# 6. PN JUNTURA OREKA TERMODINAMIKOAN

Dispositibo erdieroale askoren oinarria *p* eta *n* motetako bi eskualde elkarrekin jartzean sortzen den junturaren ezaugarrietatik dator. Pn Juntura ezagutzea, beraz, oinarrizkoa zaigu.

Gainera, egitura horrek, berak bakarrik, pn junturako diodoa osatzen du. Askotan, *pn juntura* eta *diodo* hitzak nahasten dira:

- Pn juntura egitura fisiko bat da, dispositibo askotan agertzen dena.
- Diodoa, berriz, bere baitan pn juntura bat eta bi terminal besterik ez duen dispositibo bat da.

Pn juntura ezagututa, zenbait zirkuitu ez-linealen ezaugarriak eta erabilerak hobeto ulertuko ditugu. Gainera, transistorearen funtzionamendua azaltzerakoan, pn junturara joko dugu.

Egoera estatikoko I-V ezaugarria lortzea da hurrengo bi ikasgaien helburua. Pn junturaren polarizazioa zazpigarren ikasgaian ikusiko bada ere, ikasgai honetan egingo dugu hori ulertu ahal izateko lehendabiziko urratsa, pn juntura polarizaziorik gabe (V = 0 V egoeran) analizatuz.

Hau da, ikasgai honetan, junturaren oreka termodinamikoa analizatuko dugu, eta, horretarako:

- Hasteko, pn junturaren definizioa eta motak ikusiko ditugu.
- Gero, fluxu nuluak izateko sortu behar den egoera deskribatuko dugu. Hala, agertuko diren profilak eta eremua gutxi gorabehera arrazoituz, bi eskualde neutro eta karga duen eskualde bat kausituko ditugu. Hortik, potentzial termodinamikoaren kontzeptua definitu eta, garapen sinple batez, beraren balioa kalkulatuko dugu.
- Ondoren, junturan agertzen den karga espazialeko gunean jarriko dugu arreta, eta bertan orekan agertzen diren karga-dentsitatearen ($\rho$), eremu elektrikoaren ($\varepsilon$) eta potentzialaren ($\varphi$) adierazpenak ondorioztatuko ditugu.
- Azkenik, karga espazialeko eskualdearen luzera eta potentzial termodinamikoa erlazionatzen dituen ekuaziora iritsiko gara.

## 6.1 Pn junturaren egitura

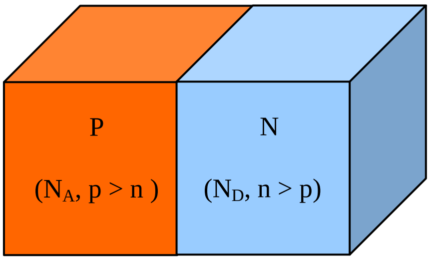
### *6.1.1 DEFINIZIOA*

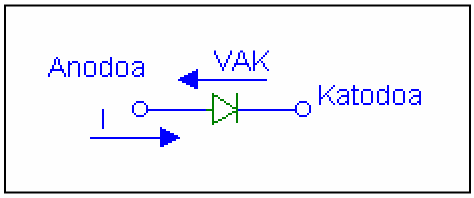
Erdieroale kristal batean, pn juntura bat egongo da, baldin eta kristal horretan zehar ezpurutasunen kontzentrazio garbia ($N_d = N_D^+ - N_A^-$) positiboa izatetik negatiboa izatera pasatzen bada. Hau da, pn juntura batean, n motako eskualde baten ondoan p motako eskualde bat dugu. Argi dagoenez, $N_d = 0$ ($N_D^+ = N_A^-$) beteko da erdiko puntu batean: puntu (gainazal) horri *juntura metalurgikoa* deitzen diogu (giro-tenperaturan gaudela onartuta, ezpurutasun guztiak ionizaturik egongo dira).

Hau da: *n eta p motako bi eskualde banatzen dituen juntura metalurgiko bat dugunean, pn juntura bat dugu*.

Diodoetan, p eskualdeak *anodo* du izena. n eskualdea, berriz, *katodoa* da.

Dispositiboak hiru dimentsio badituz ere, normalean horietako bitan aldaketarik ez dagoenez, analisia dimentsio bakar batera mugatuko dugu. Norabide horretan gertatzen dira kontzentrazio- eta tentsio-aldaketak eta norabide horretan bertan joango dira eramaile fluxuak eta korrontea.





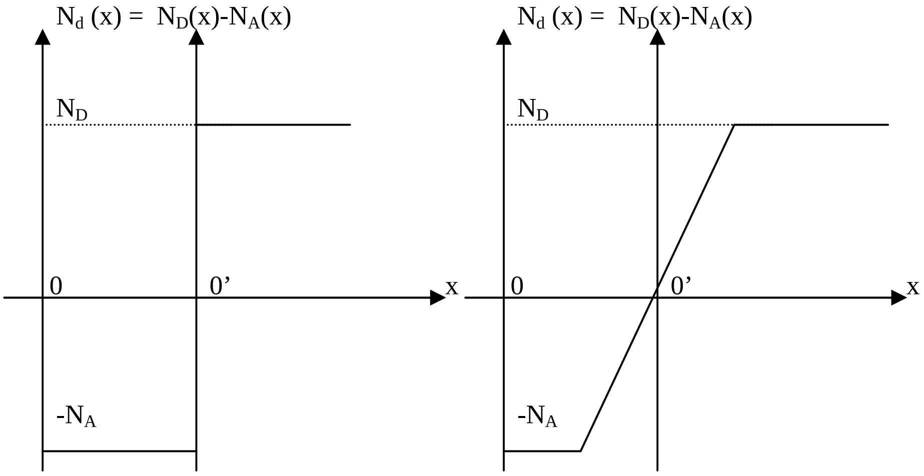

***6.1 Irudia.*** *Pn Juntura (ezk) eta diodoa (esk)*

### *6.1.2 JUNTURA LATZ ETA LAUA*

Pn junturak $N_d$ funtzioak duen formari begira sailkatzen dira:

- Aldaketa oso azkarra bada -hau da, distantzia laburrean gertatzen bada-, *juntura latza* dela esaten dugu.
- Aldiz, aldaketa emeki gertatzen bada -distantzia luzeagoa behar badu-, *juntura mailakatu edo gradual* deitzen diogu.

Juntura moten analisia antzekoa denez, eta emaitzak kualitatiboki berdintsuak direnez, junturarik sinpleena ikertuko dugu: juntura latz laua. Laua deitzen diogu, eskualde neutroetan ezpurutasun-kontzentrazioa konstante mantentzen baita.




***6.2 Irudia.*** *Bi pn juntura mota: latz laua (ezk.) eta mailakatua (esk.)*

Juntura latz laua: $N_d$-k bi balio konstante ditu juntura metalurgikoa osatzen duen planoaren bi aldeetan.

Horretaz gain, bi eskualdeek hutsune eta elektroi asko dituztela onartu ohi da (gogoratu eramaile-kontzentrazio handia dagoen puntu batean eremua oso txikia izango dela beti, bestela atoiko korronte itzela agertuko litzateke-eta).

## 6.2 Oreka termodinamikoa eta barneko potentziala ($V_{bi} = \phi_T$)

Demagun erdieroalea oreka termodinamikoan dagoela: aspalditik ez dago kanpoko tentsiorik, eremu magnetiko edo elektrikorik, ez eta argirik ere.

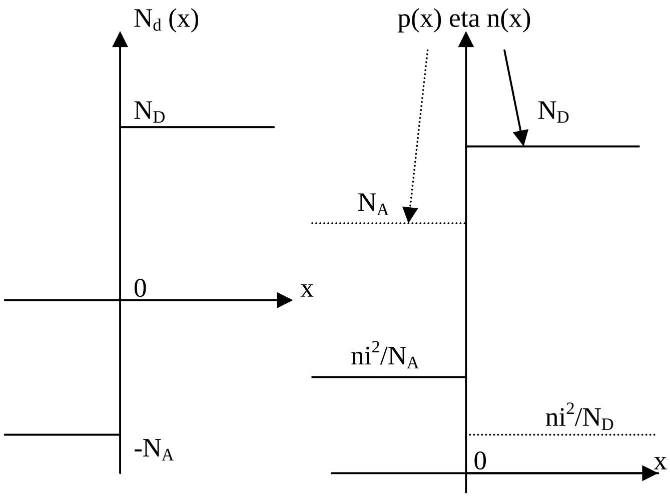
Beraz, tenperatura berean dago lagin osoa eta eramaile mota bakoitzaren fluxua zero da puntu guztietan.

### *6.2.1 OREKAKO PROFILEN SORRERA*

Hasierako profil ezinezkoak

Elkarrekin jartzean, barreiaduraz, n eskualdetik p eskualderanzko elektroi-fluxu bat eta p eskualdetik n alderantz doan hutsune-jario bat agertuko dira, junturan dagoen kontzentrazio-alde itzela berdintzearren (ikus 6.3. Irudia).

Beraz, elektroien eta hutsuneen fluxu garbi bat dago egoera horretan: definizioz horiek ezin dira oreka termodinamikoari dagozkion profilak izan. Barreiapenez, beraz, profilak aldatuko dira orekakoak lortu arte.

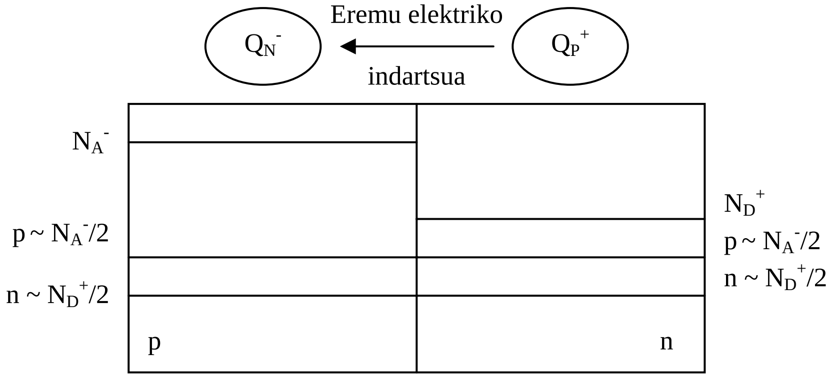



***6.3 Irudia.*** *Juntura latz lauan orekan agertzen diren kontzentrazioak: hasieran espero genitzakeen kontzentrazioak. Ezin dira orekakoak izan (fluxuak ez baitira zero)*

Difusioa azken mugaraino eramanez gero lorturiko profil uniforme ezinezkoak

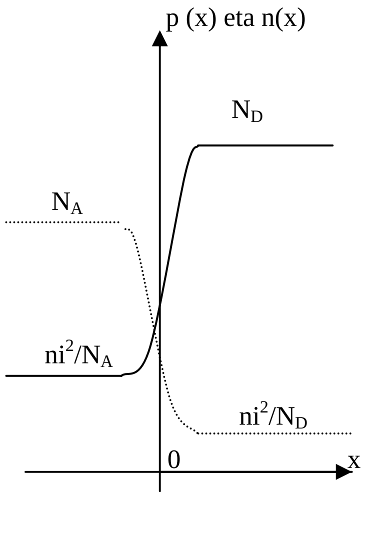
Demagun barreiapena azken mugaraino eramaten dela eta eramaile-jarioak egitura osoan zehar kontzentrazioak berdindu arte jarraitzen duela. Orduan, karga finkoek (ioiek) mugitzerik ez dutenez, eskualde bat positiboki eta bestea negatiboki kargatuko lirateke (ikus 6.4 Irudia). Egoera horretan, ez dago karga-neutraltasunik lagineko puntu bakar batean ere, eta sortzen den eremuak eramaileak banatuko ditu atoian, bakoitza jatorrizko eskualdean gera dadin.

Atoiko fluxu garbi bat egongo litzateke bi eramaile motentzat eta, beraz, ez da OTD egoerari dagokion profila.




***6.4 Irudia.*** *Hasierako fluxua jarraitzekotan lortutako egoera ezinezkoa [adibide honetan ($N_A$=3/2$N_D$, $W_p$ = $W_n$)]*

Beraz, hasierako egoeratik (bi eskualdeetako eramaileak nahastera eramaten duen egoeratik) amaiera ezinezkoraino (eramaileak nahastera eramaten duen egoeraraino) heldu baino lehen, erdiko egoera batean geldituko da.




***6.5 Irudia.*** *Oreka termodinamikoan agertzen diren profilak*

Egoera horretan, kargaren neutraltasuna juntura zenaren inguruan apurtzen da bakarrik, eta, bertan, eremu banatzaile bat agertzen da -karga finkoak direla medio-; bitartean, eskualde neutroetan hasierako egoera mantentzen da.

Hala, kontrako bi indar / fluxuk elkar ezabatzen dute edonon:

- Alde batetik, eramaile ugarienek bestaldera pasatu nahi lukete, barreiapenez.
- Baina beste alde batetik, erdiko gunean sortu den eremuak eramaileak ugarien diren eskualdean mantentzen ditu, atoiz.

Ugarienak bere eskualdea utziz gero, eremua hazten da, eta, eremu hori eramaile ugariena jatorrizko eskualdean mantentzen saiatzen denez, orekara helduko gara azkenean; eramaileak banatzeko eremu nahikoa dagoenean, hain zuzen ere.

Oreka termo*dinamiko*an, eramaile bakoitzaren fluxua zero izango da, eramaile bakoitzaren barreiapeneko korrontea bere atoiko korrontearekin ezabatuko da. Hori puntu guztietan beteko da.

$$J_n = 0 \Rightarrow J_{dn} + J_{an} = 0 \Rightarrow J_{dn} = -J_{an}$$

$$J_p = 0 \Rightarrow J_{dp} + J_{ap} = 0 \Rightarrow J_{dp} = -J_{ap}$$

Eta, zer esanik ez, eramaile bakoitzaren fluxua zero denez, korronte osoa ere zero da:

$$J_T = J_p + J_n = 0 + 0 = 0$$

### *6.2.2 POTENTZIAL TERMODINAMIKOA EBAZTEA*

Esan bezala, eremu bat sortzen da junturaren inguruan. Eremua, ikusi den bezala, n eskualdeko ertzetik, p eskualdeko ertzera doa, eta gehienezko balioa junturan hartzen du.

Efektuari potentzial elektrikoaren ikuspuntutik begiratzen badiogu, eremuaren bektorearen jatorrizko eskualdean (hau da, n eskualdean), potentziala altuagoa izango da beste eskualdean baino.

Izan ere, potentziala eremuaren integraletik (- zeinuarekin) kalkula dezakegu. Emaitza *junturaren potentzial termodinamikoa* da (built-in potential) $V_{bi} = \phi_T$.

$\phi_T$ ebazteko, fluxua zero dela hartuko dugu abiapuntutzat. Adibidez, elektroiak hartuz, beren fluxu osoa hutsa dela badakigunez:

$$F_n = 0 \Rightarrow F_{dn} + F_{an} = 0 \Rightarrow \left[-\frac{dn(x)}{dx} \cdot D_n\right] + \left[-n(x) \cdot \mu_n \cdot \varepsilon(x)\right] = 0$$

$$D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx} = -n(x) \cdot \mu_n \cdot \varepsilon(x) \Rightarrow \frac{D_n}{\mu_n} \cdot \frac{dn(x)}{n(x)} = -\varepsilon(x) \cdot dx \equiv \frac{d\varphi(x)}{dx} \cdot dx$$

$$\frac{KT}{q} \cdot \frac{dn(x)}{n(x)} = d\varphi(x) \Rightarrow \frac{KT}{q} \cdot d\left[Ln(n(x))\right] = d\varphi(x)$$

$$\frac{KT}{q} \cdot Ln\left[n(x)\right] = \varphi(x) + C$$

$$\frac{KT}{q} \cdot Ln\left[\frac{n(x_1)}{n(x_2)}\right] = \varphi(x_1) - \varphi(x_2)$$

Eta, beraz,

$\varphi$(n eskualdean) - $\varphi$(p eskualdean) = KT/q x Ln $[N_D/(n_i^2/N_A)]$

$$\Phi_T = \frac{KT}{q} \cdot Ln\left[\frac{N_A x N_D}{n_i^2}\right]$$

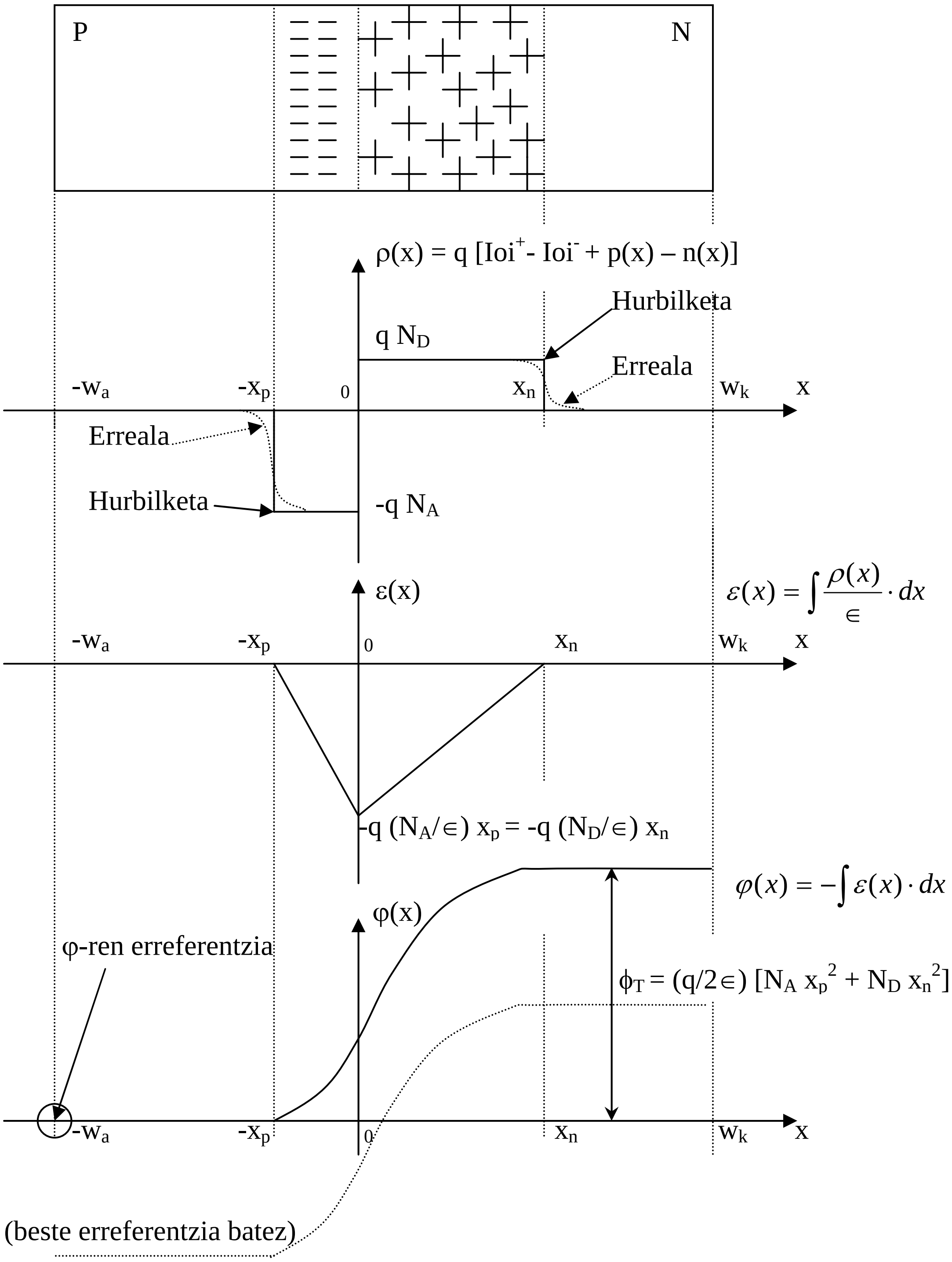
## 6.3 Eskualde dipolarra oreka termodinamikoan eta $\phi_T$ ebaztea

Juntura metalurgikoaren inguruetan, eramailerik gabeko eskualde bat agertu da. N eskualdearen ondoan, ezpurutasun emaileak (positiboki kargaturik, $N_D^+$) besterik ez dago (eramaile bat bertan eroriko balitz, ugarien den eskualdera eramango luke (atoian) eremuak). P eskualdearen ondoan, ezpurutasun hartzaileak, besterik ez dugu.

Eramailerik (ia) ez dagoenez, *hustutako eskualdea* edo *deplexio geruza/eskualdea* esaten zaio. Bertan karga dagoenez gero eta karga horrek dipolo bat sortzen duenez, *karga espazialeko eskualdea* edo *eskualde dipolarra* ere esaten zaio.

Hurrengo irudian (ikus 6.5 Irudia), magnitude nagusiek hustutako eskualdean duten bilakaera ikusten dugu. Karga-dentsitatea, eremu elektrikoa eta potentziala irudikatu dira.

Benetako egoera marraz agertzen da;  erabateko despopulatzea, berriz, puntuez adierazten da. Ikusten denez, hurbilketa hori egitean, errorea txikia da eta, beraz, erraztasuna aitzaki, *erabateko despopulatzearen hipotesia* ontzat eman daiteke.




***6.5 Irudia.*** *Eramailez Hustutako Eskualdearen (Karga espazialeko eskualdearen) analisia. Kargaren kalkulua errazteko, hurbilketa bat egin da: karga duen eskualdearen despopulatzea erabatekoa dela onartuz.*

## *6.3.1 HUSTUTAKO ESKUALDEAREN ANALISIA DESPOPULATZEA ONARTUTA*

$\phi_T$ –ren ebazpena kargetatik abiatuta, bi (hiru) ekuazio erabili behar ditugu:

$$\rho(x) = q \cdot \left[ p(x) + N_D - n(x) - N_A \right]$$

$$\frac{\rho(x)}{\in_S} = \frac{d\varepsilon(x)}{dx} = -\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2}$$

non $\in_S$ erdieroalearen permitibitatea den. Normalean, parametro hau baino, hutsaren permitibitatearekin ($\in_0$ = 8.85E-14 F/cm = 8.85 pF/m) erlazionatzen duen konstante dielektrikoa erabiltzen da datu gisa: silizioaren kasuan, $\in_{rSi} = \in_{erlatiboSi} = 11.8 \rightarrow \in_{Si} = 104$ pF/m; germaniorako, $\in_{rGe} = 16.3$.

Kargari dagokionez, lau eskualde daude. X ardatzaren jatorria juntura metalurgikoan kokatzen badugu eta $-x_p$ eta $x_n$ (erabat) hustutako eskualdeko mugak badira:

| Eskualdea | P neutroa | Kargaduna (P eskualderantz) | Kargaduna (N eskualderantz) | N neutroa |
|---|---|---|---|---|
| x | $x < -x_p$ | $-x_p < x < 0$ | $0 < x < x_n$ | $x_n < x$ |
| Karga-dentsitatea | $\rho(x) = 0$ | $\rho(x) = - q N_A$ | $\rho(x) = + q N_D$ | $\rho(x) = 0$ |

Poissonen ekuazioa erabiliz: $\varepsilon(x) = \int \frac{\rho(x)}{\in} \cdot dx$

| Eskualdea | P neutroa | Kargaduna (P eskualderantz) | Kargaduna (N eskualderantz) | N neutroa |
|---|---|---|---|---|
| Eremuaren forma | $K_1$ | $K_2 - qN_A/\in_S\, x$ | $K_3 + qN_D/\in_S\, x$ | $K_4$ |
| Eremua | 0 | $- qN_A/\in_S\, (x + x_p)$ | $qN_D/\in_S\, (x - x_n)$ | 0 |

Non, $K_i$ kalkulatzeko, eremuarentzako mugalde-baldintza hauek jarri diren:

- Eremua zero da hustutako eskualdetik kanpo (eta, funtzio jarraitua denez, hustutako eskualdeko ertzetan ere bai): $K_1 = 0$; $K_2 = -qN_A/\in_S x_p$; $K_3 = -qN_D/\in_S x_n$; $K_4 = 0$.
- Eremua jarraitua denez juntura metalurgikoan: K2 = K3; $-qN_A/\in_S x_p = -qN_D/\in_S x_n$ ; $x_n/x_p = N_A/N_D$

  Ikusten denez, guztira metatutako karga zero da: $\mathbf{x_n N_D = x_p\ N_A}$; hau da, hustutako luzera, dopaketa txikiagoa duen eskualderantz zabaltzen da gehiago.

Karga osoa = $q(x_n N_D - x_p N_A) = 0$

Gehienezko eremua: $\boldsymbol{\varepsilon_{max} = -qN_A/\in_S x_p = -qN_D/\in_S x_n}$

Azkenik, eremua integratuz, potentziala lortzen da: $\varphi(x) = -\int \varepsilon(x) \cdot dx$

| Eskualdea | P neutroa | Kargaduna<br>(P eskualderantz) | Kargaduna<br>(N eskualderantz) | N neutroa |
|---|---|---|---|---|
| Eremua | 0 | $- qN_A/\in_S (x + x_p)$ | $qN_D/\in_S (x - x_n)$ | 0 |
| φ(x)-ren forma | $C_1$ | $C_2 + qN_A/\in_S(x+x_p)^2/2$ | $C_3 - qN_D/\in_S(x-x_n)^2/2$ | $C_4$ |
| φ(x) | 0 (erref.) | $qN_A/\in_S(x+x_p)^2/2$ | $qN_A/\in_S(x_p)^2/2 +$<br>$qN_D/\in_S(x_n)^2/2 –$<br>$qN_D/\in_S(x-x_n)^2/2$ | $qN_A/\in_S(x_p)^2/2 +$<br>$qN_D/\in_S(x_n)^2/2 –$<br>$= \phi_T$ |

Honako mugalde-baldintza hauek jarriz:

- Potentzialarentzat erreferentzia hartzearren, $C_1 = 0$
- Jarraitua denez:
  - $x = -x_p$ puntuan: $0 = C_2 + qN_A/\in_S (-x_p + x_p)^2/2 \rightarrow C_2 = 0$
  - $x = 0$ puntuan: $qN_A/\in_S (x_p)^2/2 = C_3 - qN_D/\in_S (x_n)^2/2$; eta beraz: $C_3 = q/2\in_S [N_A x_p^2 + N_D x_n^2]$
  - $x = x_n$ puntuan: $C_4 = C_3 = q/2\in_S [N_A x_p^2 + N_D x_n^2]$

Eta, beraz,

$\phi_T = \varphi(x>x_n) - \varphi(x<-x_p) = C_4 - C_1 = q/2\in_S [N_A x_p^2 + N_D x_n^2]$

$$\boldsymbol{\phi_T = q/2\in_S [N_A x_p^2 + N_D x_n^2]}$$

*6.3.2 HUSTUTAKO ESKUALDEAREN ZABALERA*

Potentzial termodinamikorako ditugun bi adierazpenetatik eta hustutako eskualdearen bi luzeren arteko erlaziotik, hustutako eskualdearen zabalera ebazten da:

$$\phi_T = \frac{KT}{q} \cdot Ln\left[\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right] \quad \text{(normalean erraz kalkulatzen dena)}$$

$$\phi_T = \frac{q}{2\in_S} \cdot \left[N_A \cdot x_p^2 + N_D \cdot x_n^2\right] \quad \text{non } x_n N_D = x_p N_A \Rightarrow x_p = x_n \frac{N_D}{N_A}$$

$$\phi_T = \frac{q}{2\in_S} \cdot \left\{N_A \cdot \left[x_n \frac{N_D}{N_A}\right]^2 + N_D \cdot x_n^2\right\} \Rightarrow \frac{2\in_S \phi_T}{q} = \left[\frac{N_D^2}{N_A} + N_D\right] \cdot x_n^2$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\in_S \phi_T}{q \cdot N_D\left[1 + \frac{N_D}{N_A}\right]}} \qquad x_p = x_n \frac{N_D}{N_A} = \sqrt{\frac{2\in_S \phi_T}{q \cdot N_A\left[1 + \frac{N_D}{N_A}\right]}}$$

$$l = x_n + x_p = x_n + x_n \frac{N_D}{N_A} = x_n\left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) = \sqrt{\frac{2\in_S \phi_T\left[1 + \frac{N_D}{N_A}\right]}{q \cdot N_D}} = \sqrt{\frac{2\in_S \phi_T}{q}\left[\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A}\right]}$$

Ikusten denez, zenbat eta dopaketa handiagoa, orduan eta zabalera txikiagoa. Era berean, lehenago ikusi dugunez, argi geratzen da berriro hustutako aldea estuagoa dela eskualde dopatuagorantz:

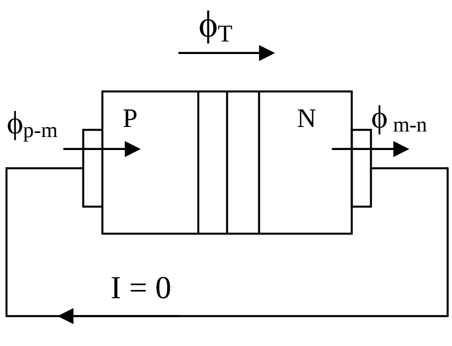
$$l = x_n\left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) \Rightarrow x_n = \frac{l}{1 + \frac{N_D}{N_A}} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot l \qquad x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} \cdot l$$

*6.3.3 PN JUNTURA OREKA TERMODINAMIKOAN: LABURPENA*

1. Eskualde dipolarretik kanpo, ez dago eremu elektrikorik eta erdieroalea neutroa da (oreka termodinamikoan).
2. Eskualde dipolarraren ertz batetik bestera oreka termodinamikoan dagoen potentziala *potentzial termodinamikoa* da.
3. Junturan bada eskualde dipolar bat eta hori, karga espaziala kalkulatzeari dagokionez, erabat despopulatuta dago (eramailez hustuta).
4. Eskualde dipolarrean, ezpurutasun atomo ionizatuek osatzen dute karga espaziala, $qN_d(x)$ (erabateko despopulatzearen hipotesitik).
5. Eremu elektrikoa eta potentziala laugarren puntua Poissonen ekuaziora eramanez kalkulatzen dira.
6. Abiapuntua potentziala izango balitz, eremu elektrikoa deribatuz kalkulatuko genuke. Eremua jakinda, Poissonen ekuazioaren bidez, kargaren adierazpena berehalakoa litzateke. Eta hortik, dopaketak edota eramaile-kontzentrazioak (dopaketak jakinez) ebatziko genituzke. Noranzko horretan, erabateko despopulatzearen hipotesia ez litzateke beharrezkoa izango, zeren eramaile-kontzentrazioak zehazki ebatziko bailirateke (dena dela, ezpurutasunekin alderatuta oso gutxi izango lirateke).

<u>*Eranskina: kontaktuetan agertzen den lan-potentziala eta Kirchoffen legea*</u>

Potentzial termodinamikoa oreka termodinamikoan agertzen da eta ez du inolako korronterik sortzen. Aldiz, barreiapeneko korrontea eragozten du. Bi material (ezberdin) lotzen ditugunean, $\phi_T$-ren antzeko fenomenoak agertzen dira. Materialen izaeraren menpekoak diren potentzial horietarako, lan-potentzial edo ukipen-potentzial izena erabili ohi da. Potentzial horiek direla eta, orekan, zirkuitua ixtean (hau da, bateriarik gabe, zirkuitulaburrean), Kirchoff betetzen da, eta ez da inolako korronterik behar.




**6.6 Irudia.** *Kirchoff zirkuitulaburrean:* $\phi_{p-m} + \phi_T + \phi_{m-n} = 0$

Hori dela-eta, ezin dugu $\phi_T$ voltmetroaz neurtu (zunden eta materialen arteko lan-potentzialak sartzen dira eta). Gainera, voltmetroak korrontea behar du neurtzeko, eta, orekan, korronte osoa zero da.