi osagaiak I_L –zuzena- eta i_l –alternoa-). Seinale osoa v_L edo i_L da. L *load* (karga) hitzetik dator, baina, batzuetan, O azpi-indizea erabiltzen da (output hitzetik). Sarrerako seinaleetarako, I azpi-indizea (ingelesezko *in* hitzetik) erabiltzen da.

Etxean erabiltzen ditugun aparatuetan (ordenadorean, adibidez), jatorrizko elikadura 220 volteko tentsio alternoa da (sare elektrikotik, entxufetik, jasotzen duguna, hain zuzen ere). Aparatuen barneko zirkuitu elektronikoetan elikadura gisa seinale jarraituak erabili ohi direnez (adibidez, ordenadorearen CPU delakoa edo disko gogorra elikatzeko, 5 edo 3.5 volteko tentsioa erabili ohi da), normalean, , tentsio alternoa jarraitu bihurtzeko bloke bat egoten da aparatuan sartu bezain laster. Bloke hori **elikadura-iturria** da.



***1.2 Irudia**. Seinale jarraituak edo zuzenak eta alternoak. Hitzartutako ikurrak.*

1.2 Dispositiboen ereduak

Azkenean, zirkuitu batean dispositibo bat erabili behar badugu, gehien interesatzen zaiguna beraren portaera aurreikustea da. Eta portaera horren ezaugarri nagusiak kanpoko terminal metalikoetan agertuko diren tentsio eta korronteen arteko erlazioak dira. Erlazio horiek matematikoki edo grafikoki (I-V kurben bidez) adierazi ohi dira.

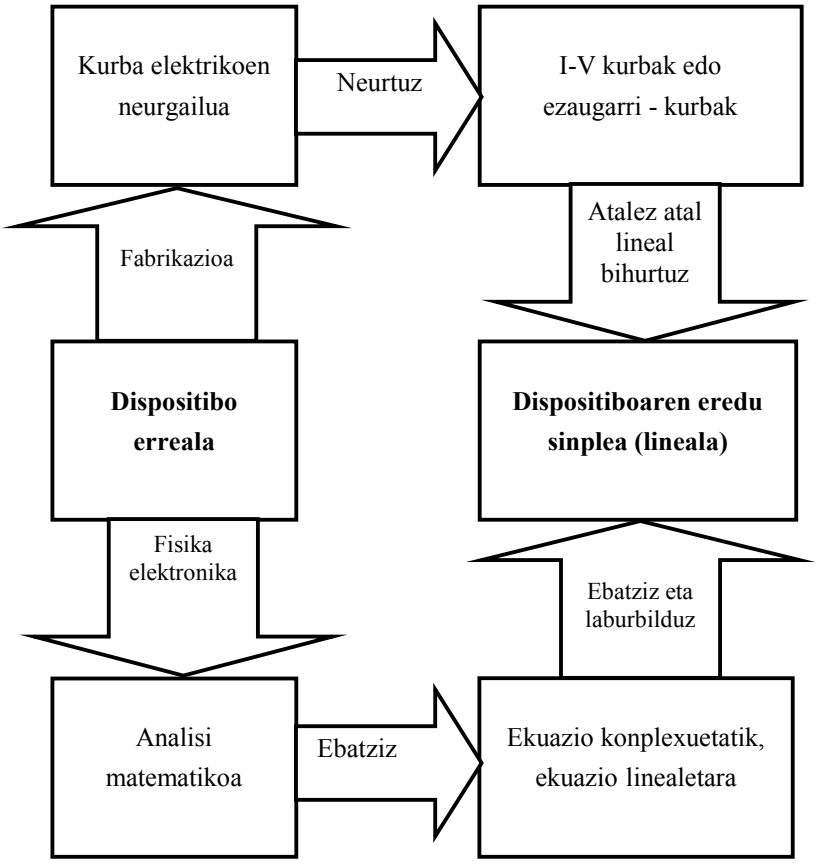
Osagai elektroniko baten funtzionamendua edo I-V kurbak zehaztasun osoz jakiteko, ekuazio fisikoetatik abia gaitezke. Baina horien ebazpena latza da (ordenadorea behar izaten da, haren analisi fisikotik sortzen diren ekuazio multzoa ebaztea ezinezkoa bailitzateke bestela).

I-V kurbak lortzeko beste bide bat, osagaia hartu eta zuzenean neurtzea da. Dispositiboen deskribapenik onena dira kurba esperimental horiek, eta fabrikatzaileek dispositibo-multzo bakoitzari dagozkionak datu-liburuetan islatzen dituzte.

Baina osagaia modelo lineal sinple batez ordeztea edo modelatzea da erabilgarriena. Sinplea izanik, eredua hurbilketa bat besterik ez da izango (ez da zehatza izango), eta, ziur aski, egoera oso berezietan ez da baliagarria izango, baina guri interesatzen zaigun tartean –gure lan-puntuan- dispositiboaren portaera nahiko ongi deskribatzen badu, erabilgarria izango da.

Modelo linealera iristeko bi bide ditugu (ikus 1.3 Irudia):

- Ekuazio zehatz guztiak planteatu ondoren, zenbait fenomeno edo ekuazio hutsiritziz, ekuazio sinpleagoak lortuz eta ebatziz modelo linealera, sinplera, heltzea.
- Neurtutako kurbetatik zenbait hurbilketa eginez, kurba horien ekuazio baliokideak sortzea.



1.3 Irudia. *Osagaien modelaketa eta I-V kurben erabilera*

Hala, dispositiboen adierazpenak hiru forma izan ditzake:

- Zirkuitu-ikurra: zirkuituetan osagaia irudikatzeko marrazkia. Batzuetan, balio nominala jartzen da ondoan.
- Ekuazio matematikoa: v = i (v) (v volt, i anpere).
- Ezaugarri-kurbak edo dispositiboaren kurba karakteristikoak: ekuazio matematikoen adierazpen grafikoa. Kurbak teorikoak izan daitezke, baina erabilgarriagoak dira datu-liburuetako kurba esperimentalak.

1.3 Dispositiboen ezaugarri-kurbak: korronte-tentsio eta transferentzi kurbak

1.3.1 ATE BAKARREKO OSAGAIAK: KORRONTE-TENTSIOAREN EZAUGARRI KURBA

Ate bakarreko dispositiboetan bi nodo edo terminal daudenez, tentsio bakar bat eta korronte bakar bat ezar daitezke. Beraz, bi aldagai daude: I eta V.

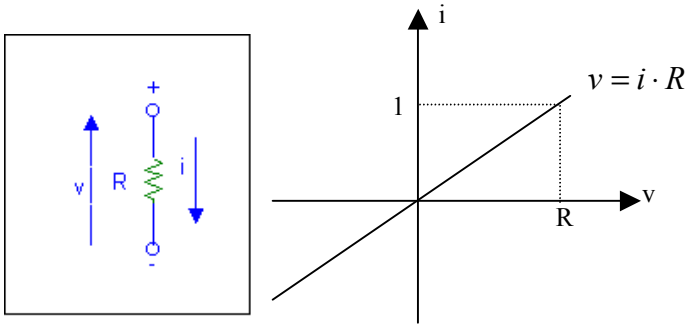
Dispositiboen izaerak bi aldagaien arteko *erlazio bat (ekuazio bat)* ematen digu.

Osagaia zirkuitu batean sartzean, zirkuituak finkatzen du korronte eta tentsioaren arteko bigarren erlazioa.

Beraz, bi ekuazioetatik bi aldagaiak ebatziz, I eta V jakingo ditugu.

Jarraian, ate bakarreko dispositibo batzuen adierazpenak aurkeztuko ditugu.

Erresistentzia

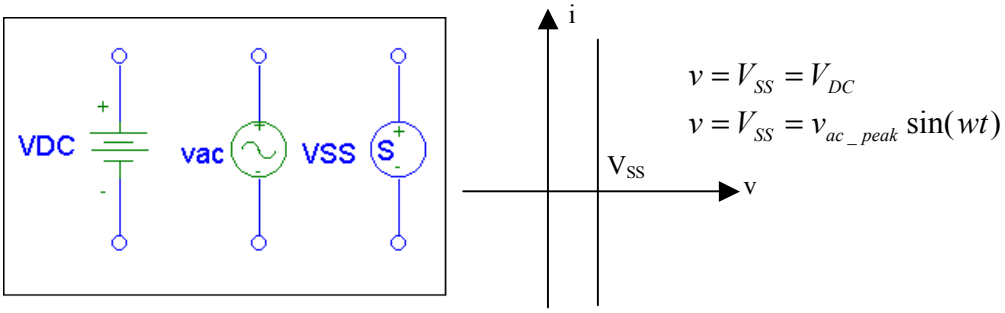


1.4 Irudia. *Erresistentziaren ikurra, I-V kurba eta ekuazioa*

Hau da, R(Ω) balioko erresistentzian erortzen den tentsioa hura bera zeharkatzen duen korrontearekiko proportzionala da, eta R da proportzioaren konstantea.

V_{ss} balioko Tentsio Sorgailu Independentea

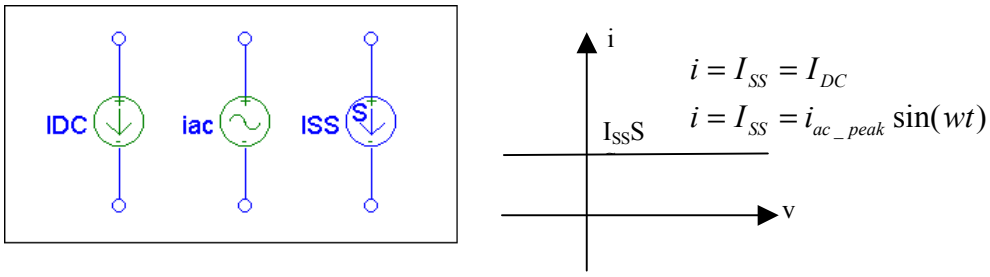
Sorgailu horrek V_{SS} balioan mantentzen du tentsioa beti, eta, horretarako, zirkuituak eskatzen duen korrontea ematen dio (edo hartu).



1.5 Irudia. *Tentsio Sorgailu Independentearen ikurra, I-V kurba eta ekuazioa*

I_{ss} balioko Korronte Zuzeneko Sorgailu Independentea:

Osagai horrek I_{SS} korrontea injektatzen du beti zirkuitura, eta horretarako behar den tentsioa *ematen du* edo jasanten du.



1.6 Irudia. *Korronte Sorgailu Independentearen ikurra, I-V kurba eta ekuazioa*

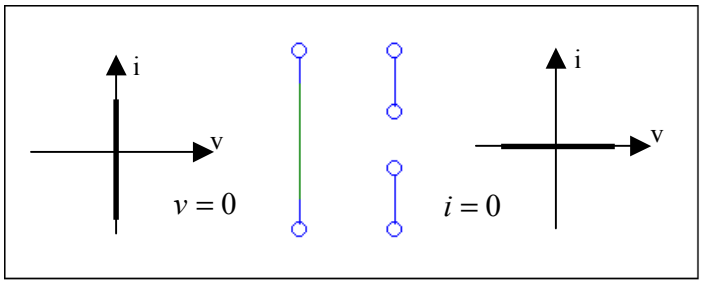
Zirkuitulaburra eta zirkuitu irekia

Zirkuitulaburra ON egoeran dagoen etengailuaren (edo kable baten) parekoa da. Erresistentzia nuluko osagaia denez, v = 0 beteko da beti. Kanpoko zirkuituak finkatuko du korrontea.

Beste ikuspuntu batetik, zero balioko tentsio-sorgailua ere bada.

Zirkuitu irekia, OFF egoeran dagoen etengailuaren (edo erresistentzia infinitu baten) parekoa da. Korrontea, pasabiderik ez duenez, nulua da eta i = 0 beteko da beti. Gainontzeko zirkuituek finkatzen dute tentsioa.

Beraz, zero balioko korronte-sorgailutzat ere har daiteke, nolabait.

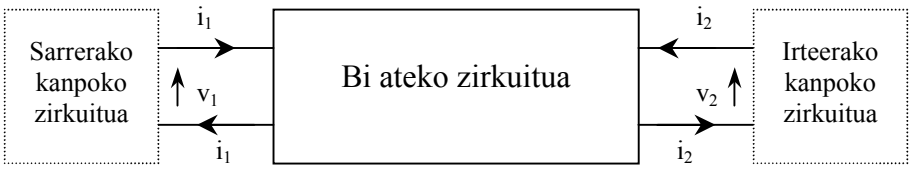


1.7 Irudia. *Zirkuitulaburraren (ezk) eta zirkuitu irekiaren (esk) ezaugarri-kurbak, ikurrak eta ekuazioak*

1.3.2 BI ATEKO DISPOSITIBOAK: SARRERA, IRTEERA ETA TRANSFERENTZIA KURBA KARAKTERISTIKOAK

Dispositibo edo zirkuitu askok bi ate dituzte kanpoaldearekin komunikatzeko. Ate horietako bat sarreratzat hartzen da eta bestea, irteeratzat.

Ate bakoitzean, bi nodo edo terminal daude, eta batetik joaten den korrontea bestetik itzultzen da. Kutxaren barruan dagoena nahi dugun bezain sinplea edo konplikatua izan daiteke.



1.8 Irudia. *Bi ateko zirkuitua*

1.8 Irudian ikusten denez, badaude *lau aldagai* ezagutzen ez ditugunak, eta zirkuituak haien arteko bi erlazio ematen dizkigu. Kanpoko bi zirkuituek ekuazio bana emanez, lau erlazio eta lau aldagai dituen sistema ebazten da.

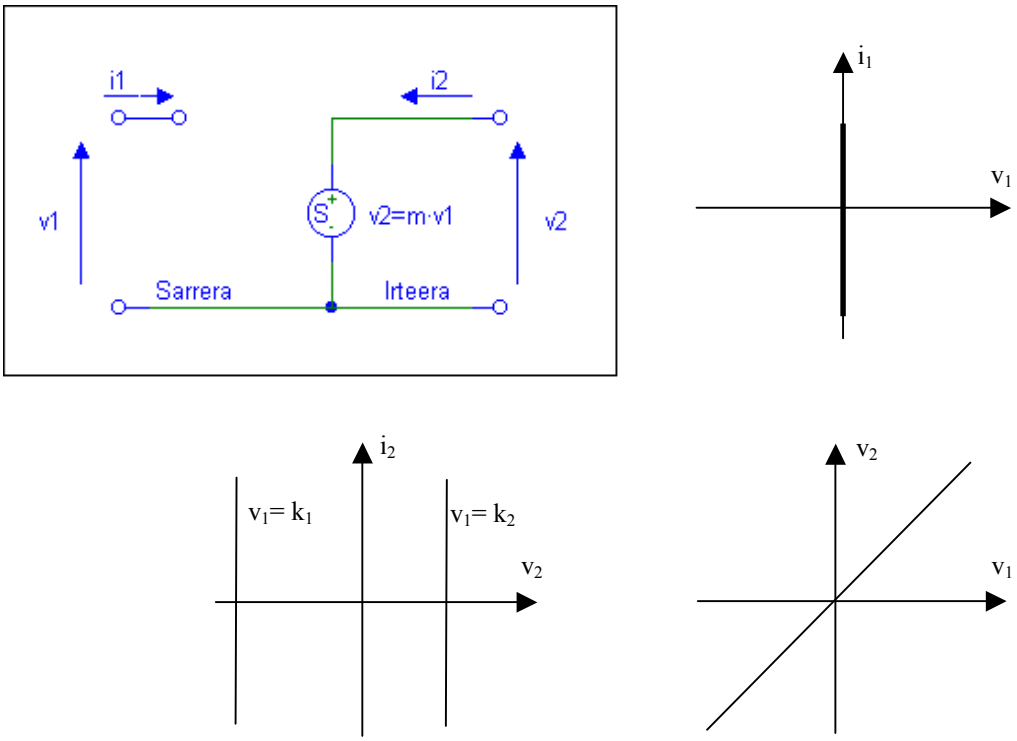
Grafikoki adierazteko, bi erlazio izatea(?) nahikoa izan arren arren, normalean hiru kurba aurkezten dira: sarrerako I-V kurba, irteerako I-V kurba eta sarreratik irteerarako transferentzia-kurba. Zer da transferitzen (edo pasatzen) da? Batzuetan tentsioa, bestetan korrontea edo potentzia, baina, azkenean, informazioa.

Ondoren, bi ateko dispositibo batzuk aurkeztuko ditugu.

Tentsioaren bidez kontrolatutako tentsio-sorgailua:

Erlazioak honako hauek dira: $i_1 = 0$

$v_2 = \mu \cdot v_1$



1.9 Irudia. *Tentsioaren menpeko tentsio-sorgailua: a) ikurra b) sarrerako ezaugarria c) irteerako ezaugarria d) transferentzia-kurba*

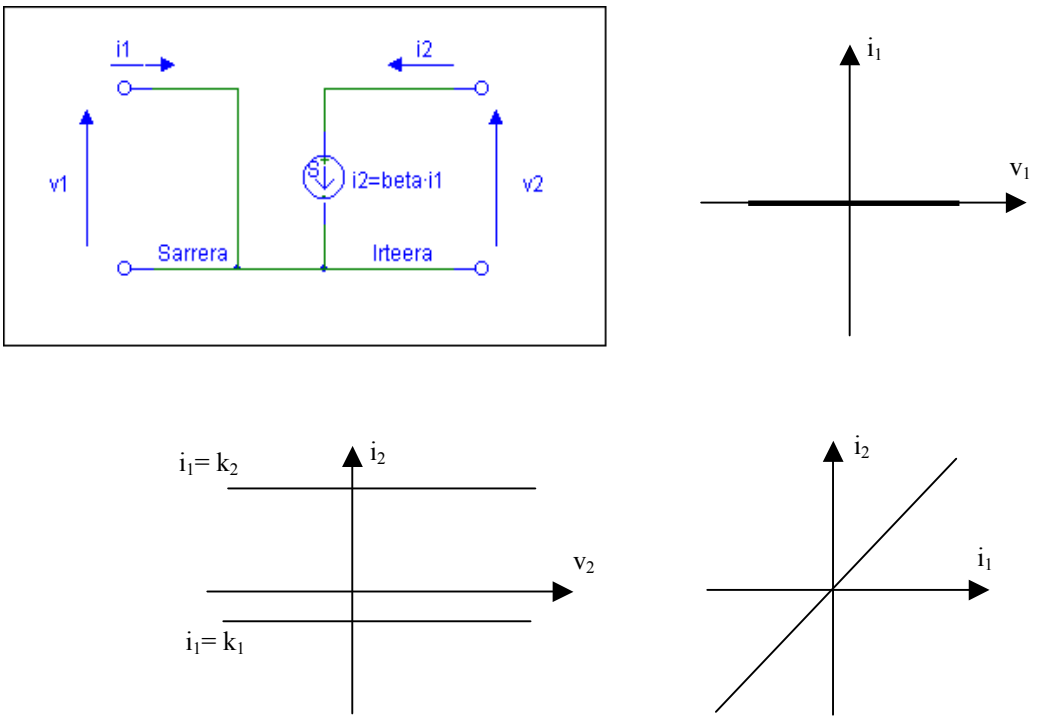
Sarrera eta irteera erlazionatzen dituen konstantea (μ) transmitantzia da. 1.9.c Irudian i_2 korrontearen eta v_2 tentsioaren arteko erlazioa adierazteko, v_1 tentsioari balio jakin batzuk eman behar zaizkio.

Korrontearen bidez kontrolatutako korronte-sorgailua:

Erlazio analitikoak honako hauek dira: $v_1 = 0$

$i_2 = \beta \cdot i_1$

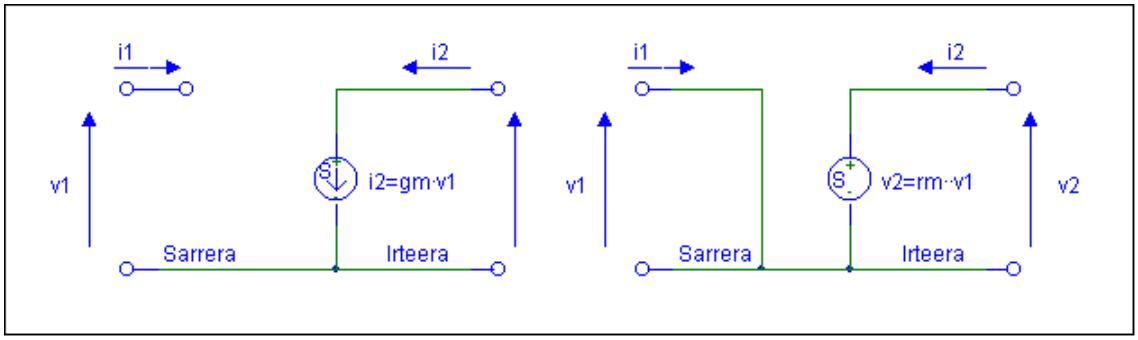
Irteera eta sarrera erlazionatzen dituen konstantea (β) transmitantzia da. 1.10.c Irudian i_2 eta v_2 aldagaien arteko erlazioa adierazteko, i_1 parametro gisa erabiltzen da.



1.10 Irudia. *Korronte menpeko korronte-sorgailua. a) ikurra b) sarrerako ezaugarria c) irteerako ezaugarria d) transferentzi kurba*

Bi ateko beste dispositibo batzuk

1.11 Irudian, korrontez kontrolatutako tentsio-sorgailua ($v_1 = 0$; $v_2 = r_m$ x i_1) eta tentsioz kontrolatutako korronte-sorgailua ($i_1 = 0$; $i_2 = g_m$ x v_1) irudikatu dira.



a) *b)*

1.11 Irudia. *Tentsioz kontrolatutako korronte-sorgailua (a) eta korrontez kontrolatutako tentsio-sorgailua (b)*

2. ERDIEROALEEN EZAUGARRIAK

Gaur egun, dispositibo elektroniko gehienak erdieroale izeneko materialez fabrikatzen dira eta horien ezaugarri elektrikoak dispositiboen funtzionamenduaren oinarriak dira. Hori dela eta, nahiz eta askotan dispositiboak erabiltzeko barrutik gertatzen dena ezagutzea beharrezkoa ez izan, erdieroaleak aztertuko ditugu.

Hasteko, isolatzaile, eroale eta erdieroaleen arteko ezberdintasunak ikusiko ditugu. Ondoren, erdieroale motak aurkeztuko dira.

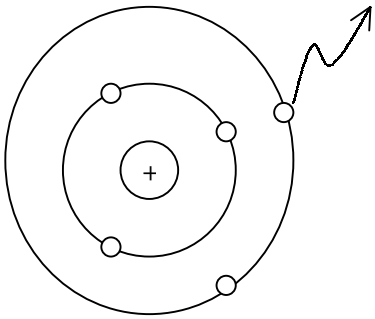
Bi ikuspegitatik abia gaitezke horretara:

- Erdieroaleen egitura kristalinotik; hau da, lotura kobalentetik.
- Energiaren ikuspuntutik; hau da, energia-banden eredutik.

Asignatura honetan batez ere lehenengo ikuspuntua erabiliko dugu.

2.1 Materialen sailkapena

Materia atomo neutroez osatzen da. Horiek positiboki kargatutako nukleo bat eta karga hori orekatzeko behar diren elektroiak dituzte. Elektroiak, atomoaren inguruan, orbitetan banatzen dira. Kanpokoak askoz libreago daude atomotik alde egiteko edo inguruko atomoekin banatzeko, eta balentziako elektroiak deitzen zaie.

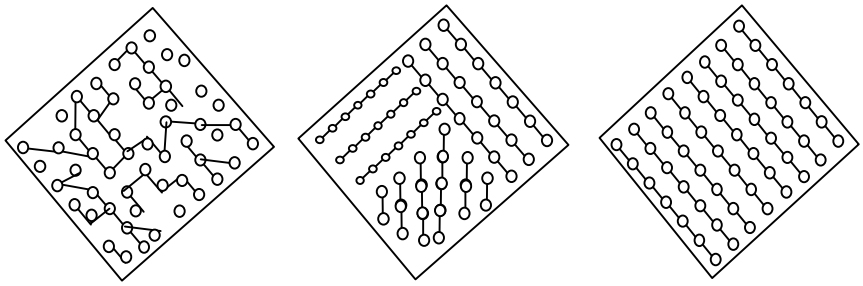


2.1 Irudia. *Balentziako elektroiak*

Atomoak (berdinak edo ezberdinak) molekulatan biltzen dira. Errazteko asmoz, atomo bakar bateko molekula bat hartuko dugu hemendik aurrera; silizio atomoa, esate baterako. Materia osatzeko, atomo horiek elkarrekin lotzen dira.

Loturaren indarraren arabera, materialaren egoera edo fasea solidoa, likidoa edo gaseosoa izan daiteke. Solidoan, elkarren arteko erakarpen indarra handia da eta, hor, atomoen arteko distantziarik laburrenak aurkitzen ditugu.

Solidoen ezaugarrietan ezberdintasun fisiko nabarmenak sumatzen ditugu barneko egituraren arabera.



2.2 Irudia. *Solido amorfoa, polikristalinoa eta kristalinoa*

Solido amorfoan –formarik gabekoan-, ikuspegi makroskopikotik ez da inolako ordenarik ikusten. Nahiz eta zati bereko pusketak izan, atomoen posizioa erabat ezberdina da puntu batetik bestera.

Kristaletan atomoak hiru dimentsioetan daude ordenatuak/lerrokatuak. Lagin txikia hartuz gero, ikusten da hori behin eta berriro errepikatzen dela: bai geometria bai distantziak berdin-berdinak dira egitura osoan.

Material polikristalinoetan, kristalen egitura hori ikusten da, baina taldeka: kristal ugariz konposatzen dira. Talde edo kristalen arteko geruzek ale-muga dute izena.

Hemendik aurrera, solido kristalinoei buruz ariko gara.

Solido kristalinoak hiru mailatan sailka daitezke beren eroankortasuna kontuan hartuz:

- Eroale onak edo metalak (Cu, Ag, Al).
- Dielektrikoak edo Isolatzaileak: mika, beira (azken hau amorfoa da).
- Erdieroaleak.

METALAK:

Beren egitura kristalinoan, atomoen kanpoko elektroiak (balentziakoak) atomo guztiek elkarrekin banatzen dituzte eta material osoan zehar mugi daitezke. Metal gehienetan, atomo bakoitzak elektroi batez hartzen du parte eta elektroi aske (e^-) horien kopurua (kontzentrazioa) >= 10^{23} = 1E23 e^-/cm^3.

Eremu elektriko bat aplikatzen badugu (volt/cm), elektroi horiek erraztasun handiz mugi daitezke. Horren ondorioz, korrontea sortzen da, leku jakin batetik segundo bakoitzeko n elektroi pasatzen badira, korrontea I = q·n (anpere) izango da, kontrako noranzkoan ($q_{elektroi}$ = - $1.6 \cdot 10^{-19}$ = -1.6E-19 C).

Beti ere, R erresistentzia jakin bat topatzen dute mugitzeko, sarearen kontra (atomoen aurka) talka egiten baitute. Hori geometriaren eta ρ materialaren berezko erresistentziaren araberakoa da: R = ρ·luzera / Sekzioa (ohm).

Metalen berezko erresistentzia (erresistibitatea, ρ) 10^{-4}, 10^{-6} Ω·cm izaten da (giro-tenperaturan). Tenperatura igotzen denean, erresistentzia pixka bat handitzen da, elektroien mugikortasuna txikiagoa baita (sarearen mugimendu termikoa garrantzitsua da).

Guri dagokigunez, erresistentzia txikia da tenperatura tarte zabalean.

DIELEKTRIKOAK:

Haietan, atomo bakoitzaren jatorrizko elektroiak beraren inguruan mantentzen dira. Ez dira, beraz, edonora joateko libreak, nahiz eta eremu elektriko altua aplikatu. Giro-tenperaturan, $\rho_{dielektriko} = 10^{18}$ Ω·cm. Tenperaturaren arabera(??) pixka bat jaisten da ρ hori.

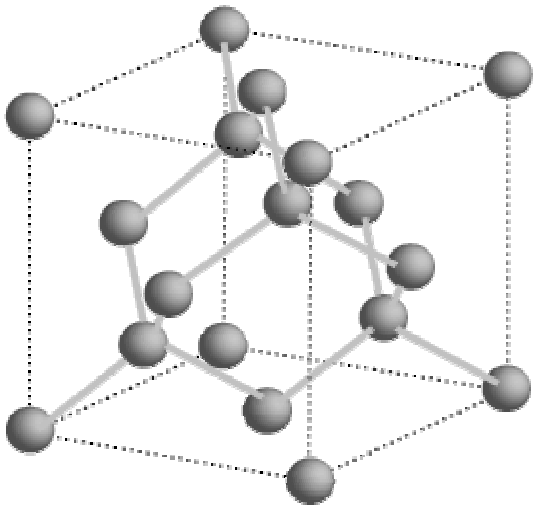
ERDIEROALEAK:

Giro-tenperaturan ez dira ez eroale onak ez eta isolatzaileak ere . ρ 10^{-3} Ω·cm –10^5 Ω·cm tartean dago. Tenperatura baxuetan (oso baxuetan, T = 30 K), oso isolatzaile onak izaten dira eta tenperatura altuetan eroale onak izan daitezke. Horren arrazoia elektroi askeen sorreran datza. Fenomenoa ulertzeko gakoa egitura kristalinoa denez, horixe izango da hurrengo puntua.

2.2 Berezko erdieroaleak edo erdieroale intrintsekoak. Egitura kristalinoa.

Erdieroale material bat intrintsekoa edo purua da, erdieroalearen 10^9 atomoko ezpurutasun bat edo gutxiago badago (ezpurutasuna beste motako atomo bat litzateke). Bestela estrintsekoa da.

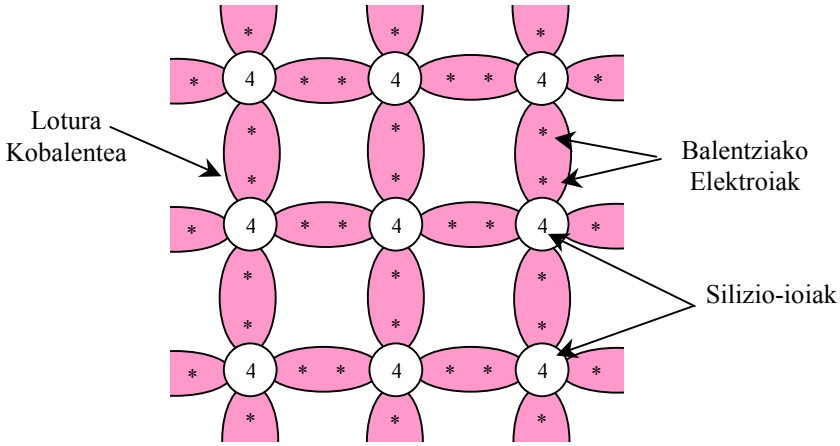
Ohiko erdieroaleetan (silizioan, germanioan), 2.3 irudian agertzen den estruktura hiru dimentsioetan errepikatuz egituratzen da kristala.



2.3 Irudia. *Egitura diamantinoa (hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)*

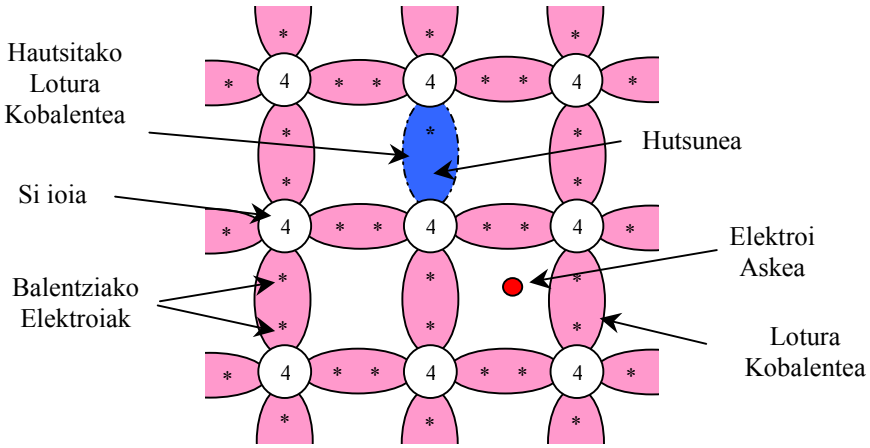
Silizio (14) eta germanio (32) atomoek lau elektroi dituzte beren azken geruzan. Jakina denez, atomoen egoerarik egonkorrena azken geruzan zortzi elektroi izatea da. Horretarako, atomo bakoitzak bere lau elektroiak konpartitzen ditu inguruko beste lau atomoekin, eta horietako bakoitzetik bana hartu. Horrela, zortzi elektroi ditu, beste atomoekin banaturik bada ere. Lotura bakoitzeko bi elektroi horiek adar horretatik mugitzen dira, beraien bi jabeen artean. Lotura mota horri *lotura kobalente* deritzo.

Egitura horretan, atomoak elkarrengandik urruntzen dira, eta, plano bat baino, tetraedro bat eratzen dute. Tetraedro hori hiru dimentsioetan errepikatuz ez dago egitura koherente bat lortzerik. Bai, ordea, 2.3 Irudian agertzen den zortzi tetraedroko egitura. Silizioak dituen egituretako baten zelula unitarioa da hori (kasu horretako zelulak 8 atomo ditu). Zelula unitario ezberdinak daude, egitura ezberdinak sortzen.



2.4 Irudia. *Kristala tenperatura baxuan*

Tenperatura oso baxua denean (~0K), atomo bakoitzak bere elektroiak zuhurki gordetzen ditu eta lotura bakoitzak (bere) bi elektroiak ditu. Ez dago, beraz, mugitzeko karga askerik eta, eremu elektriko bat aplikatzean, ez da ia korronterik sortuko. Materiala isolatzailea da, beraz.



2.5 Irudia. *Kristala giro-tenperaturan*

Tenperatura igotzean, atomoen higidura/ikara termikoak zenbait lotura kobalenteren haustura dakar eta kristalean zehar mugi daitezkeen karga libreak agertzen dira. Lotura bat hausteko behar den gutxieneko energia E_G da (E_{GSi} = 1.15 eV, E_{GGe}= 0.7 eV, giro-tenperaturan eta tenperaturaren arabera jaisten dira). Energi Banden / Mailen teoriak azaltzen du horren zentzu fisikoa. E_G ionizazio-energiaren antzekoa da, baina ionizazio-energia klasikoa baino askoz txikiagoa: atomo bakar bati elektroi bat kentzea latzagoa da

zenbait atomok konpartitzen dutenean baino. Eroapeneko elektroi edo elektroi aske (e^-) bilakatu da; hau da, korronte-eramaile bat dugu.

Elektroiak, alde egitean, zulo bat, hutsune bat uzten du. Elektroiak bere bidea egingo du sare kristalinoan zehar hutsune bat topatu arte. Orduan, biak lotu eta desagertzen dira, eta, horren ondorioz, energia askatzen da: **birkonbinatzen** dira. Baina hutsunea ere nolabait mugitzen da: oso erraza da –estatistikoki- aldameneko elektroi batek hutsunea betetzea. Horrenbestez, esan daiteke hutsune berriak betetzen dituzten elektroien mugimendua jarraitu baino, elektroi ezberdinak direnez, hutsunea mugitzen dela. Eta modu independentean. Hutsunea ez da elektroi askea bezain bizkorra (estatistika kontuak), baina mugitu egiten da. , Benetako elektroien korronte bera emateko, haren karga +1.6E-19 C da.

Elektroi askeen kontzentrazioari (kopurua/bolumena) "n" deritzo. Hutsuneen kontzentrazioari, berriz, "p".

Erdieroale puruetan (intrintsekoetan), beraz, elektroi (aske) bakoitzeko hutsune bat sortzen da ($p = n = n_i$). Desagertu ere, pareka desagertzen dira. Eta elektroien kontzentrazioa (n) tenperaturaren arabera igotzen da.

Siliziozko zentimetro kubiko batean:

- $5 \cdot 10^{22}$ atomo daude
- $14 \cdot 5 \cdot 10^{22} = 6 \cdot 10^{23}$ elektroi ditugu, horietako $2 \cdot 10^{23}$ azken geruzan
- Giro-tenperaturan, 10^{10} elektroi inguru ditugu (eta beste hainbeste hutsune). Beraz, azken geruzako $2 \cdot 10^{13}$ elektroietatik, bat baino ez da askatzen.

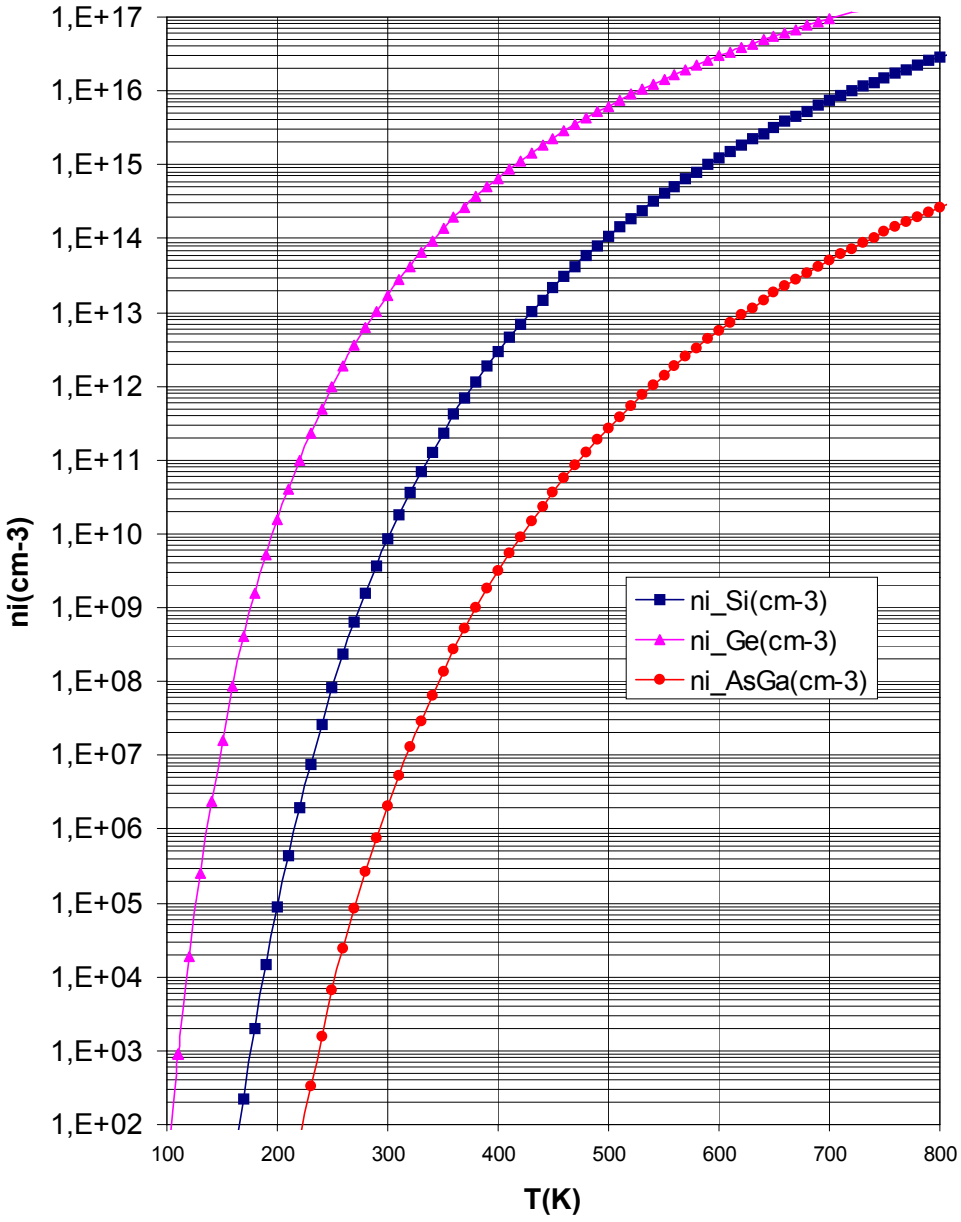
OREKA TERMODINAMIKOA

Lagin bat oreka termodinamikoan (OTDan) egongo da baldin eta **aspalditik isolatuta** badago (inolako kanpo-eragin edo kitzikapenik gabe).

Oreka termodinamikoan, definizioz, ez dago tenperatura-aldaketarik ezta partikula-fluxurik ere.

Orekan egoteak kitzikapenak *aspalditik* ez izatea eskatzen duenez, egoera geldikorra da. Oreka termodinamikoa, nolabait, kitzikapen oro desagertzerakoan, materialak bilatzen duen egoera geldikorra da.

Egoera horretan, materialaren puntu (makroskopiko) bakoitzean, kontzentrazioak konstanteak dira eta partikulen fluxua nulua da, baina horrek ez du esan nahi inolako erreakzio edo mugimendurik ez dagoenik. Izan ere, loturak etengabe apurtu eta berreraikitzen dira. Eta partikula askeak (eramaileak) modu aleatorioan mugitzen dira, baina partikula mota bakoitzaren mugimendu garbia nulua da.



2.6 Irudia. *Ge, Si eta GaAs materialen berezko eramaileen kontzentrazioen bilakaera tenperaturaren arabera*

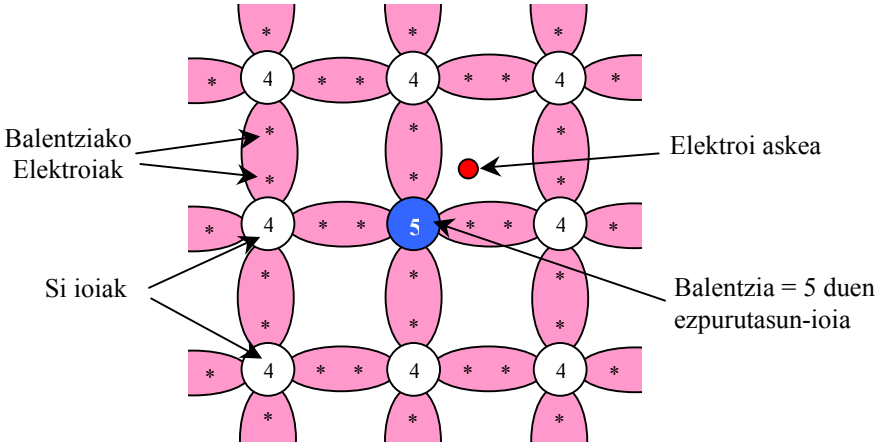
2.3 Erdieroale estrintsekoak: ezpurutasun emaile eta hartzaileak

Erdieroale material bat estrintsekoa da, bere baitan ezpurutasun nahikoak dituenean. Hots: berezko 10^9 atomoko ezpurutasun bat baino gehiago dugunean ($5 \cdot 10^{13}$ ezpurutasun/cm^3).

Berezko erdieroaleetan, elektroi eta hutsune kopurua (kontzentrazioa) tenperatura normaletan nahiko baxua da. Adibidez, silizioan, zentimetro kubiko bakoitzeko $5 \cdot 10^{22}$ atomo badaude ere, bakarrik 10^{10} eramaile pare daude.

Eramaile-kontzentrazioa handitzeko, ezpurutasunak sartu ohi dira, kopurua kontrolatu dz. Hala, dopaturiko erdieroaleak sortzen dira. Ezpurutasunei *dopatzaileak* edo *dopagarriak* deritze eta prozesuei *dopaketa* (edozein ezpurutasunek ez du balio). Ezpurutasunak eramaile mota baten kontzentrazioa handitzen du.

2.3.1 N MOTAKO ERDIEROALEAK: EZPURUTASUN EMAILEAK



2.7 Irudia. *Ezpurutasun emailea eta elektroia*

2.7 Irudian, dopatutako siliziozko kristala irudikatu da. Materiala silizioa da oraindik, baina haren egitura aldatu da, nolabait iritsi den fosforo atomo batek erdiko silizioaren postua hartu duela. Fosforoaren zenbaki atomikoa 15 denez, bararen tamaina silizioaren antzekoa da eta sare kristalinoan arazo handirik gabe sartzen da.

Baina, bere azken geruza atomikoan, bost elektroi ditu, silizioak ez bezala. Beraz, inguruko lau silizioen loturak ase ondoren, loturarik gabeko (konpartitu gabeko) elektroi bat geratuko da loturarik ez duen fosforo atomoaren inguruan.

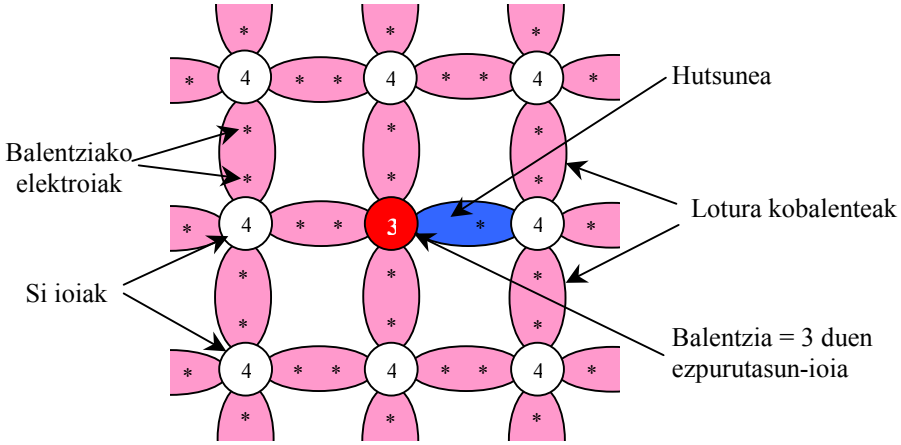
Fosforoak, orain, azken geruzan zortzi elektroi dituenez, lotura ahuldu egin da: ez da beharrezkoa hain hurbil egotea. Beraz, elektroi aske bat erraz sor daiteke (ioi positibo batekin batera). Ioiak mugitzerik ez duen bitartean, elektroiak bai.

Makroskopikoki materiala neutro mantentzen bada, beste alde batetik (kanpotik adibidez), elektroi bat badator.

Tenperatura oso txikia denean, elektroia loturik geratzen da (nahiz eta lotura ahula izan, ez du hura apurtzeko behar duen energia nahikorik). Baina, tenperatura oso baxua ez bada, badugu elektroi aske bat. Zentimetro kubiko bakoitzeko 10^{15} fosforo atomo sartzen baditugu, pentsatzekoa da (lehenengo hurbilketan) $10^{15} + 10^{10}$ elektroi eta 10^{10} hutsune egongo direla. **Ugarienak,** elektroiak dira. **Urrienak**, berriz, hutsuneak dira.

Elektroi askeak sortzen dituzten materialek *ezpurutasun emaile* dute izena. Giro-tenperaturan, hutsune baino elektroi gehiago dituen materiala *n motako materiala* da, eramaile nagusienen karga *n*egatiboa delako.

2.3.2 P MOTAKO ERDIEROALEAK: EZPURUTASUN HARTZAILEAK



2.8 Irudia. *Ezpurutasun hartzailea eta hutsunea*

2.8 Irudiko siliziozko kristalean, boro atomo batek hartu du erdiko silizioaren postua. Haren zenbaki atomikoa bost denez, azken geruza elektronikoan, hiru elektroi ditu. Hori dela eta, inguruko lau silizioen elektroiekin ere, oraindik, elektroi bat falta zaio azken geruzan zortzi elektroi izateko. Nahiz eta neutroa izan, beste elektroi bat balu, egonkorragoa litzateke. Hortaz, inguruko lotura batetik elektroi bat askatzen bada, boroak berehala hartzen du. Hala, konpentsatu gabeko hutsune bat sortzen da, kristaletik mugitzeko prest. Negatiboki kargaturiko guneak (ioiak), aldiz, ezin da mugitu.

Elektroiak hartzen dituzten ezpurutasunek *hartzaile* dute izena. Hartzailez dopaturiko materialetan, hutsuneak ugariago dira elektroiak baino; hala ere, bietatik daude (elektroiak loturak termikoki/estatistikoki apurtzetik datoz). Eramaile ugarienenen karga *p*ositiboa denez, materiala p motakoa dela esaten da..

Hiru ohar:

- Atomo dopagarriak dopatutako materialean berezko atomoen lekua hartzeko gai izan behar du. Silizioa dopatzeko, emaileen artean, fosforoa, antimonioa eta artsenikoa erabiltzen ditugu. Dopagarri hartzaileen artean, boroa, aluminioa, galioa eta indioa ditugu. Prozesu hori kristala haztean bertan edo gero, dispositiboaren fabrikazioan, kanpotik ezpurutasunak sarraraziz egin daiteke.
- Atomo dopatzaile batek eramaile bat sorraraztean, kontrako zeinuaz kargatzen da. (e- bat sortu orduko, positiboki; h^+ bat sortzean, negatiboki). Eramaileak mugi daitezke, korrontea eraman dezakete eta materialak horien bidez eroaten du. Ioia bertan dago, tinko finkaturik.
- Zentimetro kubiko bakoitzeko kontzentrazioak:

  $5 \cdot 10^{22}$ silizio atomo; 10^{10} eramaile bikote;

  10^{15} dopagarri atomo gehituz gero: 10^{15} ioi, kontrako motako 10^{15} eramaile (ugarienak edo maioritarioak) eta ioien zeinu bereko eramaile batzuk (urrienak edo minoritarioak)

2.4 Kontzentrazioaren kalkulua: Masa-ekintzaren legea eta Kargaren neutraltasuna. Kontzentrazioen bilakaera tenperaturarekin.

MASA-EKINTZAREN LEGEA

Kimikan, erreakzio askok *masa-ekintzaren legea* delakoa betetzen dute. Lege horrek dioenez, erreakzioaren abiadura erreakzioaren bi osagaien kontzentrazioen biderkaduraren menpe dago.

Gure kasuan, erreakzioa honako hau da:

$lotura \leftrightarrow e^- + h^+$ (→, sorrera; ←, birkonbinaketa)

Non sorrera = G = $f_1(T)$; eta birkonbinaketa = R = $f_2(T) \cdot n \cdot p$;

Orekan → G = R ($G_{th} = R_{th}$)→ np = $f_1(T)/ f_2(T) = f_3(T) = n_i^2(T)$]

Beraz, masa-ekintzaren legeak honako hau dio :

Tenperatura jakin batean, n x p = konstantea

Eta berezko erdieroaleetan n x p = n_i x n_i = n_i^2 betetzen denez, konstantea beti n_i^2 da, bai erdieroale intrintsekoetarako bai erdieroale estrintsekoetarako:

$n \cdot p = n_i^2$

Masa-ekintzaren legea orekan betetzen diren ekuazio nagusietako bat da.

KARGAREN NEUTRALTASUNAREN EKUAZIOA

Orain arteko ekuazioetan, ezpurutasun-kontzentrazioa ez da agertu. Lehen hurbilketa batean esan dugunez, ugarien kontzentrazioa = M ~ ezpurutasun kopurua. Kargaren neutraltasunak ezpurutasun eta eramaileen arteko erlazio zehatza dakar.

Demagun uniformeki dopatutako erdieroale bat dugula, eta ezpurutasun kontzentrazioak N_D eta N_A direla (emaile eta hartzaileenak, hurrenez hurren). Beraz, makroskopikoki begiratuz, puntu bakoitzean dagoen kargak zero izan behar duenez,

$$q \cdot k \arg a_{positiboak} - q \cdot k \arg a_{negatiboak} = q \cdot \left[p + N_D^{+} - n - N_A^{-} \right] = 0$$

non N_D^{+}, eta N_A^{-}, ionizatutako ezpurutasun hartzaile eta emaileak baitira.

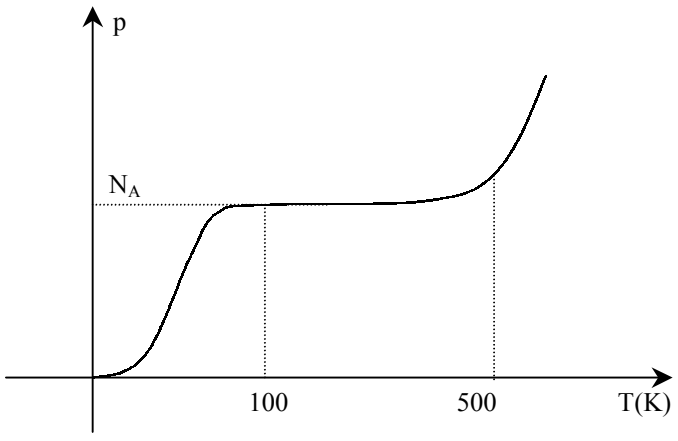
Gure <u>ohiko</u> kasuetan, tenperatura 298-300 K (25-27ºC) ingurukoa izaten denez, ezpurutasun guztiak ionizaturik egoten dira eta, beraz: $p + N_D - n - N_A = 0$;

BILAKAERA TENPERATURAREKIN [P motako erdieroale batean]

Demagun N_A ezpurutasun hartzailez dopaturiko erdieroalezko lagin bat dugula. [Giro-tenperaturan, $N_A^{-} = N_A >> n_i$]

Beraz,

$$p^2 - p \cdot N_A^{-} - n_i^2 = 0 \Rightarrow p = \frac{N_A^{-} \oplus \sqrt{N_A^{-2} + 4n_i^2}}{2} = \begin{cases} T \downarrow \Rightarrow p \approx n_i(T) \\ T \leftrightarrow \Rightarrow p \approx N_A^{-} \\ T \uparrow \Rightarrow p \approx n_i(T) \end{cases}$$



2.9 Irudia. *Ezpurutasun-kontzentrazioaren ohiko bilakaera tenperaturaren arabera (p motako erdieroale batean)*

Hiru portaera ikusten ditugu:

- Tenperatura oso baxuetan, ezpurutasun guztiak ez daude ionizaturik, eta, beraz, $N_A^- < N_A$. Orduan, $N_A^- >> n_i$ bada, $p = N_A^-$, baina, $N_A^- << n_i$ bada, orduan, $p = n_i$.
- Tenperatura igotzean (adibidez, giro-tenperaturan), ezpurutasun guztiak ionizatzen dira ($N_A^- = N_A$) eta, orduan, $p = N_A$.
- Tenperatura asko igotzen bada ($T >> T_{ambient}$), orduan, $n_i >> N_A$ bilakatzen da. Eta $p = n_i$. Lagina, portaeraren aldetik, intrintseko bihurtzen da berriro.

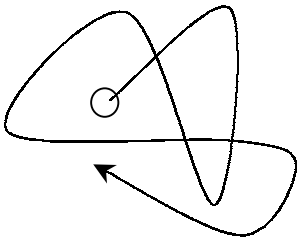
2.5 Eramaileei buruzko terminologiaren laburpena

- Dopatzaileak edo material dopagarriak: erdieroaleei dosi kontrolatuetan gehitzen zaizkien ezpurutasun berezien atomoak, elektroi edo hutsune-kopuruak handitzeko.
- Erdieroale intrintsekoa: dopatu gabeko erdieroalea, oso material garbia edo purua; ezpurutasun-kopuru hutsala duenenez, ezaugarriak berez edo intrintsekoki ditu.
- Erdieroale estrintsekoa: dopaturiko erdieroalea. Dopaketak erdieroalearen ezaugarriak eta portaera nabarmenki aldarazten ditu.
- Ezpurutasun emailea: elektroi kopurua handitzen duen ezpurutasuna; n motako dopatzailea.
- Ezpurutasun hartzailea: hutsune-kontzentrazioa igotzen duen ezpurutasuna; p motako dopatzailea.
- N motako materiala: ezpurutasun emailez dopaturikoa; hutsune baino elektroi gehiago ditu.
- P motako materiala: ezpurutasun hartzailez dopaturikoa; elektroi baino hutsune gehiago ditu.
- Eramaile ugarienak edo gehien-eramaileak: erdieroalezko lagin batean gehien azaltzen diren korronte-eramaileak. N motako materialetan, elektroiak; p motakoetan, hutsuneak.
- Eramaile urriena edo gutxien-eramailea: lagin batean gutxien azaltzen den eramaile mota. N motako materialetan, hutsunea; p motakoetan, elektroia.

3. KORRONTEAREN EROAPENA

Aurreko ikasgaian, erdieroale batean oreka termodinamikoan elektroi eta hutsune-kontzentrazioak ebazteko erabiltzen diren ekuazioak ikasi genituen.

Oreka termo*dinamikoan*, eramaile mota bakoitzaren mugimendu garbia nulua izan arren, eramaileak ez daude geldirik. Jatorri termikoa duen energia zinetikoa dutenez, eramaileak etengabe mugitzen dira. Ibilaldiak laburrak eta aleatorioak dira, sare kristalinoan atomoekin talka egiten dutelako. Mugimendu termiko hori aleatorioa denez, korrontea, guztira, zero da.



3.1 Irudia. *Elektroi baten mugimendu aleatorioa*

Talken artean, mugimenduak nahiko azkarrak izaten dira giro-tenperaturan ere v_{th} = 1E7 cm/s (orduko 360.000 km).

Kanpotik perturbazio bat datorrenean bakarrik gerta daiteke korronte elektrikoa, bestela eramaileen guztizko erantzuna hutsa da-eta.

Erdieroaleetan, hiru erantzun posible daude kanpoko eragin baten aurrean: atoia, barreiapena eta sorrera-birkonbinaketa prozesuak. Kapitulu honetan lehenengo biak ikusiko ditugu, eta azken prozesua hurrengoan ikasiko dugu.

Nahiz eta bakoitza bere aldetik analizatu, hiru prozesuak batera gertatzen dira, eta elkarrekin erlazionatzen dira.

3.1 Korrontearen eroapenaren mekanismoak:

- Atoiko mekanismoa: erdieroalean, kanpoko kausa bat dela-eta, eremu elektriko bat – potentzial bat- agertzen denean gertatzen da. Metaletan gertatzen denaren antzekoa da, eta bere adierazpide matematikoa Ohmen legea da.
- Barreiapeneko mekanismoa: elektroi- eta hutsune-kontzentrazioetan gradienteak edo espazioarekiko aldaketak daudenean gertatzen da. Mekanismo hori erdieroaleen berezitasun bat da eta hortik datoz dispositiboen ezaugarri eta aplikazio gehienak

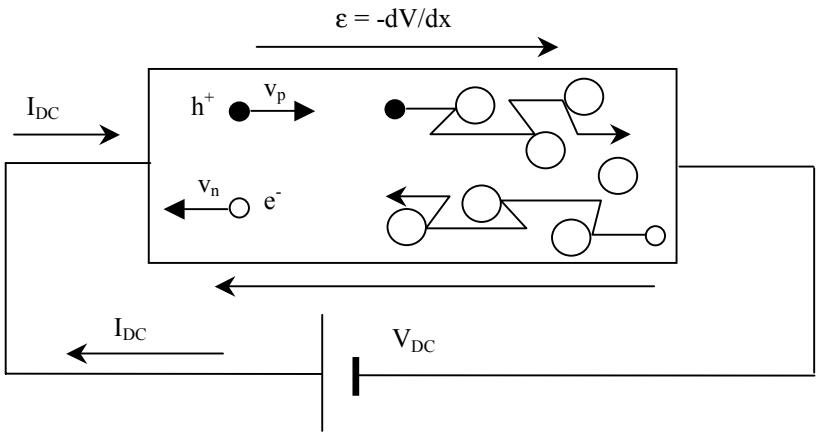
3.2 Atoiaren bidezko eroapena: Ohmen legea

Atoia edo deriba, definizioz, karga duen partikula aske batek aplikatutako eremu elektriko baten menpean duen mugimendua da.

Erdieroale batean, aplikatutako eremu batek, karga positiboak eta negatiboak bereizten ahalegintzen da. Karga positiboek (hutsuneek) eremuaren noranzkoan joateko joera agertzen dute. Negatiboek (elektroiek), aldiz, eremuaren kontrako noranzkoan joko dute (ikus 3.2 Irudia).

Sarearen kontrako talkak direla-eta –termikoki iraultzen ari den sareko atomoen eta ezpurutasunen ioien kontra- azelerazioa eten eta berrasten da.

Esan daiteke kanpotik, ikuspegi makroskopikotik, eramaile bakoitzaren higidura garbia v konstante batez gertatzen dela (batez beste).

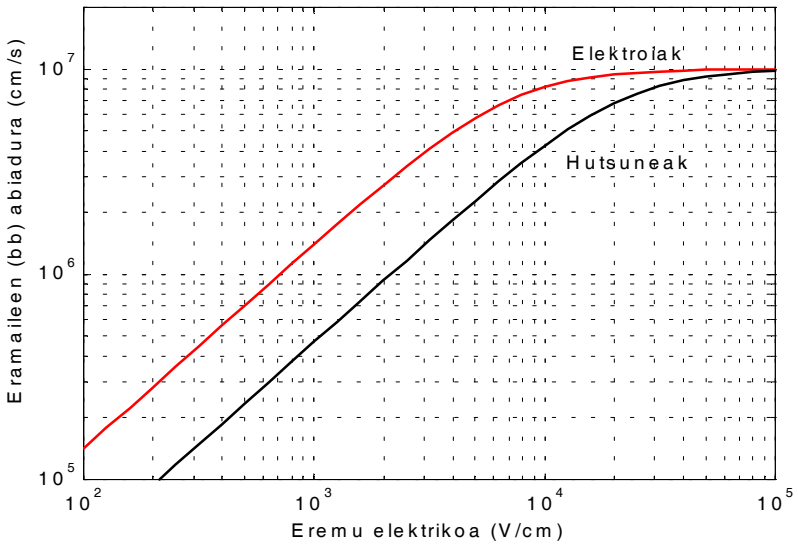


3.2 Irudia *Atoiko korrontearen mekanismoa*

Atoia, beraz, eremuak eramaileak –bere noranzkoan edo kontrakoan- mugiaraztea da; mugimendu hori abiadura eraginkor konstanteaz gertatzen da.

Higidura termikoak bere horretan jarraitzen du. Gainezartzen zaion atoiaren eragina hutsa izango ez denez, mugimendu termikoa ez dugu normalean aipatzen, baina ez da desagertu. Hau da, praktikoki, aintzat ez hartzeko modukoa da.

Eramaileek hartzen duten batez besteko abiadura eremuaren balio absolutuaren araberakoa da. Kasu orokorrean, menpekotasun nahiko konplexuak agertzen dira eta modelatze matematikoa ez da batere erraza. Baina, gure ohiko egoeretan, eramaileek hartzen duten abiadura eremuarekiko proportzionala da, 3.3 Irudian ikusten denez (interesgarria izaten den tartean). Gero asetzen da, eta ez dago 1E7 cm/s lortzerik.



3.3 Irudia. *Atoiko abiaduraren neurketa esperimentalak (tenperatura eta dopaketa finkoak mantenduz): eremuarekiko menpekotasun lineala du tarte zabal batean*

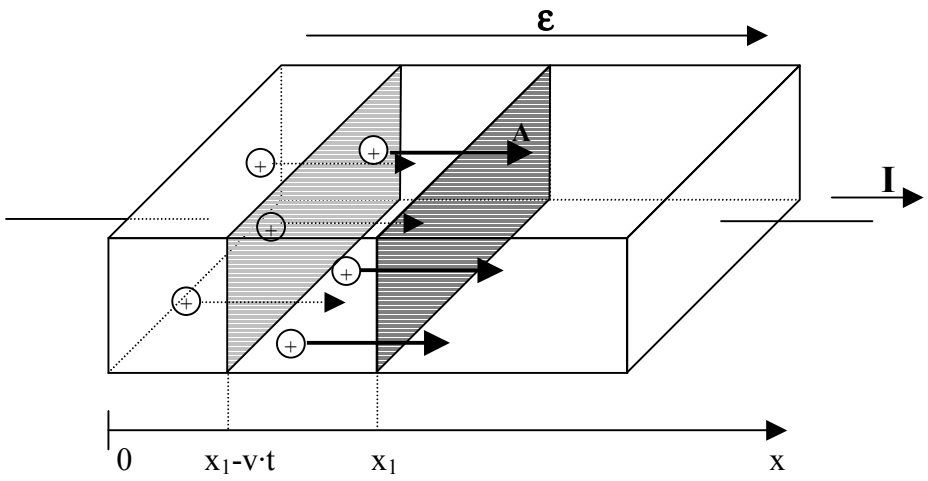
Beraz, eta eragiten duen abiaduraren noranzkoa kontuan hartuta, guri interesatzen zaigun tartean:

$v_n(cm/s) = -\mu_n \times \varepsilon(V/cm)$

$v_p(cm/s) = +\mu_p \times \varepsilon(V/cm)$

non μ mugikortasuna baita, $\mu_n = 1200\ cm^2/s/V$ eta $\mu_p = 400\ cm^2/s/V$ izaten baitira gutxi gorabehera.

ATOIKO KORRONTEAREN ADIERAZPENAREN EBAZPENA:



3.4 Irudia. *Atoiko korrontearen ebazpenerako eskema (hutsuneetarako)*

L luzera eta A sekzioa dituen erdieroalezko lagina hartuta, t denboran sekzio bat **eskuinerantz** zeharkatzen duen **c motako eramaileen korrontea** kalkulatuko dugu:

c bolumeneko c motako eramaileen kontzentrazioa da

v eramaileen abiadura da (negatiboa izan liteke) eta, beraz, eramaileek v·t distantzia egiten dute t denboran.

T denboran A sekzioa **eskuinerantz** zeharkatzen duten c eramaileak = cAv·t

Denbora horretan A sekzioa **eskuinerantz** zeharkatzen duen karga = q_ccAv·t

Korrontea = Karga / t = q_ccAv.

Korronte-dentsitatea = Korronte/A = $q_c$cv.

Emaitza elektroietarako eta hutsuneetarako bereiziz gero:

$J_{n,\ atoi} = -q \times n \times v_n$

$J_{p,\ atoi} = q \times p \times v_p$

Aurreko ekuazioetan abiaduren adierazpenak erabilita,

$J_{n,\,atoi} = -q \times n \times (-\mu_n \times \varepsilon) = q\,p\,\mu_n\,\varepsilon$

$J_{p,\,atoi} = q \times p \times (+\mu_p \times \varepsilon) = q\,p\,\mu_p\,\varepsilon$

Beraz, atoiko korrontea, guztira:

$$\mathbf{J_{atoi} = J_{p,\,atoi} + J_{p,\,atoi} = q\,p\,\mu_p\,\varepsilon + q\,p\,\mu_p\,\varepsilon = q\,(n\mu_n + p\mu_p)\,\varepsilon}$$

Bestalde, Ohmen legeak dioenez: $I \times R = V$

$$JA \times \rho\,(L/A) = \varepsilon \times L \;\rightarrow\; \mathbf{J = \varepsilon / \rho = \sigma \times \varepsilon}$$

non σ eroankortasuna eta ρ erresistibitatea diren.

Eroankortasuna materialak eroateko duen erraztasuna da (siemens/cm edo 1/ohm/cm). Erresistibitatea materialak korrontea eroateari jartzen dion oposizioa da.

$\sigma = q\,(n\mu_n + p\mu_p) = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p$

$\rho_n = 1 / \sigma_n \qquad \rho_p = 1 / \sigma_p \qquad \rho_n = 1 / (1/\rho_n + 1/\rho_p)$

Beraz, bi eramaile mota izatea bi erresistentzia paraleloan izatea bezalakoa da.

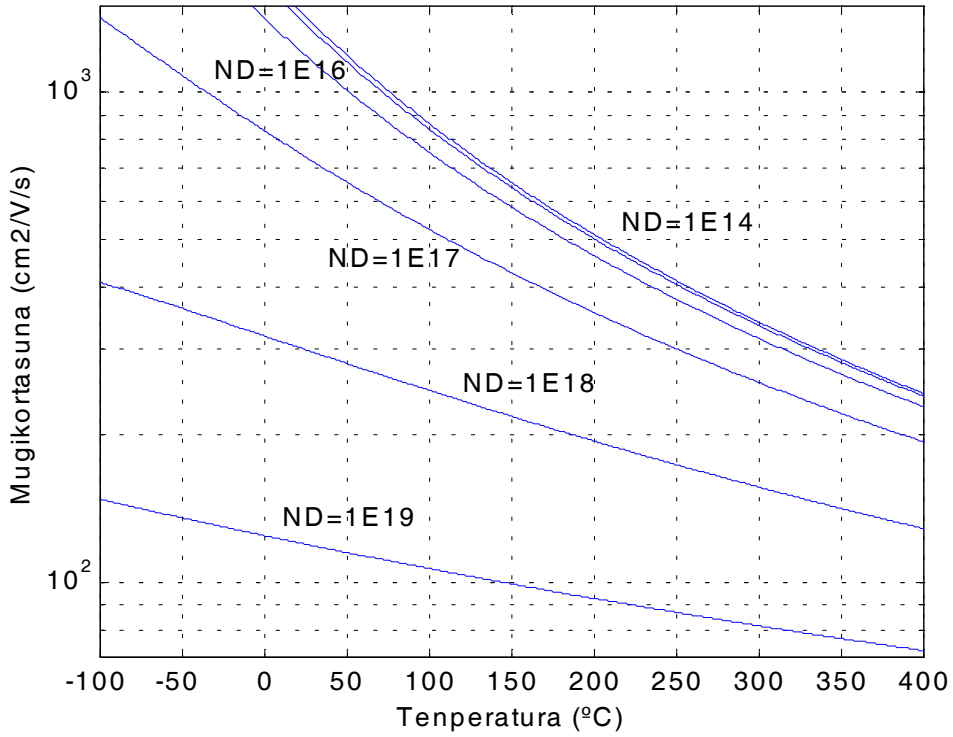
- Berezko erdieroale batean, orekan, $n = p = n_i$ eta, beraz, $\sigma = q\,(\mu_n + \mu_p)\,n_i = \sigma_i$ (berezko eroankortasuna). Berehala ikusten denez, tenperatura igo ahala, n_i hazten da eta erdieroaleak hobeto eroaten du.
- Erdieroale estrintseko batean, $M >> m$ eta, beraz:

  $\sigma = q\,(m\mu_m + M\mu_M) \sim q\,M\mu_M$. Orduan, $\sigma = \sigma_M$.

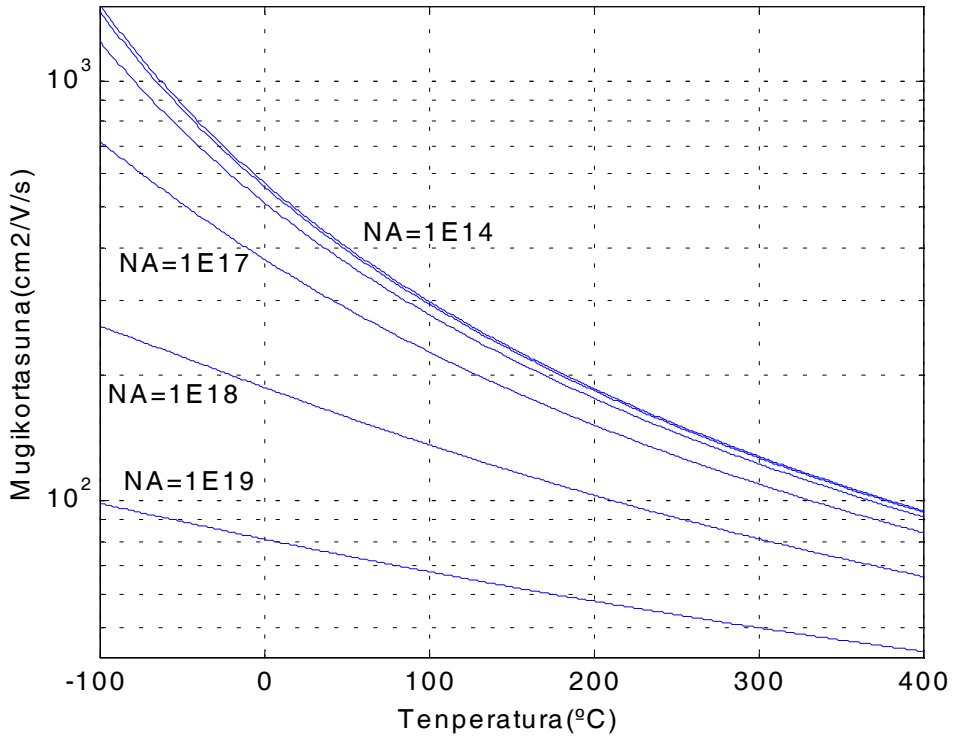
MUGIKORTASUNA, μ:

Atoiaren parametro nagusia aztertu behar dugu jarraian, hau da, mugikortasuna:

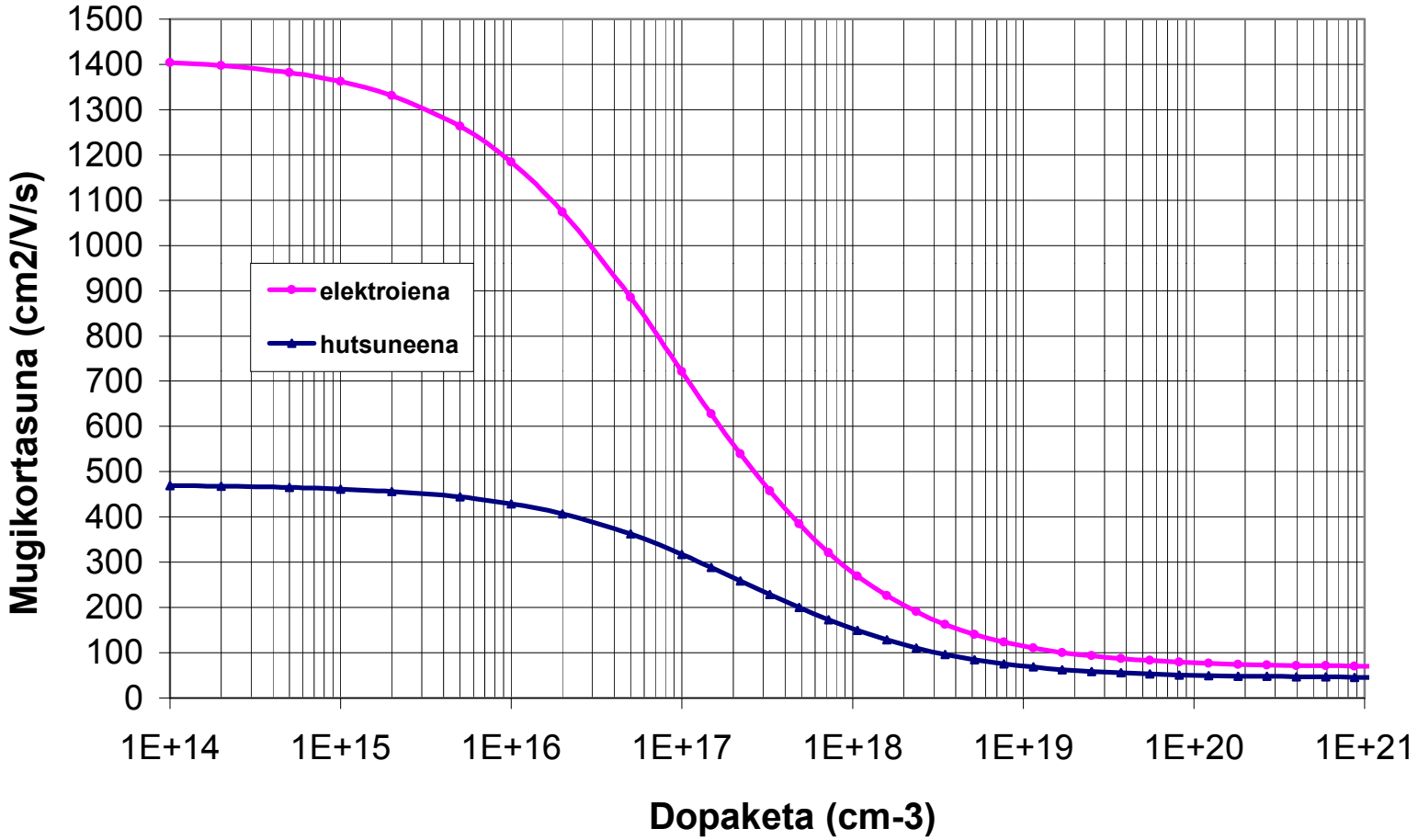
- Unitateak: $cm^2/V/s$
- Gure problemetan konstantea izango den arren, ez da zehazki konstantea. Tenperaturaren, ezpurutasun-kontzentrazioaren eta eremuaren menpe dago.
- Eramaile baten mugikortasunak, bere izenak adierazten duenez, eramaileak -eremu baten pean- duen mugitzeko erraztasuna adierazten digu.
- Kasu gehienetan, $\mu_n > \mu_p$; Normalean izaten ditugun dopaketekin, $\mu_n \sim 2.5\,\mu_p$. Horregatik, dopaketa berdina izanez gero, n motako erdieroaleak eroale hobeak izaten dira.



3.5 Irudia. *Elektroien mugikortasuna tenperaturaren eta dopaketaren arabera*



3.6 Irudia. *Hutsuneen mugikortasuna tenperaturaren eta dopaketaren arabera*



3.7 Irudia. *Hutsuneen eta elektroienen mugikortasuna dopaketaren arabera (giro-tenperaturan)*

3.3 Barreiapeneko eroapena

Gasen zinetikan, barreiapena edo difusioa fenomeno ezaguna da partikula klasikoetan, eta , higidura termiko aleatorioan du jatorria. Higidura horrek, gasa bere gordailu osoan zehar barreiatzera ——mugitzera— darama.

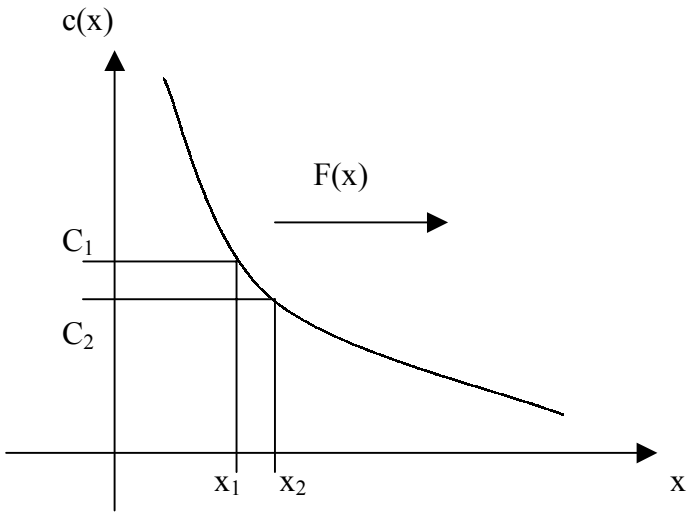
Talka baten ondoren, partikula bakoitzak edozein noranzko hartzeko probabilitate berak ditu. Hori dela-eta, eramaileak oso ugari diren tokietatik, oso urri direnetarantz mugitu edo barreiatzen dira. Gas-ihesak horren adibide izango dira.

Barreiapena, beraz, kontzentrazioaren aldaketa espazialak daudenean gertatzen da. Barreiatzeko ez da beharrezkoa partikulek karga izatea (partikula askeak izatearekin nahiko da).

Partikula horiek karga dutenean, difusioko jarioak korronte elektrikoa dakar.

BARREIAPENEKO KORRONTEAREN ADIERAZPENAREN EBAZPENA:

Demagun erdieroale batean eramaile mota orokor baten kontzentrazioa C(x) dela, hau da, posizioaren funtzioa dela.



3.8 Irudia. *X ardatzean aldatzen den eramaile-kontzentrazioa eta barreiapeneko jarioa*

Horrenbestez, eramaile mota horren jarioak puntu batetik alboko puntu batera dagoen kontzentrazio aldearekiko menpekotasun lineala du. Era berean, distantziarekiko menpekotasun inbertsoa du. Jarioa C handiagoa den lekutik C txikiagoa den lekura doa.

Matematikoki:

$F = - K \times (C2-C1)/(D2-D1)$.

$F(x) = - K \times [C(x_2)-C(x_1)]/(x_2-x_1)$

$x_2 \sim x_1$ eginez,

$F(x) = - K \times [C(x+dx)-C(x)/(x + dx - x) = -K \times dC(x)/dx = -K \times \nabla C(x)$

$F(x) = -D \times \nabla C(x)$ **(Ficken lehenengo legea)**

D (cm^2/s) difusio edo barreiapeneko koefizientea da

Hala, fluxu-dentsitateak $cm^2/s \cdot$partikula/cm^3 / cm = partikula/cm^2/s unitateak izango ditu.

(Kasu praktiko batean, x puntua gainazal bat da. Laginaren sekzioa A (cm^2) bada, F = partikula / cm^2 /s)

$F(x) = -D \times \nabla C(x)$ bada eta eramaileen karga *k* bada,

$I_{eramaile_barreiapen} = k_{eramaile} \times (-D_{eramaile} \times \nabla C(x) \times A)$

$J_{n_barreiapen}$ $= -q \times (-D_n \times \nabla n(x)) = qD_n \nabla n =$ (normalean) **$qD_n dn/dx$**

$J_{p_barreiapen}$ $= q \times (-D_p \times \nabla p(x)) = -qD_p \nabla p =$ (normalean) **$- qD_p dp/dx$**

Erdieroalean normalean bi eramaile motak izaten ditugunez,

$J_{barreiapen} = J_{n_barreiapen} + J_{p_barreiapen} = qD_n \nabla n - qD_p \nabla p = q(D_n \nabla n - D_p \nabla p)$

3.4 Einsteinen erlazioa

$D_{eramaile}$ eramaile horren barreiapenaren koefizientea da. Mugikortasunarekin gertatzen zen bezalaxe, eramaile motaren, materialaren, tenperaturaren eta ezpurutasun-kontzentrazioaren menpe dago.

Izan ere, bi parametroen arteko erlazio bat dago: **Einsteinen erlazioa,** hain zuzen ere.

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} = V_T$$ (non V_T potentzial termikoa baita)

non K ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K edo $8.625 \cdot 10^{-5}$ eV/K), Boltzmanen konstantea baita.

Giro-tenperaturan, KT/q = 0.0259 V.

Erlazio horrek argi uzten du atoia eta barreiapena ez direla independenteak. Ikuspuntu sinple batetik, aurrikus genezakeen, zeren, mugikortasuna handiagoa bada, difusio koefizientea handiagoa izango baita.

Tenperatura igotzerakoan, eramaileen eta sarearen mugimendu aleatorioak areagotzen dira. Beraz, barreiatzeko joera (D_m) handiagoa da, baina kanpoko eremu baten pean sarean zehar ibilbide zuzena hartzeko erraztasuna (μ_m) txikixeagoa.

3.5 Guztizko korronteak

Eroapena bi mekanismoez gertatzen denez, guztira:

$J = J_n + J_p = J_{n_b} + J_{n_a} + J_{p_b} + J_{p_a}$

$J = J_{n_a} + J_{p_a} + J_{n_b} + J_{p_b} = J_{atoi} + J_{barreiapen}$

$\mathbf{J = \sigma \times \varepsilon + q(D_n \nabla n - D_p \nabla p) = J_{ohm} + J_{difusio}}$

non $\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q\,(n\mu_n + p\mu_p)$

Hor ikusten dugunez, Ohmen legea ez da beti betetzen erdieroaleetan.

Izan ere, bakarrik $D_n \nabla n = D_p \nabla p$ denean betetzen da: adibidez, uniformeki dopatutako laginetan, oreka termodinamikoko kontzentrazioak ditugunean ($\nabla n = 0$ eta $\nabla p = 0$) .

4. SORRERA ETA BIRKONBINAKETA

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

- Sorrera 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.

$$lotura + energia \leftrightarrow elektroia + hutsunea$$

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

Energia -banden teorian, elektroi baten balentziako bandatik eroapeneko bandarako trantsizioa da sorrera (horretarako, E_G baino energia handiagoa eman behar diogu elektroiari). Birkonbinaketa elektroiaren 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 argiztatze edo argia igortzea (fotosorrera eta fotobirkonbinaketa,

non: $lotura + fotoia \leftrightarrow e^- + h^+$); beste partikula batzuez 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. Oreka 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 gainazaletan 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 korronteetan, atoiko eta barreiapeneko prozesuetan parte hartzen duten eramaileen kontzentrazioak aldatzen baitituzte.

4.1 Birkonbinaketaren abiadura oreka termodinamikotik 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), elektroien 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, elektroien eta hutsuneen kontzentrazio osoekin lan egin ordez:

$n' = n - n_0$

$p' = p - p_0$

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 ugarienak baino askoz gutxiago izaten dira (p motakoa bada, n' << p_0; n motakoa bada, p' << n_0) eta injekzio baxuan (IB) gaudela esango dugu. Bestela, injekzio ertainean edo altuan (IA) egongo gara.

Injekzio baxuan izendapen orokorragoa aplikatuz:

$m' << M_0$

$m = m_0 + m'$

$M = M_0 + M'$

eta, kargaren neutraltasunaz, $M = M_0 + m' \approx M_0$

Askotan, M_0 >> m' >> m_0 betetzen da, eta orduan m ~ 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 termodinamikotik kanpo:

$R \neq R_{th}$ (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:

$U = R - R_{th}$ Birkonbinaketa Osoa – 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 garrantzitsuena, 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, fenomenoa adierazpen nahiko sinple batez adieraz daiteke:

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

Hau da,

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

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

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

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

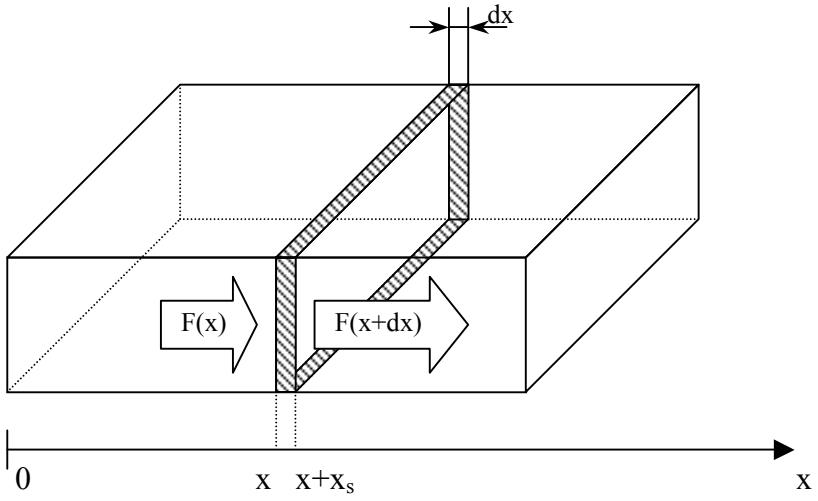
4.2 Gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera

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 (pare/cm^2·s) (gainazaleko birkonbinaketa-abiadura) erabili ohi da.

Antzeko prozedura erabiltzen da eskualde oso meheetan bolumeneko sorrera oso handia denean: orduan, G_S (pare/cm^2·s) gainazaleko sorrera definitzen da.



4.1 Irudia. Gainazala eskualde mehe baten bidez adierazita

ANALISI MATEMATIKOA (Injekzio baxuan)

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

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

  U (pare·cm^{-3}/s)

Hori **bolumeneko birkonbinaketaren abiadura** da.

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

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

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

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

  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),

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

  eta, orain, $\boldsymbol{U_S(x_s) = m'(x_s)\cdot S_m}$ (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 zinematikoa*** deritzo.

Analisi bera errepika daiteke gainazaleko sorrerarako:

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

baina hemen ez da sorrera zinematikorik definitzen.

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

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

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

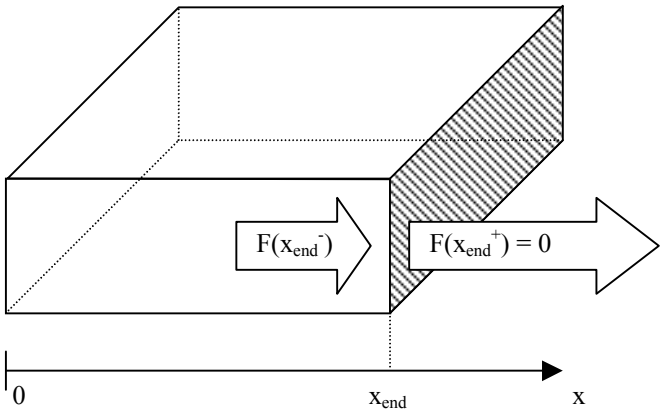
Hau da:

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

edo $F_{eskuin} = F_{ez\,\text{ker}} + G_s - U_s$

KASU BEREZIA: MATERIALAREN MUTURRAK

Materialaren aurpegietan –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:

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

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

Eta injekzio baxuan bagaude:

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

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):

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

  Injekzio baxuan m = m_0 + m' eta M ~ M_0 direnez:

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

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

  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 $20 \cdot 10^{22}$ 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 → 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.

5. EKUAZIO OROKORRAK

Aurreko lau ikasgaietan, erdieroaleen oinarrizko portaerarekin zerikusia duten fenomeno fisikoak analizatu ditugu eta orekatik kanpo gertatzen diren eramaileen erantzunik garrantzitsuenen ereduak ondorioztatu dira.

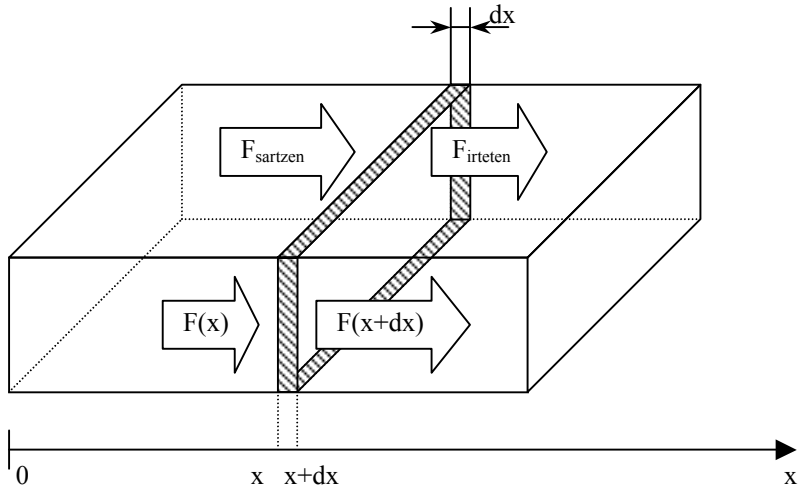
Bakoitza beraren aldetik analizatu badira ere, erantzun horiek guztiak batera gertatzen dira eta elkarren artean eragindako ondoriok kontuan hartu behar dira. Hori dela eta, fenomeno horiek guztiek kontzentrazioetan duten eragina kuantifikatzea izango da gure hurrengo helburua. Emaitza **jarraitutasunaren ekuazioak** izango dira.

Beraz, erdieroalean gertatzen dena goitik behera jakiteko gauza gara . **Egoeraren ekuazioak edo ekuazio orokorrak** dira horretarako balio duen ekuazio multzoa. Ekuazioak ebaztea zaila da, eta metodo numerikoak eta tresna informatikoak behar izaten dira, elkarrekin erlazionatutako ekuazio diferentzialak baitira.

Hala ere, zenbait egitura eta egoera errazetan, ekuazioak analitikoki ebatz daitezke. Izan ere, ikasgai honetan hiru kasu berezi eta oso esanguratsu ebatziko dira. Horien bidez, oinarrizko kontzeptu batzuk aztertzeaz gain, erabili ohi diren tresna matematikoekin lan egiten hasiko gara.

5.1 Jarraitutasunaren ekuazioak

Ebazpena erraztearren, onartuko dugu laginak *y* eta *z* ardatzetan uniformeak direla eta *x* ardatzarekin bakarrik lan egingo dugu bakarrik. Hala, 5.1 Irudiko laginaren [x – x+dx] eskualdean gertatzen dena analizatuko dugu.



5.1 Irudia. *Eramaileen jarraitutasuna aztertzea: lagin orokorra*

Jarraian, bolumeneko diferentzial horretan dauden eramailea zenbatuko ditugu. Partikula orokor baterako, bere kontzentrazioa *k(x,t)* bada:

- Bolumena dV = A·dx da.
- Eramaileen kontzentrazioa, K(x,t) da [K(x,t); K(x+dx,t) ~ K(x,t)].
- Bolumen horretan –zutean- ditugun fluxu dentsitateak F(x,t) (ezkerreko gainazalean) eta F(x+dx,t) (eskuinekoan) dira. Fluxuak eskuinerantz doazenez, F(x,t) bolumenera sartzen den fluxu dentsitatea da; eta F(x+dx,t) fluxu dentsitateak bolumenetik irteten diren eramaileen berri ematen digu.
- G(x,t) kanpoko sorrera da [G(x,t); G(x+dx,t) ~ G(x,t)].
- U(x,t) birkonbinaketa garbia da (R_{th} kenduz) [U(x,t); U(x+dx,t) ~ U(x,t)]
- G_{th}-k eta R_{th}-k elkar konpentsatzen dute.

Denbora joan ahala,

- Fluxuak bolumena zeharkatzean jasaten duen murrizketak kontzentrazioa handitzen du:

- F(x) eramaile/cm^2/s sartzen dira; eta F(x+dx) irteten dira.
- Beraz, F(x)-F(x+dx) eramaile/cm^2/s geratzen dira barruan (dx luzeran).
- Beraz, cm^3 eta segundo bakoitzeko [F(x)-F(x+dx)]/dx = **-dF/dx** eramaile.

➢ Kanpoko Sorrerak kontzentrazioa handitzen du:

- G eramaile gehiago ditugu cm^3-ko eta segundo bakoitzeko.

➢ Birkonbinaketak kontzentrazioa murrizten du:

- U eramaile gutxiago daude cm^3–ko eta segundo bakoitzeko.

Ondorioz, denboran zehar eramaileen kontzentrazioak duen bilakaera bi eragin nagusien funtzioan honela adieraz daiteke:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial k}{\partial t}\right)_{sorrera-birkonbinaketa} + \left(\frac{\partial k}{\partial t}\right)_{sarrerakofluxua-irteerakofluxua}$$

Horrek, zuzenean, honako ekuazio hau dakar:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} = G - U - \frac{\partial F_k(x,t)}{\partial x}$$

Hiru dimentsioak kontuan hartuz:

$$\frac{dk(x,y,z,t)}{dt} = G(x,y,z,t) - U(x,y,z,t) - \vec{\nabla}\vec{F}_k(x,y,z,t)$$

Eta, beraz, elektroietarako eta hutsuneetarako:

$$\frac{dn}{dt} = G_n - U_n - \frac{dF_n}{dx} = G_n - U_n + \frac{1}{q}\cdot\frac{dJ_n}{dx} = \langle orokorrean \rangle = G_n - U_n + \frac{1}{q}\cdot\frac{\vec{\nabla}\vec{J}_n}{dx}$$

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{1}{q}\cdot\frac{dJ_p}{dx} = \langle orokorrean \rangle = G_p - U_p - \frac{1}{q}\cdot\frac{\vec{\nabla}\vec{J}_p}{dx}$$

5.2 Egoeraren ekuazioak

Erdieroalezko laginaren ezaugarriak, bost ekuazio behar dira:

Poissonen ekuazioa:

$$\nabla^2 V(x,y,z) = -\frac{\rho(x,y,z)}{\in} \Rightarrow \frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\in} = -\frac{q\cdot\left[p + N_D^+ - n - N_A^-\right]}{\in}$$

Jarraitutasunaren ekuazioak:

$$\frac{dn(x,y,z,t)}{dt} = G_n - U_n - \vec{\nabla}\left(\vec{F}_n(x,y,z,t)\right) \Rightarrow \frac{dn(x,t)}{dt} = G_n - U_n - \frac{dF_n(x,t)}{dx}$$

$$\frac{dp(x,y,z,t)}{dt} = G_p - U_p - \vec{\nabla}\left(\vec{F}_p(x,y,z,t)\right) \Rightarrow \frac{dp(x,t)}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p(x,t)}{dx}$$

Garraioaren ekuazioak:

$$J_n(x,t) = -q\cdot F_n = q\cdot n(x,t)\cdot \mu_n \cdot \varepsilon(x,t) + q\cdot D_n \cdot \frac{dn(x,t)}{dx}$$

$$J_p(x,t) = +q\cdot F_p = q\cdot p(x,t)\cdot \mu_p \cdot \varepsilon(x,t) - q\cdot D_p \cdot \frac{dp(x,t)}{dx}$$

Bost ekuazioak ez-linealak eta diferentzialak dira eta elkarrekin daude erlazionaturik (akoplaturik daude).

Ebazpenak, oro har, memoria handiko ordenadorea, denbora luzea eta programa konplexuak behar ditu.

Hala ere, errazak eta fisikoki mamitsuak diren kasu batzuk ebatziko ditugu.

5.3 Eramaileen denborarekiko aldaketa: erdibizitza

Badugu ezpurutasun emaileez uniformeki dopatutako erdieroalezko lagin bat. t = 0 unean, bolumen osoa argiztatzen dugu uniformeki, segundo eta cm^3 bakoitzeko G_L eramaile pare sortzen dituen erradiazioa erabiliz (betiere injekzio baxuan).

Analizatu eramaile-kontzentrazioaren denborarekiko bilakaera (geldikortasunera arte):

Hasi baino lehen:

a) Lagina uniformeki dopatuta dagoenez eta argiztapena uniformea denez, espazioan ez da aldaketarik espero:

   p(x,t) = p(t); n(x,t) = n(t)

b) Injekzio baxuan gaudenez,

   p'(t) → n(x,t) = n_0 + p'(t) ~ N_D; eta p(x,t) = p_0 + p'(t) = ?

   Ariketa urrienez ebatziko dugu.

c) Gainera p'(t) = p(t) - p_0 = p(t) -n_i^2/N_D → dp'(t) = dp(t) (dp_0 = 0 baita).

   Beraz, hutsuneen jarraitutasunaren ekuaziotik abiatuz:

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{dJ_p}{q \cdot dx}$$

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - 0 \qquad \text{(dena uniformea denez, } F_p(x) = F_p = 0\text{)}$$

$$\frac{dp'(t)}{dt} = G_L - \frac{p'(t)}{\tau_p} \quad \text{(injekzio baxuan gaude eta dp = dp' da)}$$

   Ekuazio diferentziala ebatziz:

$$p'(t) = G_L \cdot \tau_p + K \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$ non K konstante ezezagun ba baita.

   Badakigu p'(t = 0^-) = 0. Eta, argia piztu berria denean, ere p'(t = 0^+) = p'(t = 0^-) = 0.

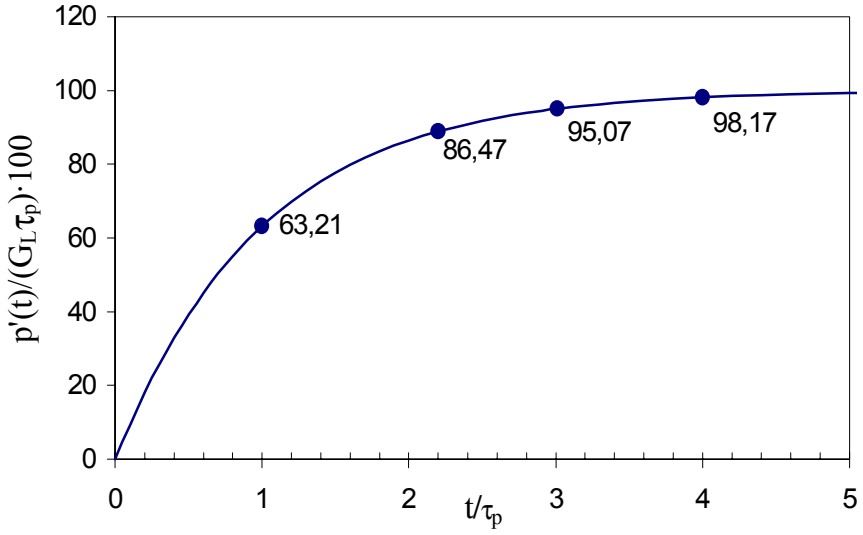
   Beraz, $p'(0^+) = G_L \cdot \tau_p + K \cdot \exp(0) = 0 \Rightarrow K = -G_L \cdot \tau_p$

   eta $p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)\right]$

   p(t) = p_0 + p'(t) = n_i^2/N_d + p'(t)

   n(t) = n_0 + n'(t) = N_D + p'(t) ~ N_D

Denbora luzearen ondoren → p'(t luzea) = $G_L \cdot \tau_p$ ($cm^{-3}/s \cdot s = cm^{-3}$)



5.2 Irudia. *Soberakin normalduaren ($p'(t)/G_L\tau_p$) denborarekiko bilakaera argia piztean*

Formulan ikusten denez, ez digu t denborak axola, t/τ_p zatidurak baizik.

$t/\tau_p = 1$ denean --> $p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot 0.632$

$t/\tau_p = 2$ denean --> $p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot 0.865$

Sorrera, birkonbinaketa eta hazkundearen analisia:

Sorrera: G_L **Konstantea**

Birkonbinaketa: $U = \frac{p'(t)}{\tau_p} = G_L \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)\right]$ **Gero eta handiagoa**

Eta hazkundearen abiadura: $\frac{dp(t)}{dt} = G_L \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$ **Gero eta txikiagoa**

Erdibizitzak adierazten du sistemak egoera geldikorrera iristeko (hurbiltzeko) behar duen denbora.

[Oharra: amaieran, egoera egonkorrera iristean ez dago denborarekiko menpekotasunik. Beraz, tarte horretan dagoen soberakina ebazteko, jarraitutasunaren ekuazioa erraztuz:

$$\frac{dp'(t)}{dt} = G_L - \frac{p'(t)}{\tau_p} = 0 \Rightarrow p'(t) = G_L \cdot \tau_p \,]$$

Lagin horretan, $t = t_{itzali}$ unean, behin egoera geldikorrera iritsi eta gero ($t_{itzali} >> \tau_p$), unean argia itzaltzen dugu. Analizatu eramaileen kontzentrazioaren denborarekiko bilakaera (geldikortasuna lortu arte) (Beti injekzio baxuan).

Lehen bezala, hutsuneen soberakinari begira:

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{dJ_p}{q \cdot dx}$$

$$\frac{dp}{dt} = 0 - U_p - 0 \qquad \text{(dena uniformea da -F(x) = F = 0- eta ez dago sorrerarik)}$$

$$\frac{dp'(t)}{dt} = \frac{p'(t)}{\tau_p} \qquad \text{(injekzio baxuan gaudenez eta dp = dp' denez)}$$

Ekuazio diferentziala ebatziz:

$p'(t) = K \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$ non K konstante ezezagun bat baita.

Badakigu $p'(t_{itzali}^{-}) = G_L \cdot \tau_p$. Eta, argia itzali berria denean ere, $p'(t_{itzali}^{+}) = p'(t_{itzali}^{-})$.

$$p'(t_{itzaili}^{+}) = K \cdot \exp\left(-\frac{t_{itzali}}{\tau_p}\right) = G_L \cdot \tau_p \Rightarrow K == G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(\frac{t_{itzali}}{\tau_p}\right)$$

$$p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(\frac{t_{itzali}}{\tau_p}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

$$p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(-\frac{t - t_{itzali}}{\tau_p}\right) = G_L \cdot \tau_p \cdot \exp\left(-\frac{t'}{\tau_p}\right) \quad \text{non } t' = t - t_{itzali}$$

Sorrera: beti hutsa da.

Birkonbinaketa: $U = \frac{p'(t)}{\tau_p} = G_L \cdot \exp\left(-\frac{t - t_{itzali}}{\tau_p}\right)$

Hazkundearen abiadura: $\frac{dp'(t)}{dt} = -\frac{G_L}{\tau_p} \cdot \exp\left(-\frac{t - t_{itzali}}{\tau_p}\right)$ (beraz, murrizten dira)

$t = t_{itzali}$: $p' = G_L \cdot tau_p$

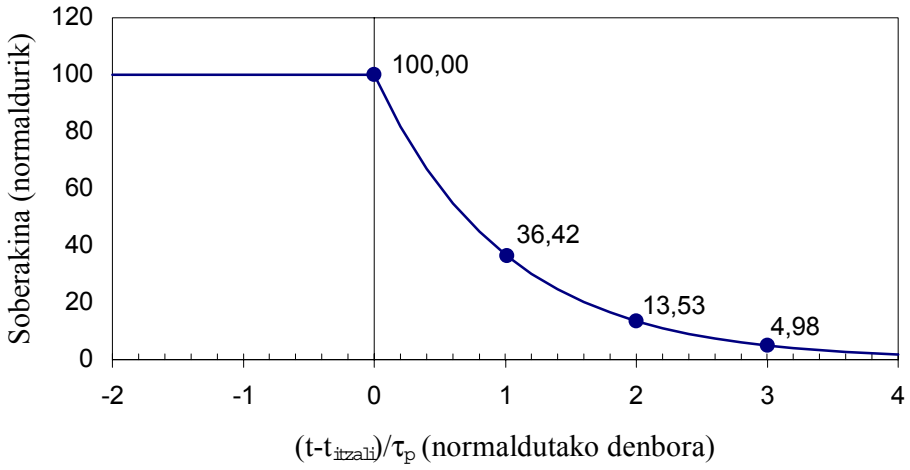
$t = t_{itzali} + taup$: $p' = G_L \cdot tau_p \cdot 0.368$

$t = t_{itzali} + 2tau_p$: $p' = G_L \cdot tau_p \cdot 0.135$

Berriro, $(t - t_{itzali})/\tau_p$ da denborarekiko aldaketaren abiaduraren adierazlea.

Izan ere, eramaileen batez besteko biziraupena τ_p da, estatistikoki frogatzen denez:

$$t_{bbbiziraupena} = \frac{\int_{titzali}^{\infty} p'(t) \cdot dt}{p'(t_{itzali})} = \tau_p$$



5.3 Irudia. *Denborarekiko bilakaera argia itzaltzean*

5.4 Eramaileen posizioarekiko aldaketa: barreiapeneko luzera

Badugu uniformeki dopatutako n motako erdieroalezko lagin bat. Haren mutur batean (x=0 gainazalean,) eramaile soberakin bat mantentzen da (kanpoko eramaile jario batez edo sorrera batez) erregimen geldikorrean. Beste gainazala oso urruntzat jotzen da. Injekzio baxuan gaudela onartuta, analizatu laginean zehar dauden eramaileen profilak.

Datuak: p'(0) eta τ_p.

Hasi baino lehen:

Gainazalean soberakin bat agertzen bada, bolumen osora zabaltzen —barreiatzen— saiatuko da, baina, gainazaletik urrundu ahala, eta birkonbinaketaren ondorioz, soberakina murriztuz joango da (batez beste, hutsuneek τ_p denboraz bizirauten dute). Hori dela-eta, beste ertzean ez da p'(0) soberakinaren efektua nabarituko, eta p'(x >> 0) = 0. Beraz, eramaileen profila ez da uniformea izango. Gainera, egoera geldikorrean gaudenez, denboran zehar ez da aldaketarik agertuko.

Urrienen soberakinaz ebatziko ditugu kontzentrazioak:

$p(x,t) = p_0 + p'(x,t) = p_0 + p'(x)$; $\quad n(x,t) = N_d + n'(x,t) = N_d + p'(x) \sim N_d$

eta p'(0) = datua eta dp = dp'

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - \frac{dF_p}{dx} = G_p - U_p - \frac{dJ_p}{q \cdot dx}$$

$$F_p(x) = F_{ap} + F_{bp} \approx F_{bp} = -D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} = -D_p \cdot \frac{dp'(x)}{dx}$$

Froga daitekeenez, dopaturiko erdieroale homogeneoetan, urrienen atoiko fluxua aintzat ez hartzeko modukoa izaten da*. Beraz, $F_m = F_{bp} + F_{ap} \sim F_{bp}$.

[*Dopaturiko erdieroale homogeneo batean $\varepsilon(x) \sim 0$, zeren, bestela, σ_M oso altua denez, ugarienen atoiko korronte-dentsitatea oso oso altua bailitzateke $J_{aM}(x) = \sigma_M \cdot \varepsilon(x)$. Beraz, urrienen korronte-dentsitatea $J_{am} = \sigma_m \cdot \varepsilon(x) = (\sigma_m/\sigma_M) \cdot \sigma_M \cdot \varepsilon(x) = (\sigma_m/\sigma_M) \cdot J_{aM}$ oso baxua izango da: $J_m \sim J_{bm}$]

Injekzio baxuan gaudenez eta denborarekiko menpekotasunik ez dagoenez:

$$0 = 0 - \frac{p'(x)}{\tau_p} - \frac{d\left(-D_p \cdot \frac{dp'(x)}{dx}\right)}{dx} \Rightarrow p'(x) = D_p \cdot \tau_p \cdot \frac{d^2 p'(x)}{dx^2}$$

$$p'(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{x}{L_p}\right)$$

non $L_p(cm) = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$ barreiapeneko luzera baita

Bi (inguru) baldintza bete behar dira:

p'(x >> 0) finitua izango da

$$p'(\infty) = A \cdot \exp(-\infty) + B \cdot \exp(\infty) = A \cdot 0 + B \cdot \infty \neq \infty$$ eta ,beraz, B = 0

eta p'(0) datua da.

$$p'(0) = A \cdot \exp(0) + B \cdot \exp(0) = A + B = \langle B = 0 \text{ denez} \rangle = A \Rightarrow A = p'(0)$$

Beraz, $p'(x) = p'(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$ eta, horrenbestez, x-k baino, x/L_p erlazioak agintzen du

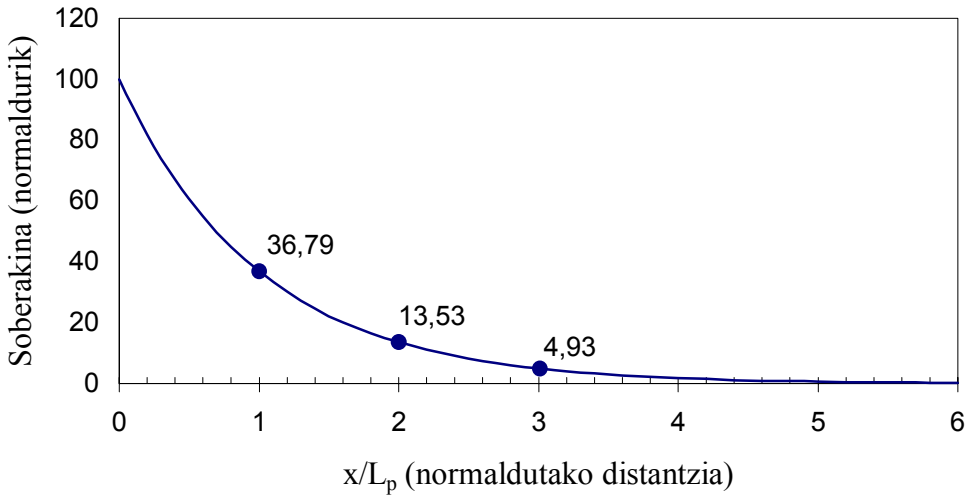
x = 0: p'(0)

$x = L_p$: $p'(0) \cdot 0.368$

$x = 2 \cdot L_p$: $p'(0) \cdot 0.135$

$x = 3 \cdot L_p$: $p'(0) \cdot 0.049$

Beraz, L_p parametroak adierazten du, nolabait, eramaileen soberakina noraino barreiatzen den. Hori dela-eta, L_p-ri hutsuneen barreiapeneko luzera deitzen diogu.



5.4 Irudia. *Soberakin normalduaren espazioarekiko aldaketa*

5.5 Gainazaleko birkonbinaketa

Uniformeki dopatutako p motako erdieroalezko lagin bat dugu eta uniformeki argiztatzen dugu bolumen osoan (cm^3 eta segundoko G_L pare sortzen dira). Haren aurpegi batean (x=0 gainazalean), birkonbinaketa-abiadura S cm/s da. Erregimen geldikorrean eta injekzio baxuan gaude. Beste gainazala oso urruntzat hartzen da. Analizatu laginean zehar dagoen eramaileen profila.

$$\frac{dn}{dt} = G - U - \frac{dF_n}{dx}$$

non $F_n(x) = F_{an} + F_{bn} \approx F_{bn} = -D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx} = -D_n \cdot \frac{dn'(x)}{dx}$

$$0 = G_L - \frac{n'(x)}{\tau_n} - \frac{d\left(-D_n \cdot \frac{dn'(x)}{dx}\right)}{dx} = G_L - \frac{n'(x)}{\tau_n} + D_n \cdot \frac{d^2 n'(x)}{dx^2}$$

$$n'(x) = G_L \cdot \tau_n + K_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) + K_2 \cdot \exp\left(\frac{x}{L_n}\right)$$

Baina $n'(\infty) = G_L \cdot \tau_n + K_1 \cdot \exp(-\infty) + K_2 \cdot \exp(\infty) \neq \infty \Rightarrow K_2 = 0$

Eta, dakigunez, $F_{\text{ezkerrerantz}}(0^+) = -F(0^+) = U_S = \langle IB \rangle = S \cdot n'(0)$

$$F_n(x) = -D_n \cdot \frac{dn'(x)}{dx} = -D_n \cdot K_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)\cdot\left(-\frac{1}{L_n}\right) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

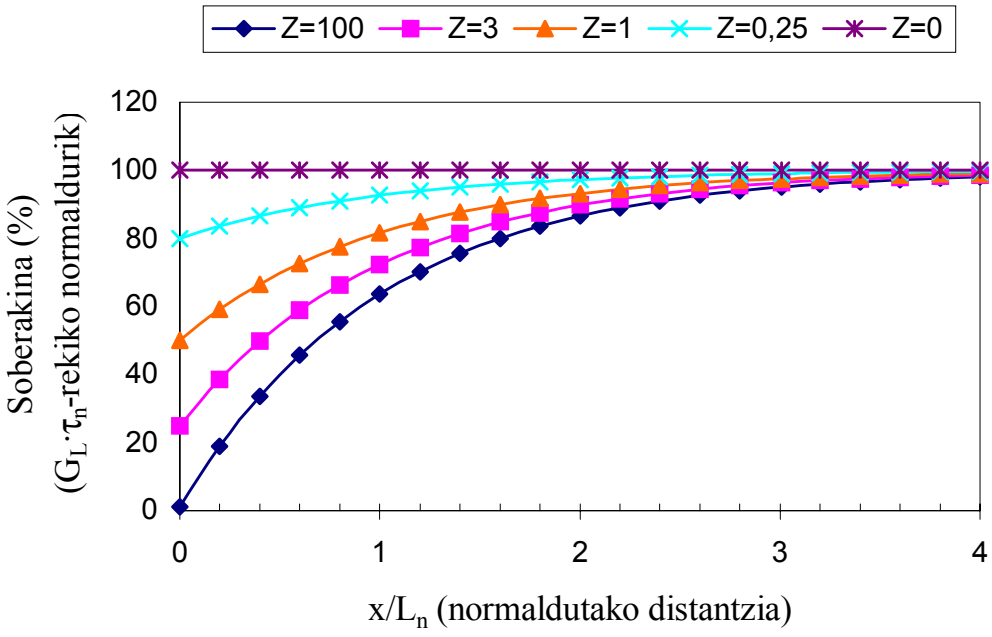
$$F_n(0) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \cdot \exp(-0) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \Rightarrow -F_n(0) = -K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} = U_S$$

$$-F_n(0) = S \cdot n'(0) \Rightarrow -K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} = S \cdot \left[G_L \cdot \tau_n + K_1 \cdot \exp(0)\right] = S \cdot \left(G_L \cdot \tau_n + K_1\right)$$

$$K_1 = -\frac{S \cdot G_L \cdot \tau_n}{S + \frac{D_n}{L_n}} = -\frac{G_L \cdot \tau_n}{1 + \frac{D_n}{SL_n}} = -\frac{G_L \cdot \tau_n}{1 + Z^{-1}} = -\frac{Z \cdot G_L \cdot \tau_n}{Z+1}$$ non $Z = L_n \cdot S/D_n$ baita

eta, beraz, $n'(x) = G_L \cdot \tau_n \cdot \left[1 - \frac{Z}{Z+1} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)\right]$

5.5 Irudian Z erabili da Soberakinaren S-rekiko menpekotasuna analizatzeko.



5.5 Irudia. *Espazioarekiko aldaketa S batzuentzat ($Z = L_n \cdot S/D_n$)*

$$S >> D_n \cdot L_n;\ Z >> 1 \Rightarrow n'(x) = G_L \cdot \tau_n \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)\right]$$ (beraz, n'(0) = 0 cm^{-3})

$$S << D_n \cdot L_n;\ Z \approx 0 \Rightarrow n'(x) = G_L \cdot \tau_n$$

Muturreko bi kasu daude:

- S = ∞ cm/s denean, gainazalari *ohmikoa* deitzen zaio eta n'(0) = 0 behartzen du, birkonbinaketa finitua baita:

  $S \cdot n'(0) = U_S = finitua \Rightarrow \infty \cdot n'(0) = finitua \Rightarrow n'(0) = 0\, cm^{-3}$

  Erdieroale-metalen kontaktuak mota horretakoak izatea bilatuko dugu.
- S = 0 cm/s denean, gainazala *pasibaturik* dago, eta, bertako birkonbinaketa nulua denez, ez dago jariorik: $S \cdot n'(0) = 0 = U_S = -F(0)\ cm^{-2}/s$. Kasu horretan ematen du materiala ez dela amaitzen (hemen ere, uniformea eta infinitua zenean lortzen zen profila agertzen da n'(x) = $G_l \cdot \tau_n$).

Eranskina: ebatzi beharko ditugun ekuazio diferentzialak (injekzio baxuan)

A) Egoera iragankorrean, fluxuak konstanteak badira:

$$\frac{dm'(t)}{dt} = G_{kanpo} - \frac{m'(t)}{\tau_m} \Rightarrow$$

$$m'(t) = G_{kanpo} \cdot \tau_m + A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_m}\right)$$

Non A (integratzerakoan agerturiko konstantea) mugaldeko baldintzetatik kalkulatzen baita.

B) Egoera geldikorrean, sorrera, birkonbinaketa eta fluxu aldakorrak baditugu:

$$0 = G_{kanpo} - \frac{m'}{\tau_m} + D_m \cdot \frac{d^2 m'(x)}{dx^2} \Rightarrow$$

$$m'(x) = G_{kanpo} \cdot \tau_m + A \cdot \exp\left(\frac{x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right) \text{ edo}$$

$$m'(x) = G_{kanpo} \cdot \tau_m + C \cdot Sh\left(\frac{x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right) + D \cdot Ch\left(\frac{-x}{\sqrt{D_m \cdot \tau_m}}\right)$$

Non A eta B (edo C eta D) mugaldeko baldintzetatik kalkulatzen baitira.

(Integrazio prozesutik sortu diren sasi-konstanteak dira)

C) Egoera geldikorrean, birkonbinaketa nulua bada:

$$0 = G_{kanpo} + D_m \cdot \frac{d^2 m'(x)}{dx^2} \Rightarrow$$

$$0 = -\frac{G_{kanpo}}{D_m}\frac{x^2}{2} + Ax + B$$

Non A eta B mugaldeko baldintzetatik kalkulatzen baitira.

ERDIEROALEARI BURUZKO

ARIKETAK

1. ARIKETA: erdibizitza eta barreiapeneko luzera estatistikaren ikuspuntutik

Erdibizitza

5.2 puntuko ariketaren bigarren atalean, argia itzaltzerakoan gertatzen den urrienen desagerpena analizatu da. Desagerpen hori bat-batekoa izango balitz, estatistikoki analizatuz erabili beharreko denbora t_1 da:

$$t_1 = \frac{\int_0^\infty p'(t)\cdot dt}{p'(0)}$$

Egiaztatu t_1 urrienen erdibizitza dela.

Adierazi p'(t) erdilogaritmikoetan (Y ardatzean log(p'(t)), X ardatzean t).

Barreiapeneko luzera

5.3 puntuko soluziotik abiatuz, barreiapeneko luzeraren esanahi estatistikoa analiza dezakegu. Horretarako, kalkulatu soberakinaren murrizketaren batez besteko luzera, x_0 (desagerpena puntu jakin batean gertatuko balitz, non gertatuko litzatekeen esaten digu x_0 luzerak).

$$x_0 = \frac{\int_0^\infty p'(x)\cdot dx}{p'(0)}$$

Adierazi p'(x) erdilogaritmikoetan (Y ardatzean log(p'(x)), X ardatzean x).

2. ARIKETA: n eta p kopuruen bilakaera tenperaturareren arabera (orekan)

Badugu N_D (10^{17} cm^{-3}) ezpurutasun emaileez eta N_A (10^{18} cm^{-3}) ezpurutasun hartzailez dopaturiko siliziozko lagin bat, eta eramaileen kontzentrazioak tenperaturarekin nola aldatzen diren analizatu nahi dugu (betiere, oreka termodinamikoan).

Kalkulatu beheko taulan agertzen diren tenperaturetan elektroien eta hutsuneen kontzentrazioak (hau da, n eta p).

Datuak: Tenperatura bakoitzean neurtu diren silizioaren kontzentrazio intrintsekoa, $n_i(T)$, eta ezpurutasun ionizatuen kopurua, ehunekoetan (kasu honetan, ionizazioa berdina da bi ezpurutasunentzat):

T(K)	**0**	**200**	**248**	**249**	**250**	**251**	**300**	**400**	**500**	**700**
N_{ioi}/N (%)	0	0	0	1	99	100	100	100	100	100
n_i (cm^{-3})	0	1E5	7E7	7E7	7E7	7E7	1E10	6E12	3E14	1E19

3. ARIKETA: egoera geldikorrak eta denborarekiko aldaketak

Badugu boroz dopatutako siliziozko lagin bat giro-tenperaturan ($n_i = 10^{10}$ cm^{-3}, eta zentimetro kubiko bakoitzeko 10^{14} boro atomo daude). Segundo eta zentimetro kubiko bakoitzeko, uniformeki 10^{12} pare sortzen dituen argi bat piztu dugu aspaldian.

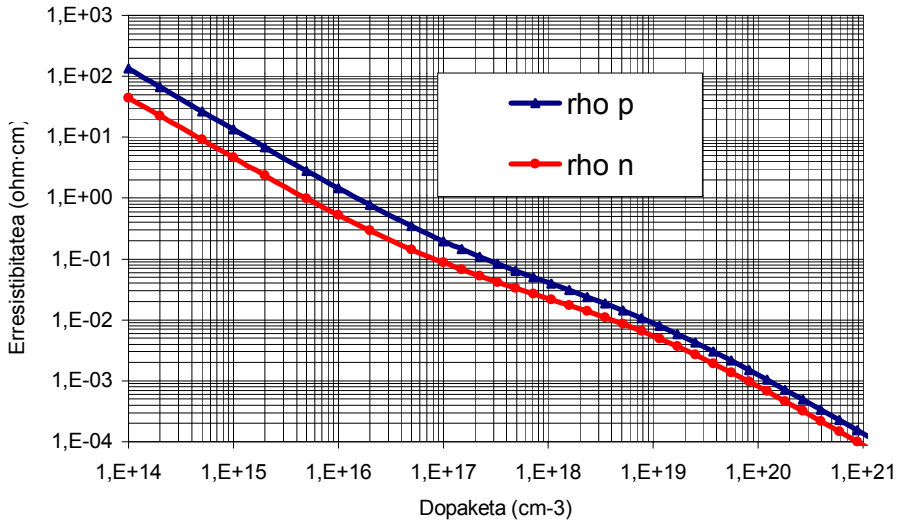
Elektroien erdibizitza 100 µs bada, kalkulatu lagineko eramaileen kontzentrazioak.

Argia itzali eta milisegundo batera ditugun kontzentrazioak kalkulatu.

4. ARIKETA: injekzio altua

Badugu 10 Ω·cm-ko erresistibitatea duen n motako siliziozko lagin bat, giro-tenperaturan (n_i (300 K) = 10^{10} cm^{-3}).

a) Kalkulatu (dituzuen grafikoen bidez) elektroien eta hutsuneen orekako kontzentrazioak eta hutsuneen mugikortasuna.



b) Elektroien mugikortasuna 1350 cm^2/V·s bada, errepikatu aurreko atala.

Dakigunez, U = R – R_{th} = kte (p n – n_i^2) (ia) beti betetzen bada ere, U = m'/tau_m adierazpenak bakarrik injekzio baxuran balio du.

c) Hutsuneen erdibizitza 1 µs bada, kalkulatu kte sasi-konstantearen balioa.

Lagina G_L pare/cm^3/s sortzen dituen argi batez argiztatzen da ($G_L = 10^{22}$ cm^{-3}/s).

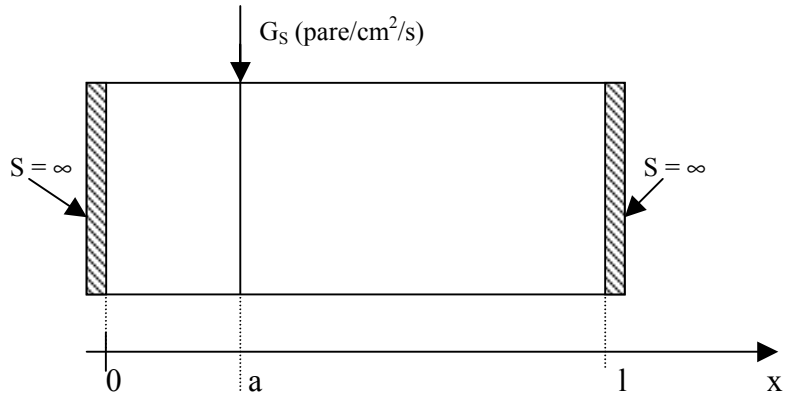
d) Handik denbora luzera agertzen diren eramaile kontzentrazioak kalkulatu. Zer motako injekzioa dugu? Altua (indartsua) ala baxua (ahula)?

e) Kalkulatu laginaren eroankortasuna(k) argiztatuta eta argiztatu gabe. Luzera 2 cm bada eta sekzioa, 1 cm^2, kalkulatu bi kasuetako erresistentziak. Atera ondorioak.

5. ARIKETA: gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera

Badugu P motako erdieroale lagin homogeneo bat. Bolumenean gertatzen den birkonbinaketa (U) ez da aintzat hartzeko modukoa, U~0 erdibizitza (tau) oso handia baita. . Laginaren luzera **l** da,, Ezkerreko ertzetik **a** distantzian argi estu batez argiztatzen da, eta, plano horretan, G_S sorrera eragiten du (zentimetro **koadro** bakoitzeko eta segundo bakoitzeko G_S pare sortzen ditu: $G_S = G_V(\text{pare/cm3/s})\cdot x_s(\text{cm})$).

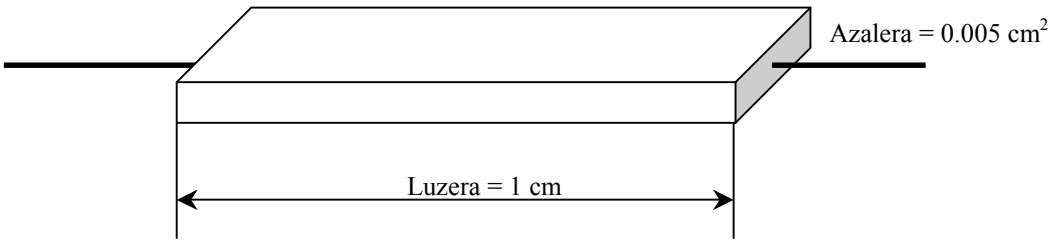
Kalkulatu soberakinen profila, kontaktuak ohmikoak direla jakinda.



6. ARIKETA: foto-erresistentzia (erdieroale intrintsekoak erabiliz)

Badugu berezkoa (intrintsekoa) den erdieroale baten lagin bat. Bertako birkonbinaketa (garbiaren) abiadura $U = R - R_{th} = (p\ n - n_i^2)/(n+p+2n_i)/\tau_0$. formulaz modela daiteke. Gainazal guztietan (kontaktuak barne), gainazaleko birkonbinaketa hutsa da.

Datuak: $\tau_0 = 3.18\ \mu s$; $n_i = 1.5\cdot 10^{10}\ cm^{-3}$; $\mu_n = 1350\ cm^2/V/s$; $\mu_p = 480\ cm^2/V/s$.



a) Birkonbinaketa garbiaren abiaduraren adierazpen sinpleagoa lortu, elektroien soberakina (n') eta erdibizitza berri bat (τ) erabiliz. Kalkulatu erdibizitza horren balioa.

b) Kalkulatu laginaren erresistentzia.

c) Dispositiboa uniformeki argiztatzen da (cm^3 eta segundo bakoitzeko $G_L = 2.36 \cdot 10^{18}$ pare sortzen dituen argi batez). Kalkulatu egoera geldikorreko soberakinak.

d) Kalkulatu ilunpeko eta argipeko erresistentziak.

e) t = 0 denboran argia itzaltzen bada, kalkulatu τ uneko erresistentzia.

7. ARIKETA: injekzio altua eta injekzio baxua

Badugu N motako Erdieroale lagin homogeneo bat. Argi indartsu batez argiztatzen da, eta G_L sorrera eragiten du (zentimetro kubiko bakoitzeko eta segundo bakoitzeko G_L pare sortzen ditu).

G_L handia denez, lagina injekzio altuan sartuko da eta $U \sim p'/(\tau_n+\tau_p)$ adierazpena erabiliko dugu birkonbinatzea modelatzeko ($U = p'/\tau_p$ ez da hemen baliagarria).

a) Kalkulatu egoera geldikorreko profilak (kontzentrazioak).

[Gainazalek ez dute eraginik, oso urrun daudelako edo S = 0 cm/s delako].

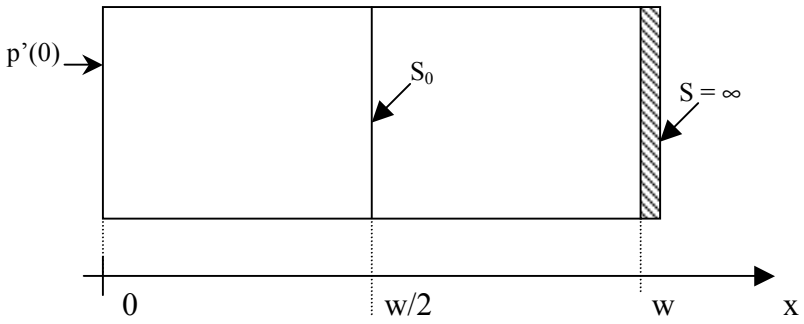
b) t = 0 unean, argia itzaltzen da. Hortik aurrera, urrienen soberakinak duen bilakaera irudikatu, eta baliorik esanguratsuenak azpimarratu.

8. ARIKETA: gainazaleko birkonbinatzea

Badugu N motako erdieroale lagin bat, w luze.

x = 0 gainazalean (ezkerreko muturrean) p'(0) soberakin bat mantentzen da (ez digu hori lortzeko erabilitako bideak axola). x = w gain azalean (eskuineko muturrean) birkonbinaketa abiadura itzela dugu (infinitua). Gainontzeko bolumenean, oso birkonbinaketa txikia dago, ($U \sim 0$; $\tau \rightarrow \infty$) erdiko gainazalean izan ezik.

x = w/2 gainazalean, egitura kristalinoak zenbait akats ditu eta, horrek birkonbinaketa nabarmena dakar. Fenomeno hori, matematikoki lan egiteko, SO (cm/s) abiadura zinematikoaz adieraziko dugu.



a) Egituran zehar dagoen soberakinen profila kalkulatu (S_0 abiaduraren funtzio gisa).

b) $S_0 = 0$ eta $S_0 = \infty$, kasua aztertu. Ondorioak atera.

c) Segundo bakoitzeko eta cm^2 bakoitzeko x = w/2 eta x = w gainazaletan birkonbinatzen diren eramaileak (pareak) lortu (S_0 parametroaren arabera).

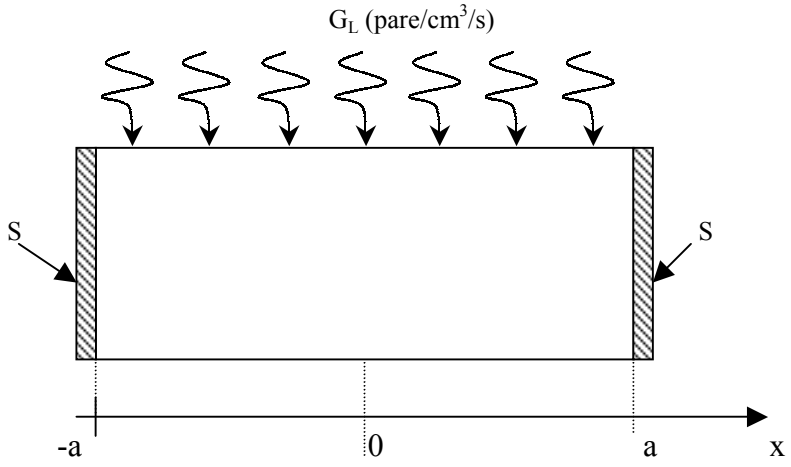
d) $S_0 = 0$ eta S_0 = infinitua denean, kasua aztertu. Ondorioak atera.

9. ARIKETA: gainazaleko eta bolumeneko birkonbinaketa

Badugu N motako erdieroale homogeneo baten lagin bat ($N_D = 10^{14}$ cm^{-3}), 2a cm luze. Elektroi-izpiz bonbardatzen dugu egoera geldikorrean, eta $G = 10^{18}$ pare/cm^3/s sortzen dira.

μ_n= 1200 cm^2/V/s; μ_p= 400 cm^2/V/s; τ_p = 10 μs. kT = 0.025 eV; (kT/q= 25 mV)

$n_i = 10^{10}$ cm^{-3}; laginaren sekzioa = A = 10^{-4} cm^2; Luzera = 2a = 200 μm.



a) Gainazaletarantz fluxurik ez balego (hau da, gainazaletako birkonbinatzea S = 0 cm/s izango balitz), bolumenean genukeen soberakina kalkulatu. Injekzio baxuan al gaude?

b) Bi gainazaletan oso birkonbinatzea handia badugu (S = ∞ cm/s; hau da, kontaktuak ohmikoak badira), pentsatu soberakinen profilaren forma eta fluxuen noranzkoak nolakoak izango diren.

c) Kalkulatu soberakinak. x ardatzaren jatorria laginaren erdian kokatuz. Ekuazio diferentzialaren soluzio gisa, sinu eta kosinu hiperbolikoak dituena erabiltzeak ekuazioak errazten ditu.

d) Kalkulatu bolumenean eta bi gainazaletan gertatzen diren birkonbinatzeak ($B_{\text{BOLUMEN OSOAN}}$, pare/s; $B_{\text{BI GAINAZALETAN}}$, pare/s) eta sorrera osoa (G_{OSOA} pare/s). Bi birkonbinatzeen erlazioa kalkulatu eta ondorioak atera.

10. ARIKETA: grafiko logaritmikoak

3.3 Irudian, eremu batek eragiten dituen batez besteko eramaile-abiadurak agertzen dira (giro-tenperaturan eta dopaketa hutsarekin). Grafiko horretan ikusten denez, log(ε) eta log(v) magnitudeen arteko erlazioa lineala da tarte handi batean: $\log(v) = k_1 + k_2 \cdot \log(\varepsilon)$. Baina, v = v(ε), lineala al da?

a) Marraztu elektroien mugikortasun-eremuarekiko grafikoa (bospasei puntu hartuz). Erabili grafiko erdilogaritmiko bat, Y ardatza (μ) linealetan eta X ardatza (ε) logaritmikoetan jarri.

[Mugikortasuna konstante mantendu behar da gure aplikazioetan, hau da (tenperatura eta dopaketa finkoekin) Eremuaren eta Atoizko Abiaduraren arteko erlazio konstante bat eman behar digu, bestela ez luke erabilgarritasunik izango]

b) Zenbat da mugikortasunaren kontzeptua onartzeko eremu maximoa?

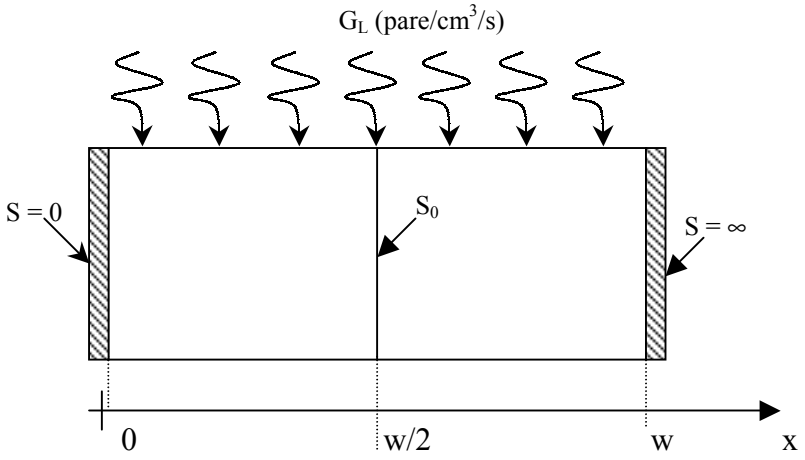
c) Mugikortasuna aplikagarria den tarte horretan, zenbat balio du k_2 malda logaritmikoak? Eta k_1 konstanteak? Zer da 10^{k1}?

d) $k_2 = 3$ balitz, zein izango litzateke erlazioa.

e) Saiatu v = v(E) linealetan jartzen.

11. ARIKETA: gainazaleko birkonbinaketa

Badugu W luze den n motako siliziozko lagin bat egoera geldikorrean. Argi batez, G_L pare sortzen dira zentimetro kubiko eta segundo bakoitzeko bolumen osoan. Injekzio baxuan gaude (baxua da? Esapide hau askotan agertzen da?) eta erdibizitza infinitua da. Ezkerreko ertzean, ez dago gainazaleko birkonbinatzearik. Eskuineko gainazala, berriz, kontaktu ohmiko bat.



Laginaren erdian (axola ez diguten arrazoiak direla eta) S_0 (cm/s) birkonbinaketa-abiadura badugu:

a) Hutsuneen soberakina kalkulatu (S_0 aldagaiaren funtzio bezala). $S_0 = 0$, $S_0 = \infty$ eta erdiko kasu bat aztertu eta marraztu.

b) Eramaile jarioak kalkulatu (S_0 aldagaiaren funtzio bezala) eta aurreko hiru kasuetako soluzioa marraztu.

c) Zenbat pare birkonbinatzen dira segundo eta zentimetro koadro bakoitzeko erdiko gainazalean? Eta eskuinekoan?

12. ARIKETA: eskualde labur eta luzeak

Badugu W luze den n motako siliziozko lagin bat, egoera geldikorrean.

Ezkerreko muturreko aurpegian, p'(0) soberakin jakin bat mantentzen da prozedura ezezagun batez (datutzat hartuko dugu). Eskuineko gainazalean, berriz, birkonbinaketa-abiadura (zinematikoa) infinitua da ($S = \infty$ cm/s).

Injekzio baxuan gaude eta erdibizitza (τ_p) eta barreiapen-koefizientea (D_p) badakizkigu (beraz, L_p ere bai).

a) Egiaztatu:

$$p'(x) = p'(0) \cdot \frac{\exp\left[\frac{w-x}{L_p}\right] - \exp\left[-\frac{w-x}{L_p}\right]}{\exp\left[\frac{w}{L_p}\right] - \exp\left[-\frac{w}{L_p}\right]}$$

b) Aztertu bi kasu berezi hauek (emaitzak egiaztatuz eta marraztuz):

$y \approx 0$ denean, $\exp(y) \approx 1 + y$ bada eta
$y >> 1$ denean, $\exp(-y) \approx 0$ bada

b$_1$) L_p oso handia denean (w-rekin alderatuta): $p'(x) \approx p'(0) \cdot \exp\left[-\frac{x}{L_p}\right]$

b$_2$) L_p oso txikia denean (w-rekin alderatuta): $p'(x) \approx p'(0) \cdot \frac{w-x}{w}$

c) Aztertu honako bi kasu hauek:

c$_1$) Egiaztatu U = 0 denean b$_1$ kasua dugula.

c$_2$) Egiaztatu w infinitua denean b$_2$ kasua dugula.

d) Ondorioz, eskualde bat *luzea* bada (w >> L_p), berdin dio haren luzerak, eskuineko gainazala ez baita ezkerreko soberakinaz ohartzen. Jatorrian dugun fluxu osoa (kalkula ezazu, deribatuz) bolumenean birkonbinatzen da (kalkula ezazu, integralez).

e) Era berean, eskualdea *laburra* bada, berdin dio barreiapeneko luzerak. Laginak bolumenean birkonbinaketa hutsa balitz bezala jokatzen du. Izan ere, fluxu osoa eskuineko gainazalean birkonbinatzen da (egiaztatu deribatu biak berdinak direla).

13. ARIKETA: gainazaleko birkonbinaketa

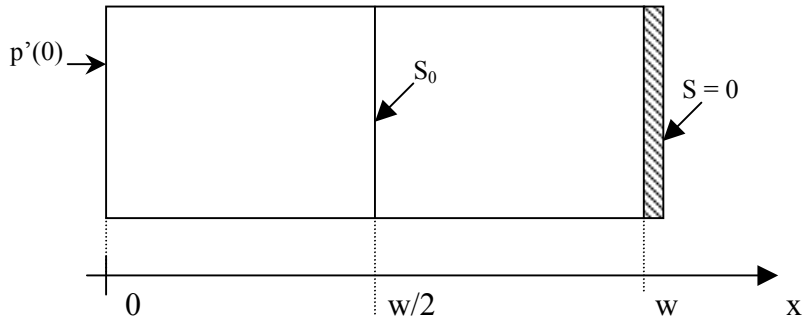
Badugu n motako siliziozko lagin bat, W luze, egoera geldikorrean.

Ezkerreko ertzean, soberakin bat mantentzen da ezagutzen ez dugun bide batez (p'(0), datutzat hartuko duguna). Eskuineko gainazala (x = w) pasibaturik dago (S = 0).

Bolumenean ez dago birkonbinatzearik (ez eta sorrerarik ere).

a) Kalkulatu egoera horretan dugun hutsune-soberakina.

Orain sareko zenbait akats direla eta S_0 birkonbinatzea abiadura zinematikoa badugu laginaren erdiko gainazalean (x = w/2):



b) Kalkulatu hutsune-soberakina (S_0 aldagaiaren funtzioan). $S_0 = 0$, $S_0 = \infty$ eta erdiko kasu bat aztertu eta marraztu.

c) Kalkulatu (S_0 aldagaiaren funtzioan) eramaile-jarioak eta aurreko hiru kasuetako soluzioa marraztu.

d) Muturreko bi kasuetarako: zenbat pare birkonbinatzen dira, segundo eta zentimetro koadro bakoitzeko, erdiko gainazalean? Eta eskuinekoan?