BIGARREN MULTZOA: DIODOA

6. PN JUNTURA OREKA TERMODINAMIKOAN **63**
6.1 Pn junturaren egitura 64
6.1.1 Definizioa 64
6.1.2 Juntura latz eta laua 65
6.2 Oreka termodinamikoa eta barneko potentziala 66
6.2.1 Orekako profilen sorrera 66
6.2.2 Potentzial termodinamikoa ebaztea 68
6.3 Eskualde dipolarra oreka termodinamikoan eta potentziala ebaztea 69
6.3.1 Hustutako eskualdearen analisia despopulatzea onartuta 71
6.3.2 Hustutako eskualdearen zabalera 73
6.3.3 Pn juntura oreka termodinamikoan: laburpena 74

7. DIODOAREN POLARIZAZIOA **77**
7.1 Definizioak eta hitzarmenezko zeinuak 78
7.2 Eskualde dipolarraren analisia polarizaziopean 78
7.3 Eskualde neutroen analisia: Shockleyren ekuazioa 81
7.3.1 Analisi kualitatiboa 81
7.3.2 Analisi kuantitatiboa 83
7.3.3 Shockleyren ekuazioa 89
7.3.4 Asetasuneko korrontearen esanahia 91
7.3.5 Kasu bereziak 92
7.4 Seinale handiko ereduak: zirkuitu-eredu ideala eta hurbilketak 94
7.5 Zirkuituen ebazpen grafikoa: karga-zuzena (estatikoan) 97
7.5.1 Zirkuituak ebaztea eredu osoak erabiliz 97
7.5.2 Zirkuituak ebaztea eredu linealak erabiliz 98

8. DIODO IDEALAREKIKO DESBIDERATZEAK **101**
8.1 Desbideratzeak polarizazio zuzenean 101
8.1.1 Hustutako eskualdean ez dago birkonbinaketarik? 102
8.1.2 Injekzio baxuan gaude? 103
8.1.3 Tentsio osoa hustutako eskualdean agertzen da? 104
8.2 Desbideratzeak alderantzizko polarizaziopean 104
8.2.1 Junturaren haustura eta Zener diodoak 104
8.2.2 Zirkuituak Zener diodoekin: erreguladoreak 106

9. DIODOA ERREGIMEN DINAMIKOAN **107**
9.1 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera estatikoan 108
9.2 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera dinamikoan 110
9.3 Seinale txikiko erregimenaren analisia: garapena eta zirkuitu

baliokidea 116
9.4 Diodoaren portaera kommutazioan 120
9.4.1 Eroaten hastea (OFF→ON) 120
9.4.2 Etetearen analisia (ON→OFF) 124

10. ZIRKUITUAK DIODOEKIN ETA BESTE DIODO ERDIEROALE BATZUK 129
10.1 Zirkuitu zuzentzaileak: transferentzia-kurbak 130
10.1.1 Uhin erdiko zuzentzailea 130
10.1.2 Uhin osoko zuzentzailea 132
10.1.3 Uhin osoko zuzentzailea iragazpenarekin 133
10.2 Zirkuitu ebakitzaileak 135
10.3 Beste diodo erdieroale batzuk: Schottky eta LED diodoak, zelula fotovoltaikoa eta fotodiodoa 137
10.3.1 Schottky diodoak 137
10.3.2 Fotodiodoak eta zelula fotovoltaikoak 137
10.3.3 Light emitting diodes (LEDs) 140

DIODOARI BURUZKO ARIKETAK 141
Zirkuituak ebazteko prozeduren laburpena 143
Ariketen enuntziatuak 147

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 (ρ), eremu elektrikoaren (ε) eta potentzialaren (φ) adierazpenak ondorioztatuko ditugu.
- Azkenik, karga espazialeko eskualdearen luzera eta potentzial termodinamikoa erlazionatzen dituen ekuaziora iritsiko gara.

6.1 Pn junturaren egitura

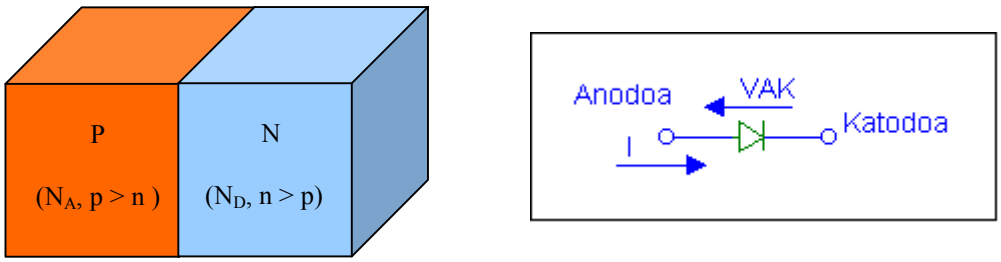
6.1.1 DEFINIZIOA

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 baditu 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.



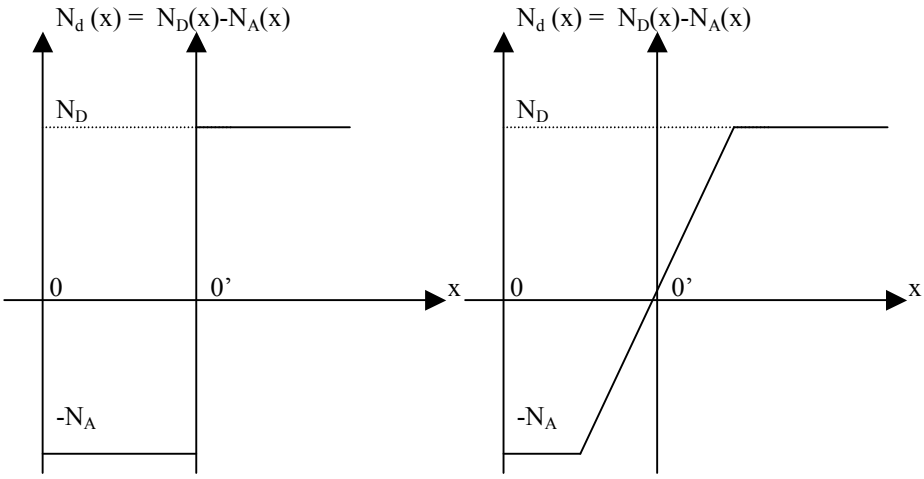
6.1 Irudia. *Pn Juntura (ezk) eta diodoa (esk)*

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.

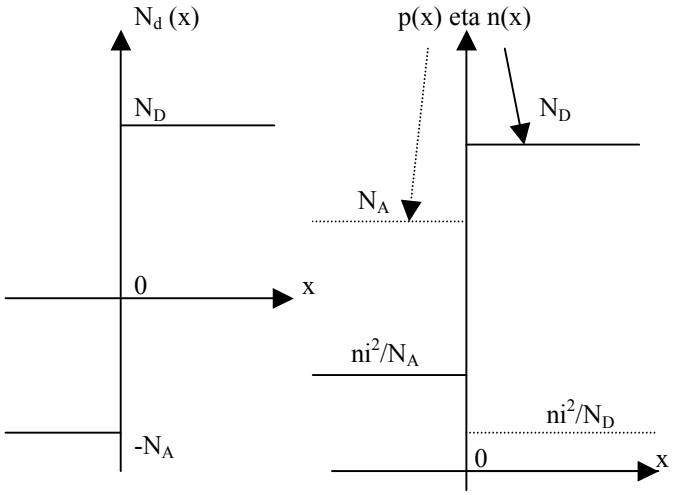
Beraz, tenperatura berean dago lagin osoa eta eramaile mota bakoitzaren fluxua zero da puntu guztietan.

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.

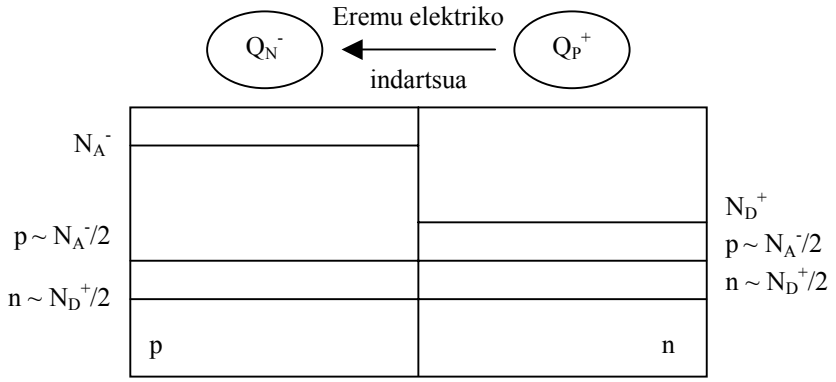


6.3 Irudia. *Juntura latz lauan orekan agertzen diren kontzentrazioak: hasieran espero genitzakeen kontzentrazioak. Ezin dira orekakoak izan (fluxuak ez baitira zero)*

Difusioa azken mugaraino eramanez gero lorturiko profil uniforme ezinezkoak

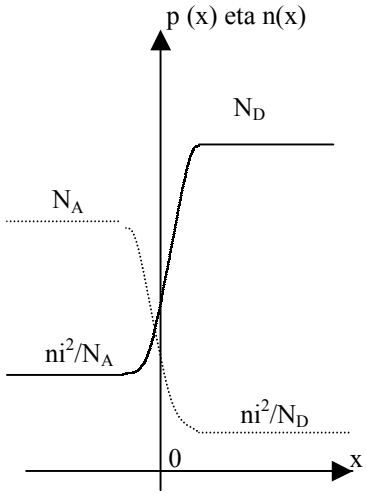
Demagun barreiapena azken mugaraino eramaten dela eta eramaile-jarioak egitura osoan zehar kontzentrazioak berdindu arte jarraitzen duela. Orduan, karga finkoek (ioiek) mugitzerik ez dutenez, eskualde bat positiboki eta bestea negatiboki kargatuko lirateke (ikus 6.4 Irudia). Egoera horretan, ez dago 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=3/2N_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 gelditukо 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) $V_{bi} = \phi_T$.

ϕ_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,

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

ϕ_T = KT/q x Ln [N_D x N_A / n_i^2]

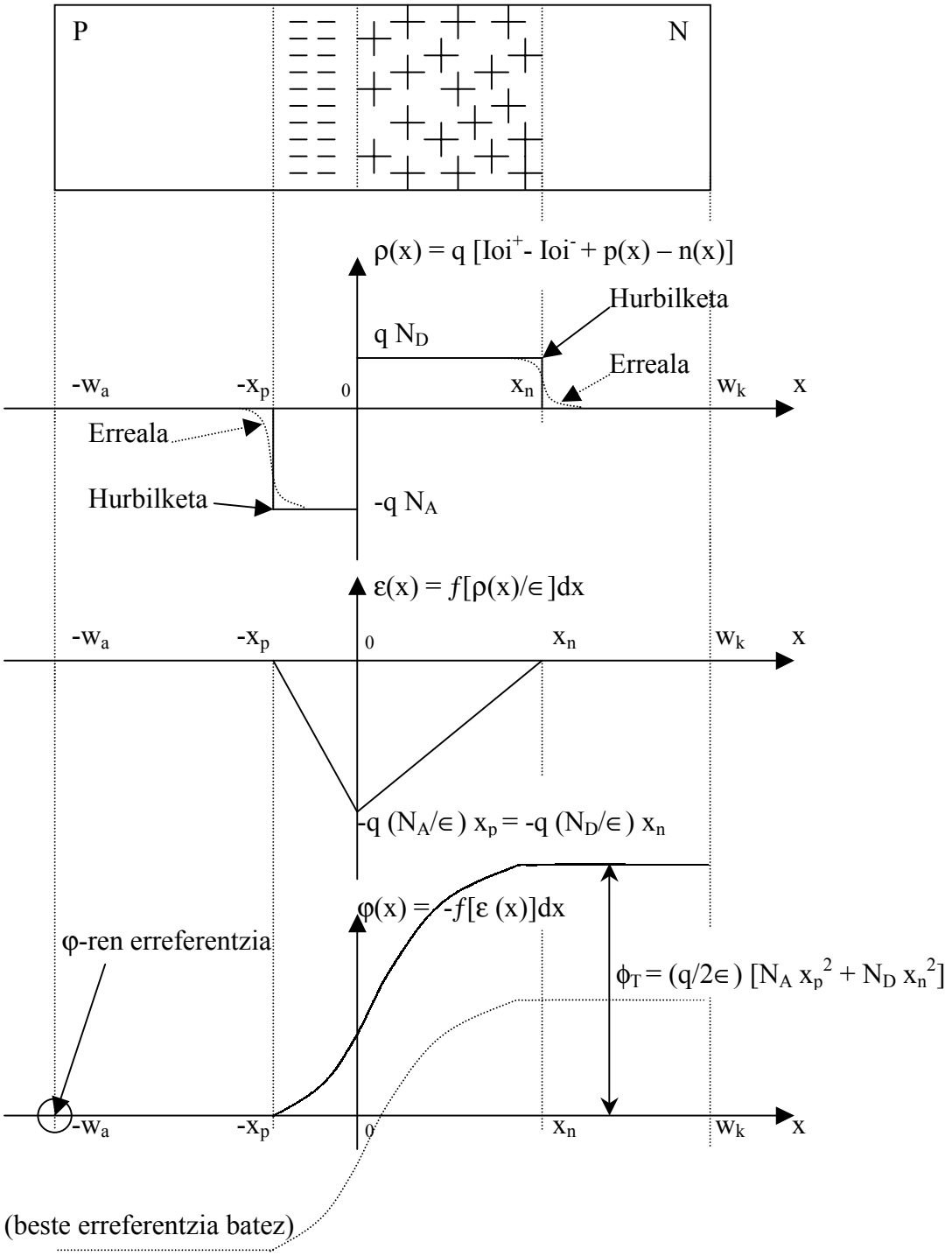
6.3 Eskualde dipolarra oreka termodinamikoan eta ϕ_T ebaztea

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

ϕ_T –ren ebazpena kargetatik abiatuta, bi (hiru) ekuazio erabili behar ditugu:

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

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

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 → $\in_{Si}$ = 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 (P eskualderantz)	Kargaduna (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.)	$qN_A/\in_S (x+x_p)^2/2$	$qN_A/\in_S (x_p)^2/2 + qN_D/\in_S (x_n)^2/2 - qN_D/\in_S (x-x_n)^2/2$	$qN_A/\in_S (x_p)^2/2 + qN_D/\in_S (x_n)^2/2 - = \phi_T$

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:

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

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

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

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

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

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:

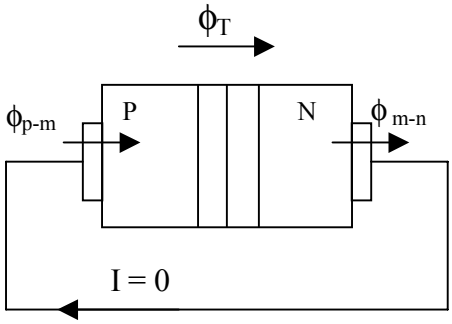
$$l = x_n\left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) \Rightarrow x_n = \frac{l}{1 + \frac{N_D}{N_A}} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot l \qquad x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} \cdot l$$

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, ϕ_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 ϕ_T voltmetroaz neurtu (zunden eta materialen arteko lan-potentzialak sartzen dira eta). Gainera, voltmetroak korrontea behar du neurtzeko, eta, orekan, korronte osoa zero da.

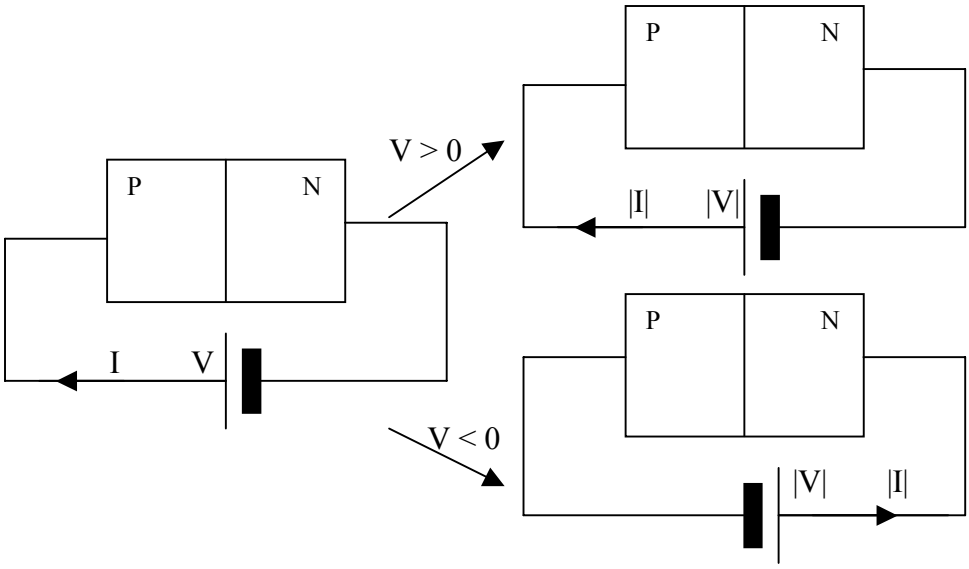
7. DIODOAREN POLARIZAZIOA

Ikasgai honetan, PN juntura polarizaziopean analizatuko dugu. Orekarekin alderatuz gero gertatzen diren aldaketen analisian, honako puntu hauek ikusiko ditugu:

- Hasteko, polarizatzean erabiliko ditugun hitzarmenezko zeinuak, noranzkoak eta definizioak ikusiko ditugu.
- Gero, karga espazialeko eskualdea tentsioarekin nola aldatzen den analizatuko da.
- Ondoren, eskualde neutroetako eramaileen profilak eta horien tentsioarekiko menpekotasuna aurkeztuko da. Eskualde laburren eta luzeen kasu bereziak ere ebatziko dira.
- Garapena amaitzeko, korrontea, profilen bidez –eta, beraz, tentsioaren funtzioan- nola adierazten den ikusiko dugu. Hau da: Shockleyren ekuazioa (I-V ezaugarri-kurba) lortu eta marraztuko dugu.
- Azkenik, ezaugarri-kurbatik abiatuz, zirkuituak ebazteko erabiltzen diren eredu matematiko sinpleak aurkeztuko dira.

7.1 Definizioak eta hitzartutako zeinuak

Kanpotik V tentsioa aplikatzen diogunean, juntura polarizatuta dagoela esaten dugu. 7.1 Irudian, dauden bi aukerak eta tentsioaren hitzarmenezko zeinuak aurkezten dira.



7.1 Irudia. *Polarizazioko tentsioak eta korronteak: irizpide orokorrak (ezkerrean). Polarizazio zuzena (V>0, goiko eskuinean) eta inbertsoa (V<0, beheko eskuinean).*

Beraz,

- Aplikatutako potentzialak p eskualdeko kontaktua n eskualdekoa baino positiboagoa egiten badu, *polarizazio zuzena* edo positiboa izango dugu. V > 0.
- Aplikatutako potentzialak p eskualdeko kontaktua n aldekoa baino negatiboagoa egiten badu, *alderantzizko polarizazioa*, inbertsoa edo negatiboa izango dugu. V < 0.

7.2 Eskualde dipolarraren analisia polarizaziopean

Normalean bi aurrebaldintza betetzen direla onar dezakegu:

- P eta N eskualdeetako dopaketa nahiko altua denez, eskualde neutroen eroankortasuna nahiko handia da ($\sigma = q\mu_M M$). Hori dela-eta, korronte baxu edo ertainekin, bertan agertzen diren eremua ($\varepsilon = J_{aM} / \sigma$) eta tentsioa ($V_{eskneutroa} \sim I \times L_{eskneutroa} /(\sigma A)$ oso baxuak dira (bestela atoiko korrontea oso handia izango litzateke eta). Aintzat ez hartzeko modukoak dira, baina ez dira nuluak.

- Kontaktu metalikoak ohmikoak (*onak*) dira. Beraz, dispositiboa zeharkatzen duen korronteak oso erresistentzia txikia zeharkatzen du sartu eta irteteko. Ondorioz, kontaktuetan, tentsioa aintzat ez hartzeko modukoa da (kontaktuetako potentziala jatorrizko ukipen-potentziala da: ez da aldatzen).

Beste modu batera esanda: I korronteak, kontaktu eta eskualde neutroetan proportzionalak diren tentsioak eragiten ditu: $I \cdot R_{kontaktu}$ eta $I \cdot R_{esk\ neutro}$, baina, erresistentziak oso baxuak direnez, tentsioak aintzat ez hartzeko modukoak izaten dira korrontea oso altua ez bada.

Beraz ohiko korronteetarako, kanpotik aplikatutako tentsioa hustutako eskualdean baino ezin da agertu. Bertan, lehenagotik genuen potentzial termodinamikoari gainjartzen zaio.

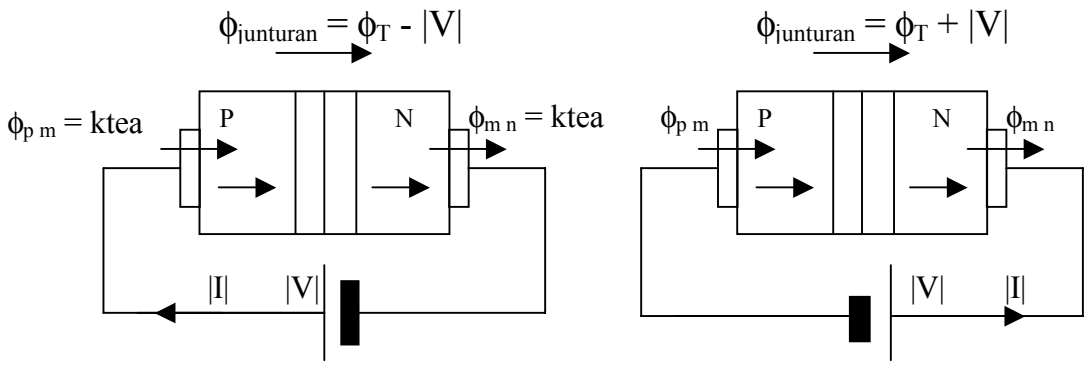
V = 0 kasuan, ϕ_T –k, n eskualdea (katodoa) p eskualdea (anodoa) baino potentzial altuagoan zegoela esaten zigun.

V > 0 bada, p eskualdeak n eskualdearekiko zeukan potentzial langa V volt jaisten da (hustutako eskualdean, $\phi_T - V$ potentziala dago). Eremua txikiagoa da eta ez du barreiapeneko korrontea guztiz ezabatzen. Beraz, elektroi-fluxu bat agertzen zaigu n eskualdetik p alderantz eta, paraleloan, hutsune-fluxu bat anodotik katodorantz. Elektroien karga negatiboa denez, bi korronteak p eskualdetik n eskualderantz doaz eta bien batura den korronte garbia agertzen da.

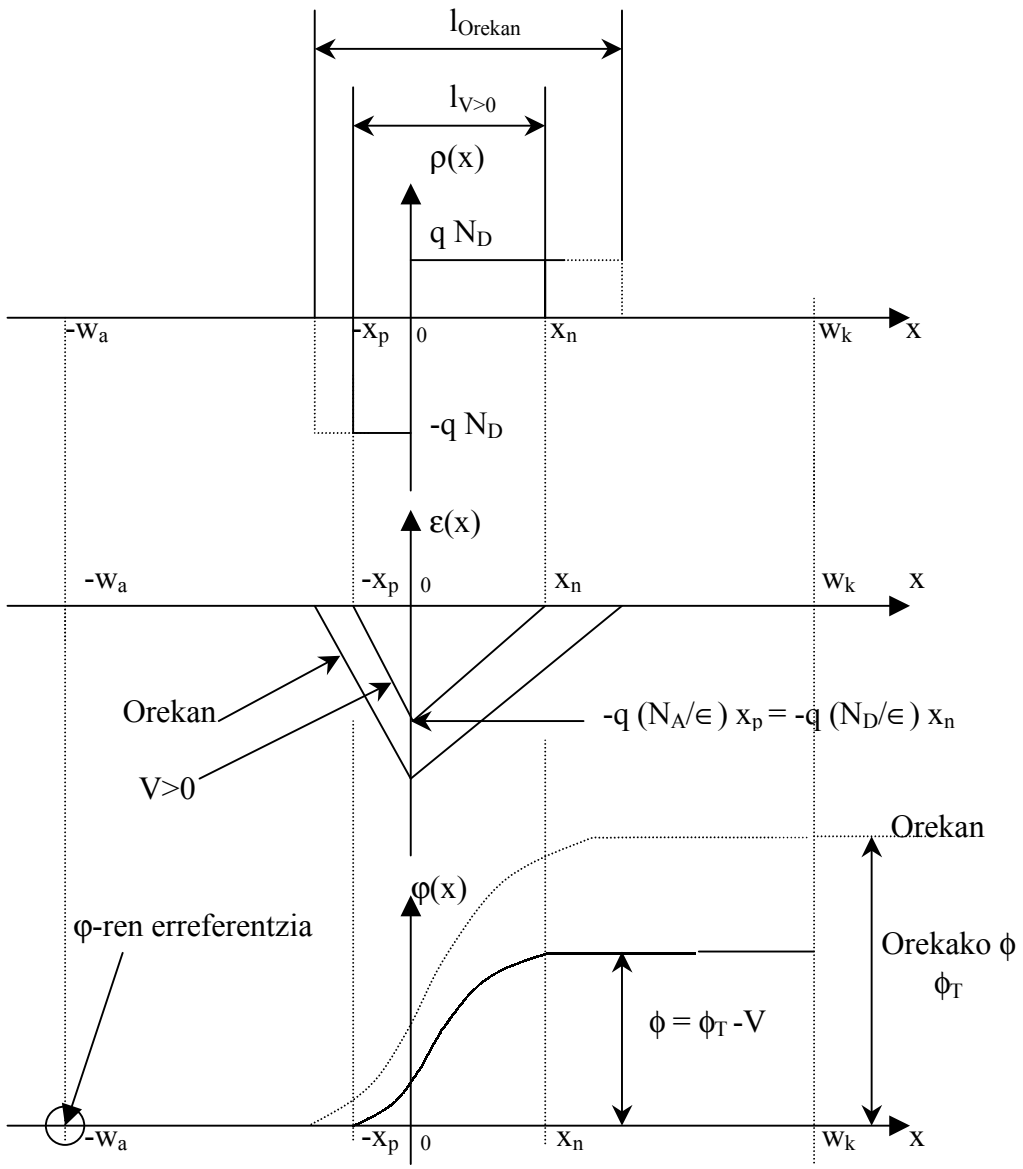
V < 0 bada, potentzial langa igotzen da eta eramaileek zailtasun handiagoak izango dituzte urrien diren eskualdera pasatzeko (horixe zen ϕ_T –ren helburua, eta orain $\phi_T - V > \phi_T$). Kasu honetan, atoiko korrontea, difusiokoa baino altuagoa da eta p eskualdetik n eskualdera elektroi-fluxu garbi bat doa; arrazoi bera dela-eta, paraleloan, hutsune-fluxu bat dago kontran. Ondorioz, korronte garbi bat azaltzen da n eskualdetik p eskualdera.

Beraz, bi kasuetan, aplikatutako tentsioak korrontea eragiten du *kontrako* noranzkoan. Korrontearen balioa, aldiz, ez da bi kasuetan ordena berekoa, geroago ikusiko dugunez.

Gune dipolarrean, orekan (potentzial termodinamikoa hustutako eskualdearekin erlazionatzeko) egin dugun garapen bera erabil dezakegu berriro, orain $\phi_{junturan} = \phi_T - V$ erabiliz. Baina jadanik ez gaude oreka termodinamikoan eta korronteak ez dira nuluak izango ($J_n \neq 0$, $J_p \neq 0$, $J_T \neq 0$).



7.2 Irudia. *Junturako potentzialak eta korronteak (kanpotik aplikatzen den tentsioa normalean junturan agertzen da: korrontea oso altua ez bada)*



*7.3 **Irudia.** Juntura polarizazio positiboa aplikatzean*

Hau da: Poissonen ekuaziotik abiatuz, dena era berean kalkulatzen da (ikus 7.3 Irudia) eta, ondorioz, hustutako eskualdearen luzera eta potentziala erlazionatzen dituen ekuazioa baliagarria da. Oraingo formulan agertzen den potentziala "$\phi = \phi_T - V$" izango da:

$$l = \sqrt{\frac{2\in_S}{q}\left[\frac{1}{N_D}+\frac{1}{N_A}\right]\phi} = \sqrt{\frac{2\in_S}{q}\left[\frac{1}{N_D}+\frac{1}{N_A}\right][\phi_T - V]} = l_0\sqrt{\frac{\phi_T - V}{\phi_T}}$$

Oharra:

Aplikatutako tentsioak, mugarik al du? Nahi dugun tentsio iturria jar dezakegunez, hustutako eskualdean, $\phi = \phi_T - V$ negatiboa izatera hel liteke? Ez. Baldintza horietan, eremu elektrikoak bere noranzkoa aldatuko luke eta difusioaren alde joko luke, eta, ondorioz, korrontea ikaragarri igoko litzateke. Horrek lehen ezinezkotzat hartu dugun egoera ekarriko luke (karga espazialeko eskualdea dispositibo osoa litzateke). Ez gara, ordea, egoera horretara heltzen, korrontea asko handitzean, eskualde neutroetan eta kontaktuetan erortzen diren tentsioek aintzat ez hartzeko modukoak izateari uzten diotelako.

7.3 Eskualde neutroen analisia, Shockleyren ekuazioa eta ezaugarri-kurba

7.3.1 ANALISI KUALITATIBOA

Polarizazio zuzena:

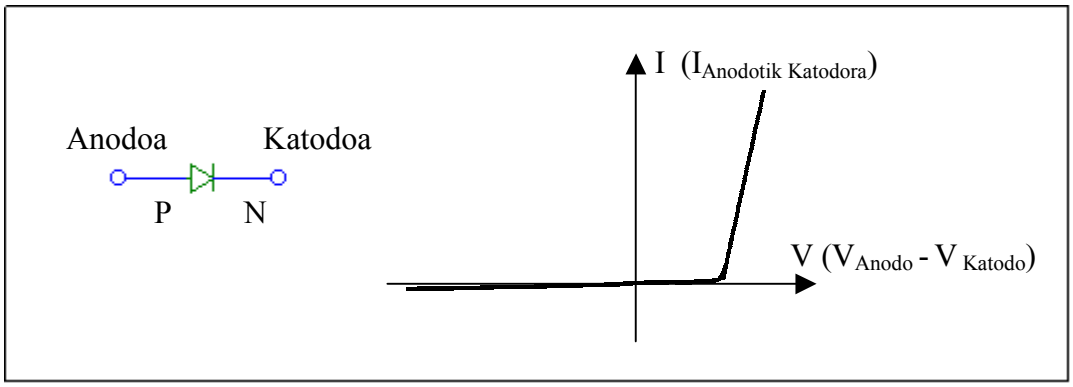
Hustutako eskualdean, $\phi_T - |V|$ potentziala dugu (non $|V| < \phi_T$). Beraz, orekarekin alderatuz gero, eremu txikiagoa eragingo du eta atoiko korronteak ez du barreiapenekoa ezabatuko (gogoratu: barreiapeneko korronteak eramaileak ugarien diren puntutik urrien diren puntura daramatza). Beraz, n eskualdetik (katodotik) p eskualdera (anodora) doan elektroi-fluxu garbi bat agertzen da. Paraleloan, hutsune-jarioa, anodotik, katodora doa. Fluxu horiek dakartzaten bi korronteak, anodotik, katodora doaz: korronte garbi bat dugu, kanpoko tentsioak agintzen duen noranzkoan.

Injektatzen diren eramaileak [elektroiak (n→p) eta hutsuneak (p→n)] oso ugari dira injekzioaren jatorrizko eskualdean eta, beraz, korrontea handia izan daiteke. Hustutako aldea zeharkatu ondoren, urrien diren eskualdera heltzen dira, eta beren kontzentrazioa hazi egiten da. Hortik aurrera, urrien diren eskualdean daudenez, barreiapenez jarraituko dute beren bidea (bolumenean edo kontaktuan birkonbinatu arte).

Alderantzizko polarizazioa:

Hustutako eskualdean $\phi_T - V = \phi_T + |V|$ potentziala dugunez, langa, orekakoa (ϕ_T) baino altuagoa da. Beraz, eremu handiagoa ekarriko du eta atoiko korronteak barreiapeneko korrontea gainditzen du. Atoiko bi korronteak eremuaren noranzko berean doaz eta, beraz, potentzialaren langaren kontra. Hau da, n eskualdetik p eskualdera, katodotik anodora. Korronte garbi bat dugu, eta kanpoko tentsioak agintzen duen noranzkoan.

Injektatzen diren eramaileak [h^+ ($n \rightarrow p$) eta e^- ($p \rightarrow n$)] injekzioaren jatorrizko eskualdean oso urri direnez, korrontea txikia izango da beti. Hustutako aldea zeharkatu ondoren, ugarien diren eskualde batera heltzen dira, eta haien mugimendua atoiz edo barreiapenez gerta daiteke.



7.4 Irudia. *Diodoaren ikurra eta ezaugarria*

Beraz, aplikatutako tentsioa anodoan katodoan baino handiagoa bada, korrontea errazten da. Alderantzizko polarizazioan, aldiz, oso korronte txikia pasatuko da. Ondo dagokio, beraz, inbutu baten antzeko ikurra izatea.

Demagun badugula korronte alterno bat. Anodotik katodora doanean, diodoak pasatzen uzten dio. Alderantziz joaten saiatzen denean, berriz, eragozten dio. Geroago ikusiko dugunez, korronte alternoa zuzen bihurtzen du; artezten du, nolabait. Hortik etorriko zaio aplikazio ezagunenetako bat: zirkuitu zuzentzaile edo artezgailuena (aplikazio horietan erabiltzen diren diodoei "artezle" edo "zuzentzaile" deitzen zaie).

7.3.2 ANALISI KUANTITATIBOA

I-V kurbak zehatz-mehatz kalkulatzeko, eskualde bakoitzeko egoera ekuazioak ebatzi beharko ditugu: eramaileen jarraitutasunaren, korronteen garraioaren eta Poissonen ekuazioak, hain zuzen ere.

Lana errazteko asmoz, hainbat hipotesi onartuko dira. Lortuko ditugun emaitzen eta diodo errealen portaeraren arteko parekotasunak garapena bermatuko du.

Abiatu aurretiko hipotesiak:

- P eta n eskualdeak uniformeki dopatuta daude: $N_A = K_1$; $N_D = K_2$
- Hustutako eskualdea erabat hustuta dagoenez, bertan ez dago (ia) sorrerarik ezta birkonbinaketarik ere: alde batetik bestera doazen eramaileek aukera gutxi dute beste eramaile bat bertan topatzeko eta birkonbinatzeko. Beraz, eramaileen korronteak konstanteak dira hustutako eskualde osoan zehar.
- Eskualde neutroetan, injekzio baxuan gaude (beraz m` << M_0, M ~ M_0).
- Eskualde neutroetan urrien gutxi dagoenez eta eskualde horietakoeremua hutsaren hurrengoa denez, ez dugu aintzat hartuko beren atoiko fluxua (urrienenetarako barreiapena bakarrik hartuko dugu kontuan).
- Egoera estatikoan gaude, eta kanpoko sorrerarik gabe.

Bi eskualde horiek bakoitza bere aldetik aztertuko ditugunez, garapenean, bi *x ardatz* erabiliko ditugu. Aztertu behar dugun eskualdearen eta hustutako eskualdearen arteko mugan jarriko dugu bakoitzaren jatorria eta, ondorioz,kontaktuetarantz zabalduko da.

ANODOA, P ESKUALDEA:

Abiapuntua urrienen jarraitutasunaren ekuazioa da:

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = G_n - U_n - \frac{\partial F_n(x,t)}{\partial x}$$

Baina, egoera geldikorrean gaudenez,

n(x,t) = n(x) → dn(x.t)/dt = 0; $F_n(x,t) = F_n(x)$.

Eta, kanpoko sorrerarik ez dagoenez, $G_n = 0$.

$$0 = 0 - U_n - \frac{\partial F_n(x)}{\partial x}$$

Hipotesien ondorioz, $J_n(x) = J_{dn}(x) = -qF_{dn}(x) = -q\,(-D_n)dn_p(x)/dx = qD_n dn_p(x)/dx$

Eta, dakigunez, $U_n = n'_p(x)/\tau_n$

$$0 = -\frac{n'_p(x)}{\tau_n} - \frac{\partial\left[-D_n \frac{\partial n_p(x)}{\partial x}\right]}{\partial x} \Rightarrow \frac{n'_p(x)}{\tau_n} = D_n \cdot \frac{\partial^2 n_p(x)}{\partial x^2} = D_n \cdot \frac{\partial^2 n'_p(x)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 n'_p(x)}{\partial x^2} - \frac{n'_p(x)}{D_n \cdot \tau_n} = 0$$

[p azpi-indizea sartzen dugu eskualdea anodoa dela gogoratzeko]

$L_n^2 = D_n \cdot \tau_n$ erabiliz, honako hau da horren soluzioa:

$$n'_p(x) = A \cdot e^{x/L_n} + B \cdot e^{-x/L_n} = C \cdot Sh(x/L_n) + D \cdot Ch(x/L_n)$$

Bi mugalde-baldintza ditugu:

- Hustutako eskualdeko ertzean (x = 0 puntuan), jakintzat joko dugu soberakina; hau da, $n'_p(0)$ jakineko datua izango da.
- Anodoaren kontaktuan, ohmikoa denez, gainazaleko birkonbinaketa abiadura itzela da eta, beraz, eramaileen soberakina zero da. Anodoaren zabalera W_a bada, $n'_p(W_a) = 0$.

$$n'_p(0) = A + B = C \cdot Sh\left[0/L_n\right] + D \cdot Ch\left[0/L_n\right] = n'_p(0) = D \qquad \text{(datua)}$$

$$n'_p(W_a) = A \cdot e^{W_a/L_n} + B \cdot e^{-W_a/L_n} = C \cdot Sh\left[W_a/L_n\right] + D \cdot Ch\left[W_a/L_n\right] = 0$$

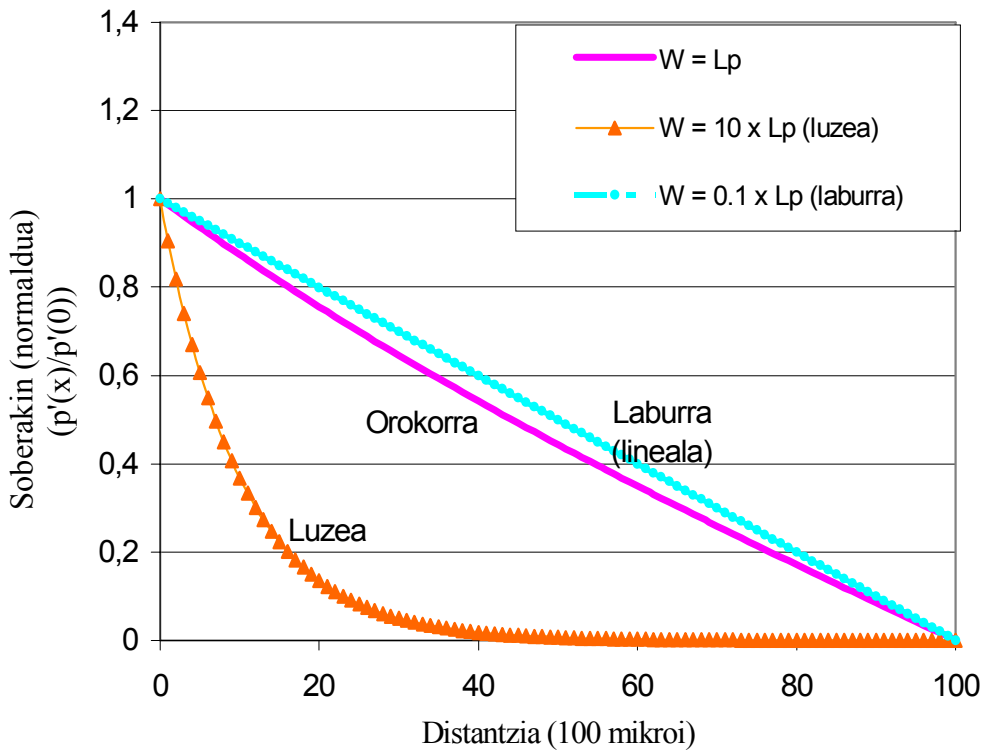
$$A = -B \cdot e^{-2W_a/L_n}$$

$$B\left(1 - e^{-2W_a/L_n}\right) = n'_p(0) \Rightarrow B = \frac{n'_p(0)}{1 - e^{-2W_a/L_n}} = \frac{n'_p(0) \cdot e^{W_a/L_n}}{e^{W_a/L_n} - e^{-W_a/L_n}} = \frac{n'_p(0) \cdot e^{W_a/L_n}}{2 \cdot Sh(W_a/L_n)}$$

$$A = -\frac{n'_p(0) \cdot e^{-W_a/L_n}}{2 \cdot Sh(W_a/L_n)}; C = -D \cdot \frac{1}{Th\left[W_a/L_n\right]}$$

$$n'_p(x) = \frac{n'_p(0)}{2 \cdot Sh(W_a / L_n)} \left[-e^{(x-W_a)/L_n} + e^{-(x-W_a)/L_n} \right] = n'_p(0) \cdot \frac{-2 \cdot Sh\left[(x-W_a)/L_n \right]}{2 \cdot Sh\left[W_a / L_n \right]}$$

$$n'_p(x) = -n'_p(0) \cdot \frac{Sh\left[(x-W_a)/L_n \right]}{Sh\left[W_a / L_n \right]} = -n'_p(0) \cdot \frac{\exp\left(\frac{x-W_a}{L_n} \right) - \exp\left(\frac{x-W_a}{L_n} \right)}{\exp\left(\frac{x-W_a}{L_n} \right) + \exp\left(\frac{x-W_a}{L_n} \right)}$$



7.5 Irudia. *Urrienen soberakinaren profilaren forma hiru kasutan*

Beste eskualdean arrazoiketa bera eginez:

$$p'_n(x) = -p'_n(0) \cdot Sh\left[(x-W_c)/L_p \right] \Big/ Sh\left[W_c / L_p \right]$$

Eta barreiapeneko korronteak:

$$J_{dif_n_peskualdea} = -q \cdot D_n \cdot (-\frac{\partial n'_p(x)}{\partial x}) = -\frac{qD_n n'_p(0)}{L_n \cdot Sh\left[W_a / L_n\right]} Ch\left[(x - W_a) / L_n\right]$$

$$J_{dif_p_neskualdea} = q \cdot D_p \cdot (-\frac{\partial p'_n(x)}{\partial x}) = \frac{qD_p p'_n(0)}{L_p \cdot Sh\left[W_c / L_p\right]} Ch\left[(x - W_c) / L_p\right]$$

$J_{osoa} = J_n + J_p$

Korronte osoa konstantea izango da egitura osoan zehar (Kirchoff), baina haren osagaiak aldatuz joango dira. Korronte horren adierazpena honako hau izango da:

- p eskualdea: $J_T = J_n(x) + J_p(x) = J_{dn}(x) + [J_{dp}(x) + J_{ap}(x)]$
- n eskualdea: $J_T = J_n(x) + J_p(x) = [J_{dn}(x) + J_{an}(x)] + J_{dp}(x)$
- hustutako eskualdean, $J_T = J_n(x) + J_p(x) = J_n(0) + J_p(0)$, konstante mantentzen direlako; komeni zaigun (dakigun) puntuan kalkulatzen ditugu: bakarrik difusioko osagaia duten lekuan. Kontuz, ordea zeinuekin. J(x) positiboa denean, x positiboetarantz doa. Bi ardatz hartu ditugunez, bakarrera pasatzerakoan, eskualde bateko korronteen zeinuak aldatu beharko ditugu. Anodotik katodorantz doan korrontea positibotzat hartzen badugu, zeinua aldatu beharko diegu anodoko korronteei.
- polarizazio zuzenean bagaude, bi eramaileen korronteak positiboak direla egizta dezakegu, lehenago modu kualitatiboan azaldu dugunez;

  $J_T = -J_n(\text{p esk } 0) + J_p(\text{n esk } 0)$, edo:

  $J_T = -J_{dif_n_peskualdean}(\text{anodoko } 0) + J_{dif_p_neskualdean}(\text{katodoko } 0)$.

$$J_T = J_{d_n_pesk}(0) + J_{d_p_nesk}(0)$$

$$J_T = -\frac{qD_n n'_p(0)}{L_n \cdot Sh\left[W_a / L_n\right]} Ch\left[(-W_a)/L_n\right] - \frac{qD_p p'_n(0)}{L_p \cdot Sh\left[W_c / L_p\right]} Ch\left[(-W_c)/L_p\right]$$

$$J_T = \frac{qD_n n'_p(0)}{L_n \cdot Th\left[W_a / L_n\right]} + \frac{qD_p p'_n(0)}{L_p \cdot Th\left[W_c / L_n\right]}$$

JUNTURAKO URRIENEN SOBERAKINA:

Oreka termodinamikoan ebatzitako ekuazioa,

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

zenbait kasutan, orekatik kanpo ere erabil daiteke (ez dugu hori frogatzerik, energi mailen teoria jakin beharko genuke eta).

x_1 eta x_2 junturako n eta p eskualdeetako ertzak badira

$n(x_1) = n_n(0) = N_D$; eta $n(x_2) = n_p(0)$; Gogoratuz $\varphi(x_1) - \varphi(x_2) = \phi_T - V$

$$\frac{kT}{q} \cdot Ln\left[\frac{N_D}{n_p(0)}\right] = \phi_T - V$$

$$\frac{kT}{q} \cdot Ln\left[\frac{N_D}{n_i^2 / N_A}\right] = \phi_T - 0 \quad \text{(orekan)}$$

$$\frac{kT}{q} \cdot Ln\left[\frac{N_D}{n_i^2 / N_A}\right] - \frac{kT}{q} \cdot Ln\left[\frac{N_D}{n_p(0)}\right] = \phi_T - (\phi_T - V) = V$$

$$V = \frac{kT}{q} \cdot Ln\left[\frac{n_p(0)}{n_i^2 / N_A}\right] \Rightarrow n_p(0) = n_i^2 / N_A \cdot e^{V/V_T}$$

$$n'_p(0) = n_i^2 / N_A \cdot \left[e^{V/V_T} - 1\right] \text{ zeren eta } n'_p = n_p - n_p(orekan) = n_p - \frac{n_i^2}{N_A}$$

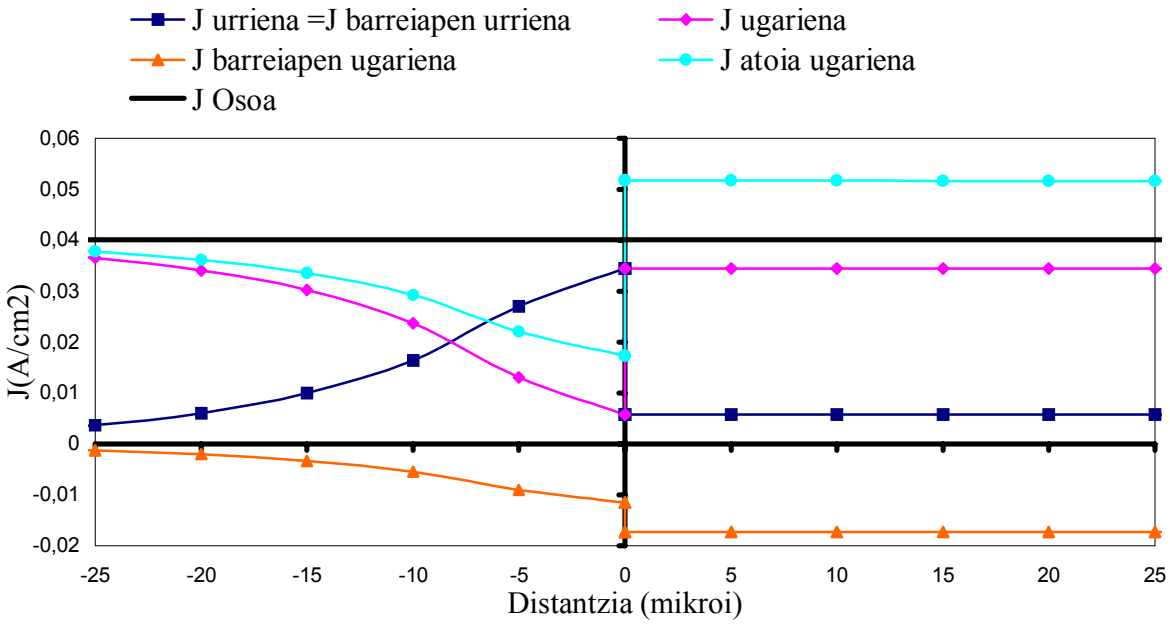
Era berean, katodoan,

$$p'_n(0) = p_n(orekan)\cdot\left[e^{V/V_T} - 1\right] = n_i^2 / N_D \cdot \left[e^{V/V_T} - 1\right]$$

Korrontea, beraz:

$$J_T = \frac{qD_n \frac{n_i^2}{N_A}(e^{V/V_T} - 1)}{L_n \cdot Th\left[W_a / L_n\right]} + \frac{qD_p \frac{n_i^2}{N_D}(e^{V/V_T} - 1)}{L_p \cdot Th\left[W_c / L_n\right]}$$

$$J_T = qn_i^2 \left[\frac{D_n}{L_n \cdot Th\left[W_a / L_n\right] N_A} + \frac{D_p}{L_p \cdot Th\left[W_c / L_p\right] N_D}\right] \cdot (e^{V/V_T} - 1)$$



7.6 Irudia. *Korronte-dentsitateen forma kasu jakin batean (Hustutako eskualdearen zabalera ez da aintzat hartu eta —argitasuna helburu— bakarrik adierazi dira -25 eta 25 mikroien arteko korronte-dentsitateak). Adibidearen datuak:* $D_p = 10$, $D_n = 30$, $n_i^2 = 10^{20}$, $q = 1.6\cdot10^{-19}$, $N_D = 10^{16}$, $N_A = 5\cdot10^{16}$, L_p *(katodo)* $= 1000\mu m$,

L_n *(anodo)* $= 10\ \mu m$, *Hortik,* $J_{sat} = 11.2\ pA/cm^2$, $J\ (550mV) = 40.2\ mA/cm^2$

Prozeduraren urratsak:

1. Profilak
2. Barreiapeneko fluxuak → Urrienen fluxu eta korronte osoak
3. Korronte osoa (hustutako eskualdean, ertzetako *urrienen* korronteak erabiliz)
4. Nahi izanez gero, ugarienen atoiko osagaia (eta eremua) kenketaren bidez

7.3.3 SHOCLKEYREN EKUAZIOA

Ikusten denez, aplikaturiko tentsioa bakarrik esponentzialean agertzen da eta, beraz, diodoaren I-V ezaugarria oso era trinkoan adieraz dezakegu honako formula honetaz:

$$J_T = J_{sat} \cdot (e^{V/V_T} - 1)$$

Horixe da, hain zuzen ere, Shockleyren ekuazioa, non materialaren eta geometriaren eragin osoa J_{sat} asetasuneko korrontean biltzen baita:

$$J_{sat} = J_{satpesk} + J_{satnesk} = \frac{qn_i^2 D_n}{L_n \cdot Th\left[W_a / L_n\right] N_A} + \frac{qn_i^2 D_p}{L_p \cdot Th\left[W_c / L_p\right] N_D} = J_{satpesk} + J_{satnesk}$$

(gogoratu: kontaktuak ohmikoak direnean bakarrik)

Zer esaten digu Shockleyren ekuazioak?

- Polarizazio zuzenean, eta $V > V_T = 25.9$ mV denean, korrontea esponentzialki hazten da (anodotik katodora doa, lehen esan bezala). Esan dezakegu ia edozein korronteri uzten diola pasatzen (tentsio txikia aplikatuz gero).
- Alderantzizko polarizazioan, eta $V<-V_T$ bada, korrontea ia konstante mantentzen da eta haren balioa $-J_{sat}$ da (oso konstante txikia da).

Beraz, ikusten dugu artezgailu gisa funtzionatzen duela, eta korrontearen noranzkoa anodotik katodorantz behartzen duela.

Diodo horretatik pasatzen den korrontea taula gisa adierazita:

$I_{sat} = 11.2pA/cm^2 \cdot 1cm^2$; $\phi_T = 731$ mV

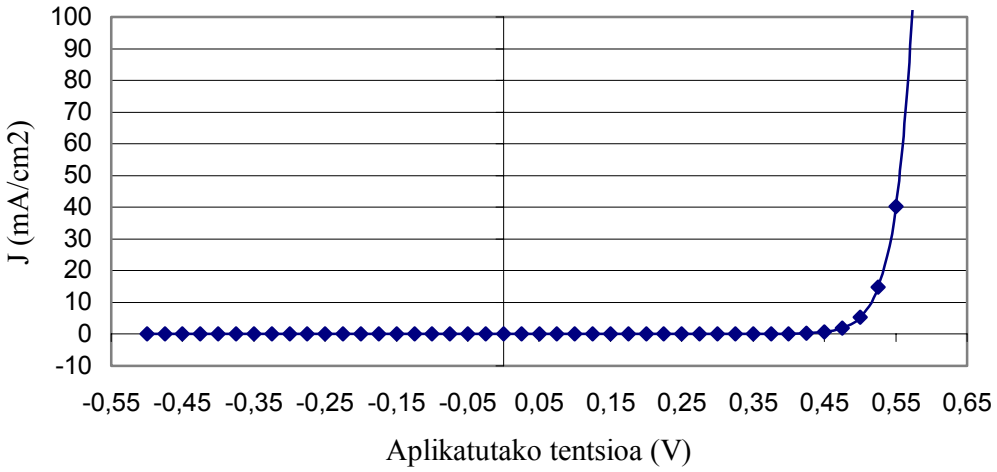
V_D(V)	0	-0.05	-0.1	-0.5	-1	-5	-10	-50	-100
I_D	0	-9.7pA	-11pA	-11.2pA	-11.2pA	-11.2pA	-11.2pA	-11.2pA	-11.2pA

V_D(V)	0	0.05	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
I_D	0	71pA	33.3nA	1.8µA	99.6µA	5.4mA	0.3A	16A	884A

V = 0.8V-eko tentsioarentzat taulan adierazi dena ez da baliagarria, zeren eta hain korronte altuarekin eskualde neutroetan eta kontaktuetan erortzen den tentsioa ez baita arbuiagarria. Horrek azaltzen du $\phi = \phi_T - V_{Juntura}$ negatiboa ez izatea,

$V_{Juntura} = V_{osoa} - V_{esk\ neutro,\ kontaktu} = V_{osoa} - I \cdot R_{esk\ neutro,\ kontaktu} < V_{osoa}$ da-eta.

Ekuazioaren adierazpen grafikoa, diodoaren ezaugarri-kurba izango da:

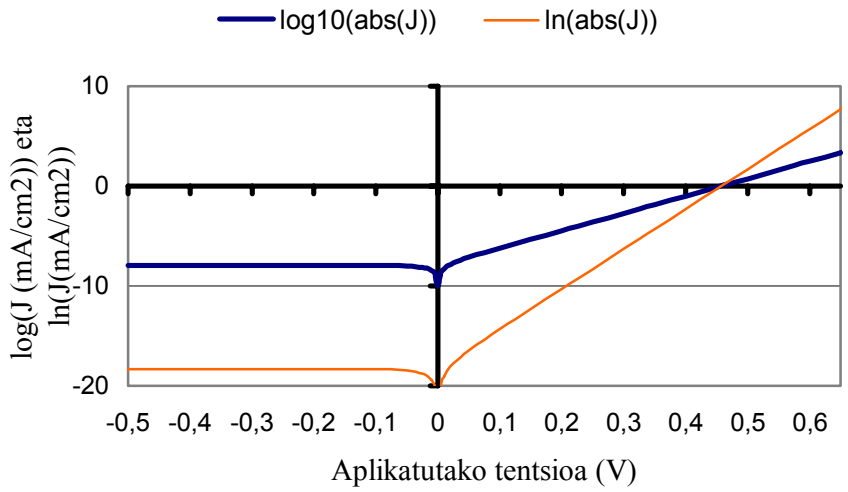


7.7 ***Irudia.*** *Diodoaren ezaugarri-kurba (J_{sat} = 11.2 pA/cm^2)*

Askotan, korrontearen menpekotasun esponentziala dela-eta, esanguratsuagoa izaten da kurba erdilogaritmikoetan.

Izan ere, V >> 25 mV bada, $Ln(I/I_{sat}) \sim V/V_T$

$\rightarrow Ln(I) \sim V/V_T + Ln(I_{sat}) \rightarrow$ malda = $1/V_T$



7.8 Irudia. *Aurreko diodoaren ezaugarri-kurba erdilogaritmikoetan*

7.3.4 ASETASUNEKO KORRONTEAREN ESANAHIA

Asetasuneko korrontea, alderantzizko polarizazio indartsuetan agertzen den korrontea da.

$$J_{sat_esk1} = qm_{esk1_orekan} D_m \frac{1}{L_m Th(W_{esk1}/L_m)} \cdot \frac{\tau_m}{\tau_m} = q \frac{m_{orekan}}{\tau_m} \frac{L_m}{Th(W_{esk1}/L_m)}$$

J_{sat} = q·sorrera/birkonbinaketa termikoa orekan x luzera eraginkorra

Polarizazio inbertsoak eramaileak urrien diren eskualdetik ateratzen ditu, junturako bestaldera pasatzeko. Beraz, abiapuntuan ez dago eramaile askorik, sorrera termikoak ekoizten dituenak bakarrik (sorrera termikoak oreka edo orekatik kanpo kopuru bera ekoizten du: N_A ezpurutasun-kontzentrazioa badugu, $n_i^2/N_A/\tau$).

$I_{sat} = AJ_{sat}$= q x sorrera termikoa x (A x luzera eraginkorra)

Sortzen diren urrien guztietatik ($qm_{orekan}/\tau AW$), biltzen den kopurua pasatzen da bestaldera [$qm_{orekan}/\tau AW$] ·[L/W/Th(W/L)].

7.3.5 KASU BEREZIAK

DIODO ASIMETRIKOAK:

Demagun $N_A >> N_D$ dela.

$$J_{sat} = \frac{qn_i^2 D_n}{L_n \cdot Th\left[W_a / L_n\right] N_A} + \frac{qn_i^2 D_p}{L_p \cdot Th\left[W_c / L_p\right] N_D} \approx \frac{qn_i^2 D_p}{L_p \cdot Th\left[W_c / L_p\right] N_D}$$

Beraz, **dopaketak oso ezberdinak direnean**, diodoaren portaera, dopaketa txikiagoa duen eskualdeak menperatzen du (gogoratu: azken formula hori erabiltzeko, kontaktuek ohmikoak izan behar dute).

OSO LUZEAK DIREN ESKUALDEEN ASETASUNEKO KORRONTEA:

Demagun, $W_A >> L_n$; hau da, anodoa luzea dela.

$$J_{satanodoa} = \frac{qn_i^2 D_n}{L_n \cdot Th\left[W_a / L_n\right] N_A} \approx \left\langle \frac{W_a}{L_n} >> 1; Th\left[W_a / L_n\right] \to 1 \right\rangle \approx \frac{qn_i^2 D_n}{L_n N_A}$$

$$J_{satanodoa} \approx \frac{qn_i^2 D_n}{L_n N_A}$$

Beraz, luzera fisikoak baino, barreiapeneko luzerak agintzen du.

(eta kasu horretan, nahiz eta jatorrian bakarrik kontaktu ohmikoekin ebatzi, horiek infinituan daudenez, kontaktu mota guztietarako balio du)

OSO LABURRAK DIREN ESKUALDEEN ASETASUNEKO KORRONTEA:

Demagun, $W_A << L_n$; hau da, anodoa laburra dela.

$$J_{satanodoa} = \frac{qn_i^2 D_n}{L_n \cdot Th\left[W_a / L_n\right] N_A} \approx \left\langle \frac{W_a}{L_n} \to 0; Th\left(\frac{W_a}{L_n}\right) \to \frac{W_a}{L_n} \right\rangle \approx \frac{qn_i^2 D_n}{L_n \frac{W_a}{L_n} N_A}$$

$$J_{satanodoa} \approx \frac{qn_i^2 D_n}{W_a N_A}$$

Kasu horretan, difusio luzerak ez du eraginik: luzera fisikoak agintzen du.

(kontaktuak ohmikoak direnean aplika daiteke bakarrik azken(goiko???) formula)

Azken kasu hori ebazteko, badago beste bide azkarrago bat: anodoa oso laburra baldin bada, ez da ia birkonbinaketarik gertatuko (τ_n infinitutzat jo daiteke)

$$\frac{\partial^2 n'_p(x)}{\partial x^2} - \frac{n'_p(x)}{D_n \cdot \tau_n} = 0 \Rightarrow (\mathrm{U_n} = 0 \text{ hurbilketaz}) \Rightarrow \frac{\partial^2 n'_p(x)}{\partial x^2} \approx 0$$

$$n'_p(x) = Ax + B$$

$$n'_p(0) = B = n'_p(0) \qquad \text{(junturako soberakina dakigu)}$$

$$n'_p(W_a) = AW_a + B = 0 \qquad \text{(kontaktuan ez dago soberakinik)}$$

$$A = -B / W_a$$

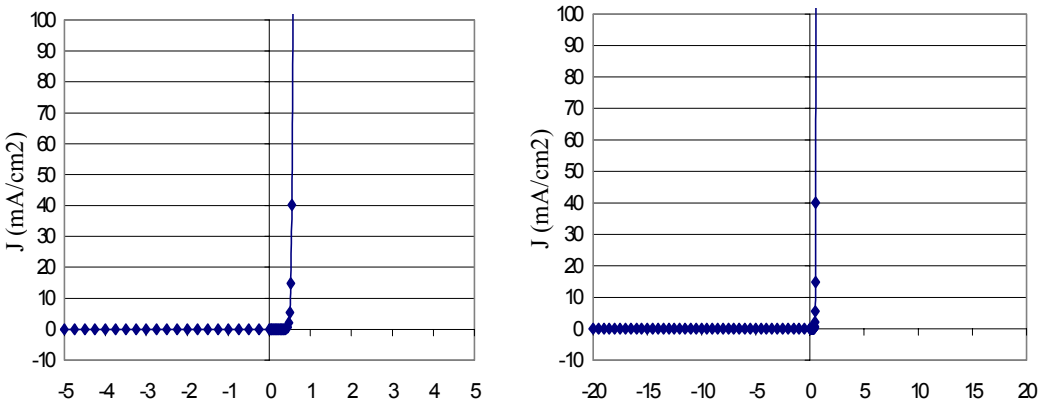
$$n'_p(x) = -B / W_a \cdot x + B = B \cdot (1 - \frac{x}{W_a}) = n'_p(0) \cdot (1 - \frac{x}{W_a})$$

$$J_{anodoa} = -J_{d_n_anodoan}(0) = -\left[-qD_n \cdot (-\frac{dn'_p(x)}{dx}) \right]_{x=0} = -qD_n \frac{n'_p(0)}{-W_a}$$

$$J_{anodoa} = qD_n \frac{n_i^2 / N_A \cdot \left(e^{\frac{V}{VT}} - 1 \right)}{W_a} = \frac{qD_n n_i^2}{W_a N_A} \cdot \left(e^{\frac{V}{VT}} - 1 \right) \Rightarrow J_{sat_anodo_laburra} = \frac{qD_n n_i^2}{W_a N_A}$$

7.4 Seinale handiko ereduak: zirkuitu-eredu ideala eta beste hurbilketa batzuk

Shockleyren ekuazioaren adierazpen grafikoan eskala/tentsio handiagoetan lan eginez, 7.9 Irudiko kurbak lortzen ditugu.



7.9 Irudia. *Diodoaren ezaugarria tentsio handien ikuspuntutik*

Beraz, lehenengo hurbilketan tentsio txikiak aintzat ez hartzeko modukoak iruditzen bazaizkigu (tentsio handiekin lan egiten badugu), bitan bana dezakegu diodoaren portaera zirkuituaren ikuspuntutik idealizatuz:

1. Diodoa zuzenean dagoenean, $v_D = 0$ eta i_D korronteak edozein balio positibo har dezake → diodoaren erresistentzia hutsa da eta zirkuitulabur baten papera betetzen du. Alegia, ON egoeran dagoen etengailuarena egiten du.

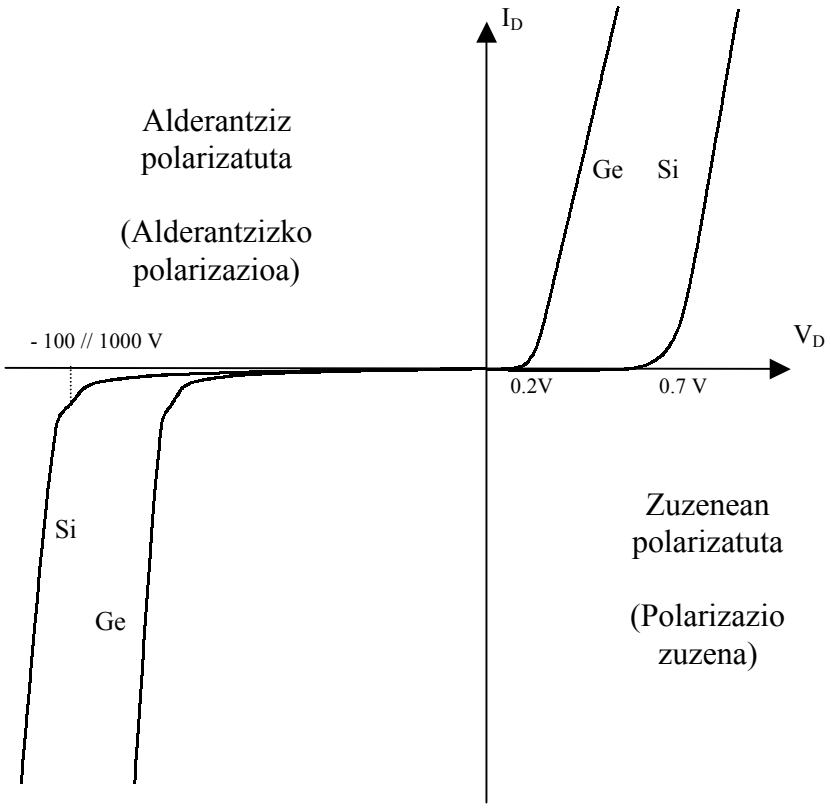
$$0 < I_D < \infty \text{ , } V_D \sim +0 \text{ V (positiboa)}$$

2. Alderantzizko polarizazioan, berriz, $i_D = 0$ eta v_D tentsioak edozein balio negatibo har dezake → kasu horretan, haren zirkuitu baliokidea erresistentzia infinitu bat edo zirkuitu ireki bat da. OFF egoeran dagoen etengailua.

$$I_D \sim 0 \text{ (negatiboa), } -\infty < V_D < 0$$

Horixe izango da diodo idealaren eredua (edo diodoaren eredu ideala). Beraz, dispositibo binarioa da, bi egoera posible besterik ez dituelako: ON/OFF.

7.10 Irudia. *Diodoaren eredurik sinpleena: ON (zuzenean) OFF (ezkerrean)*

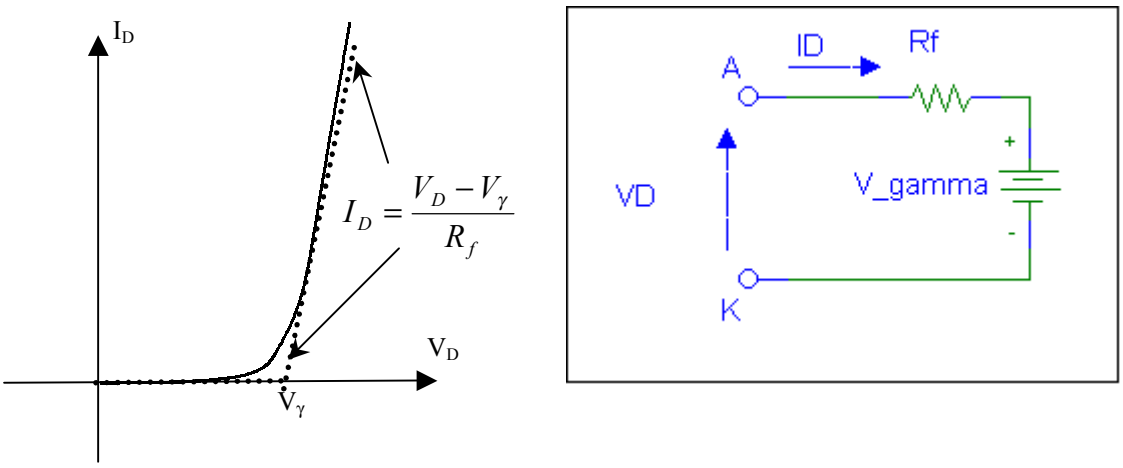


7.11 Irudia. *Diodoen ezaugarri erreala*

Errealitatean, berriz, korronte nabaria lortzeko, V_γ tentsioa aplikatu behar da gutxienez. Tentsio horretatik aurrera, korrontea azkar hazten da, baina hazkundearen malda ez da infinitua (nahiz eta oso handia izan).

V_γ tentsioak ukondoko, atariko edo eroapenean jartzeko tentsioa du izena. Siliziozko diodoetan, V_γ = 0.5-0.7 volt izaten da; germaniozkoetan, berriz, 0.2 volt ingurukoa.

$V < V_\gamma$ baldin bada diodoa OFF-ean dagoela esango dugu: praktikoki alderantzizko polarizaziopean dagoela esan daiteke nahiz eta, $V_\gamma > V > 0$ tartean, zehatzak izan nahi badugu, zuzenean egon.

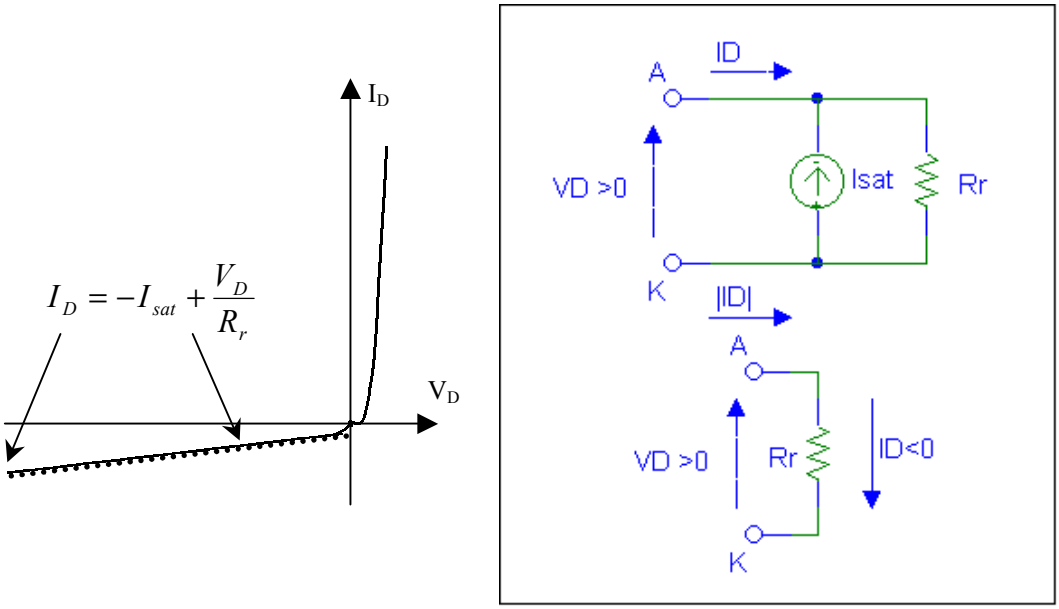


7.12 Irudia. *Diodoaren eredu linealdua polarizazio zuzenean*

Diodoaren ezaugarri-kurba erreala, bi zuzenez hurbil dezakegu (7.12 Irudia). Bi zuzen horiek, V_γ balioko tentsio-sorgailua eta R_f erresistentzia dituen zirkuituaren ezaugarria da, hain zuzen ere. Siliziozko diodoen kasuan, $5\Omega < R_f < 50\Omega$. Honek diodoari aplikatutako tentsioa V_γ baino handiagoa den kasuan bakarrik balio digu.

ON egoeran— eroapeneko egoeran—, "V_γ tentsio-sorgailua + R_f" zirkuituaz adieraz dezakegu diodo erreala.

[Oharra: R_f ez da, zehazki, diodoaren serieko erresistentzia (eskualde neutroen eta kontaktuen erresistentzia), diodoaren ezaugarri esponentziala bi zuzenez berreraikitzeko erabili den erresistentzia baizik; diodoaren erresistentzia fisikoa seriean legoke eta txikiagoa litzateke].



7.13 Irudia. *Diodoaren eredu linealdua polarizazio inbertsoan*

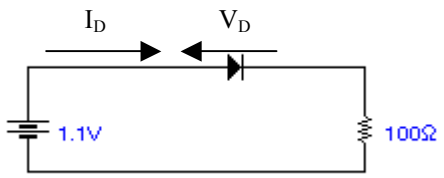
OFF egoeraren, zuzen baten bidez hurbil dezakegu etenaldiaren ezaugarria (7.13 Irudia). Zuzena jatorritik pasatzen da eta haren malda $1/R_r$ da, R_r erresistentziaren ezaugarriarekin bat datorrela. Horregatik, OFF egoeran, R_r erresistentziaz ordezka dezakegu diodoa. R_r nahiko handia denez (ehunka ohmekoa), infinitutzat hartzen dugu askotan eta OFF egoera zirkuitu ireki batez adierazten dugu. Zehaztasun handiagoa behar izanez gero, I_s sorgailua gehi dezakegu, asetasuneko korrontea adierazteko.

[Oharra: R_r erresistentziaren benetako esanahia ez da asetasuneko korrontearena – horren adierazlea sorgailua litzateke- ihes korronte batena baizik.]

Eredu horeik seinale handiekin lan egiterakoan bakarrik balioko digute (hau da, $V > V_\gamma$ denean); esaterako, artezgailuetan. Aplikatutako tentsioak txikiak direnean (mV gutxi batzuetakoak), Shockleyren ekuazio osoa erabili behar dugu.

7.5 Zirkuituen ebazpen grafikoa: karga-zuzena (estatikoan)

7.5.1 ZIRKUITUAK EBAZTEA EREDU OSOAK ERABILIZ



7.14 Irudia. *Diodo, erresistentzia eta bateria bana dituen zirkuitu sinplea*

A) Analitikoki (I_{sat} erabiliz)

$1.1\ V = I \cdot 100 + V_D$; **(zirkuituak ematen digun ekuazioa)**

Ekuazio hori zuzen bati dagokio eta berdin berdina da diodoaren ordez beste osagai orokor edo karga bat sartuta. Hori dela-eta, **karga-zuzen** deitzen diogu.

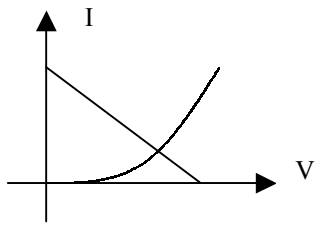
$I = I_{sat} \cdot [\exp(V_D/25.9\ mV)-1]$ **(diodoak ematen digun ekuazioa)**

Eta ekuazio-sistema ebatzi besterik ez dugu egin behar.

Ekuazio-sistema ez-lineala denez, iteratzea edo beste baliabide matematikoren bat erabiliko dugu.

B) Grafikoki (karga-zuzena eta diodoaren ezaugarria marraztuz)

Ekuazio-sistema grafikoki adierazita:



7.15 Irudia. *Polarizazioaren ebazpen grafikoa*

Soluzioa bidegurutzea izango da.

7.5.2 ZIRKUITUAK EBAZTEA EREDU LINEALAK ERABILIZ

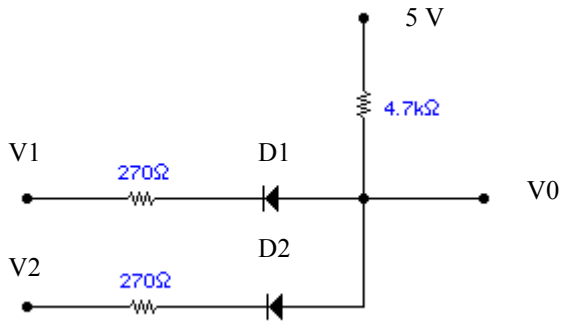
Aurreko prozedura erabiltzeak soluzio zehatzera garamatza, baina, bi diodo edo gehiago badaude, problema matematikoa zailtzen da eta nahiko emaitza hurbila lor daiteke eredu sinpleagoa erabiliz.

Seinale handiko ereduaren ezaugarriak (V_γ, R_f, I_s, R_r) jakinda, honako hau litzateke hainbat diodo dituen zirkuitua ebazteko bide bat:

- Diodo bakoitzerako, egoera igarri edo —hobeto— egoera posible guztiak planteatu (ON/OFF).
- Konbinaketa bakoitzerako (n diodo badaude, 2^n konbinatze egongo dira), diodoak beren zirkuitu baliokideez ordezkatu.
- Kasu bakoitzean geratzen den sarea ebatzi (Kirchoffen legeak erabiliz).
- Aurreko hipotesiak betetzen ote diren egiaztatu. Hau da, diodo baten egoera ON zela esan eta korrontea kontrako noranzkoan badoa, konbinatze hori ez dugu ontzat emango.

Konbinatze bakoitzak (sarrerako seinalearen) balio tarte batean balioko digu eta tarteka eman beharko dugu soluzioa, azkenean, sarrerako aukera guztiak kontuan hartuko ditugu eta soluzioaren jarraitutasuna egiaztatuko dugu.

ADIBIDEZ:



7.16 Irudia. *Bi diodo dituen zirkuitua*

Datuak: $V_\gamma = 0.6$ V, $R_f = 30\ \Omega$; $I_s = 0$; $R_r = \infty\ \Omega$.

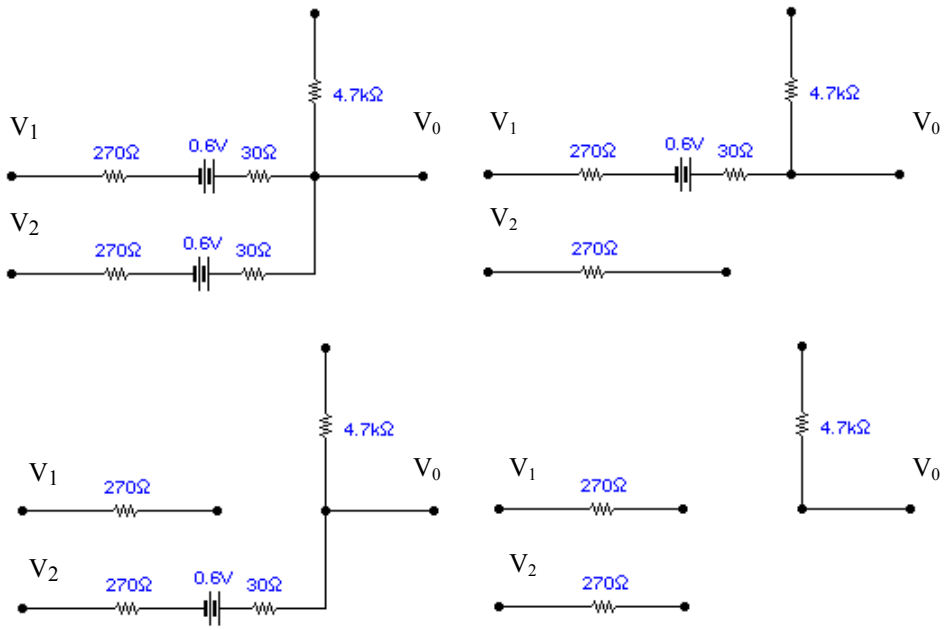
Kalkulatu v_o:

a) $v_1 = v_2 = 5$ V direnean.

b) $v_1 = 5$ V; $v_2 = 0$ V direnean.

c) $v_1 = v_2 = 0$ V direnean.

Lau aukera ditugu egoera bakoitzean:



7.17 Irudia. *Polarizazio bakoitzaren lau aukerak*

a) Lehenengo kasuan ($v_1 = v_2 = 5$ V), bakarrik laugarren konbinatzeak balio digu (zuzenean jo ditugun diodoetan, korrontea kontrako noranzkoan –katodotik anodorantz- joango litzatekeelako). Beraz, korronteak zero dira eta $V_0 = 5$V.

b) Bigarren kasuan, D_1 etenik dago eta D_2, ON egoeran (3. konbinaketa), $V_0 = 0.86$ V dela eta diodotik pasatzen den korrontea +0.88 mA dela. $V_{D1} = -5 + 0.86 = -4.14 < 0{,}6$. [Egoera bat ontzat emateak beste guztiak gaitzestea dakar, baina komeni da kasu bakoitza aztertzea eta haren ezinezkotasuna frogatzea]

c) Azken kasuan , bi diodoek eroaten dute (beraz, lehen konbinatzea da balekoa), Irteerako tentsioa 0.75 V da eta I = 0.9 mA. $V_{D1} = V_{D2} = 0.63 > 0.6$. Beste konbinatzeetan, OFF egoeran zegoela pentsatu dugun diodoan (edo bietan), $V_D > 0{,}6$V eta, beraz, ez dira zuzenak.

8. DIODO IDEALAREKIKO DESBIDERATZEAK

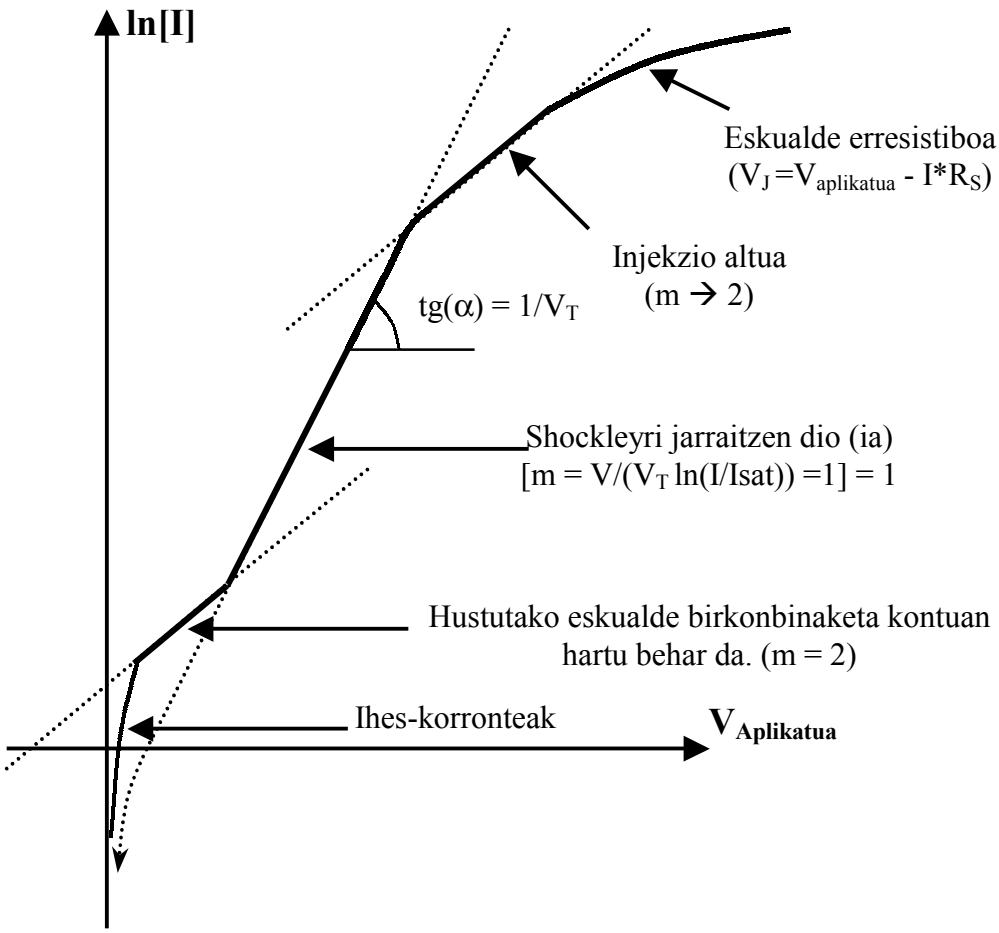
Diodorako ebatzi dugun ekuazioa, bat dator diodo errealen portaerarekin hurbilketa batzuk betetzen direnean —eta funtzionamendu puntu interesgarrienetan betetzen dira—. Baina, egin ditugun hipotesiak batzuetan betetzen ez direnez, ezaugarri-kurba aldatzen da.

8.1 Desbideratzeak polarizazio zuzenean

Zehatzak ez diren hipotesiak, honako hauek dira besteak beste:

- Hustutako eskualdean ez dago birkonbinaketarik
- Injekzio baxuan gaude
- Tentsio osoa hustutako eskualdean agertzen da

Atal honetan, hipotesi horiek ez betetzeak dakartzan eraginak (ikus 8.1 Irudia) analizatuko dira.

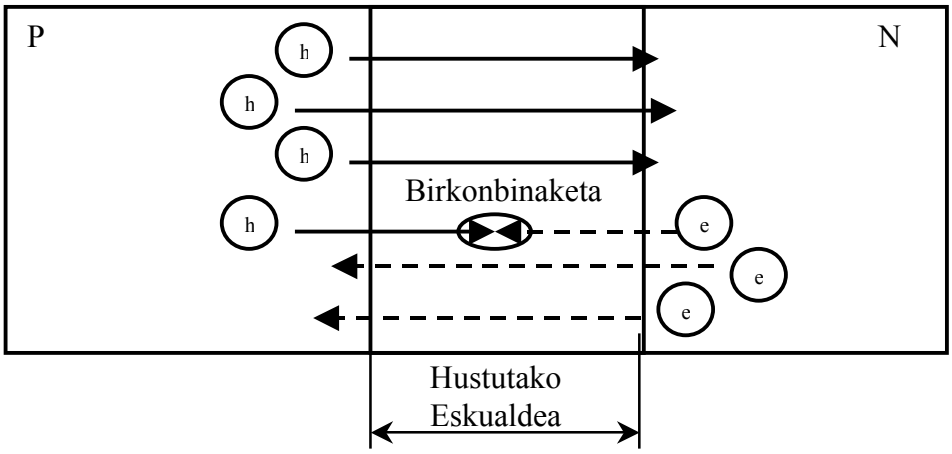


8.1 Irudia. *Korronte-tentsio ezaugarriaren desbideratzeak polarizazio zuzenean*

8.1.1 HUSTUTAKO ESKUALDEAN EZ DAGO BIRKONBINAKETARIK?

Hustutako eskualdean sorrera eta birkonbinaketa nulutzat jotzen dituen hipotesia ez da zehazki betetzen. Korronteak eskualde hori zeharkatzen duenean, bi motetako eramaileak gurutzatzen direnez, jada ez dago hain hutsik eta birkonbinaketa gerta daiteke.

Horrek dakarren *gehiegizko* korrontea, jatorrizko korrontearen noranzko berean doa. Izan ere, fluxu hori lehen aintzat hartu ez dugun arren, ez du difusioko korronteetan edo profiletan eraginik. Lehenago kontuan hartu ez dugun korrontearen osagai hori gehitu behar dugu, besterik ez.



8.2 Irudia. *Hustutako eskualdeko birkonbinaketa gehitzea: barreiapenaren kontuaz, 2 elektroi eta 3 hutsune bakarrik zenbatuko ditugu, baina 6 eramaile daude*

Maila honetan frogatzerik ez badugu ere:

$$J_{hustutako_eskualdea} = J_{sat_hustutako_aldea} \cdot \left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1 \right)$$

$$J_{sat_hustutako_aldea} = \frac{qn_i \cdot l_{hustutako_aldea}}{2\tau_{hustutako_aldea}}$$

eta, beraz, $J_T = J_{sat_hust_aldea} \cdot \left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1 \right) + J_{sat_esk_neutroak} \cdot \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$

Argi dagoenez, tentsio altuetan, bigarren batugaia handiagoa izango da. Tentsio baxuetan, aitzitik, normalean hustutako eskualdeko asetasuneko korrontea eskualde neutroetakoa baino handiagoa izaten denez, korrontea hustutako eskualdeko birkonbinaketak menperatzen du.

8.1.2 INJEKZIO BAXUAN GAUDE?

Injekzio baxuko kasua besterik ez dugu analizatu. Ez dugu frogatuko, baina, eskualde neutroetan eramaile- eta ezpurutasun-kontzentrazioak parekoak direnean (tentsioak altuak direnean), korronte nagusiaren (eskualde neutroen korrontearen) hazkundearen esponentziala moteltzen da.

Orduan, Shockley-ren ekuazioak kale egiten du eta korronte-dentsitatea beste formula honen bidez kalkula dezakegu:

$$J_{esk_neutroak_injekzioaltuan} = J_{sat_inj_altua} \cdot \left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1 \right)$$

non agertzen den J_{sat} berria oso handia baita.

Formula horrek ez du injekzio baxuan balio.

8.1.3 TENTSIO OSOA HUSTUTAKO ESKUALDEAN AGERTZEN DA?

Esan dugunez, eskualde neutroetan eramaile asko ditugunez (dopaketa altuaren ondorioz) eroankortasuna altua da eta, beraz, erresistibitatea txikia [$\rho \sim 1/(q\mu_M M)$]. Erresistentzia txikia denez, I x R = I x ρ x W / A ez dugu aintzat hartzen. Antzeko zerbait gertatzen da kontaktuekin. Hala ere, korronteak altuak direnean, erresistentzia txiki horrek ere tentsio nabaria dakar. Junturan benetan dugun tentsioa $V_{juntura}$ bada,

$I = I_{sat} \times [\exp(V_{juntura}/V_T)-1]$

Eta $V_{Rserie} = I \times R_{serie}$

R_{serie} parametroan, kontaktuen eta eskualde neutroen erresistentzia jasotzen dira.

Beraz, aplikatutako tentsio osoa $V_{aplikatua} = V_{juntura} + V_{Rserie}$ geratzen zaigu:

Hau da, korronte bat lortzeko, hasierako formulak aurreikusten duen tentsioa baino handiagoa aplikatu behar dugu. Tentsio alde hori aintzat ez hartzekoa izango da korrontea oso handia ez bada, baina, fenomenoa korronte altuetan, asko nabarmentzen da, maiz injekzio altuan sartu baino lehen.

8.2 Desbideratzeak alderantzizko polarizaziopean

8.2.1 JUNTURAREN HAUSTURA ETA ZENER DIODOAK

Shockleyren ekuaziotik, diodoa korronte oso txikian asetzen da alderantzizko polarizazioan. Hala, -0.5 voltetik aurrera, korrontea $-I_{sat}$ da.

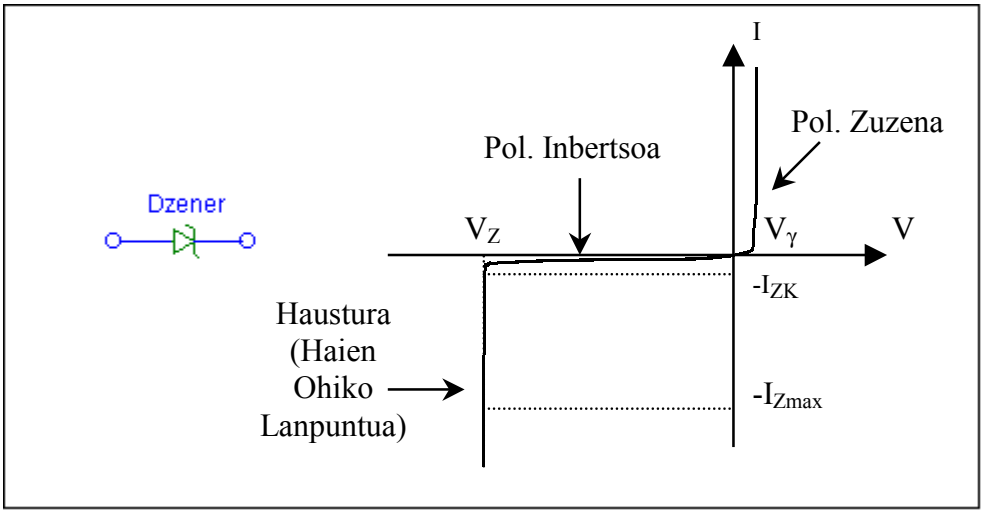
Tentsio negatiboa handitzen jarraitzen badugu, ordea, $-V_{BreakDown}$ tentsiora iristean, eroatea bat-batean errazten da hemen analizatuko ez ditugun mekanismoak direla medio (besteak beste, oldarrek edota tunel efektuak dakarten hustutako eskualdeko sorreraren bidez).

Orduan, tentsioa eta korrontea handiak izaten dira eta, xahutu behar den potentzia (I x V) nahiko altua suertatzen denez, dispositiboa haustera ere iritsi ohi da. Eroatea errazten duen tentsio horri **hausturako tentsioa** edo disrupzio-tentsioa esaten diogu. Ohiko diodoetan, $V_Z = V_{BD}$ = 1000 volt ingurukoa izaten da.

Aplikaziorik usuenetan ez da komenigarria izango diodoa hausturan sartzea baina, badirenez kasu interesgarri jakin batzuk, badaude hausturako tentsioetan lan egiteko diseinatzen diren diodoak: **Zener diodoak**.

Normalean, Zenerren hausturako tentsioa ez da oso altua izaten (izan ere, zenbat eta tentsio baxuagoa orduan eta balio erantsi handiagoa izaten dute) eta 6, 10, 20, 30 edo 40 volt inguruan kokatzen da. Hausturako tentsioa, batez ere, dopaketaren funtzioa da (ezpurutasun kontzentrazioarekiko alderantziz proportzionala, hain zuzen ere).

Korrontearen hazkundea ia bat-batean gertatzen da eta, korronte-tarte zabal batean, tentsioa V_Z-ren inguru hurbilean mantentzen da. Ematen du diodoari ezin zaiola hausturako tentsioa baino altuagorik ezarri eta, beraz, Zener diodoak, nolabait, tentsioa mugatzen du. Askotan, tentsio hori finkatzeko, ziurtatzeko, erabiliko da.



8.3 Irudia. *Zenerren ikurra eta ezaugarria, haustura-eskualdea adieraziz*

<u>Hausturan egoteko korronte minimoa eta maximoa</u>

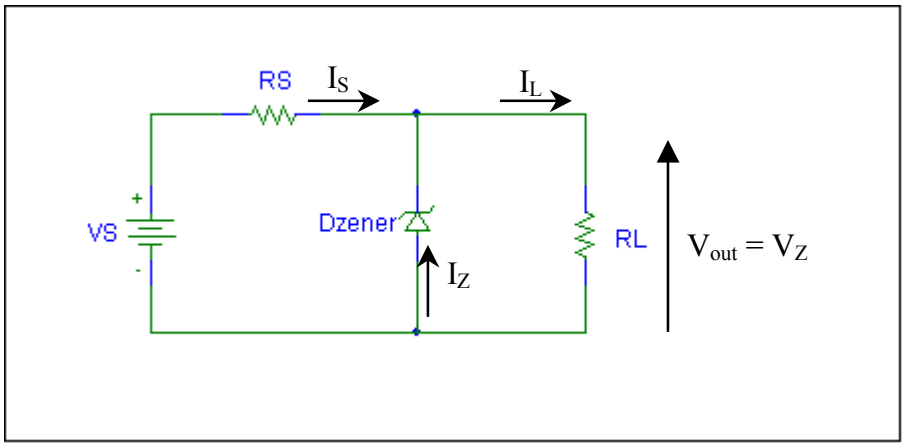
Ezaugarrian ikusten dugunez, korrontea I_{ZK} baino txikiagoa bada, ukondoan edo bihurgunean gaude eta ezin esan tentsioa V_Z denik. Beraz, zirkuituak egokiro funtzionatzen dutela ziurtatzeko korronte minimoa da I_{ZK}.

Bestela, diodoak gehienezko potentzia jakin bat (P_{max}) xahu dezakeenez, V_Z finkaturik, gehieneko korronte bat (I_{max}) egongo da: $I_{max}= P_{max} / V_Z$.

Nahiz eta gauzak horrelakoak izan, problema askotan, $I_{ZK} \sim 0$ eta I_{max} infinitutzat joko ditugu eta V_Z bakarrik erabiliko dugu, Zenerra *ideala* dela jota (ematekotan, I_{ZK} eta I_{max} balio positiboekin ematen dira).

8.2.2 ZIRKUITUAK ZENER DIODOEKIN: ERREGULADOREAK

Praktikan, lehenago esan bezala, Zener diodo bat zirkuitu batean inbertsoan jartzean, tentsioa mugatu edo finkatzen digu. Hori dela eta, diodo erreguladoreak deitzen diegu. Erabilera tipiko hori 8.4 Irudian agertzen den zirkuituan lortu ohi da.



8.4 Irudia. *Zener diodoak. Ohiko zirkuitua (I_Z negatiboa da)*

Zirkuituaren helburua R_L kargan (zirkuitu baliokidean) V_Z tentsioa finkatzea da, nahiz eta V_S, R_S eta R_L ezagunak edo zehatzak ez izan. Zirkuituak ondo lan egiten badu (hau da, Zenerretik pasatzen den korrontea ikusi ditugun bi mugen artean badago):

$I_L = V_Z/R_L$ eta $I_S = (V_S - V_Z)/R_S$

Beraz, $I_Z = I_L - I_S = V_Z/R_L - (V_S - V_Z)/R_S = -[V_S/R_S - V_Z\,(1/R_S + 1/R_L)]$

Baina horrela izateko (hipotesia zuzena izateko), bi baldintza bete behar dira:

- $-I_Z > I_{ZK} \rightarrow V_S/R_S - V_Z\,(1/R_S + 1/R_L) > I_{ZK}$

  $\mathbf{V_S > V_Z\,(1+R_S/R_L) + I_{ZK} \times R_S} > V_Z\,(1+R_S/R_L)$

- $-I_Z < I_{max} \rightarrow V_S/R_S - V_Z\,(1/R_S + 1/R_L) < I_{max}$

  $\mathbf{V_S < V_Z\,(1+R_S/R_L) + I_{max} \times R_S}$

Lehenengo ezberdintasuna betetzen ez bada, Zenerrak korronte txikiko eskualdean lan egingo du (esango dugu OFF egoeran dagoela).

Bigarren hipotesia okerra bada, Zenerrak hausturan lan egingo du, baina, denborarekin, apurtu egingo da (potentzia altuegia barreiatu beharko du-eta).

Bestela (hau da, normalean erabiltzen diren lan-baldintzetan), V_S, R_S eta R_L ezberdinetarako, V_Z tentsio finkoa lortzen da R_L 'zirkuituan', horretarako gainontzeko korronte eta tentsioak egokituz.

9. DIODOA ERREGIMEN DINAMIKOAN

Aurreko hiru ikasgaietan, egoera estatikoan -hau da, tentsioak eta korronteak denboran zehar konstante mantentzen direnean- aztertu dugu PN junturaren funtzionamendua. Kasu horretarako –eta hurbilketa batzuk onartuta-, I-V ezaugarri matematikoa deduzitu dugu: Shockleyren ekuazioa, hain zuzen ere.

Ikasgai honetan, diodoa erregimen dinamikoan ikusiko dugu. Shockleyren ekuazioak jada ez digu balio, zeren eta egindako garapen matematikoa, $dp/dt = dn/dt = 0$, baldintzatik edo egoeratik (geldikortasunaren hipotesitik) abiatzen baitzen.

Izan ere, erregimen dinamikoan ez dago I-V ezaugarri bakar bat, aukera asko baizik. Momentuko egoera ez dago bakarrik aplikatzen den tentsioaren menpe: aurreko egoeraren eta denboran zehar izan den bilakaeraren menpe ere badago. Halere, zenbait hurbilketa ontzat emanez gero, badago erregimen dinamikoa ebazteko eredu fisiko-matematiko erraz bat: kargaren bidezko kontrol-eredua.

Lehendabiziko lana, beraz, eredu hori ondorioztatzea izango da, gero bi kasu berezietan aplikatzeko: seinale txikiko erregimena eta diodoen kommutazioa. Bi aplikazio horiek, beste dispositibo askotan bezala, interesgarrienak gertatzen dira.

9.1 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera estatikoan

Kargaren kontrol-ereduaren kontzeptuarekin hasteko, estatikoan dagoen p^+n diodo (asimetriko) luzetik abiatuko gara.

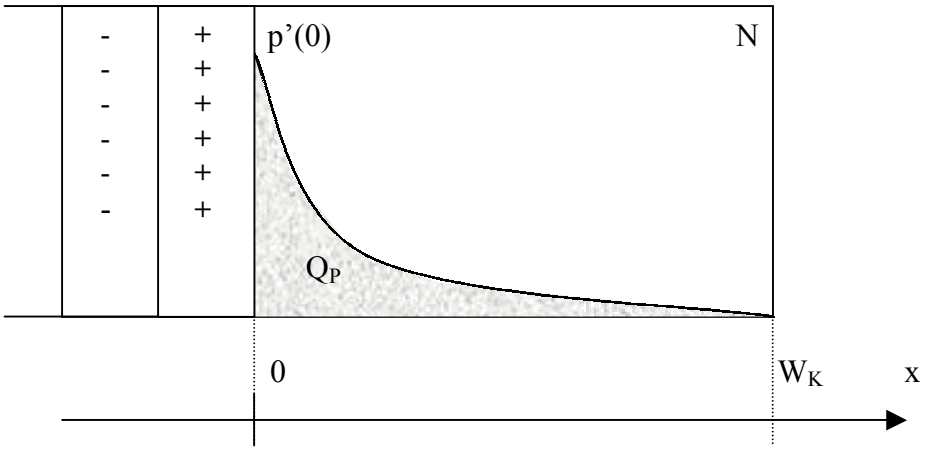
Estatikoan gaudenez, Shockleyren ekuazioa baliagarria da:

$$I = I_{sat} \cdot \left(e^{V/V_T} - 1 \right)$$

Anodoak askoz dopaketa altuagoa duenez, katodoak zehazten du $I_{sat(??)}$. Beraz, katodoari begiratuko diogu hemendik aurrera. Diodoa luzea denez:

$$I_{sat} \approx q \cdot A \cdot L_p \frac{p_{n0}}{\tau_p}$$

Katodoaren eskualde neutroan dagoen karga, zero da, noski. Baina katodoan dagoen urrienen soberakinaren karga (p' hutsuneen soberakinaren karga) ez da nulua. Diodoaren korrontea karga horren funtzioan adierazten badugu, kargak korrontean duen kontrola islatzen da eta horixe da kargaren kontrol-ereduaren oinarria. Eredua kommutazioan erabiltzen da batez ere (bai diodoetan bai transistoreetan).



9.1 Irudia. *Katodoan dagoen soberakinaren profila eta urrienen soberakinari dagokion kargaren adierazle den azalera*

URRIENEN SOBERAKINAREN KARGAREN EBAZPENA:

Katodoa luzea denez, $W_c \rightarrow \infty$; $p'_n(x) = p'_n(0)\cdot\exp(-x/L_p)$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot \int_0^{W_c} p'_n(x) \cdot dx$$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot \int_0^{\infty} p'_n(0) \cdot e^{-\frac{x}{L_p}} \cdot dx = -q \cdot A_J \cdot p'_n(0) \cdot L_p \cdot \left[e^{-\frac{x}{L_p}} \right]_{x=0}^{x=\infty}$$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot p'_n(0) \cdot L_p$$

$$Q_p = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

Eta, beraz, korrontearekin alderatuz

$$\underline{I = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot \frac{p_{n0}}{\tau_p} \cdot \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)}:$$

$$\underline{I = \frac{Q_p}{\tau_p}}$$

Esanahia ulertzeko, birkonbinaketaren ikuspuntutik begiratuko diogu kontuari. Hain zuzen ere, katodoan gertatzen den birkonbinaketa kalkulatuko dugu:

$$q \cdot Birk._{bolumenean} = q \cdot \int U \cdot dV = q \cdot A \cdot \int_0^{\infty} U \cdot dx = q \cdot A \cdot \int_0^{\infty} \frac{p'(x)}{\tau_p} \cdot dx = \frac{Q_p}{\tau_p} = I$$

Beraz, junturan barreiapeneko korrontea zena birkonbinaketa elikatzeko behar den korrontetzat har daiteke. Eta hori karga / erdibizitza erlazioaz kalkula dezakegu.

Horrek honako hau esan nahi du: <u>erregimen geldikorrean (estatikoan), diodoaren korronteak birkonbinaketarako hutsuneak injektatzen ditu katodoan.</u>

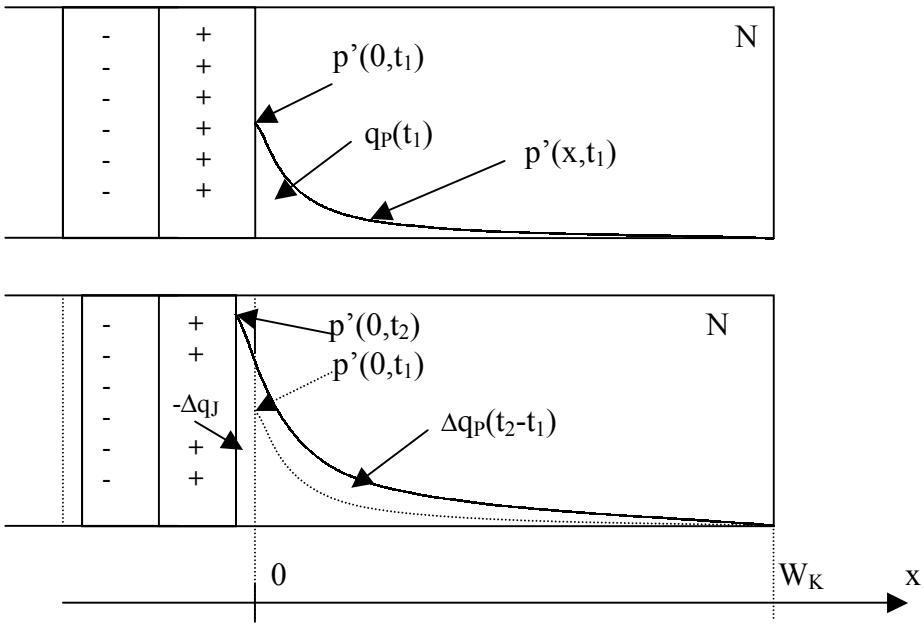
Kasu orokorrean, anodoari dagokion korronte-osagaia gehituz:

$$I = \frac{Q_p}{\tau_p} + \frac{|Q_n|}{\tau_n} = \frac{Q_p}{\tau_p} - \frac{Q_n}{\tau_n}$$

Horixe da kargaren kontrol-eredu osoa egoera estatikoan.

9.2 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera dinamikoan

p^+n diodoarekin jarraituz, demagun $v(t_1) \rightarrow v(t_2)$ trantsizioa gertatzen dela eta tentsio horiei dagokien profilen aldaketa 9.2 Irudikoa dela.



9.2 Irudia. *Karga-aldaketa polarizazio zuzena handitzean*

Ikusten denez, erregimen dinamikoan, kargaren kontrol-ereduak, birkonbinatzeaz gain, kargaren aldaketaren berri eman behar du. Karga-aldaketa hori korrontearen bidez lortzen denez, bi korronte-osagai daude:

- Dagoen kargak eskatzen duena (birkonbinaketarena, estatikoan bezala).
- Kargaren hazkundeak behar duena: urrienen kontzentrazioaren hazkundea lortzeko injektatu beharreko karga (dq karga, dt denboran).

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t}$$

non izendapena aldatu baitugu erregimen dinamikoan gaudela adierazteko.

Junturako karga kontuan hartzen badugu:

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t}$$

AURREKOA APLIKATZERAKOAN ONARTU OHI DIREN HIPOTESIAK:

1. Hustutako eskualdeko ertzetan (karga espazialeko eskualdeko ertzetan) urrienen aldiuneko kontzentrazioaren eta beren orekako kontzentrazioaren arteko erlazioa oraindik ere baliagarria da:

   $p_n(0) = p_{n0} \cdot \exp(v/V_T) \rightarrow p_n(0,t) = p_{n0} \cdot \exp(v(t)/V_T)$

   non v(t) juntura ertzean dagoen tentsioa baita (normalean, aplikatutako tentsioa).

   Hori, maiztasuna handiegia ez bada, zuzena da: eramaileek hustutako aldea zeharkatzeko behar duten denborak markatzen du kontzentrazioak eraldatzeko behar den denbora: luzera/v = 10^{-4} cm/ 10^7 cm/s = 10 ps = τ_t.

2. Eramaileen profilek erregimen estatikoan jarraituko lioketen banaketa-funtzio berari jarraitzen diote (eskualde neutroetan). Hau da:

   $$p'_n(x,t) = p'_n(0,t) \cdot \exp\left[-\, x/L_p \right]$$ katodoa luzea bada

   $$p'_n(x,t) = p'_n(0,t) \cdot \left[1 - x/W_c \right]$$ katodoa laburra bada (kont. ohm.)

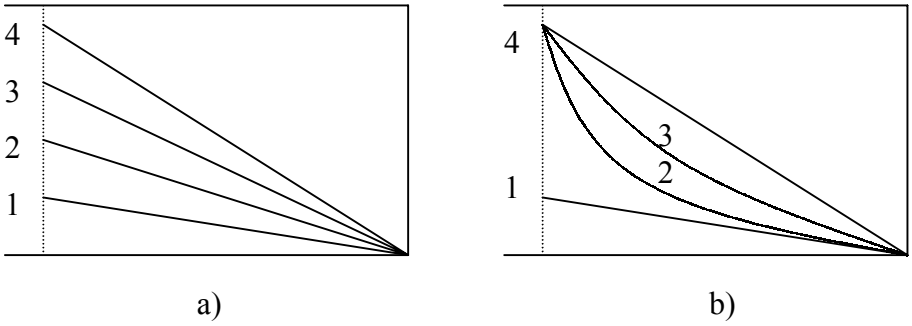
   $$p'_n(x,t) = -p'_n(0,t) \cdot Sh\left[(x - W_c)/L_p \right] \Big/ Sh\left[W_c/L_p \right]$$ (kontaktu ohmikoak)

   Hau da, aldiuneko profila lortzeko behar den eramaile garraioa azkarrago gertatzen da tentsioen aldaketa baino. Une bakoitzeko egoera egoera geldikorrean bezala ebazten da. Egoera sasi-geldikor horien arteko trantsizioa geroago ikusiko dugu.

   Beraz, ERREGIMEN DINAMIKOA ERREGIMEN GELDIKORREN JARRAIPEN EDO SEGIDA GISA ANALIZATZEN DUGU.

   Hau ez da egia (zuzena) izango seinalearen maiztasuna oso altua bada. Diodo luzeetan, hipotesia ontzat eman daiteke seinalearen maiztasuna < 100 kHz bada. Diodo laburretan, profilen aldaketa azkarragoa izaten da eta, maiztasuna ~ 25 Mhz denean ere, hipotesia erabil daiteke. Hortik aurrera, profilek beste forma bat edukiko lukete.

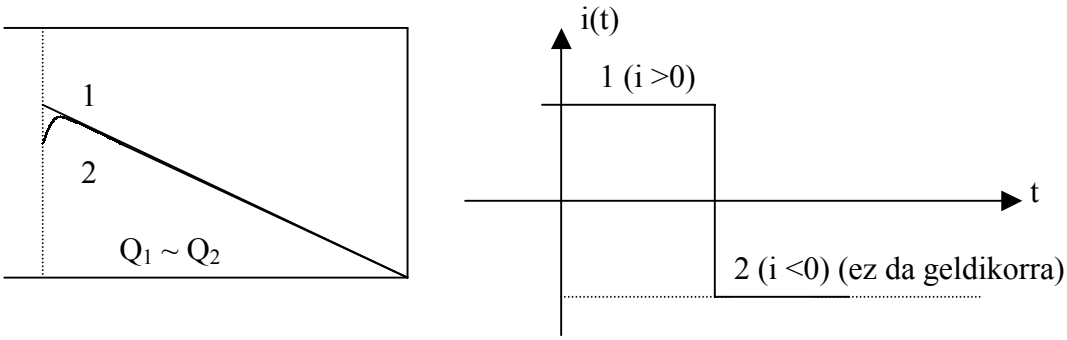
3. Kontaktuak ohmiko idealak dira eta ez dago tentsio-erorketarik eskualde neutroetan. Hori dela-eta, aplikatutako tentsio osoa junturan agertzen da. Hala ez balitz, erresistentzia bat jarri behar genuke seriean, tentsio horien berri emateko.



9.3 Irudia. *a) Erregimen dinamikoa erregimen estatikoei dagozkion profilen bidez osatzea b) Tentsio-aldaketa azkarregia da: hipotesiak ez du balio*

Estatikoan, dp/dt = dn/dt = 0 zen, eta korronteek ez zuten anodoan, katodoan eta hustutako eskualdean metatutako eramaile-kontzentrazioa (karga) handitzen. Metatutako eramaileak egoera estatiko batetik bestera aldatzen diren arren, konstante mantentzen dira egoera bakoitzean. Dinamikoan, berriz, eskualde horietan eramaileak sartu edo atera behar ditugu aldaketa hori gertatzeko. Urrienei begiratzen badiegu, polarizazio zuzena igotzen badugu, adibidez, katodoan dauden hutsuneak gehitu behar dira, hau da, horien karga gehitu egin behar da: korronte gehigarri bat behar da.

Metatutako eramaileak edo kargak aldatzeak, korronteaz gain, denbora eskatzen du. Korronteak, aldiz, (ia) berehala alda daitezke (zenbait kasutan hala gertatzen da), urrienen kontzentrazioen malden funtzioa baitira (eta maldak azkar alda daitezke).



9.4 Irudia. *Korrontearen aldaketa bortitza; karga, aldiz, ez da ia aldatzen*

AURREKO EKUAZIOAREN BESTE ADIERAZPEN BAT:

$$i_D(t) = \frac{q_H(v(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial t} - \frac{\partial q_J(v(t))}{\partial t}$$

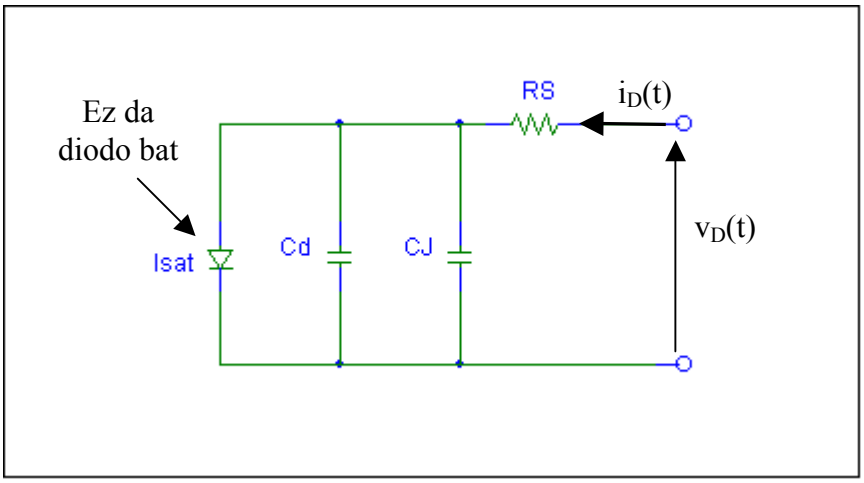
$$i_D(t) = \frac{q_H(v(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v} \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t} - \frac{\partial q_J(v(t))}{\partial v} \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t}$$

$$i_D(t) = \frac{q_H(v(t))}{\tau_p} + C_d \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t} + C_J \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t}$$

non $C_d = \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v}$ eta $C_J = -\frac{\partial q_J(v(t))}{\partial v}$

Osagaien esanahia:

- q_H/τ_p zatidurak egoera (sasi)geldikorreko korrontea adierazten du.
- C_D barreiapeneko kapazitatea da (kondentsadoreetan bezala, eskualde neutroek tentsioa aldatzean behar duten kargaren mugimendua).
- C_J junturako kapazitatea da (hustutako eskualdeko kargaren aldaketa / tentsioaren aldaketa).



9.5 Irudia. *Zirkuitu baliokidea (serieko erresistentzia ez da aintzat hartzeko modukoa izaten)*

KAPAZITATEEN KALKULUA :

Eskualde neutroei dagokiona (kasu honetan, katodokoa):

$$C_d = \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v} = \frac{\partial\left(\mathrm{I(v)} \cdot \tau_\mathrm{p}\right)}{\partial v} = \frac{\partial\left(\mathrm{I_{sat}}(\exp(\mathrm{v/V_T}) - 1) \cdot \tau_\mathrm{p}\right)}{\partial v}$$

$$C_d = \mathrm{I_{sat}}\tau_p \cdot \exp(\mathrm{v/V_T})/\mathrm{V_T} = \frac{\mathrm{I_{sat}} \cdot \exp(\mathrm{v/V_T})}{\mathrm{V_T}} \cdot \tau_p$$

$$C_d = \frac{I_{espero_genuena} + I_{sat}}{\mathrm{V_T}} \cdot \tau_p \neq \frac{I_{daukaguna} + I_{sat}}{\mathrm{V_T}} \cdot \tau_p$$

Junturakoa:

$$C_J = -\frac{\partial q_J(v(t))}{\partial v}$$

non $\left[q_J = q_{ND} = -q_{NA} = qAN_A x_p = qAN_A(\frac{N_D}{N_A + N_D} l) \Rightarrow dq_J = \frac{qAN_A N_D}{N_A + N_D} dl \right]$

$$\left[\phi_T - v_J = \frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \in (N_A + N_D)} \cdot l^2 \Rightarrow -dv_J = \frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \in (N_A + N_D)} \cdot 2l \cdot dl \right]$$

gogoratu $l = \sqrt{\frac{2\in}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \cdot \sqrt{\Phi_T - V}$ ($\in$ –ren unitateak : $\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V \cdot m}}$)

Beraz,

$$C_J = -\frac{qA\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot dl}{-\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \in (N_A + N_D)} \cdot 2l \cdot dl} = \frac{A\in}{l} = A\in \cdot \sqrt{\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2 \in (N_A + N_D)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T - v(t)}}$$

Juntura latz-laua ez bada:

$$C_J = k \cdot \left(\phi_T - v(t)\right)^{-1/m} = C_{J0} \cdot \left(\phi_T - v(t)\right)^{-1/m}$$

(juntura latzetan, m = 2; juntura mailakatuetan, m = 3).

$C_J = A\in/l$ A azalera duten eta l distantziara dauden bi xaflez egindako kondentsadorearen kapazitatea da. Izan ere, kargak sartze-ateratze hori, fenomeno bera da ohiko kondentsadoreetan edota junturetan.

C_{J0} orekako junturako kapazitatea da.

$$C_{J0} = C_J(v=0) = -A\in \cdot \sqrt{\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2\in (N_A + N_D)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T}}$$

$$C_J(v) = -A\in \cdot \sqrt{\frac{q \cdot N_A \cdot N_D}{2\in (N_A + N_D)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T - V}} \frac{\sqrt{\phi_T}}{\sqrt{\phi_T}} = C_{J0} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi_T/\phi_T - v(t)/\phi_T}}$$

$$C_J(v) = C_{J0} \cdot \left(1 - v(t)/\phi_T\right)^{-1/2} \rightarrow C_J(v) = C_{J0} \cdot \left(1 - v(t)/\phi_T\right)^{-1/m}$$

Normalean, $v(t) = V_D + v_d(t) \sim V_D$ polarizazioak agintzen du, eta, orduan:

$$C_J(v) = C_{J0} \cdot \left(1 - v(t)/\phi_T\right)^{-1/m} \approx C_{J0} \cdot \left(1 - V_D/\phi_T\right)^{-1/m}$$

[$v(t)/\phi_T > 0.5$ denean, aurreko ekuazioak kale egiten du eta kapazitatea askoz azkarrago hazten da]

C_J oso interesgarria da, tentsioaren bidez erraz kontrolatzen den kondentsadorea baita.

BIEN BATURA:

Polarizazio zuzenean, C_d nahiko handia da eta $C_d + C_J \sim C_d$. Polarizazio inbertsoan, berriz, $C_d \sim 0$, eta, bera,z $C \sim C_J$.

ERABILERA:

- Zirkuitu integratuetan, normalean, alderantzizko polarizazioan erabiltzen da kapazitate hori, elkarren ondoan dauden dispositiboak isolatzeko.
- Alderantzizko polarizazioan, tentsioarekin aldatzen den C_J kondentsadorea dugunez, telebista eta FM (frekuentzia modulatu) aplikazioetan eta orokorrean maiztasun aldakorra duten zirkuituetan erabiltzen da. Bestela, kondentsadore doigarri bat lortzeko, atal mugikorrez egindako kondentsadorea behar litzateke.

9.3 Seinale txikiko erregimenaren analisia: garapena eta zirkuitu baliokidea

Diodoa polarizazio zuzenean nahiko sartuta badago eta aplikatutako tentsioaren osagai aldakorra (alternoa) osagai finkoa (jarraitua, polarizaziokoa) baino askoz txikiagoa bada, seinale txikiko erregimenean egongo gara. Alegia, seinale txikiko erregimenean egoteko, $v_d(t) << V_T = 25.9$ mV ($T_{ambient}$).

Kasu horretan, tentsioen eta korronteen zati aldakorren arteko erlazioak linealak dira (eta ez esponentzialak / logaritmikoak edo finkoak, seinale handiekin gertatzen den bezala).

$$v_D(t) = V_D + v_d(t) \rightarrow i_D(t) = I_D + i_d(t) \text{ non} \begin{cases} I_D = I_D\,(V_D) \\ \\ i_d(t) = f(V_D)\cdot v_d \end{cases}$$

Zirkuituak analizatzean, bi osagaiak (seinale handikoa -jarraitua, polarizazioa— eta seinale txikikoa —alternoa—), bakoitza bere aldetik, aztertuko ditugu eta, gero, gainezarpena aplikatuz, bi erantzunak batuko ditugu.

[Hemen ere, kargaren kontrol-eredu osoa erabil genezake, noski; baina, alternoko seinalea txikia bada, askoz errazagoa izaten da bitan banatuz ebaztea.]

Zuzenean dagoen p^+n katodo **luzeko** diodo asimetrikoaren kasua gogoratuz:

$$q_H(t) = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \left(e^{\frac{v_D(t)}{V_T}} - 1 \right)$$

Tentsioaren bi osagaiak jarriz: $v_D(t) = V_D + v_d(t)$; non $V_D >> V_T$

$$q_H(t) = q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T} \right) - 1 \right)$$

$$q_H(t) \approx \text{(zuzenean oso sartuta gaudenez)} \approx q \cdot A_J \cdot L_p \cdot p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T} \right)$$

$$q_H(t) = qA_J L_p p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) \cdot \exp\left(\frac{v_d(t)}{V_T} \right) \approx qA_J L_p p_{n0} \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) \cdot \left[1 + \frac{v_d(t)}{V_T} \right]$$

$$q_H(t) = qA_J L_p p_{n0} \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) + \frac{qA_J L_p p_{n0}}{V_T} \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) \cdot v_d(t) = Q_H + K_1 \cdot v_d(t)$$

Beste era batean adierazita:

$$q_H(t) = Q_H + q_h(t)$$

non $Q_H = qA_J L_p p_{n0} \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right)$

eta $q_h(t) = \frac{qA_J L_p p_{n0}}{V_T} \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) \cdot v_d(t) = \frac{Q_H}{V_T} \cdot v_d(t)$

Dinamikoan erabili behar den kargaren kontroleko ekuaziora eramanez gero:

$$i_D(t) = \frac{q_H(v_D(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_H(v_D(t))}{\partial t} - \frac{\partial q_J(v_D(t))}{\partial t}$$

$$i_D(t) = \frac{Q_H(V_D)}{\tau_p} + 0 + 0 + \frac{q_h(v_d(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_h(v_d(t))}{\partial t} + 0$$

$$i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

$$I_D = \frac{Q_H(V_D)}{\tau_p} = qA\frac{L_p}{\tau_p} p_{n0} \exp(V_D / V_T) \quad \text{(Shockley)}$$

$$i_d(t) = \frac{q_h(v_d(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_h(v_d(t))}{\partial t} = \frac{Q_H(V_D)}{\tau_p V_T} v_d(t) + \frac{Q_H(V_D)}{V_T}\frac{dv_d(t)}{dt} = g_d v_d(t) + C_d \frac{dv_d(t)}{dt}$$

Beraz, gainezarpena erabil dezakegu, eta, seinale txikian:

$i_d(t) = g_d \cdot v_d(t) + C_d \cdot dv_d(t)/dt$,

Ikusten denez, g_d eta C_d sasi-konstanteek eroankortasun eta kondentsadore bana adierazten dute, zeren $v_d(t)$ eta haren deribatuarekiko proportzionalak diren osagaiak islatzen baitituzte.

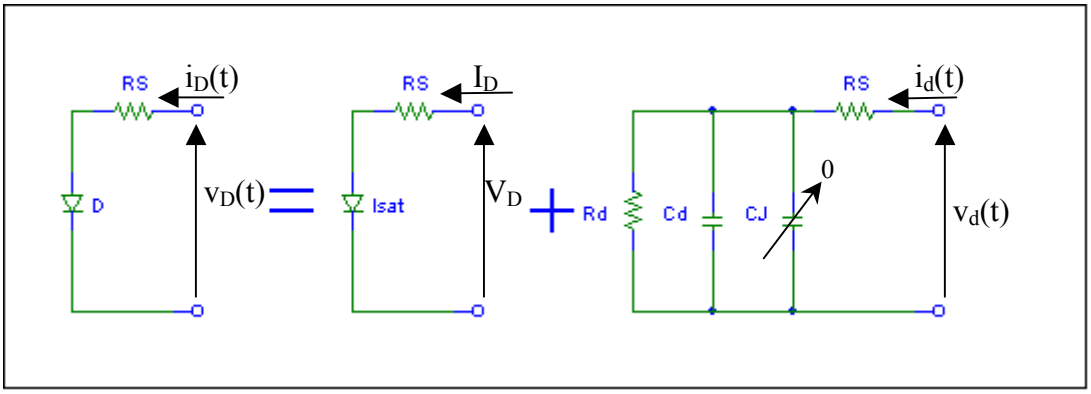
- $g_d = I_D / V_T$
- $C_d = I_D / V_T \cdot \tau_p = g_d \cdot \tau_p$

(Azken osagai bat sar liteke, C_J paraleloan gehituz)

Kontuan izan seinale txikiko zirkuitua polarizazio-puntuaren menpe dagoela.

Beraz, diodoak dituen zirkuitu bat egoera dinamikoan analizatzerakoan, seinale txikikoa delako asmoa badugu, honako hau egin beharko dugu:

- Sarrerako seinaleak bitan deskonposatu: alde batetik, polarizazioa (seinale handia, jarraitua) eta, bestetik, seinale alternoa:
  - Seinale alternoa handia balitz, kargaren bidezko kontrol-eredua osorik erabili beharko genuke, eta aurreko banaketa alferrikakoa litzateke.
  - Normalean, aldiz, seinale alternoa txikia izaten da (<< 26 mV):
    - Seinale jarraituko (handiko) zirkuitua analizatuz, polarizazioko korronteak eta tentsioak ebatzi.
    - Seinale txikiko zirkuitu baliokidea(k) kalkulatu. Hau da, g_d eta C_d (C_J aintzat ez hartzeko modukoa izango da) kalkulatu eta seinale alternoari dagokion zirkuitua planteatu.
    - Alternoko zirkuitua ebatzi.
    - Seinale handiko eta txikiko erantzunak batu.



9.6 Irudia. *Seinale txikiko zirkuitu baliokidea (serieko erresistentzia aintzat ez hartzeko modukoa izaten da)*

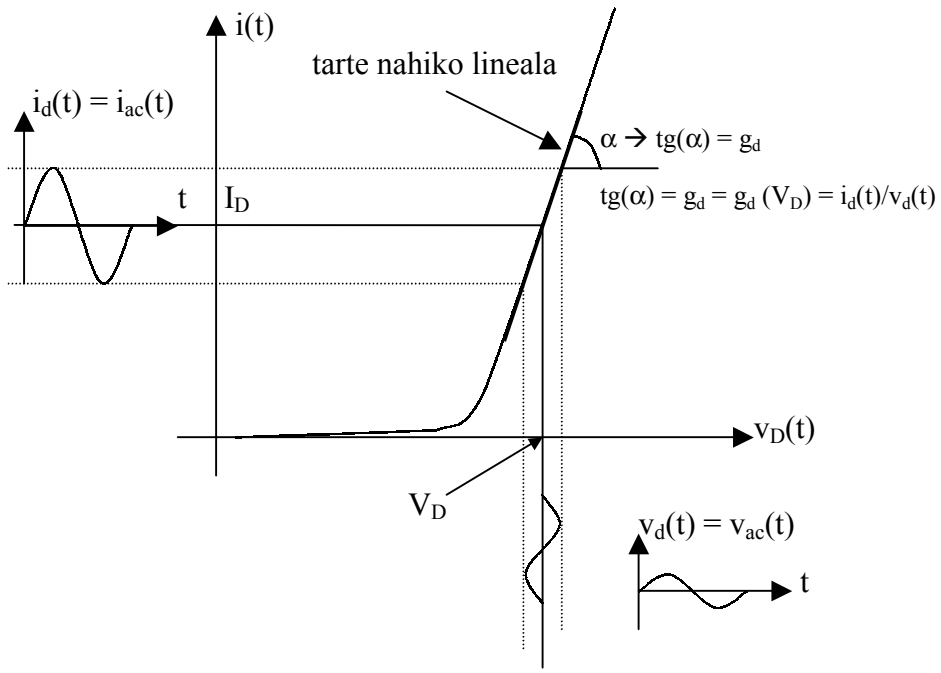
Seinale txikiko zirkuituko osagai guztiak linealak dira.

Dakigunez –Fourieren teorema eta deskonposaketa-, seinale alternoak seinale sinusoidalen batuketaren bidez adieraz daitezke, eta segida hori oso esanguratsua da maiztasunaren eremuan. Horrenbestez, oso interesgarria da hainbeste erabiltzen diren seinale sinusoidalen kasua analizatzea:

$$v_d = V_{dm}\exp(wt) \rightarrow i_d = V_{dm}\cdot\exp(wt)\cdot\left[g_d + jwC_d\right]$$

Ikusten denez, desfasatu eta ahuldu egin daiteke, baina korronteak tentsioaren forma du eta horien bidez egindako zirkuituen irteerek sarreren forma / itxura bera izango dute (seinaleak sinusoidalak badira). Maiztasun oso baxuen kasua berezia eta interesgarria da. Orduan, $wC_d << g_d$, eta $i_d(t) = g_d \cdot v_d(t)$ (beraz, kasu horretan ez da desfaserik gertatzen).

g_d eroankortasuna, i = i(v) zuzenaren malda denez, grafikoki adieraz dezakegu:



9.7 Irudia. *Seinale txikiko korrontea grafikoki ebaztea maiztasun baxuetan*

Bakarrik seinale txikiekin eta maiztasun oso baxuetan aplikatzen den azken emaitza horretara iristeko, bide laburragoa eta errazagoa dugu, Shockleyren ekuazioa aplikagarria dela onartuta:

$$i_D(t) = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{v_D(t)}{V_T} \right) - 1 \right) = I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T} \right) - 1 \right)$$

$$i_D(t) \approx (zuzenean) \approx I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D + v_d(t)}{V_T} \right) = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) \cdot \exp\left(\frac{v_d(t)}{V_T} \right)$$

$$i_D(t) \approx \left(\frac{v_d(t)}{V_T} << 1 \right) \approx I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) \cdot \left[1 + \frac{v_d(t)}{V_T} \right]$$

$$i_D(t) \approx I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) + I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T} \right) \cdot \frac{v_d(t)}{V_T} = I_D + i_d(t)$$

Non $I_D = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right)$

$$i_d(t) = g_d \cdot v_d(t) \qquad g_d = \frac{I_{sat}}{V_T} \cdot \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) = \frac{I_D}{V_T}$$

9.4 Diodoaren portaera kommutazioan

ETENGAILUEN EZAUGARRIA

Dakigunez, etengailu batek, korronteari pasatzen uzten dio ON egoeran, ia erresistentziarik jarri gabe. OFF egoeran dagoenean, aldiz, ez dio korronteari pasatzen uzten, tentsioa altua bada ere. Lehenengo kasuan, zirkuitulaburra eta, bigarrenean, zirkuitu irekia da, beraz. Diodoen ezaugarriarekin antza handia duenez, horiek ere noranzko bakar bateko etengailu gisa erabil daitezke.

Hori dela eta, askotan, diodoa kommutadore elektriko gisa erabiltzen da, eta korronte- edo tentsio-pultsu bat aplikatzen zaio: diodoa OFF (etenik) egoeratik ON (eroaten) egoerara igarotzen da -edo alderantziz-.

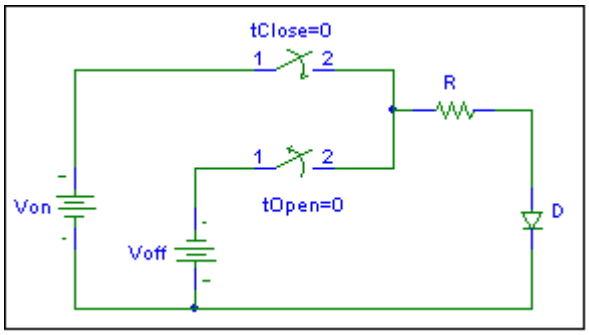
Zirkuitu horietan -bertan erabiliko diren diodoetan-, kommutazioaren abiadura funtsezkoa da.

Horregatik, kommutazio-denborak aztertuko ditugu: OFF→ ON (eroapenerako aldaketa) trantsiziotik hasiko gara eta ON→OFF (eteterako aldaketa) ikusiko dugu geroago. Bide horretan, kommutazio-denboren osagaiak definituko dira.

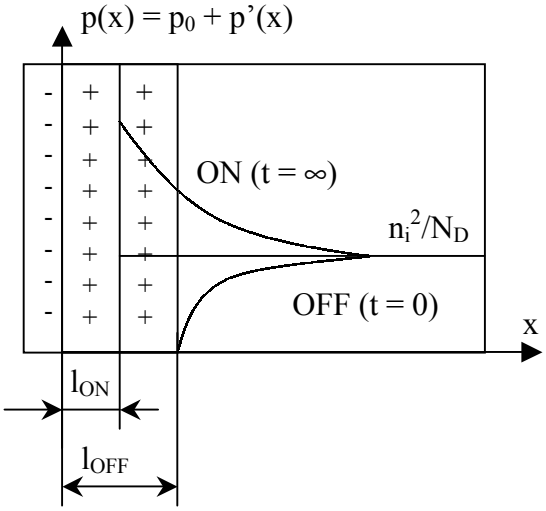
9.4.1 EROATEN HASTEA (OFF→ON)

$t = 0^-$ denean, egoera geldikorrean gaude eta diodoa etenik dago: korrontea i_D=-I_{sat} eta tentsioa $v_D = -V_R$ dira. Karga espazialeko eskualdea nahiko zabala da (orekarekin alderatuta), eta junturako ertzean ez dago urrienik.

$t = 0^+$ denean, zirkuitua aldatzen dugu (kanpoko etengailu baten bidez). Handik denbora luzera ($t = \infty$), egoera geldikorrera iritsiko gara eta, orduan, tentsioa ($v_D \sim 0.7$ V) eta korrontea ($i_D = I_F$) positiboak izango dira. Karga espazialeko eskualdea laburragoa izango da (orekako zabalera izango du, gutxi gorabehera) eta urrienen kontzentrazioa asko handituko da eskualde neutroetan.



9.8 Irudia. *t = 0 unean gertatzen den aldaketa*



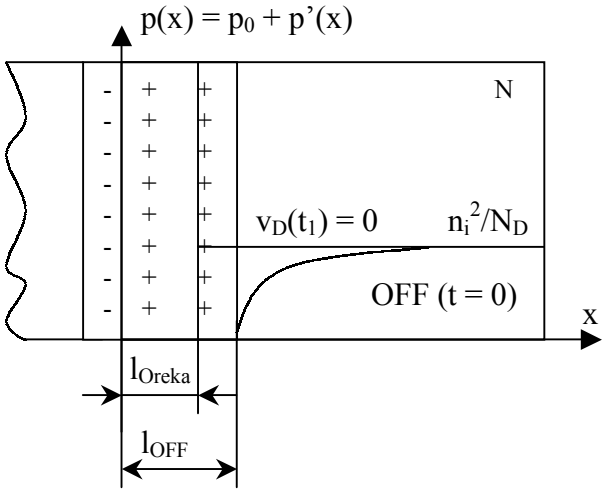
9.9 Irudia. *t = 0 eta t = ∞ uneetan izango diren profilak*

Beraz, lehenik eta behin, hustutako eskualdeko karga murriztu egin behar da. Murriztu ahala, tentsio negatiboaren balio absolutua jaitsiz joango da, zero izan arte. Karga espazialeko eskualdeak aldatzeko jartzen duen inertzia C_J kondentsadorearen bidez azaltzen dugu. (C_J, tentsioarekin, aldatuz doa).

Etapa horren hasieran, $v_D(0) = -V_{OFF}$ eta $i_D(0) = (V_{ON}-v_D)/R = (V_{ON}+V_R)/R$

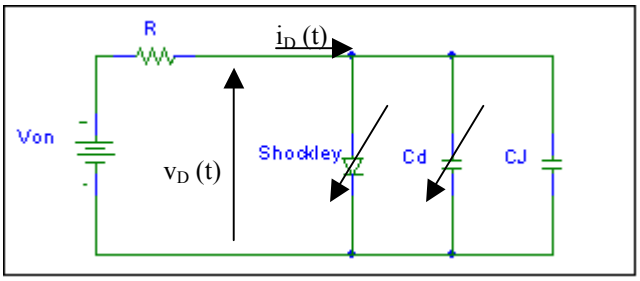
Bukaeran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON}-v_D)/R = V_{ON}/R$ (t_1 laburra izaten da)

Korronteak, junturako inguruetan karga sartu, besterik ez du egiten.



9.10 Irudia. *Hustutako eskualdeko zabalera aldatzea*

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t} \approx -\frac{\partial q_J}{\partial t} = C_J \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{V_{ON} - v}{R}$$



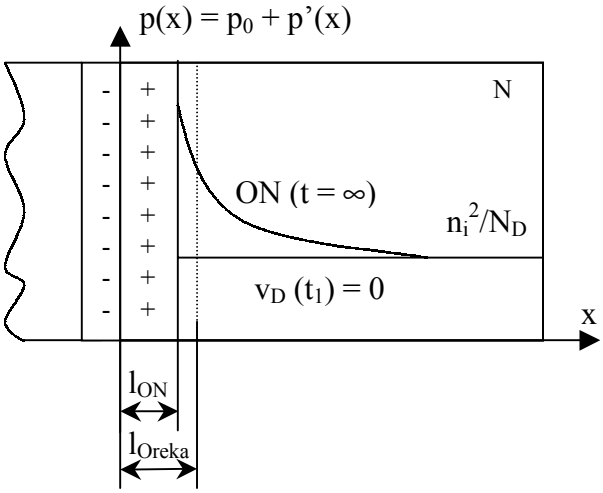
$-V_{OFF} < v_D(t) < 0$

$(V_{ON} + V_{OFF})/R < i_D(t) < V_{ON}/R$

9.11 Irudia. *Hustutako eskualdeko zabalera aldatzeari dagokion zirkuitua*

Hortik aurrera, eskualde neutroetako karga handitu egin beharko da (C_d kargatu beharko da, kontuan hartuz kondentsadore honen balioa aldakorra dela. Etapa horren hasieran $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON}-v_D)/R = V_{ON}/R$ esan bezala, eta bukaeran $v_D(t_2) \sim 0.7$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON}-v_D)/R \sim V_{ON}/R$.

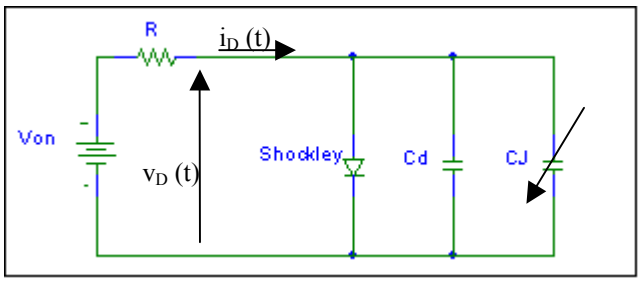
Orain, korronteak, eskualde neutroetako karga handitzeaz gain, karga mantendu ere egin beharko du (birkonbinaketa elikatuz).



***9.12 Irudia**. Eskualde neutroetako karga handitzea (birkonbinaketa mantenduz)*

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t} \approx \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} = I_{sat}\left[\exp(v/V_T) - 1\right] + C_d \cdot \frac{dv}{dt} \approx \frac{V_{ON}}{R}$$

C_J-ren efektua baztertuko dugu: hustutako eskualdea estutzea ez da kontuan hartzekoa korronteari dagokionez.



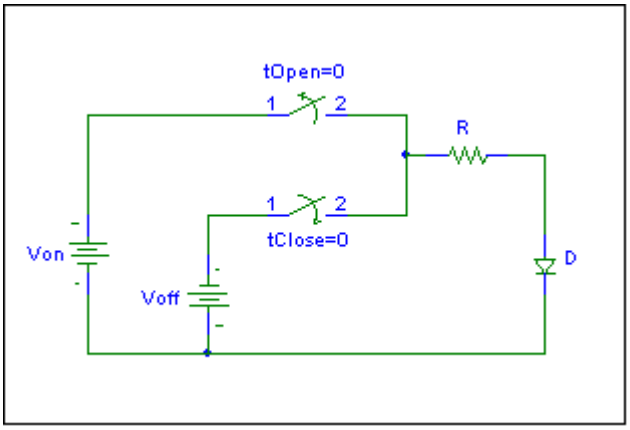
$0 < v_D(t) < 0.7$ V
$i_D(t) \sim V_{ON}/R$

***9.13 Irudia.** Eskualde neutroetako urrienen karga handitzeari dagokion zirkuitua*

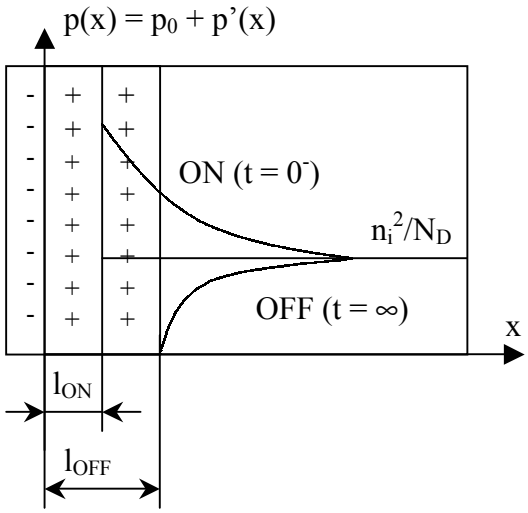
9.4.2 ETETEAREN ANALISIA (ON→OFF)

$t = 0^-$ denean, diodoa eroaten ari da, egoera geldikorrean; korrontea $i_D=I_F$ eta tentsioa $v_D \sim 0.7$ V dira. Karga espazialeko eskualdea ia orekakoa da eta urrienen soberakina handia da (batez ere junturako ertzean).

$t = 0^+$ denean, zirkuitua aldatzen da. Handik denbora batera, egoera geldikorrera iristean, tentsioa negatiboa izango da ($v_D \sim -V_R$) eta korrontea negatiboa, baina ia nulua izango da ($i_D = -I_{sat}$). Orduan, karga espazialeko eskualdea zabalagoa izango da eta eskualde neutroetan ez da ia urrienik izango.



9.14 Irudia. *t = 0 unean gertatzen den zirkuitu aldaketa*



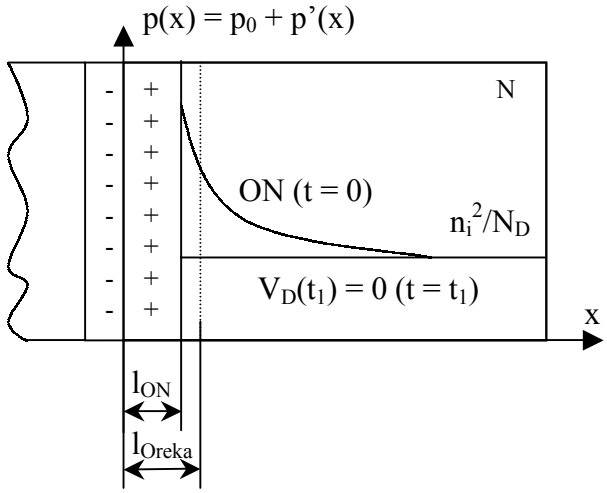
9.15 Irudia. *Bi egoera geldikorrei ($t = 0^-$ eta $t = \infty$ uneei) dagozkien profilak*

Beraz, lehenik eta behin, eskualde neutroetako karga murriztu egin beharko dugu. (C_d kondentsadore aldakorra deskargatuz).

Etapa horren hasieran, $v_D(0) \sim 0.7$ eta $i_D(0) = (V_{OFF}-v_D)/R \sim V_{OFF}/R$

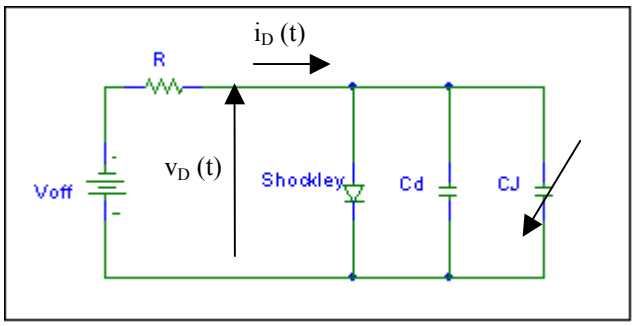
Eta, bukaeran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON}-0)/R = V_{ON}/R$

Korronteak, eskualde neutroetako karga murrizteaz gain, aldiuneko karga mantendu ere egin behar du (birkonbinaketa elikatuz).



9.16 Irudia. *Eskualde neutroetako karga murrizten (birkonbinaketa mantenduz)*

$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t} \approx \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} = I_{sat}\left[\exp(v/V_T) - 1\right] + C_d \cdot \frac{dv}{dt} \approx \frac{V_{OFF}}{R}$$



$0.7 > v_D(t) > 0$
$i_D(t) \sim V_{OFF}/R \times (-1)$

9.17 Irudia. *Aurreko aldaketari dagokion zirkuitua*

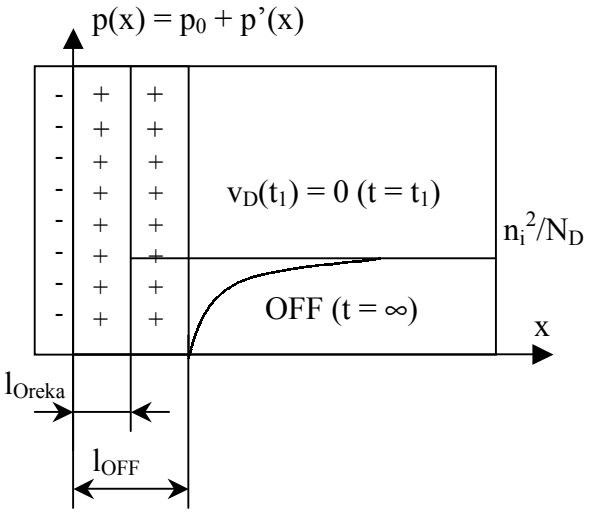
Jarraian, hustutako eskualdeko karga handitu egin behar da, eskualdea zabalduz eta inbertsoko tentsioa igoz (C_J kondentsadore aldakorra kargatuz).

Etapa horren hasieran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = V_{OFF}/R$

Bukaeran, $v_D(t_2) = -V_R$ eta $i_D(t_2) = -I_{sat}$

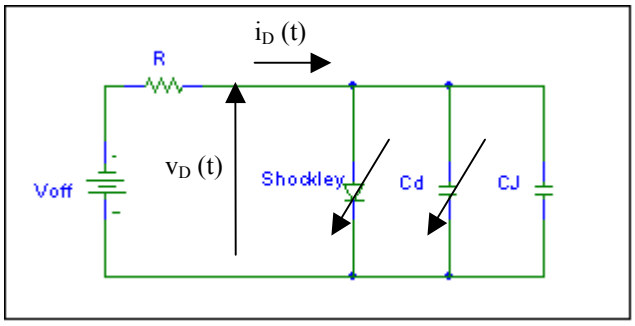
Normalean, t_2-t_1 denbora laburra izaten da.

Korronteak junturako gunean karga sartu besterik ez du egiten.



9.18 Irudia. *Hustutako eskualdeko zabalera aldatzea*

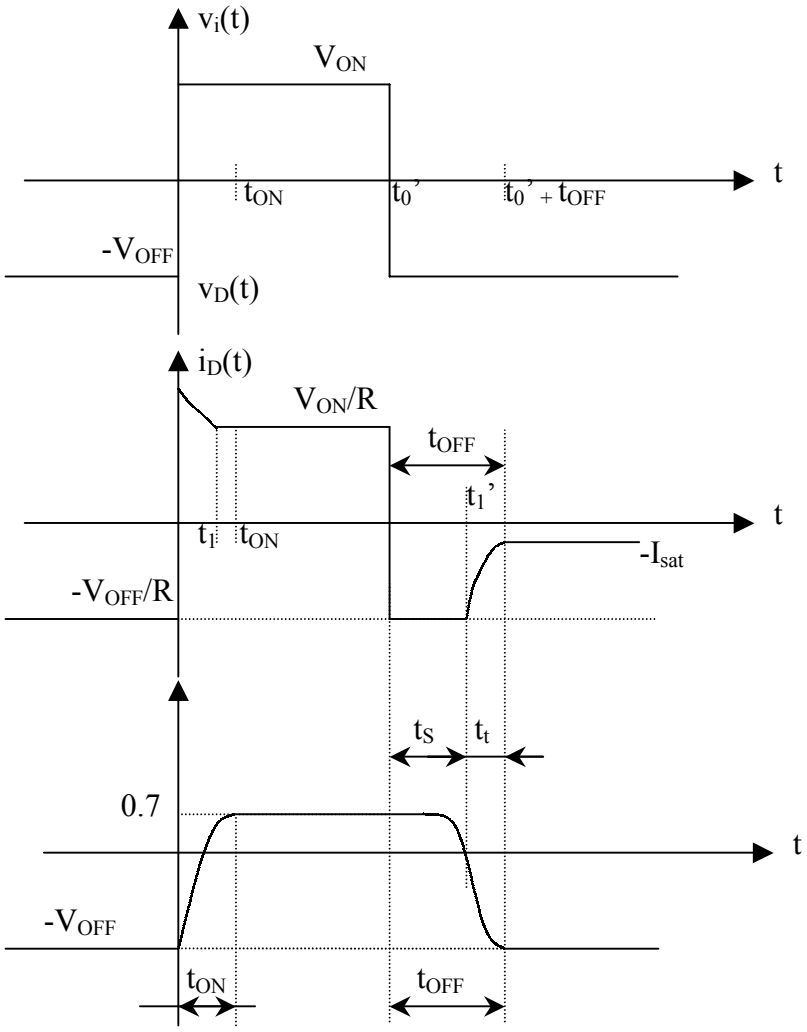
$$i_D(t) = \frac{q_p}{\tau_p} + \frac{\partial q_p}{\partial t} - \frac{\partial q_J}{\partial t} \approx -\frac{\partial q_J}{\partial t} = C_J \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{V_{ON} - v}{R}$$



$0 > v_D(t) > -V_{OFF}$

$-V_{OFF}/R > i_D(t) > -I_{sat}$

9.19 Irudia. *Hustutako eskualdeko zabalera aldatzeari dagokion zirkuitua*



9.20 Irudia. *Korronteak eta tentsioak OFF→ON eta ON→OFF trantsizioetan*

10. ZIRKUITUAK DIODOEKIN ETA BESTE DIODO ERDIEROALE BATZUK

Ikasgai honek bi atal nagusi ditu.

Lehenengoan, diodoen zenbait aplikazio ikusiko ditugu. Horien artean, badaude bi zirkuitu mota nagusi: zuzentzaileak (artezleak) eta ebakitzaileak (mugatzaileak). Aplikazio horietan guztietan, zirkuituaren sarreran agertzen den seinalea (normalean, maiztasun altuko seinale handia) prozesatu egiten da, irteeran seinale egokia izateko. Zirkuituen ezaugarri nagusia beren transferentzi kurba da, zeinak seinaleak jasaten duen eraldapenaren funtzioa ematen baitigu.

Ondoren, ikasgaiaren bigarren atalean, zenbait diodo berezi aurkeztuko dira. Horien artean, eguzki zelula fotovoltaikoak eta argia igortzen duten LED diodoak dira ezagunenak, dudarik gabe.

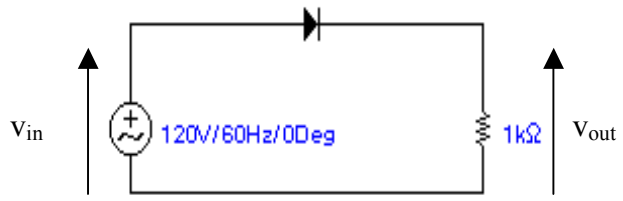
10.1 Zirkuitu zuzentzaileak: transferentzia-kurbak

Sare elektrikora konektatzen diren aparatu elektroniko gehienetan, barneko zirkuituak elikatzeko, polarizatzeko, seinale jarraitu edo zuzena behar da. Horrenbestezaz, saretik datorren seinale alternoa jarraitu bihurtu behar dugu, elikadura-iturri izeneko atalean.

Elikadura iturriak egiteko, zirkuitu zuzentzaileak dira ohiko bideetako bat. Izan ere, zuzenketa seinale alterno batetik -balio positibo eta negatiboak hartzen dituen seinale batetik- bakarrik balio positiboak hartzen dituen beste seinale batera pasatzea da. Bigarren seinale sasi-jarraitu horri seinale zuzendua (seinale arteztua) deitzen zaio. Arteztu ondorengo seinaleak oraindik osagai alternoa izaten duenez,–zuzentzearekin batera- seinalearen osagai alternoa iragazi egiten da askotan.

Jatorrizko seinalea anplitude handikoa eta maiztasun baxukoa izaten da eta, beraz, eredu linealak aplikagarriak izaten dira.

10.1.1 UHIN ERDIKO ZUZENTZAILEA



10.1 Irudia. *Uhin erdiko zuzentzailea*

Erdiziklo positiboan, diodoa zuzenean dago. Osagaia idealtzat hartuz ($V_\gamma = 0$), sarrerako tentsioa irteeran agertzen da ON egoeran.

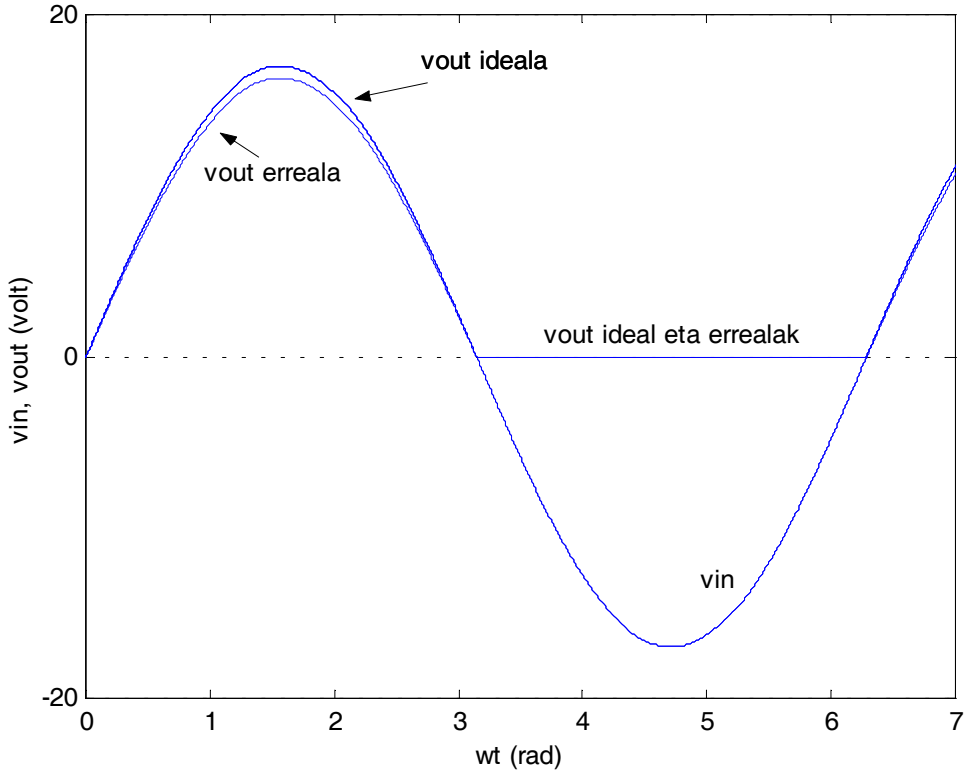
Erdiziklo negatiboan, diodoa inbertsoan dago, OFF egoeran. Erresistentziatik korronterik ez dagoenez, irteerako tentsioa hutsa da.

Sarrerako tentsioa altua ez bada, eredu finagoa erabili behar dugu, V_γ kontuan hartuz.

Orduan, irteerako seinalea nulua da sarrerakoa V_γ baino txikiagoa denean.

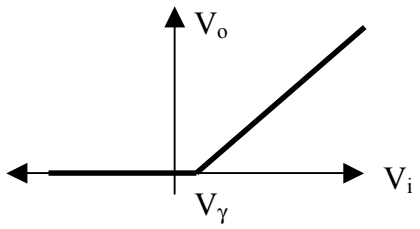
Eta, $V_i > V_\gamma$ denean, $V_o = V_i - V_\gamma$ (gutxi gorabehera).

Bi seinaleak 10.2 Irudian agertzen dira.



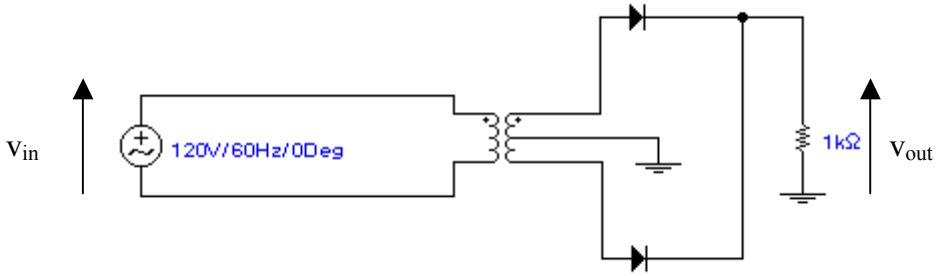
10.2 Irudia. *Uhin erdiko zuzentzailearen uhin-formak*

Tentsioa, beraz, positiboa da beti. Ez da konstantea, baina, dagoeneko, badu osagai jarraitu positiboa. Haren transferentzia-kurba, irudian agertzen dena izango da:



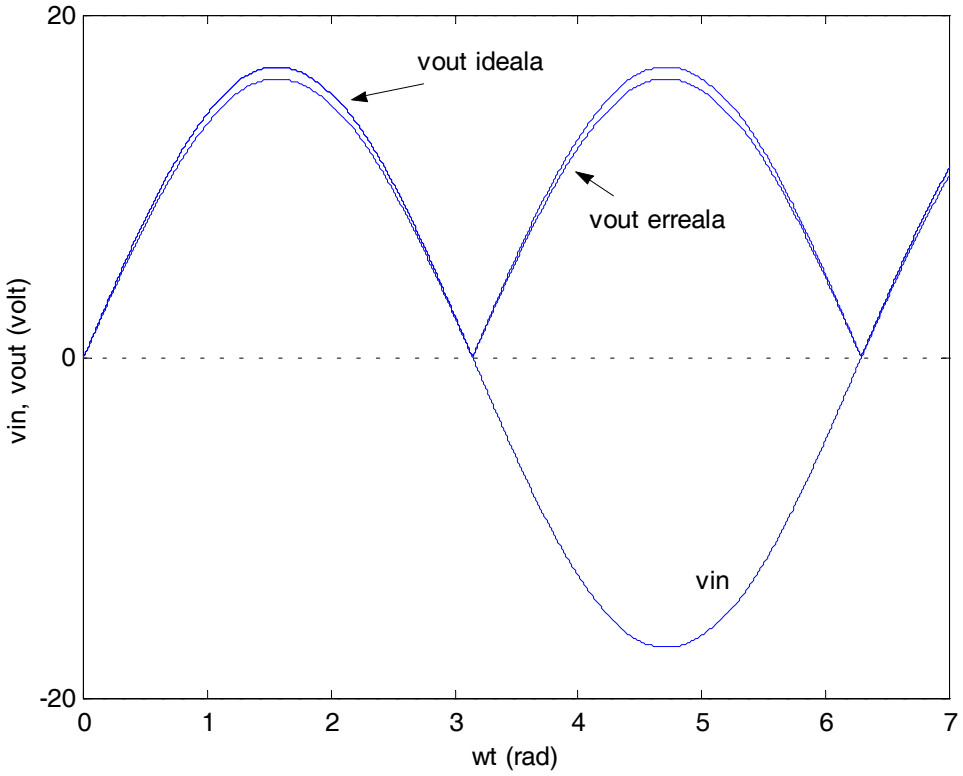
10.3 Irudia. *Uhin erdiko zuzentzailearen transferentzia-kurba*

10.1.2 UHIN OSOKO ZUZENTZAILEA



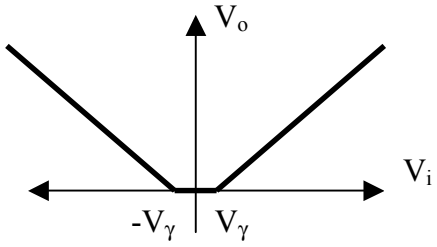
10.4 Irudia. *Uhin osoko zuzentzailea*

Uhin osoko zuzentzailea, uhin erdiko bi zuzentzailez osatzen da. Erdiziklo bakoitzean, zirkuituetako batek eroaten du, eta korronteak kargan duen noranzkoa beti berdina denez, tentsioa beti positiboa da. Sarrerako tentsioa altua ez bada, V_γ kontuan hartu behar da.



10.5 Irudia. *Uhin osoko zuzentzailearen uhin formak*

Bere transferentzi kurba, behekoa izango litzateke:

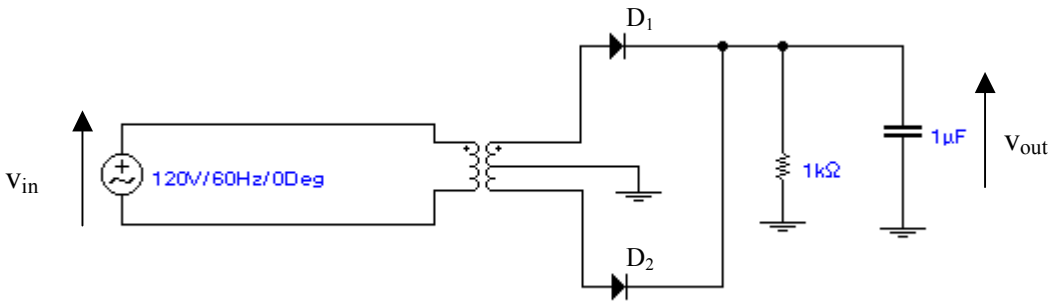


10.6 Irudia. *Uhin osoko zuzentzailearen transferentzia-kurba*

10.1.3 UHIN OSOKO ZUZENTZAILEA IRAGAZPENAREKIN

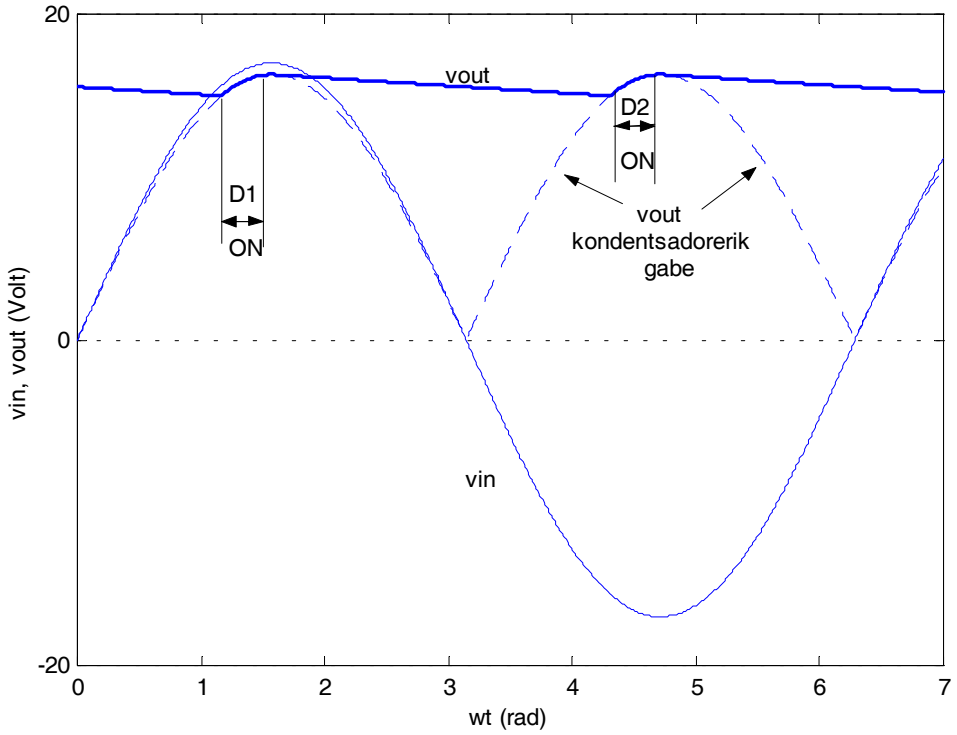
Zuzentzaileen helburua, gehienetan, ahalik eta jarraituen den seinalea lortzea izaten denez, behe-paseko iragazki bat erabiltzen da zuzenketarekin batera -osagai alternoa ahalik eta txikiena izan dadin-. Lehenengo hurbilketan, maiztasun txikiko osagaiei pasatzen uzten die iragazkiak, eta alternoak ezabatzen ditu (horiei igarotzea eragotzi, alegia).

Horretarako, 10.7 Irudiko muntaia erabil daiteke. Hango kondentsadorea irteerako seinalea konstante mantentzen saiatzen da. Hasierako erdizikloaren erdia arte, D_1 diodoak eroaten du eta kondentsadorea kargatzen du (horretarako behar adina korrontez hornituz).



10.7 Irudia. *Uhin osoko zuzentzailea iragazpenarekin*

Behin maximora iritsiz gero, berriz, kondentsadorea kargaturik dago eta, beraz, D_1 inbertsoan dago. Bitartean, kondentsadorea erresistentziatik deskargatzen da poliki-poliki (deskarga horren denbora-konstantea R·C da).



10.8 Irudia. *Iragazpena*

Bigarren erdizikloaren hasieran ere, D_2 inbertsoan egongo da, zeren eta kondentsadorean dagoen (kargari dagokion) tentsioa nahiko altua baita. Tarte horretan, $-v_i(t) < V_o = V_{kond}$ izango da.

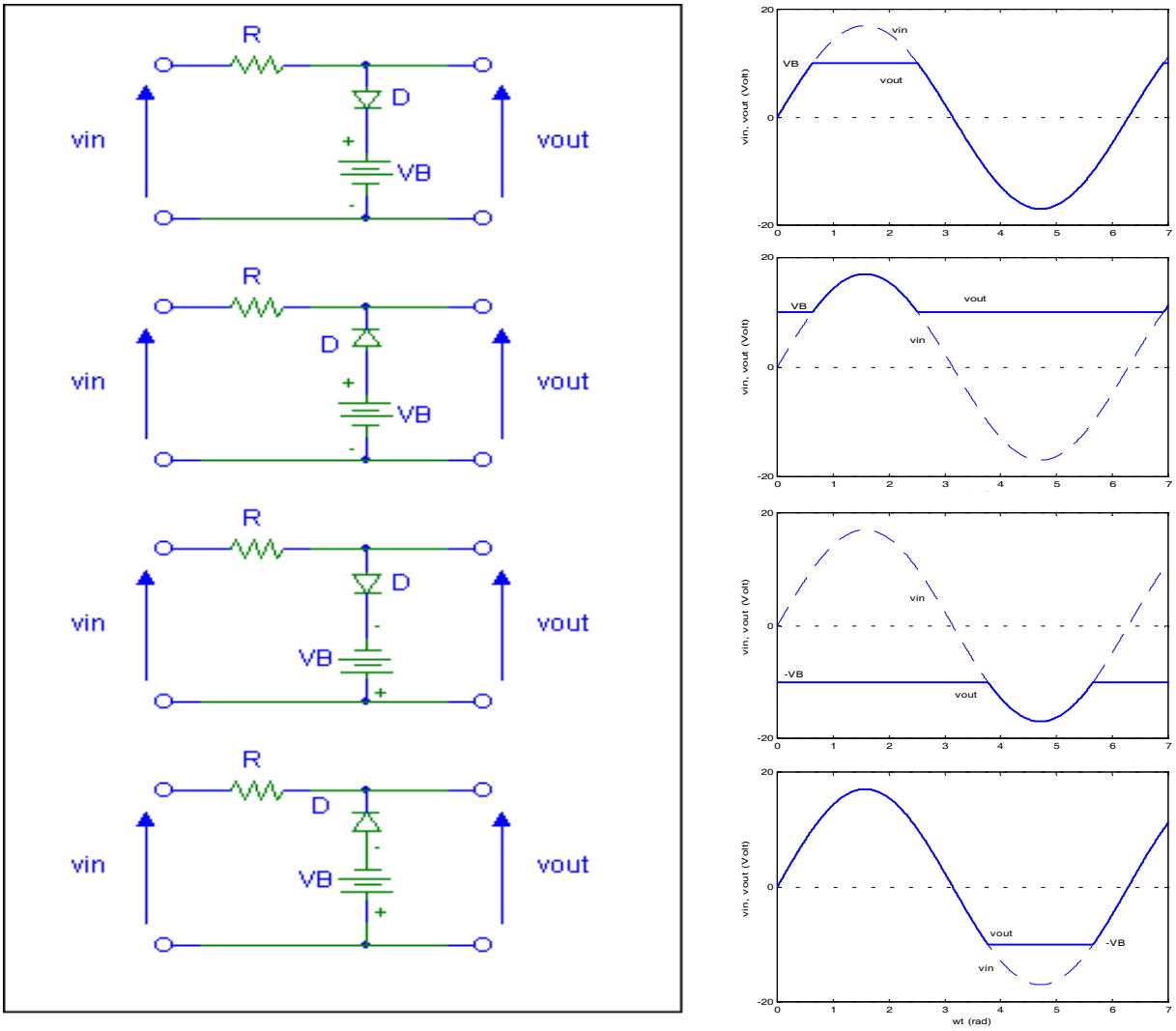
Gero, tentsio negatibo altuetan, D_2 diodoak eroango du denbora labur batez –hain zuzen ere, D_2 OFF egongo balitz $V_{kond} < -v_i(t)$ bihurtuko litzatekeen tartean-, eta kondentsadorea kargatzeko behar den korrontea hartuko da iturritik: $V_{kond} = V_o = -v_i(t)$.

Kasu horretan, diodoek periodoaren zati txiki batean lan egiten dute bakarrik, baina nahiko korronte altuak pasatzen dira. Kontuan hartu alternoko iturriak denbora laburretan ematen duela kargak (erresistentziak) kontsumitzen duen potentzia konstantea.

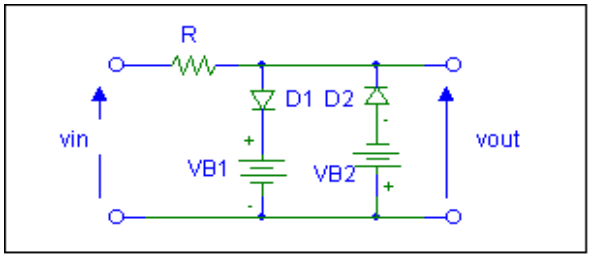
[Beste ikuspuntu batetik: pentsa dezagun kondentsadoreak kargatzeko, kargaz hornitzeko, puntako korronte altuak behar direla –batez ere kondentsadoreak handiak direnean-].

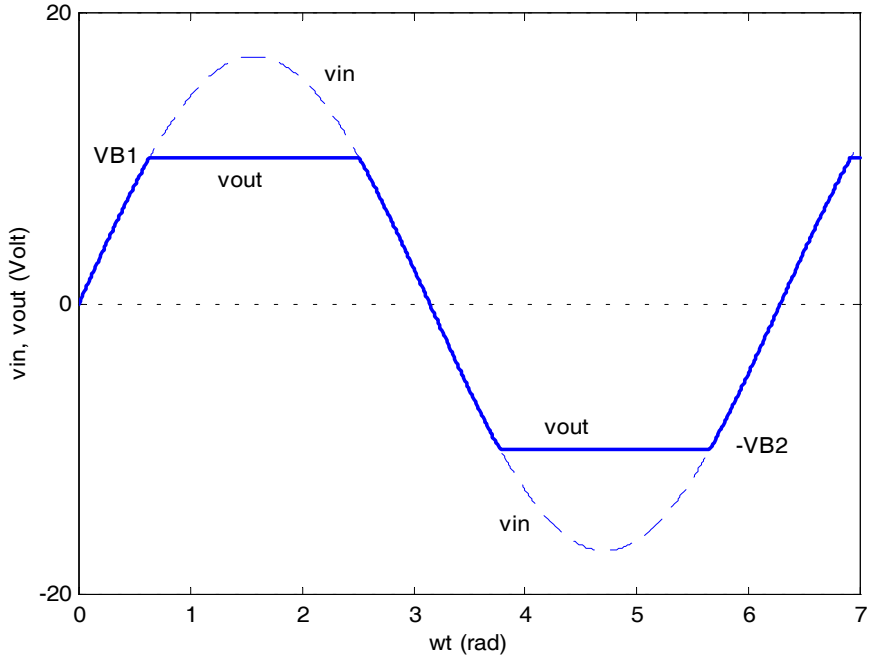
10.2 Zirkuitu ebakitzaileak

Jatorrizko seinalearen balioak ezabatzen dituzte, erreferentzi maila bat baino altuagoak (edo baxuagoak) badira. 10.9 eta 10.10 irudietan zenbait adibide agertzen dira.



10.9 Irudia. *Ohiko zirkuitu ebakitzaile batzuk*





10.10 Irudia. *Zirkuitu ebakitzaile bikoitza eta uhin-formak*

[Zuzentzaileak ere, nolabait, zirkuitu ebakitzaileak dira: atariko tentsioa baino handiagoak direnei bakarrik uzten diete pasatzen]

10.3 Beste diodo erdieroale batzuk: Schottky eta LED diodoak, zelula fotovoltaikoa eta fotodiodoa

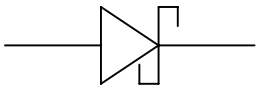
Siliziozko diodo zuzentzaileez eta Zenerrez gain, Schottky, LED, fotodiodoa eta zelula fotovoltaikoak dira diodo erabilienak.

10.3.1 SCHOTTKY DIODOAK

PN junturaren oinarria potentzial ezberdina eta eramaile askeak zituzten bi eskualde elkartzean zetzan. Horretarako, P eta N eskualde erdieroaleak erabiltzen ziren.

Junturak gauzatzeko beste aukera batzuk lagin metalikoak dira. Lagin metaliko bat eta erdieroale bat elkartzen baditugu, eramaile askeak eta potentzial ezberdinak dituzten bi lagin ditugu.

Beraz, pn junturaren antzeko egitura dugu, non, normalean, metalak p eskualdearen antzeko papera betetzen baitu. Schottky diodoa ager dadin, erdieroaleak eta metalak zenbait baldintza bete behar dituzte (azken geruzetako elektroien energia mailen ezaugarrien eta dopaketaren aldetik).



10.11 Irudia. *Schottky diodoaren zirkuitu-ikurra*

Ohiko pn juntura baten portaerarekin alderatuz gero, beren atariko/ukondoko tentsioa baxuagoa da. Askotan, Schottky diodoak nahi gabe, berez, agertzen zaizkigu, kontaktu ohmikoak sortzen saiatzen garenean.

10.3.2 FOTODIODOAK ETA ZELULA FOTOVOLTAIKOAK

FOTOSORRERA POLARIZAZIORIK GABE

Argiztaturiko pn junturako eskualde batean, argiak sortzen dituen urrienek hiru aukera izaten dituzte:

- Eskualde horretako bolumenean birkonbinatzea
- Eskualde horretako kontaktu metalikoan birkonbinatzea
- Junturaraino heltzea. Kasu horretan, eskualde dipolarrean dugun eremu elektrikoak ugarien diren eskualderantz pasarazten ditu eramaileak.

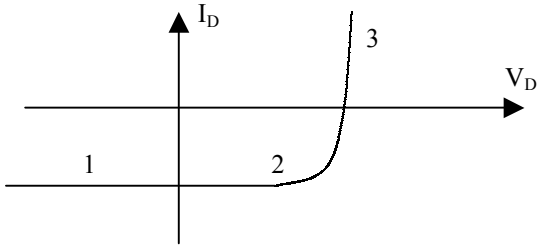
Azken kasu honetan, beraz, fotosorrerak katodotik anodora (korronte inbertsoaren noranzkoan) doan korronte bat (fotokorrontea, I_{FOTO}) eragiten du. Ohiko zeinuak erabiliz, esango genuke fotokorrontea *korronte negatiboa* dela. Fotokorronte hori diodoaren geometriaren, material erdieroalearen ezaugarrien eta iristen zaion irradiazioaren menpe dago.

FOTOSORRERA POLARIZAZIOAREKIN

Argiztapenaren eta polarizazioaren analisian, gainezarpena aplika daiteke –problema osoa ebaztean ikus litekeenez- eta, beraz, argiztaturiko diodo batean zehar pasatzen den korronte osoaren adierazpena honako hau izango litzateke:

$$I = I_{Shockley} + I_{foto} = I_{Sat} \cdot \left(e^{V/V_T} - 1 \right) - \left| I_{foto} \right|$$

Grafikoki:

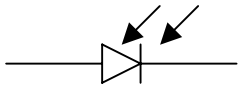


10.12 Irudia. *Argiztaturiko diodo baten I-V ezaugarria*

<u>FOTODIODOA:</u>

Lehenengo eskualdean lan egiteko bereziki diseinatutako dispositiboak fotodiodo du izena eta zirkuitura bidaltzen duen korrontea; jasotzen duen argiaren potentziarekiko proportzionala da. Horrenbesteez, argia detektatzeko edota neurtzeko erabiltzen da.

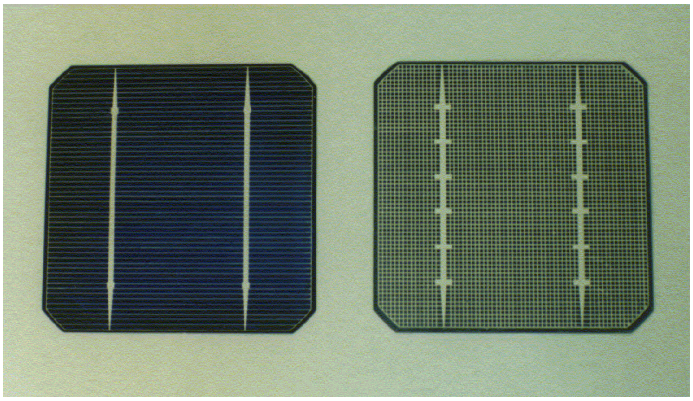
Lehenengo eskualdean lan egin dezan, inbertsoan polarizatu behar dugu beti.



10.13 Irudia. *Fotodiodoaren zikuitu-ikurra*

ZELULA FOTOVOLTAIKOA:

Bigarren eskualdean, diodoak potentzia ematen dio zirkuituari (V tentsioak erresistentzia batean eragin beharko lukeen korrontearen kontrako noranzkoan doan korrontea ematen du). Potentzia hori ahalik eta handiena izan dadin –dispositiboaren efizientzia optimizatzeko- behar diren egokipenak dituen dispositiboa eguzki-zelula fotovoltaikoa da.



10.14. Irudia. *Zelula fotovoltaikoaren argiztaturiko azala (ezkerrean) eta atzeko metalizazioa (eskuinean)*

10.15 Irudia. *Aplikazio fotovoltaikoak*

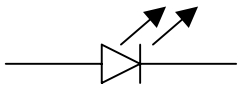
10.3.3 LIGHT EMITTING DIODES (LEDS)

FOTOBIRKONBINAKETA

Birkonbinaketa gertatzen denean, energia askatzen da. Energia hori irradiazio termikoaz irradiatu egiten da normalean, baina, zenbait kasutan, irradiazioaren uhin-luzera tarte ikusgaian kokatzen da (irradiazioa, eskualdea osatzen duen materialaren ezaugarrien arabera, ikusgai edo ikusezina izango da).

Fenomenoa nabaria izateko, eskualde horretako birkonbinaketa areagotu behar dugu. Horretarako, pn junturak erabiltzen dira: junturak zuzenean polarizatzeak ematen ditu birkonbinaketa elikatuko duten eramaileak.

Argia, soilik LEDa ON egoeran badago lortuko dugu. Argi hori kanpotik ikus dadin, dispositiboaren kapsula gardena da.

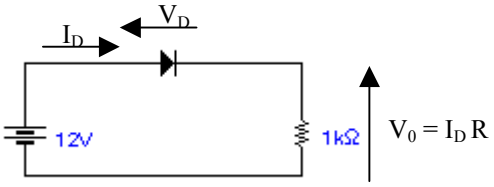


10.16 Irudia. *LEDaren zikuitu-ikurra*

DIODOARI BURUZKO

ARIKETAK

DIODOAK DITUZTEN ZIRKUITUAK EBAZTEA: SEINALE JARRAITUAK



1.- Soluzio zehatza bilatzeko:
Datua: I_{sat} edo I-V ezaugarria:
(normalean, diodo bakar bat dugunean erabiliko dugu)

A) Shockleyren ekuazioa(k) planteatu
B) Zirkuituaren ekuazioak planteatu (diodoa kutxa beltz bat izango balitz bezala) (karga-zuzena)
C) Ekuazio-sistema ebatzi:
   - Grafikoki (A eta B ataletan lortutako kurben bidegurutzeko puntua)
   - Iteratuz

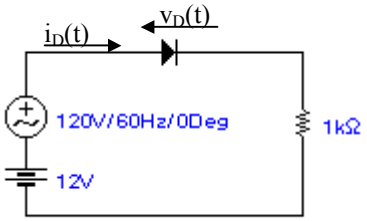
2.- Gutxi gorabeherako soluzioa bilatzeko:
Datua: erabili beharreko eredu linealak (ON eta OFF egoeretan):
(Diodo bakar bat dugunean ere balio digu baina, normalean, bi diodo edo gehiago ditugunean erabiliko dugu)

A) Diodoen egoera posible guztiak kontuan hartu → konbinaketak izendatu
B) Aukera bakoitzeko:
   - Diodoak beren zirkuitu baliokideaz ordeztu(egoera hipotetikoaren arabera)
     OFF → Korrontea = 0 (eta tentsioa, negatiboa*)
     ON → Tentsioa = 0-0,7 (eta korrontea, positiboa*)
   - Lortutako zirkuitua ebatzi
   - Ustezko egoerak betetzen ote diren egiaztatu:
     OFF → * Tentsioa negatiboa al da (korrontea = 0)?
     ON → * Korrontea positiboa al da (tentsioa = 0-0,7)?
   - Ondorioz, aukera horiek baliagarriak edo ezinezkoak diren erabaki

(Tarte bakoitzean, aukera bakar bat izango da baliagarria; beraz, aukeren azterketa asko erraz daiteke aldez aurretik *egoera posibleak* -bideragarritasunaren arabera- ordenatzen baditugu)

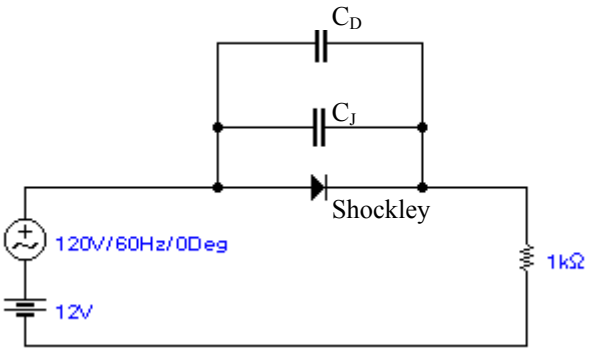
DIODOAK DITUZTEN ZIRKUITUAK EBAZTEA: SEINALE EZ JARRAITUAK (ALTERNOAK GEHI JARRAITUAK)

Orokorrean ezin da gainezarpenaren printzipioa erabili (hori bakarrik zirkuitu linealetan aplika daiteke eta diodoa ez da dispositibo lineala).



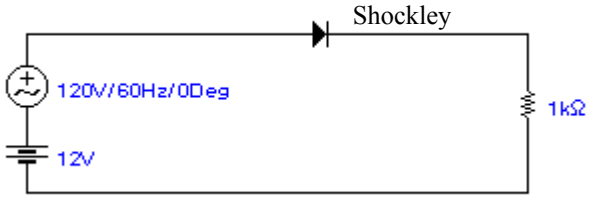
1.- Maiztasuna oso altua denean (f > 1 MHz):
Ez dakigu nola ebazten den.

2.- Maiztasuna ertaina denean (100 Hz < f < 1 MHz):
Kargaren bidezko kontrol eredu osoa erabili behar da.



Zuzenean → C_D
Inbertsoan → C_J

3.- Maiztasuna oso baxua denean (f < 100 Hz):
Karga-kontrol ereduan, kondentsadoreak ez ditugu aintzat hartu.

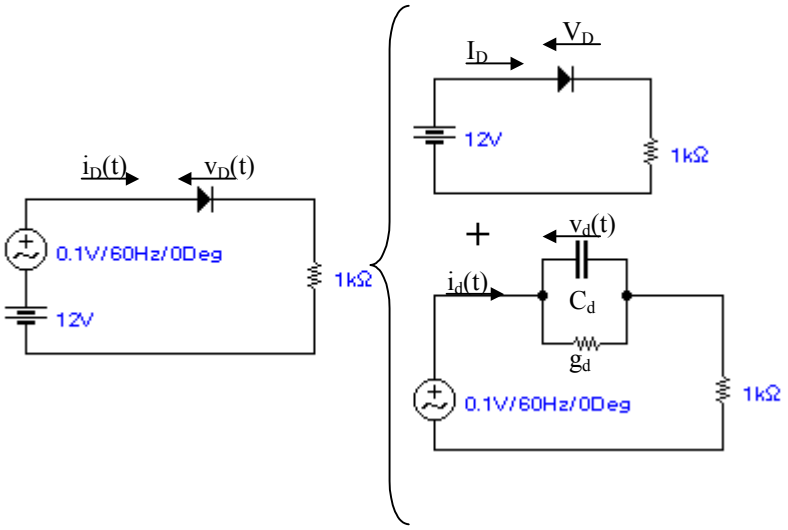


DIODOAK DITUZTEN ZIRKUITUAK EBAZTEA: SEINALE EZ JARRAITUAK (ALTERNOAK GEHI JARRAITUAK)
$V_D >> V_T$ ETA $v_d(t) << V_T$ KASU BEREZIA: SEINALE TXIKIA

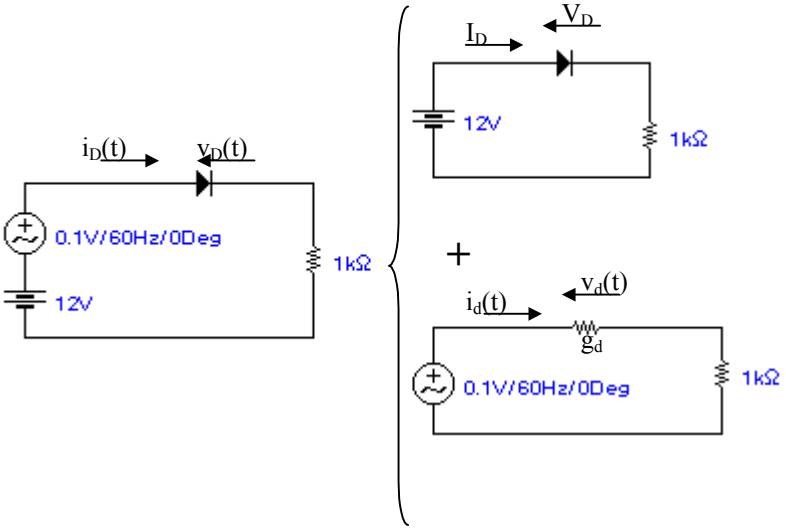
Gainezarpena erabil daiteke (azkenean, alternoaren erantzuna bakartu eta linealdu delako).

1.- Maiztasuna oso altua denean (f > 1 MHz):
Ez dakigu nola ebazten den.

2.- Maiztasuna ertaina denean (100 Hz < f < 1 MHz):
Karga-kontrol eredutik ondorioztatzen zenez:



3.- Maiztasuna oso baxua denean (f < 100 Hz):
Karga-kontrol ereduan, kondentsadoreak ez ditugu aintzat hartzen.



(V_D >> 25mV eta $|v_d|$ << 25 mV ezberdintasunak egiaztatu beharko genituzke)

1. ARIKETA: juntura latz lau bati dagokion hustutako eskualdea

Germaniozko pn juntura latz batek honako ezpurutasun-kontzentrazio hauek ditu: $N_A = 5\cdot10^{14}$ cm^{-3}; $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}.

a) Kalkulatu potentzial termodinamikoa (Φ_T) giro-tenperaturan gaudela jakinda (tenperatura horretan, $n_{iGE}^2 = 6\cdot10^{26}$ cm^{-6}).

b) V = 0 V bada, kalkulatu hustutako eskualdean agertzen den eremuaren balio maximoa eta eskualdearen zabalera ($\in_{Ge} = 6.3$; $\in_0 = 8.85\cdot10^{-14}$ F/cm).

c) Errepikatu aurreko atalak, tentsioa V = -20 V bada.

2. ARIKETA: korronteak eta korronte-dentsitateak

Siliziozko ($n_i = 1.5\cdot10^{10}$ cm^{-3}) diodo luze batean, $N_A = 10^{18}$ eta $N_D = 10^{14}$ cm^{-3} dira. Kalkulatu V = 0.2 V, V = 0.4 V, V = 0.6 V, V = 0.7 V, V = -0.5 V eta V = -10 V tentsioei dagozkien korronteak.

Datuak: KT/q = 25 mV, $\in_{Si} = \in_{erlatiboa\ Si}\in_0 =$ 650q F/um = 104pF/m= 1.04 pF/cm (edo $\in_{rSi} = 11.8$), $\Phi_T = 0.67$ V, $D_n = 6$ cm^2/s, $D_p = 15$ cm^2/s, $\tau_p = 50$ µs, $\tau_n = 50$ µs eta Azalera = 0.5 cm^2

3. ARIKETA: eramaileen soberakinen profilak eta korronte-dentsitateak (katodo luzea eta anodo laburra dituen diodoa)

V tentsioaz ($0 < V < \Phi_T$) polarizatutako diodo batean agertzen diren eramaileen eta korronte-dentsitateen profilak marraztu.

Datuak: Katodoan, $N_D = 10^{14}$ cm^{-3}, $L_p = 275$ µm eta $w_k = 800$ µm.

Anodoan, $N_A = 10^{18}$ cm^{-3}, $L_n = 15$ µm eta $w_a = 5$ µm.

4. ARIKETA: uniformeki argiztaturiko diodoa

Pn junturako diodo bat dugu. Bai anodoa bai katodoa laburrak dira (barreiapeneko luzerarekin alderatuz) eta, beraz, bolumeneko birkonbinaketa aintzat ez hartzeko modukoa da. Kontaktuak, berriz, ohmikoak dira. Bolumen osoa uniformeki argiztatzen dugu, eta G_L pare/cm^3/s sortu.

Diodoa zirkuitulaburtzen dugu (V = 0 V, *short circuit* egoera behartuz).

a) Marraztu urrienen profilak
b) Kalkulatu birkonbinaketa osoa
c) Kalkulatu argiak guztira eragiten duen sorrera
d) Kalkulatu kanporantz irtengo den korrontea (I_{sc})

Argia mantenduz V tentsioa aplikatzen badugu (eta argirik gabe Shockleyren ekuazioa betetzen dela onartuz):

e) Marraztu urrienen profila

f) Marraztu eta kalkulatu tentsio/korronte-ezaugarria

Orain, diodoa zirkuitu irekian uzten badugu (*open circuit*):

g) Kalkulatu V_{oc} (zirkuitu irekiko tentsioa)

Jarraian, diodoaren kontaktuen artean, erresistentzia bat jartzen dugu:

h) Kalkulatu haren balioa, oraingo korrontearen balio absolutua $I_{sc}/2$ bada

5. ARIKETA: diodo luze baten analisia

Pn juntura latzeko diodo bat dugu. Karga espazialeko eskualdean ez dago ez sorrerarik ez eta birkonbinaketarik ere.

Datuak: Anodoan: $N_A = 6.25 \cdot 10^{16}$ cm^{-3}, $D_n = 50$ cm^2/s, $\tau_n = 2\mu$s

Katodoan: $N_D = 6.25 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}, $D_p = 50$ cm^2/s, $\tau_p = 2\mu$s

$n_i = 2.5 \cdot 10^{13}$ cm^{-3}

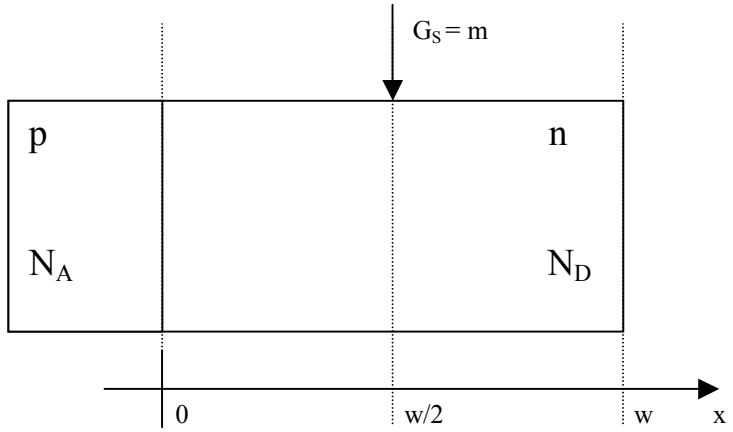
a) Hustutako eskualdea zeharkatzen duen korrontean, zenbat da (gutxi gorabehera) elektroien korrontearen garrantzia (%koetan)?

b) Diodoaren sekzioa A = 0.01 cm^2 bada, zenbat da asetasuneko korrontea?

6. ARIKETA: katodoaren erdiko gainazalean argiztatutako diodoa

Beheko irudian agertzen den pn juntura laser batez argiztatzen dugu katodoaren erdiko gainazalean (x = w/2), eta $m = 1.25 \cdot 10^{16}$ pare sortzen ditugu (zentimetro koadroko eta segundo bakoitzeko).

Egoera geldikorrean gaude eta bolumeneko birkonbinaketa aintzat ez hartzeko modukoa da (hau da: erdibizitza oso altua da = zabalerak oso laburrak dira barreiapeneko luzerarekin alderatuz gero). Kontaktuak ohmikoak dira.



Juntura zirkuitulaburrean badago (V = 0).

a) Marraztu urrienen soberakinen profila. Kalkulatu x = w/2 gainazalean dagoen soberakina, p'(W/2) (U = 0 hartu).

b) Kalkulatu korronte-dentsitate osoa (J_L). Zein da haren noranzkoa?

c) Zenbat da n eskualdean benetan dugun birkonbinaketa? Ontzat eman al daiteke U~0 hurbilketa?

Laser-izpia hustutako eskualderantz daramagu:

d) Marraztu eta kalkulatu eramaile-profilak eta korronte-dentsitateak

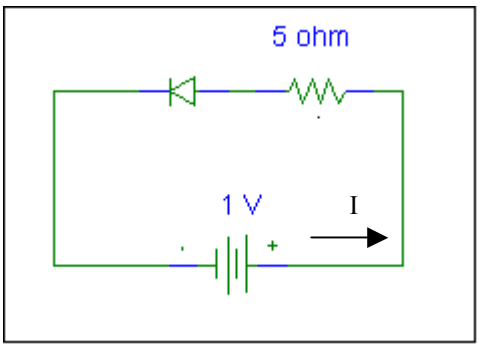
e) Zenbat da, aplikatu beharko genukeen tentsioa J = 0 korrontea lortzeko?

Datuak: $N_A >> N_D$; $n_i = 1.5 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}; $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C; KT/q = 25 mV.

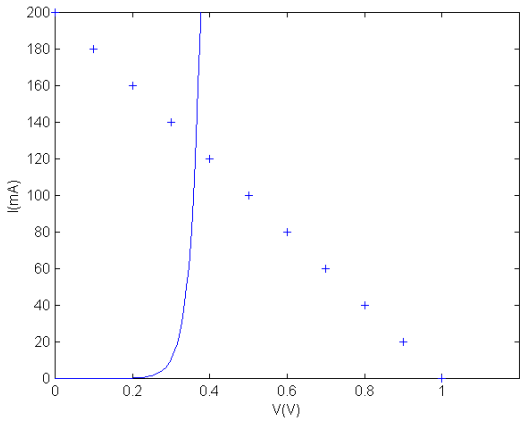
Katodoan, $N_D = 10^{15}$ cm^{-3}; $L_p = 200$ µm; $\tau_p = 15$ µs; w = 100 µm.

7. ARIKETA: diodoak dituzten zirkuituak zehatz-mehatz ebaztea

a) Irudian agertzen den zirkuituan, kalkulatu diodoan erortzen den tentsioa eta zirkuitua zeharkatzen duen korrontea. Datua: I-V ezaugarria (2. Irudia).



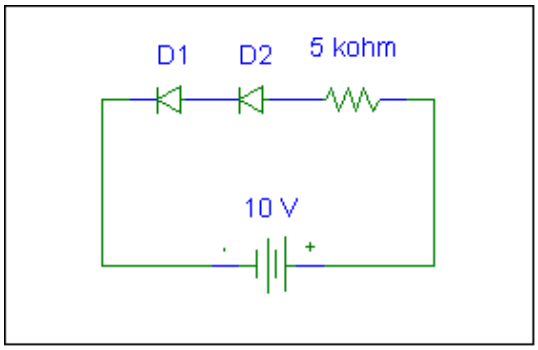
1. Irudia. Zirkuitua



2. Irudia. I-V kurba

b) Aurreko zirkuituan, ezaugarria izan beharrean I_{sat} = 100 nA (hau da, 10^{-7} A) datua ematen badigute, zenbat da V_D? Eta I?

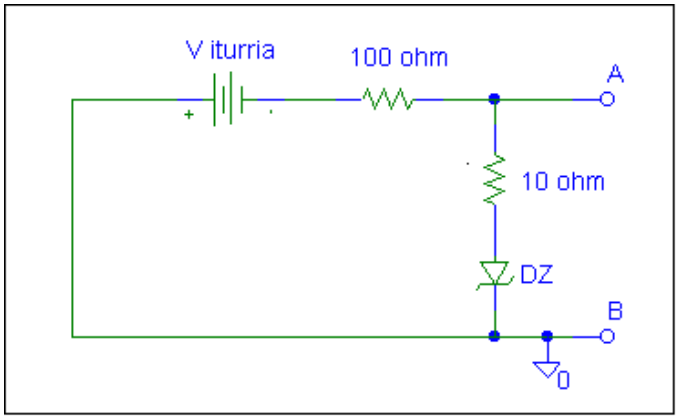
c) 3.n Irudiko zirkuituan, I_{sat1} = 10 μA eta I_{sat2} = 20 μA dira. Kalkulatu korrontea eta tentsioak.



3. Irudia. Azken ataleko zirkuitua

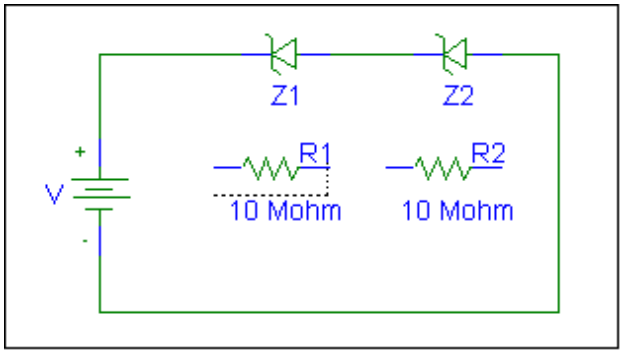
8. ARIKETA: tentsioa zener diodoen bidez mugatzea

$V_{iturria}$ tentsioa 0-24 volt tartean badabil, zenbat da A puntuan (lurrarekiko) dagoen tentsioa. Datua: V_Z = 8 V.



9. ARIKETA: zener diodoak seriean

Irudian agertzen diren bi diodoen asetasuneko korronteak I_{sat1} = 1 μA eta I_{sat2} = 2 μA dira. Beren haustura-tentsioak berdinak dira: $V_{Z1} = V_{Z2}$ = 100 V.



Kalkulatu:

a) Diodo bakoitzaren tentsioa eta korrontea, V = 9 V denean.

b) Diodo bakoitzaren tentsioa eta korrontea, V = 110 V denean.

c) Eta paraleloan bi erresistentzia jartzen badizkiegu ($R_1 = R_2 = 10\ M\Omega$)?

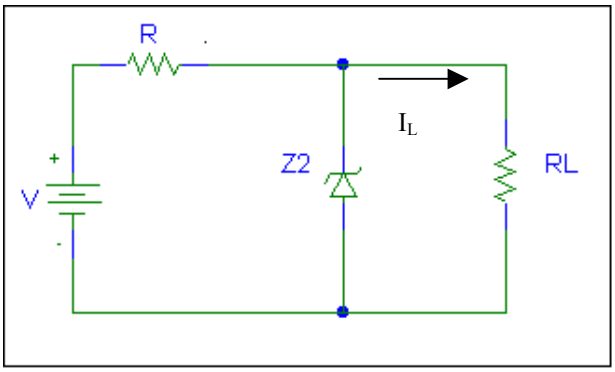
10. ARIKETA: zener diodoen ohiko aplikazioa eta mugak

Oldarrezko diodo batek 50 voltetan finkatzen du tentsioa hura zeharkatzen duen (alderantzizko) korrontea 5 mA eta 40 mA tartean badago.

a) Kalkulatu R, baldin eta I_L korrontea 0 eta I_{max} artean ($0<I_L<I_{max}$) dagoenean tentsioa 50 voltetan egotea nahi badugu. Elikadura-tentsioa $V_{iturria} = 200$ V.

b) Zenbat balio du I_{max} balioak?

c) R a) atalekoa bada eta $I_L = 25$ mA bada, zein dira $V_{iturria}$ tentsioaren muturreko balio posibleak (zenerrak "egokiro" lan egiteko)?

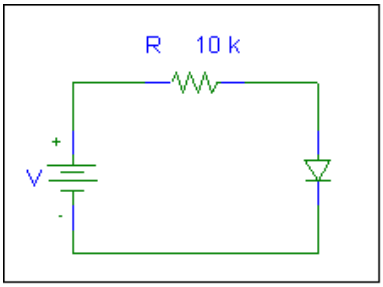


11. ARIKETA: diodoaren ereduak (zuzeneko polarizaziopean)

Kalkulatu honako zirkuitu honetako I_D:

a) $V_{elikadura} = 10$ volt denean

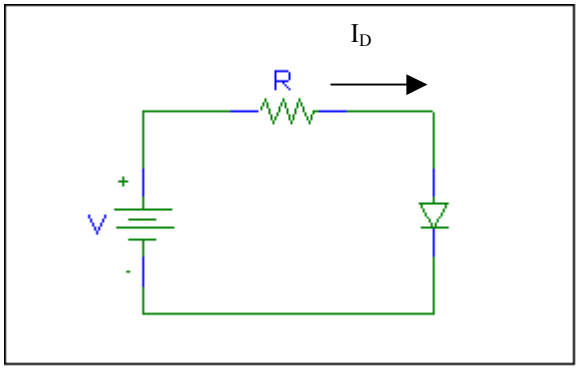
b) $V_{elikadura} = 1$ volt denean



Kasu bakoitzean, honako hiru ereduak erabili: 1.- Diodo ideala; 2.- Tentsio konstantea ($V_\gamma = 0.5$ V); 3.- Bateria + Erresistentzia eredua ($V_\gamma = 0.5$ V; $R_f = 200\ \Omega$)

12. ARIKETA: zirkuitu baten ebazpena iteratzea

Beheko zirkuituan, I_D kalkulatu:



$V_{elikadura}$ = 15 volt; I_{sat} = 100 nA; R = 100 Ω.

($R_{eskualde\ neutroak}$ ematen ez digutenez, aintzat ez hartzeko modukoa dela onartuko dugu).

13. ARIKETA: ezaugarri-kurba ez ideala deduzitzea

Batzuetan, $I = I_0 \cdot [\exp(V/V_T)-1]$ ekuazioaz baino, beste eredu batez doitu egiten da diodoaren I-V kurba erreala.

Diodo erreal baten bi datu honako hauek badira: I(0.6V) = 0.25 mA; I (0.85V) = 100 mA

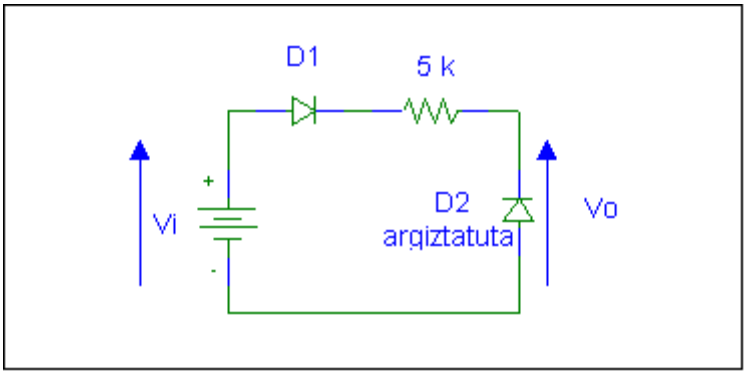
a) Kalkulatu $I = I_0 \cdot [\exp(V/mV_T)-1]$ ereduko m eta I_0.

b) Kalkulatu eredu lineala lortzeko behar diren V_γ eta R_f.

DATUAK: $KT/q = V_T = 25$ mV

14. ARIKETA: argiztaturiko diodo bat duen zirkutua

Irudian agertzen diren bi diodoak berdinak dira, salbuespen bakarrarekin: D_1 diodoaren sekzioa (sekzioaren azalera) D_2 diodoaren azaleraren doblea da. Gainera, D_2 diodoaren katodoaren erdiko gainazala ($x = w_k/2$ puntua, hain zuzen ere) argi indartsu eta estu batez argiztatzen da, eta gainazal horretan segundo bakoitzeko $G_s = 2 \cdot 10^{16}$ pare/cm^2 sortzen dira argiak sortzen ditu. Kontaktuak ohmikoak dira eta egoera geldikorrean gaude.



Kalkulatu:

a) $V_o = V_o (V_i)$, V_i 15 volt – 30 volt tartean badago (marraztu kurba).

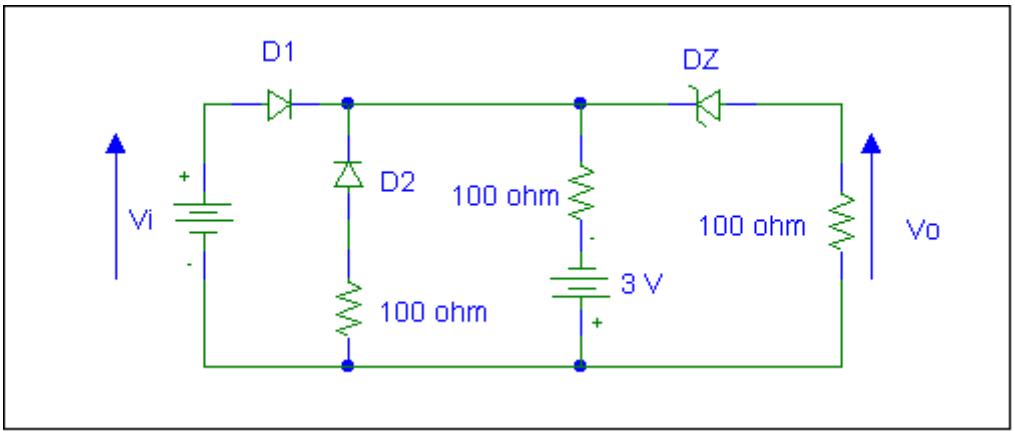
b) Diodoetan agertzen den tentsioa.

c) Eramaileen soberakinen profilak $V_i = 20$ volt denean

DATUAK: $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; $n_i = 1{,}5e10$ cm^{-3}, $A_1 = 0{,}1$ cm^2; $A_2 = 2 \cdot A_1 = 0{,}2$ cm^2; $\tau_p = 15$ µs; $N_A >> N_D = 1E15$ cm^{-3}, $L_p = 200$ µm. $W_{katodo} = 100$ µm .

15. ARIKETA: transferentzia-kurbak zener diodoekin

Irudian ikusten dugun zirkuituan, diodoak idealak dira eta Zener diodoaren haustura $V_Z = 8$ V tentsioan gertatzen da. Kalkulatu eta marraztu transferentzia-kurba V_i tentsioa -100 volt – 100 volt tartean badago.



16. ARIKETA: korronte handiek eskualde neutroetan eragiten duten tentsioa

10^{-4} cm^2-ko azalera duen pn junturako diodo baten ezaugarriak honako hauek dira:

	Katodoa	Anodoa
Ezpurutasun-kontzentrazioa:	$N_D = 10^{19}$ cm^{-3}	$N_A = 2 \cdot 10^{14}$ cm^{-3}
Eskualde neutroen luzera:	$w_n = 50$ µm	$w_p = 20$ µm << L_n
Eskualde neutroen erresistibitatea:	$\rho_n = 10^{-2}$ Ω·cm	$\rho_p = 50$ Ω·cm
		$\mu_n = 1400$ $cm^2/(V \cdot s)$

Kalkulatu zer tentsio (V_{Osoa}) aplikatu den, korrontea 0.65 mA-koa bada.

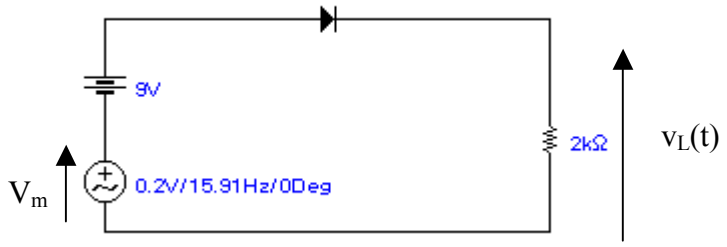
Azaldu tentsio hori nola banatzen den eskualde dipolarraren (V_j) eta eskualde neutroen (V_{anodo} eta V_{katodo}) artean.

17. ARIKETA: erregimen dinamikoa eta seinale txikia

Irudian agertzen den zirkuituan $V_{JARRAITUA}$ = 9 V; $V_m = 0.2 \cdot \sin(100t)$ V eta $R_L = 2$ kΩ.

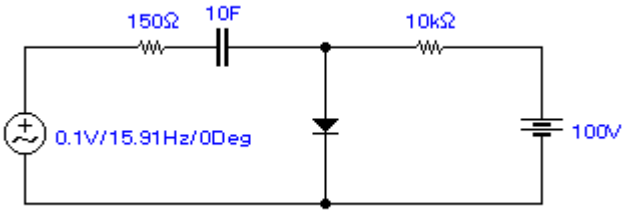
Diodoaren seinale handiko eredu linealaren ezaugarriak honako hauek dira: atariko tentsioa $V_\gamma = 0.6$ V eta R_f (f = forward = zuzenekoa) = 10 Ω.

Kalkulatu kargan agertzen den tentsioa $v_L(t)$.



18. ARIKETA: erregimen dinamikoa eta seinale txikia

Irudian agertzen den zirkuituko *pn junturako diodoaren* asetasuneko korrontea (I_{sat}) eta eskualde neutroek eta kontaktuek batera agertzen duten erresistentzia (R_s) badakizkigu: I_{sat} = 1 nA; R_s = 5 Ω. Gainera, kommutazio-denbora neurtuz, eskualde neutroetako erdibizitza antzeman da: τ = 1 µs.



Kalkulatu:

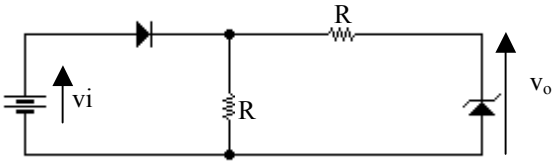
a) $v_i = 0$ denean, diodoa zeharkatzen duen korrontea (I_D).

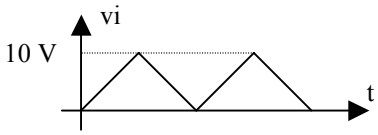
b) Aurreko egoeran diodoan dugun tentsioa (V_D).

c) $v_i = 0.1 \sin(100t)$ denean, diodoan agertzen den tentsioa (osoa).

19. ARIKETA: transferentzia-kurbak

Beheko zirkuituan, diodoak idealak dira ($V_Z = 5$ V).





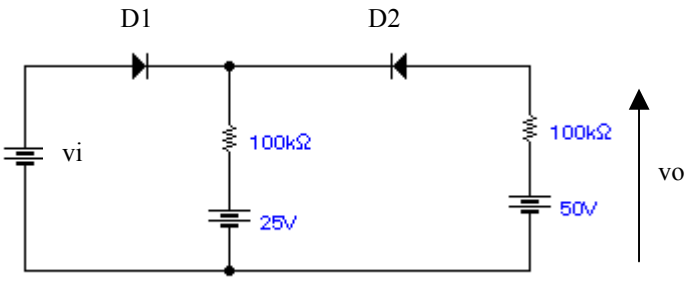
a) Kalkulatu eta marraztu transferentzia-kurba.

b) Marraztu $v_o(t)$, vi(t) ezkerreko irudikoa denean.

20. ARIKETA: transferentzia-kurbak

Beheko zirkuituan, v_i tentsioak 0 – 100 V tarteko balioak izan ditzake.

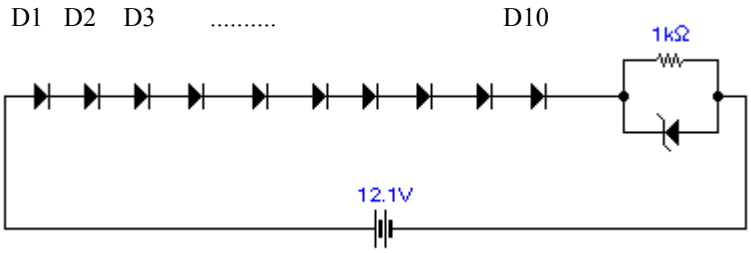
Irudikatu transferentzia-kurba (diodoak idealak dira).



21. ARIKETA: diodoen konbinaketak zehatz-mehatz ebaztea

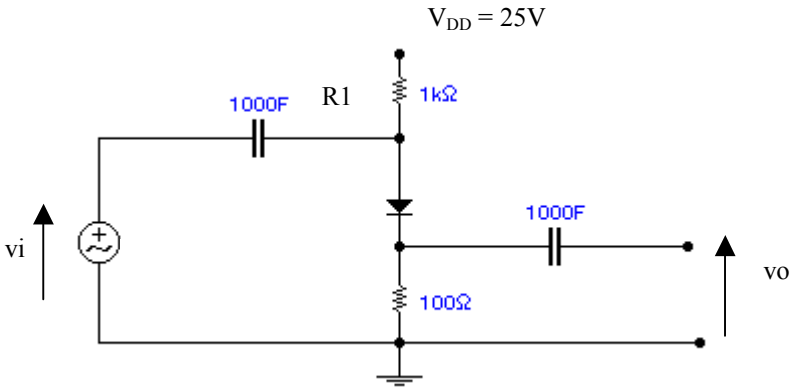
Beheko zirkuituko diodo zuzentzaileak berdin-berdinak dira, eta haien asetasuneko korrontea I_{sat} = 1 μA da. Zener diodoaren ezaugarriei dagokienez: V_Z = 12 V; $I_{sat\ zener}$ = 0.72 μA parametroak badakizkigu.

Erresistentziatik igarotzen den korrontea 1 μA bada, zenbat da R?



22. ARIKETA: seinale txikia

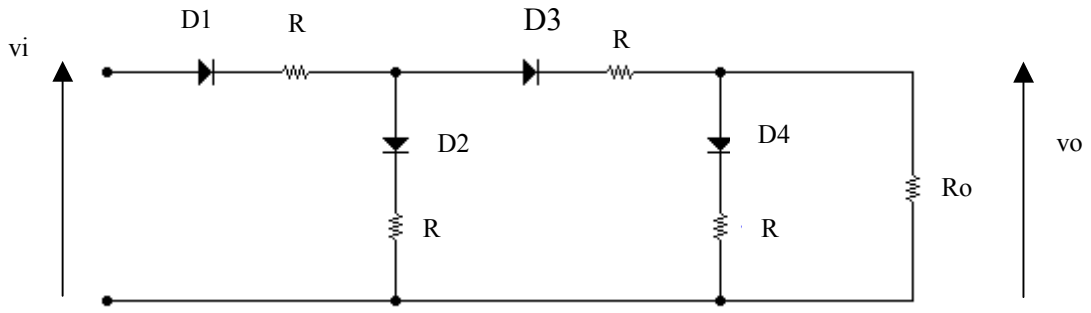
Kalkulatu R_1 erresistentziaren balioa, irteerako seinalearen anplitudea sarrerakoaren erdia izateko (maiztasun baxuetan).



Diodoa (jarraituan) idealtzat jo.

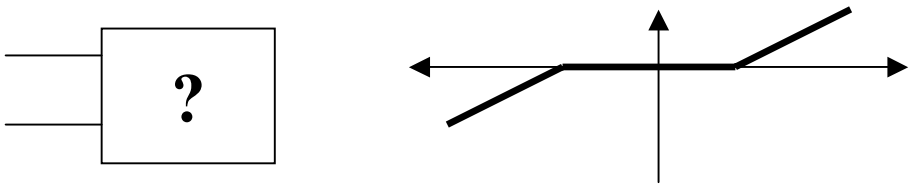
23. ARIKETA: transferentzia-kurba

Datuak. V_γ = 0.4 V eta R<<Ro.



24. ARIKETA: transferentzia-kurba

Diseinatu beheko irudian agertzen den ezaugarria aurkeztuko duen zirkuitua.

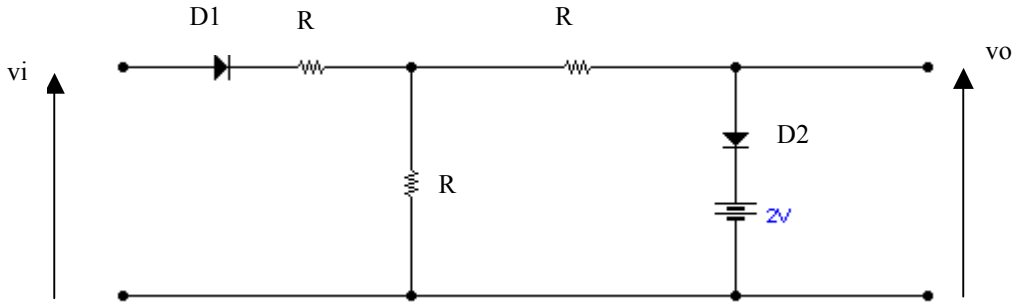


25. ARIKETA: transferentzia-kurbak

a) Kalkulatu beheko zirkuituko transferentzia-kurba, diodoak idealak badira.

b) Eta diodoen ukondoko tentsioa 0.7 bada, zer gertatzen da?

c) Diodoak idealak direnean, nola alda genezake zirkuitua (eskuineko adarra) irteerako tentsioak 2 voltetan mugaturik jarrai dezan. Hau da, zein da eskuineko adarraren zirkuitu baliokide bat (kasu honetan).

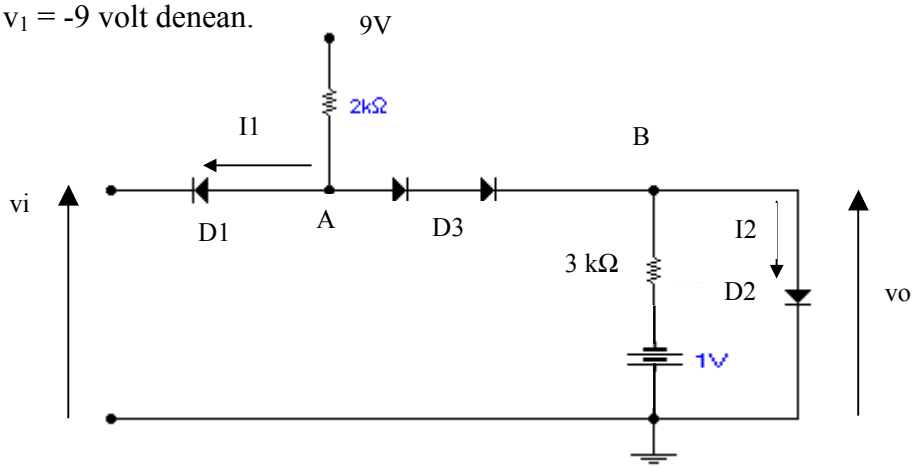


26. ARIKETA: transferentzia-kurbak

Irudiko zirkuituan, diodoak idealak dira. Kalkulatu I_1, I_2 eta v_o:

a) $v_1 = 0.2$ volt denean.

b) $v_1 = -9$ volt denean.



27. ARIKETA: diodoak seriean eta paraleloan konbinatzea

Baditugu bi diodo berdintsu, D_1 eta D_2. Haien arteko ezberdintasun fisiko bakarra azaleran datza: D_2 diodoaren sekzioa D_1 diodoarena bider lau da ($A_{D2} = 4 \cdot A_{D1}$).

Dakigunez, D_1 diodoa zeharkatzen duen korrontea $I_{D1} = 12$ mA denean bere tentsioa $V_{D1} = 0.62$ volt da.

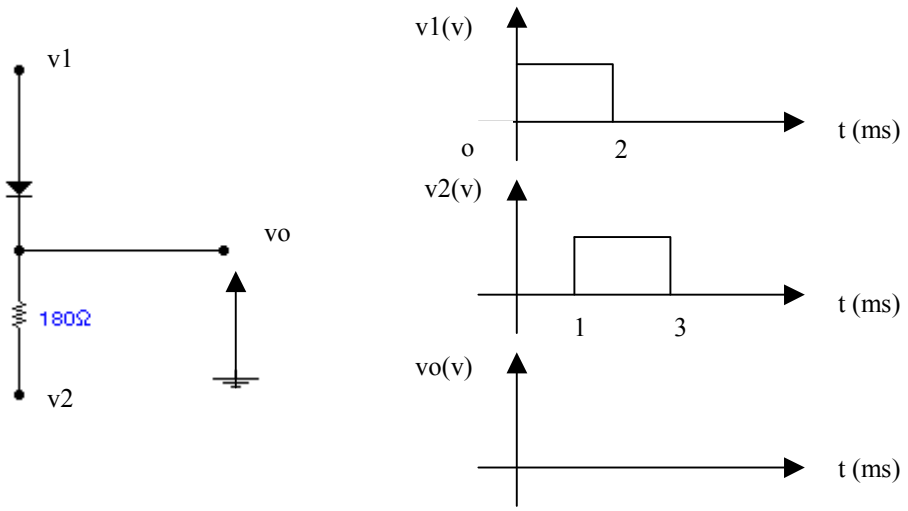
a) D_1 eta D_2 seriean badaude, eta haietatik korronte positibo handia igarotzen bada, V_{D1} eta V_{D2} artean dagoen erlazioa aurkitu. Behar diren hurbilketak egin.

b) D_1 eta D_2 paraleloan badaude eta $I_{D1} + I_{D2} = 4$ mA bada, kalkulatu diodo bakoitzean ditugun tentsio eta korronteak.

28. ARIKETA: logika digitala

Irudiko zirkuituan, $v_1(t)$ eta $v_2(t)$ aplikatzen dira. Irudikatu $v_o(t)$.

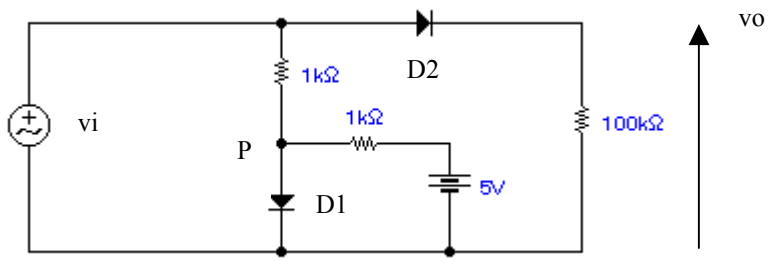
DATUAK: $V\gamma = 0.6$ V; $R_F = 20\ \Omega$; Sarreren puntako balioa 5 V da.



29. ARIKETA: transferentzia-kurbak

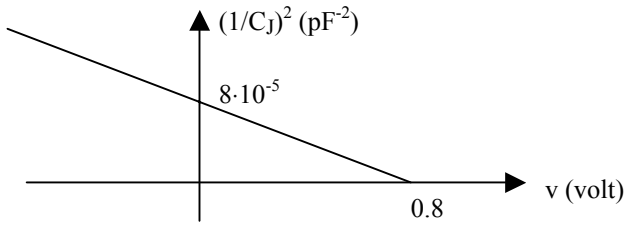
Irudikatu, diodoak idealak badira, zirkuituko $v_O(t)$ eta $v_P(t)$,.

DATUA: $v_1(t) = 10 \sin(wt)$ V da ($w = 2\pi f$ oso txikia da).



30. ARIKETA: junturako kondentsadorea eta oinarrizko ezaugarri fisikoak

Behean, p^+n diodo baten $(1/C_J)^2$–ren tentsioarekiko menpekotasuna irudikatu da.



Kalkulatu:

a) Potentzial termodinamikoa (ϕ_T).

b) Gutxien dopatutako eskualdearen ezpurutasun-kontzentrazioa.

(OHARRA: $N_D << N_A$ bada, aplikatu $1/N_D + 1/N_A \sim 1/N_D$)

c) P^+ eskualdearen dopaketa.

d) Hustutako eskualdearen orekako luzera (l_{orekan}), $x_{porekan}$ eta $x_{norekan}$.

e) Orekako eremu maximoa (ε_{max_orekan}).

DATUAK: $\in_0 =$ 8.85E-14 F/cm; $\in_{r\,Si} = 11.8$, A = 0.348 mm^2; $V_T/q = 25.9$ mV

31. ARIKETA: erregimen dinamikoa eta kommutazioa

Diodo bati $V_F = +10$ V tentsioa aplikatzen diogu 10 kΩ-eko erresistentzia baten bidez denbora luzez (beraz, egoera geldikorrean gaude). t = 0 unean, tentsioa bat-batean aldatzen dugu, eta hortik aurrera tentsioa $V_R = -5$ V da.

Diodoan, 5 μs da urrienen erdibizitza baliokidea. Karga-aldaketak dakarren kapazitatea eta diodoaren kanpoko kapazitateak C = 20 pF dira bat eginez.

Kalkulatu eta irudikatu diodoan agertzen diren tentsioa eta korrontea (baliorik adierazgarrienak agerian utziz).

OHARRA: diodoa zuzenean dagoenean, bere terminalen artean agertzen den tentsioa aintzat ez hartzeko modukoa da.