

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.

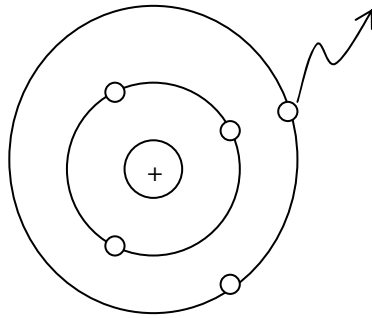
Bi ikuspegitatik abia gaitezke horretara:

- 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.

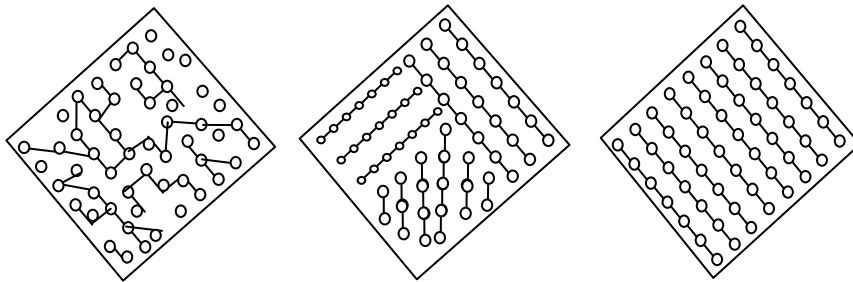


2.1 Irudia. *Balentziako elektroiak*

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 mugitu daitezke. Metal gehienetan, atomo bakoitzak elektroik batez hartzen du parte eta elektroik aske (e^-) horien kopurua (kontzentrazioa) $\geq 10^{23} = 1E23 e^-/cm^3$.

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

Beti ere, R erresistentzia jakin bat topatzen dute mugitzeko, sarearen kontra (atomoen aurka) talka egiten baitute. Hori geometriaren eta ρ materialaren berezko erresistentziaren arabera da: $R = \rho \cdot \text{luzera} / \text{Sekzioa (ohm)}$.

Metalen berezko erresistentzia (erresistibitatea, ρ) 10^{-4} , $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ izaten da (giro-temperaturan). Temperatura igotzen denean, erresistentzia pixka bat handitzen da, elektroien mugikortasuna txikiagoa baita (sarearen mugimendu termikoa garrantzitsua da).

Guri dagokigunez, erresistentzia txikia da temperatura tarte zabalean.

DIELEKTRIKOAK:

Haietan, atomo bakoitzaren jatorrizko elektroik beraren inguruan mantentzen dira. Ez dira, beraz, edonora joateko libreak, nahiz eta eremu elektriko altua aplikatu. Giro-temperaturan, $\rho_{\text{dielektriko}} = 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$. Temperaturaren arabera pixka bat jaisten da ρ hori.

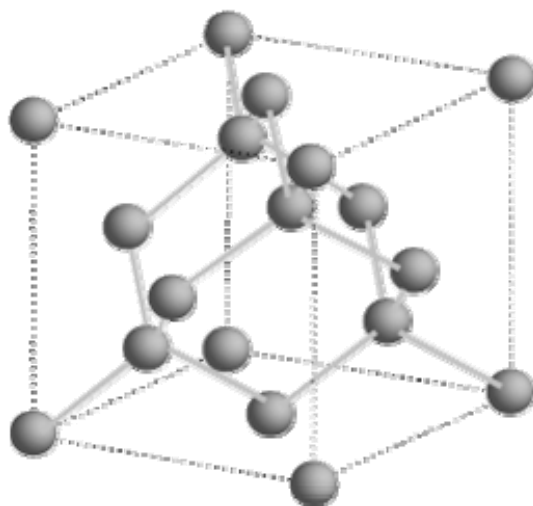
ERDIEROALEAK:

Giro-temperaturan ez dira ez eroale onak ez eta isolatzaileak ere. ρ $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ – $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ tartean dago. Temperatura baxuetan (oso baxuetan, $T = 30 K$), oso isolatzaile onak izaten dira eta temperatura altuetan eroale onak izan daitezke. Horren arrazoia elektroik 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.

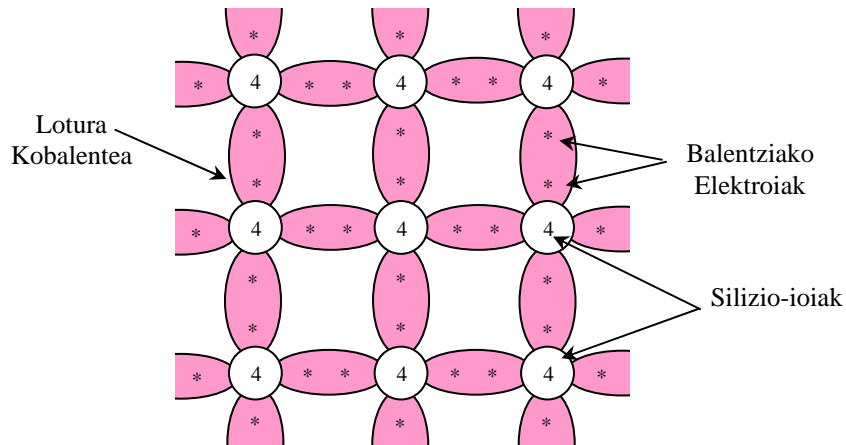
Ohiko erdieroaleetan (silizioan, germanioan), 2.3 irudian agertzen den estruktura hiru dimentsioetan errepikatuz egituratzen da kristala.



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

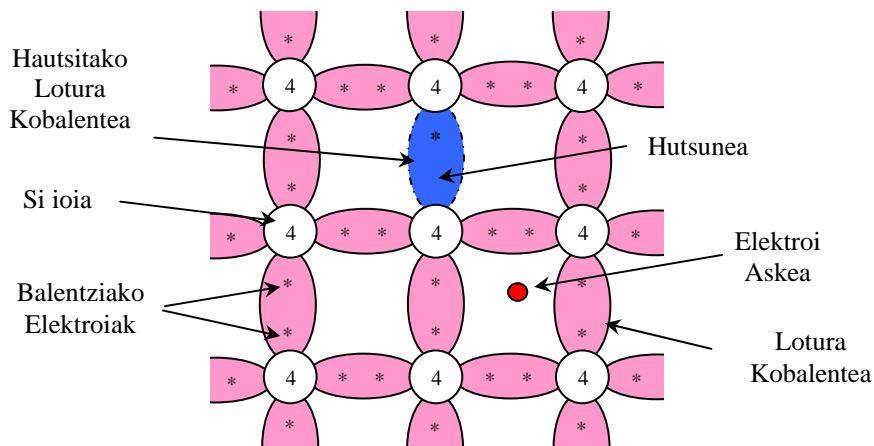
Silizio (14) eta germanio (32) atomoek lau elektroiz beren azken geruzan. Jakinaenez, atomoen egoerarik egonkorrena azken geruzan zortzi elektroiz izatea da. Horretarako, atomo bakoitzak bere lau elektroiak konpartitzen ditu inguruko beste lau atomoekin, eta horietako bakoitzetik bana hartu. Horrela,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

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 mugitu daitezkeen karga libreak agertzen dira. Lotura bat hausteko behar den gutxieneko energia E_G da ($E_{G_{Si}} = 1.15 \text{ eV}$, $E_{G_{Ge}} = 0.7 \text{ eV}$, 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 elektroik bat kentzea latzagoa da

zenbait atomok konpartitzen dutenean baino. Eroapeneko elektroi edo elektroi aske (e^-) bilakatu da; hau da, korrante-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 korrante bera emateko, haren karga $+1.6 \times 10^{-19}$ C da.

Elektroi askeen kontzentrazioari (kopurua/bolumena) “n” deritzen. Hutsuneen kontzentrazioari, berriz, “p”.

Erdieroale puruetan (intrintsekoetan), beraz, elektroi (aske) bakoitzeko hutsune bat sortzen da ($p = n = n_i$, berezko kontzentrazioa, intrintsekoa). 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.

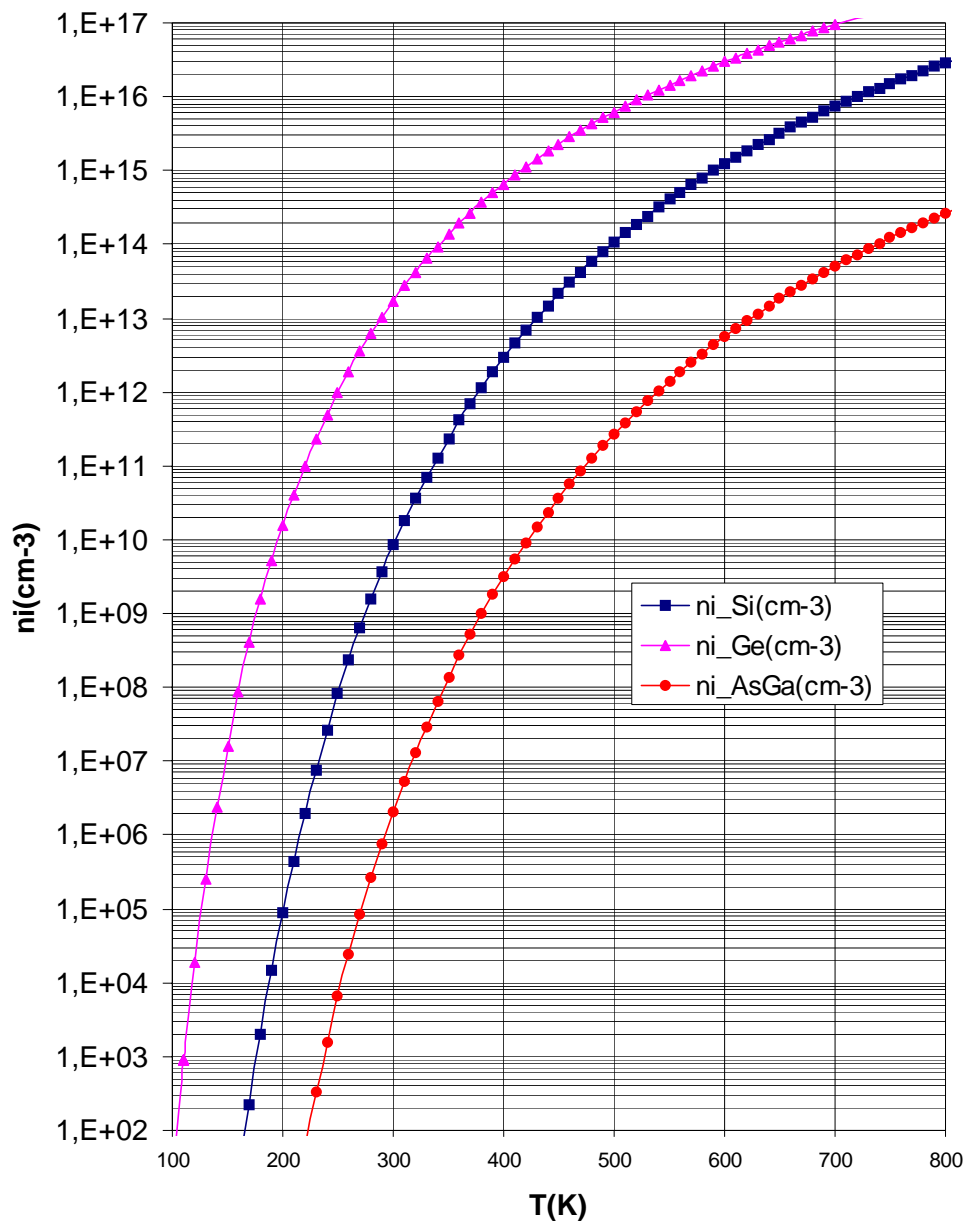
OREKA TERMODINAMIKOA

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 temperaturaren arabera

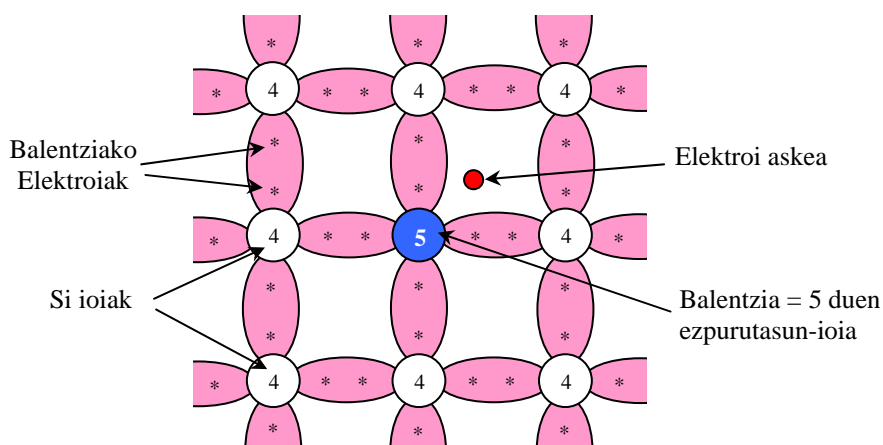
2.3 Erdieroale estrintsekoak: ezpurutasun emaile eta hartzaileak

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/cm³).

Berezko erdieroaleetan, elektroiei eta hutsune kopurua (kontzentrazioa) temperatura 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 15enez, bararen tamaina silizioaren antzekoa da eta sare kristalinoan arazo handirik gabe sartzen da.

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

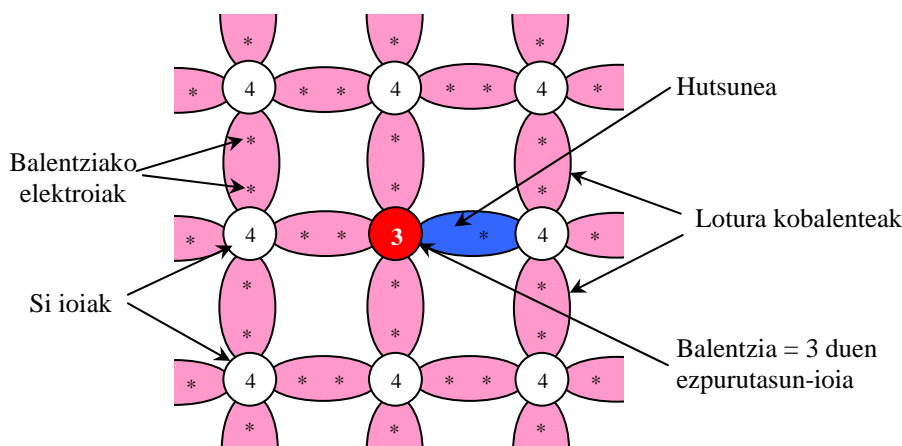
Fosforoak, orain, azken geruzan zortzi elektroiei dituenez, lotura ahuldu egin da: ez da beharrezkoa hain hurbil egotea. Beraz, elektroiei aske bat erraz sor daiteke (ioi positibo batekin batera). Ioiak mugitzerik ez duen bitartean, elektroiei bai.

Makroskopikoki materiala neutro mantentzen bada, beste alde batetik (kanpotik adibidez), elektroik 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 elektroik aske bat. Zentimetro kubiko bakoitzeko 10^{15} fosforo atomo sartzen baditugu, pentsatzekoa da (lehenengo hurbilketan) $10^{15} + 10^{10}$ elektroik eta 10^{10} hutsune egongo direla. **Ugarienak**, elektroikak dira. **Urrienenak**, berriz, hutsuneeak dira.

Elektroik askeak sortzen dituzten materialek *ezpurutasun emaile* dute izena. Giro-tenperaturan, hutsune baino elektroik gehiago dituen materiala *n motako materiala* da, eramaile nagusien karga *negatiboa* 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 elektroik ditu. Hori dela eta, inguruko lau silizioen elektroiekin ere, oraindik, elektroik bat falta zaio azken geruzan zortzi elektroik izateko. Nahiz eta neutroa izan, beste elektroik bat balu, egonkorragoa litzateke. Hortaz, inguruko lotura batetik elektroik 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.

Elektroik hartzen dituzten ezpurutasunek *hartzaile* dute izena. Hartzailez dopaturiko materialetan, hutsuneeak ugariago dira elektroik baino; hala ere, bietatik daude (elektroik loturak termikoki/estatistikoki apurtzetik datoz). Eramaile ugarienen karga positiboa denez, materiala p motakoa dela esaten da..

Hiru ohar:

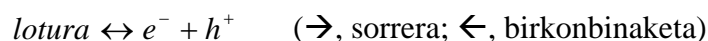
- Atomo dopagarriak dopatutako materialean berezko atomoen lekua hartzeko gai izan behar du. Silizioa dopatzeko, emaleen artean, fosforoa, antimonioa eta arsenikoa erabiltzen ditugu. Dopagarri hartzaileen artean, boroa, aluminioa, galioa eta indioa ditugu. Prozesu hori kristala haztean bertan edo gero, 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 mugitu daitezke, korronea 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 (ugarrienak edo maioritarioak) eta ioien zeinu bereko eramaile batzuk (urrienak edo minoritarioak)

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

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:



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

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

Beraz, masa-ekintzaren legeak honako hau dio :

Tenperatura jakin batean, $n \times p = \text{konstantea}$

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

$n \cdot p = n_i^2$, non n_i kontzentrazio intrintsekoa baita.

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

KARGAREN NEUTRALITASUNAREN 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,

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

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

Gure ohiko kasuetan, temperatura 298-300 K (25-27°C) ingurukoa izaten denez, ezpurutasun guztiak ionizaturik egoten dira eta, beraz: $p + N_D - n - N_A = 0$;

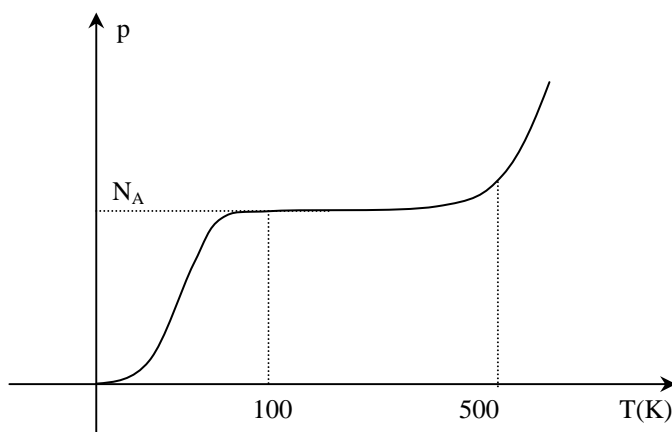
BILAKAERA TENPERATURAREKIN [P motako erdieroale batean]

Demagun N_A ezpurutasun hartzailez dopaturiko erdieroalezko lagin bat dugula.

Beraz,

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

[Giro-tenperaturan, $N_A^- = N_A \gg n_i$]



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

Hiru portaera ikusten ditugu:

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

2.5 Eramaillei 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 duenez, 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.
- Eramaille ugariak edo gehien-eramaileak: erdieroalezko lagin batean gehien azaltzen diren korrante-eramaileak. N motako materialetan, elektroiak; p motakoetan, hutsuneak.
- Eramaille urriena edo gutxien-eramailea: lagin batean gutxien azaltzen den eramaile mota. N motako materialetan, hutsunea; p motakoetan, elektroia.