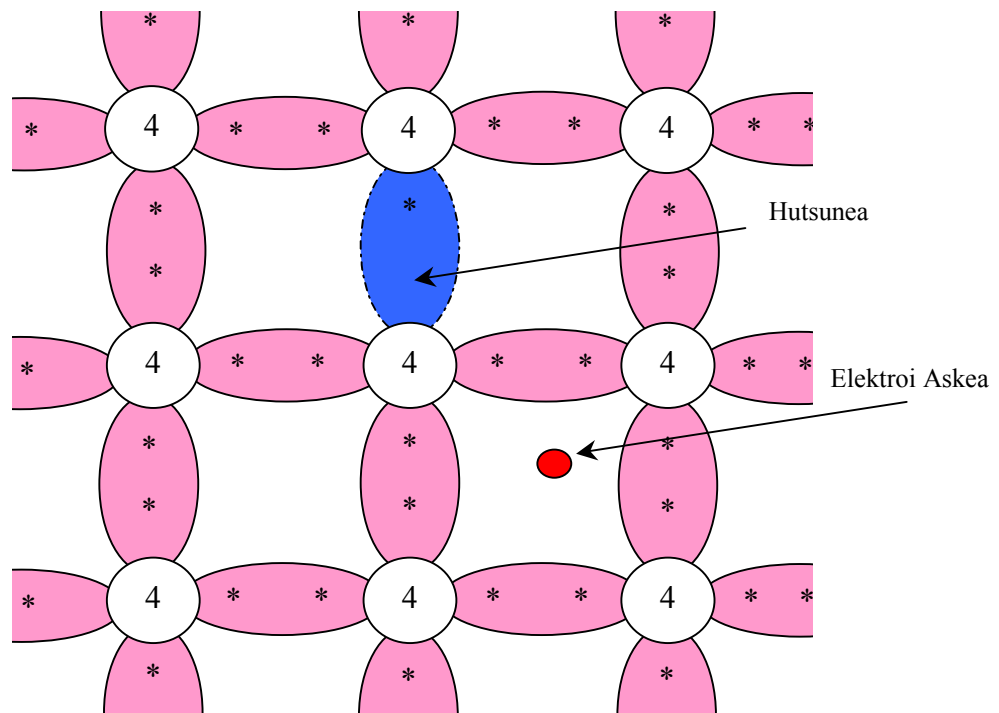


DISPOSITIBOEN

ELEKTRONIKA



Federico Recart
Susana Uriarte
Rubén Gutiérrez

2004ko uztaila

DISPOSITIBOEN ELEKTRONIKA

SARRERA ETA ERDIEROALEA

- 1. DISPOSITIBOAK**
 - 2. ERDIEROALEEN EZAUGARRIAK**
 - 3. KORRONTEAREN EROAPENA**
 - 4. SORRERA ETA BIRKONBINAKETA**
 - 5. EKUAZIO OROKORRAK**
- ERDIEROALEARI BURUZKO ARIKETAK**

DIODOA

- 6. PN JUNTURA OREKA TERMODINAMIKOAN**
 - 7. DIODOAREN POLARIZAZIOA**
 - 8. DIODO IDEALAREKIKO DESBIDERATZEAK**
 - 9. DIODOA ERREGIMEN DINAMIKOAN**
 - 10. ZIRKUITUAK DIODOEKIN ETA BESTE DIODO ERDIEROALE BATZUK**
- DIDOARI BURUZKO ARIKETAK**

TRANSISTORE BIPOLARRA

- 11. TRANSISTORE BIPOLARRA ESTATIKOAN**
 - 12. TRANSISTORE BIPOLARRAREN SEINALE HANDIKO EREDUAK**
 - 13. TRANSISTORE BIPOLARRA ERREGIMEN DINAMIKOAN**
 - 14. ZIRKUITU ANPLIFIKADOREEN ANALISIA**
- TRANSISTORE BIPOLARRARI BURUZKO ARIKETAK**

EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREA

- 15. EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREAK I: SAILKAPENA ETA MOSFETA**
 - 16. EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREAK II: JFETAK**
 - 17. FETAK ERREGIMEN DINAMIKOAN: SEINALE TXIKIA**
 - 18. FETEN POLARIZAZIOA**
- EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREARI BURUZKO ARIKETAK**

LEHENENGO MULTZOA:

SARRERA ETA ERDIEROALEA

1. DISPOSITIBOAK	1
1.0 Oinarrizko kontzeptuak	3
1.1 Dispositiboen ereduak	6
1.2 Dispositiboen ezaugarri-kurbak: korrante-tentsio eta transferentzi kurbak	8
1.2.1 Ate bakarreko osagaiak: I-V ezaugarri-kurba	8
1.2.2 Bi ateko dispositiboak: sarreraren, irteeraren eta transferentziaren ezaugarrikurba	10
2. ERDIEROALEEN EZAUGARRIAK	13
2.0 Materialen sailkapena	13
2.1 Berezko erdieroaleak edo erdieroale intrintsekoak. Egitura kristalinoa.	16
2.2 Erdieroale estrintsekoak: ezpurutasun emaile eta hartzaileak.	20
6.1.1 N motako erdieroaleak: ezpurutasun emaileak	20
6.1.2 P motako erdieroaleak: ezpurutasun hartzaileak	21
2.3 Kontzentrazioaren kalkulua: <i>Masa-ekintzaren legea</i> eta <i>Kargaren neutraltasuna</i> . Kontzentrazioen bilakaera tenperaturaren arabera	22
2.4 Eramaileei buruzko terminologiaren laburpena	24
3. KORRONTEAREN EROAPENA	25
3.0 Korrontearen eroapenaren mekanismoak	26
3.1 Atoiaren bidezko eroapena: Ohmen legea	26
3.2 Barreiapeneko eroapena	32
3.3 Einsteinen erlazioa	33
3.4 Guztizko korronteak	34
4. SORRERA ETA BIRKONBINAKETA	35
4.0 Birkonbinaketaren abiadura oreka termodinamikotik kanpo	36
4.1 Gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera	39
Oharrak	42

5. EKUAZIO OROKORRAK	43
5.0 Jarraitutasunaren ekuazioak	44
5.1 Egoeraren ekuazioak	46
5.2 Eramaileen denborarekiko aldaketa: erdibizitza	47
5.3 Eramaileen posizioarekiko aldaketa: barreiapeneko luzera	50
5.4 Gainazaleko birkonbinaketa	52
Eranskina: ebatzi beharreko ekuazio diferentzialak	55
ERDIEROALEARI BURUZKO ARIKETAK	57

BIGARREN MULTZOA: DIODOA

6. PN JUNTURA OREKA TERMODINAMIKOAN	63
6.0 Pn junturaren egitura	64
6.1.1 Definizioa	64
6.1.2 Juntura latz eta laua	65
6.1 Oreka termodinamikoa eta barneko potentziala	66
6.2.1 Orekako profilen sorrera	66
6.2.2 Potentzial termodinamikoa ebaztea	68
6.2 Eskualde dipolarra oreka termodinamikoan eta potentziala ebaztea	69
6.2.1 Hustutako eskualdearen analisia despopulatzea onartuta	71
6.2.2 Hustutako eskualdearen zabalera	73
6.2.3 Pn juntura oreka termodinamikoan: laburpena	74
7. DIODOAREN POLARIZAZIOA	77
7.0 Definizioak eta hitzarmenezko zeinuak	78
7.1 Eskualde dipolarren analisia polarizaziopean	78
7.2 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
7.3 Seinale handiko ereduak: zirkuitu-eredu ideala eta hurbilketak	94
7.4 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
8.0 Desbideratzeak polarizazio zuzenean	101
8.2.1 Hustutako eskualdean ez dago birkonbinaketarik?	102
8.2.2 Injekzio baxuan gaude?	103
8.2.3 Tentsio osoa hustutako eskualdean agertzen da?	104
8.1 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
9.0 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera estatikoan	108
9.1 Kargaren bidezko kontrol-eredua egoera dinamikoan	110
9.2 Seinale txikiko erregimenaren analisia: garapena eta zirkuitu baliokidea	116
9.3 Diodoaren portaera kommutazioan	120
9.4.1 Eroaten hasia (OFF→ON)	120
9.4.2 Etetearen analisia (ON→OFF)	124
10. ZIRKUITUAK DIODOEKIN ETA BESTE DIODO ERDIEROALE BATZUK	129
10.0 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
10.1 Zirkuitu ebakitzzaileak	135
10.2 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

HIRUGARREN MULTZOA: TRANSISTORE BIPOLARRA

11. TRANSISTORE BIPOLARRA ESTATIKOAN (BIPOLAR JUNCTION TRANSISTOR)	161
11.1 Transistore bipolarren egitura eta fabrikazioa	162
11.2 Funtzionamendu moduak edo lan-guneak	164
11.3 Funtzionamendu kualitatiboa: transistore-efektua	165
11.4 Modu aktiboaren analisi kuantitatiboa: zirkuituko parametro nagusiak	169
12. SEINALE HANDIKO EREDUAK	175
12.1 Ebers-Mollen ereduak	176
12.1.1 Ereduaren dedukzioa	176
12.1.2 α_F , α_R , I_{ES} eta I_{CS} parametroen kalkulu esperimentalak	179
12.1.3 Ebers-Mollen ekuazioen beste adierazpen bat	180
12.1.4 Ebers-Mollen ereduak garraioaren ikuspuntutik	181
12.1.5 Ebers-Mollen ekuazioen kasu bereziak	183
12.2 Ezaugarri-kurbak	185
12.2.1 Sarrerako I-V kurba	186
12.2.2 Irteerako I-V kurba	187
12.3 BJT idealarekiko desbideratzeak	189
12.3.1 Early efektua	189
12.3.2 Kolektoreko korrentarekiko β parametroaren menpekotasuna	191
12.4 BJTaren lan-puntua finkatzea: karga-zuzen estatikoa	192
12.5 Polarizazioaren egonkortasuna	195
12.5.1 Q puntuaren aldaketak	195
12.5.2 Autopolarizazio-zirkuitua: berrelikadura negatiboa	197
12.5.3 I_C -ren β -rekiko egonkortasuna: sentikortasuna	198
12.5.4 Aldaketak tenperaturarekin: sentikortasun-faktoreak	199
Zirkuitu batzuen sentikortasun-parametroak	201

13. TRANSISTORE BIPOLARRA ERREGIMEN DINAMIKOAN	203
13.1 Kargaren bidezko kontrol-eredua	204
13.1.1 Kargaren bidezko kontrol eredua egoera geldikorrean	204
13.1.2 Kargaren bidezko kontrol eredua egoera dinamikoetan	206
13.1.3 Aurreko ekuazioak Ebers-Mollen eredutik lortzea	209
13.1.4 Aurreko ekuazioen ebazpena garraioaren ikuspuntutik	211
13.2 BJTa konmutadore gisa	212
13.3 BJTa seinale txikian: zirkuitu baliokidea	214
13.3.1 Seinale txikiko korrante osagaiak	214
13.3.2 π erako zirkuitu baliokidea	217
13.4 BJTa koadripolo gisa	219
13.4.1 Parametro hibridoak	220
13.4.2 Ebaketa-maiztasuna	226
Eranskinak: π eta h parametroen zirkuituak konparatzea eta erraztea	227
14. ZIRKUITU ANPLIFIKADOREEN ANALISIA	231
14.1 Anplifikazioa, karga zuzen dinamikoa eta distortsioa	232
14.1.1 Anplifikazioa	232
14.1.2 Karga zuzen dinamikoa	235
14.1.3 Distortsioa eta tarte dinamikoa	235
14.1.4 Tarte dinamikoa optimizatzen	237
14.2 Egituren analisisa	238
14.2.1 Igorle komuneko anplifikadorea	238
14.2.2 Kolektore komuneko anplifikadorea	239
14.2.3 Base komuneko anplifikadorea	240
14.2.4 Egituren arteko konparazioa	241
TRANSISTORE BIPOLARRARI BURUZKO ARIKETAK	243

LAUGARREN MULTZOA:

EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREA

15. EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREAK I: SAILKAPENA ETA MOSFETA	259
15.1 MOSFET transistorearen oinarria: MOS egitura	261
15.1.1 Metal-Oxido-Erdieroale egitura orekan	261
15.1.2 MOS egituraren portaera tentsiopean	262
15.2 MOSFET transistorearen egitura, motak eta funtzionamendua	264
15.2.1 MOSFETaren egitura eta motak	264
15.2.2 Ugaltze n kanaleko MOSFETaren funtzionamendua	265
15.3 Ezaugarri-kurbak	270
15.3.1 N pasabideko ugaltze MOSFETA	270
15.3.2 N pasabideko urritze MOSFETA	271
15.3.3 P pasabideko urritze MOSFETA	272
15.3.4 Kurba idealarekiko desbideratzeak: I-V kurba errealak	272
16. EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREAK II: JFETAK	275
16.1 JFETaren egitura	275
16.2 Iturri aldeko kanalaren zabalera kalkulatzeko: atariko tentsioa	277
16.3 Funtzionamenduaren oinarriak (n pasabideko JFET)	278
16.4 I-V ezaugarriak	284
17. FETAK ERREGIMEN DINAMIKOAN: SEINALE TXIKIA	287
17.1 Seinale txikiko planteamendua eta garapen matematikoa	287
17.2 Seinale txikiko zirkuitu baliokidea	290
18. FETEN POLARIZAZIOA	293
18.1 Iturri autopolarizatutako zirkuitua	294
18.2 Metaketazko MOSFETarentzako zirkuitua	295
18.3 Polarizazio zirkuitu orokorra	296
EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREEI BURUZKO ARIKETAK	299

BIBLIOGRAFIA

1. J Aduriz, J. Berra, O. Jaio, “Elektronika Analogikoa”, Elhuyar 2001
2. O. Arbelaitz, Tx. Ruiz, “Zirkuitu elektriko eta elektronikoen oinarrizko analisisa”, UEU 2001
3. N. R. Malik, “Electronic circuits. Analysis, simulation and design”, Prentice-Hall Int., Inc.
4. J.M.Ruiz; G.L.Araujo; G.Sala, “Física de los dispositivos electrónicos”. I eta II bolumenak, E.T.S. Ingenieros de telecomunicación de Madrid
5. J. Millman, C. Halk, “Dispositivos y circuitos electrónicos”, Pirámide
6. “Temas selectos de Ingeniería” bilduma, Addison-Wesley Iberoamericana argitaletxea.
 - a) “Fundamentos de los semiconductores”. Egilea: R. F. Pierret.
 - b) “Diodo pn de unión”. Egilea: G. W. Neudeck
 - c) “El transistor bipolar de unión” Egilea: G. W. Neudeck
 - d) “Dispositivos de efecto de campo” Egilea: R. F. Pierret.

1. DISPOSITIBOAK

ELEKTRONIKA ZER DEN ETA NOLA KOKATZEN DEN HISTORIAN

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

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

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

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

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

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

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

Ordutik hona, fabrikazio-teknologiaren garapena dela eta, integrazio eskala ikaragarriro handitu da: gaur egungo prozesadoreetan, 125 milioi transistore/cm² baino gehiago eraikitzen dira (eta 2016. urterako aurreikuspena 3.000 milioi transistore/cm² da).

ELEKTRONIKA TITULAZIOAN ETA TELEKOMUNIKAZIOETAKO INGENIARIAREN LANBIDEAN NON KOKATZEN DEN

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

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

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

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

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

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

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

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

1.1 Oinarrizko kontzeptuak

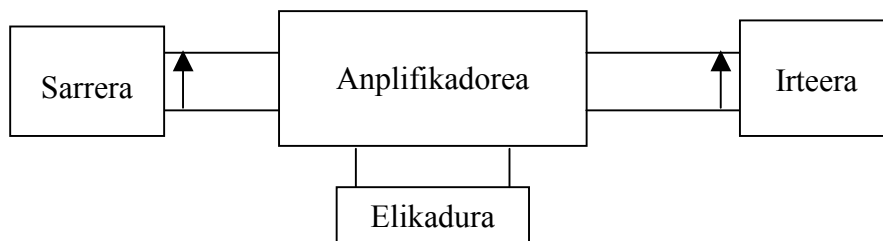
SISTEMAK: SARRERA, IRTEERA ETA POLARIZAZIOA

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

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

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

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



1.1 Irudia. Anplifikadore baten eskema

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

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

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

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

SEINALE JARRAITUAK ETA SEINALE ALTERNOAK

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

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

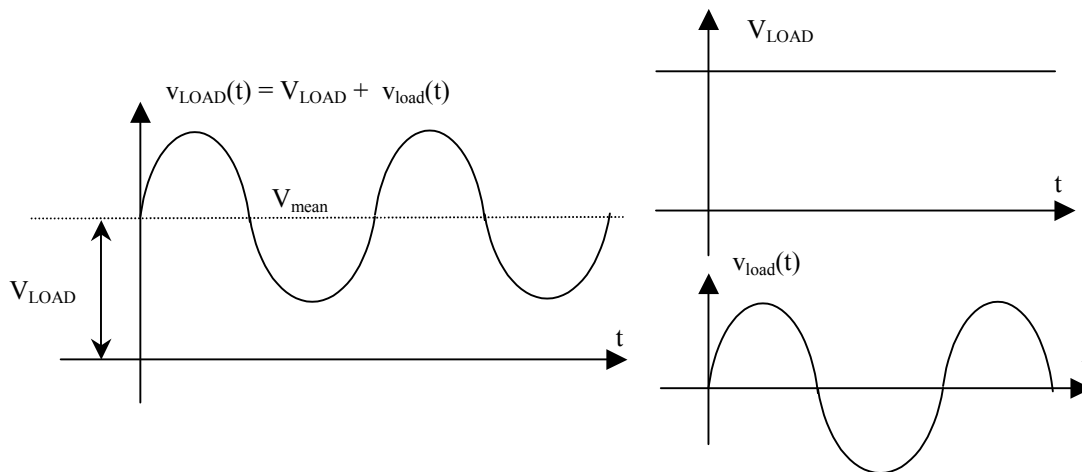
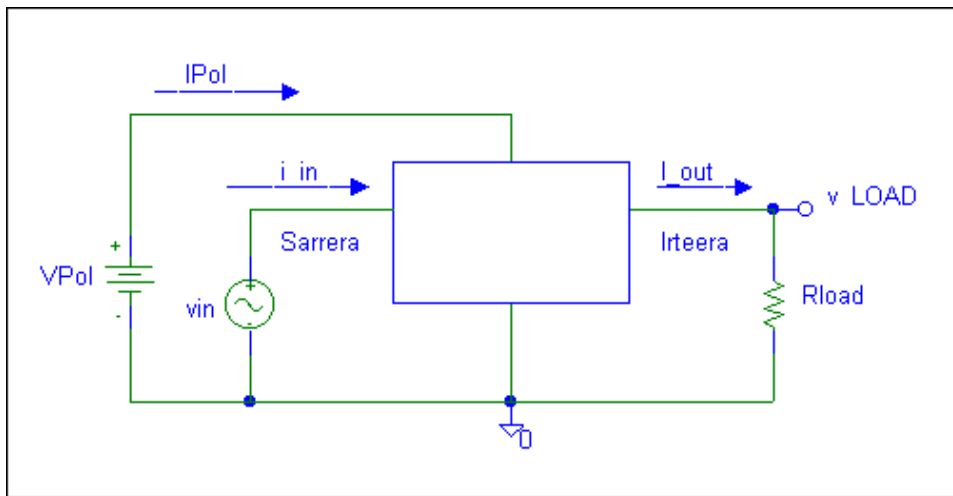
Askotan, errazago lan egitearren, seinale osoak oinarrizko bi osagaitan deskonposatzen ditugu: batetik, jarraitua (seinalearen batez besteko balioa) eta, bestetik, alternoa (seinale osoari batez bestekoa kenduz lortzen dena: forma bereko seinalea, baina batez besteko balio hutsekoa). Informazioa, gehienetan,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

Bereizteko asmoz, seinalearen osagaiak honela adierazten dira:

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

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

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



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

1.2 Dispositiboen ereduak

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

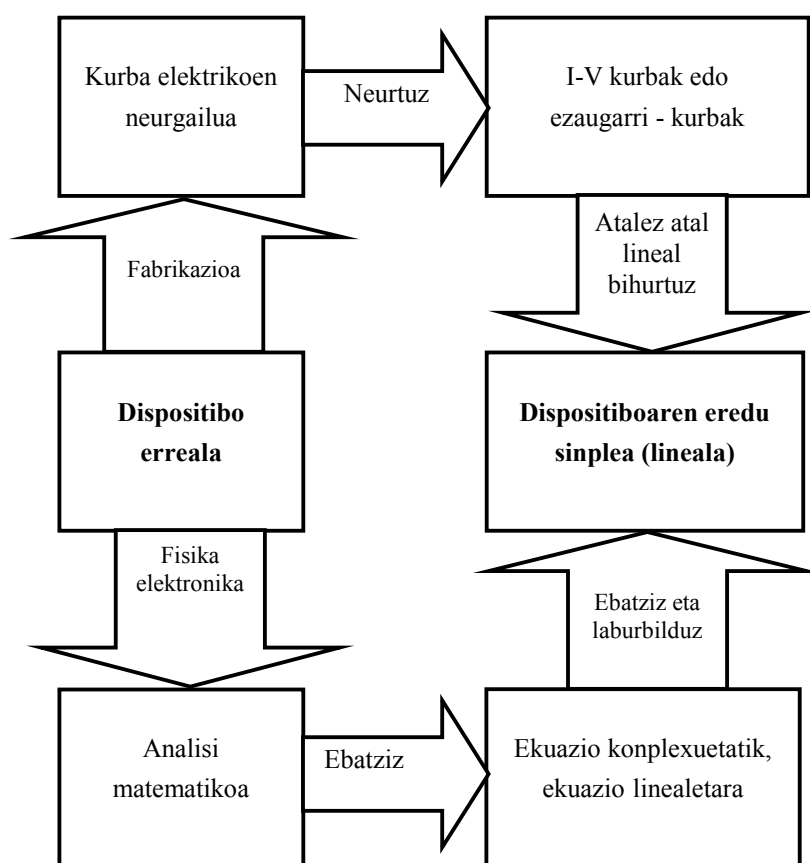
Osagai elektroniko baten funtzionamendua edo I-V kurbak zehaztasun osoz jakiteko, ekuazio fisikoetatik abia gaitzeko. Baina horien ebazpena latza da (ordenadorea behar izaten da, haren analisi fisikotik sortzen diren ekuazio multzoa ebaztea ezinezkoa bailitzateke bestela).

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

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

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

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



1.3 Irudia. Osagaien modelaketa eta I-V kurben erabilera

Hala, dispositiboen adierazpenak hiru forma izan ditzake:

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

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

1.3.1 ATE BAKARREKO OSAGAIK: KORRONTE-TENTSIOAREN EZAUGARRI KURBA

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

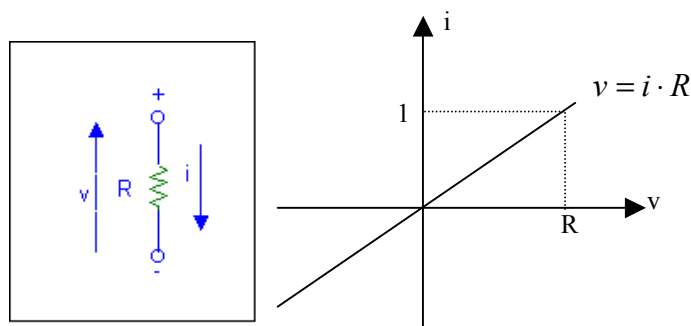
Dispositiboen izaerak bi aldagaien arteko *erlazio bat* (*ekuazio bat*) ematen digu.

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

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

Jarraian, ate bakarreko dispositibo batzuen adierazpenak aurkeztuko ditugu.

Erresistentzia

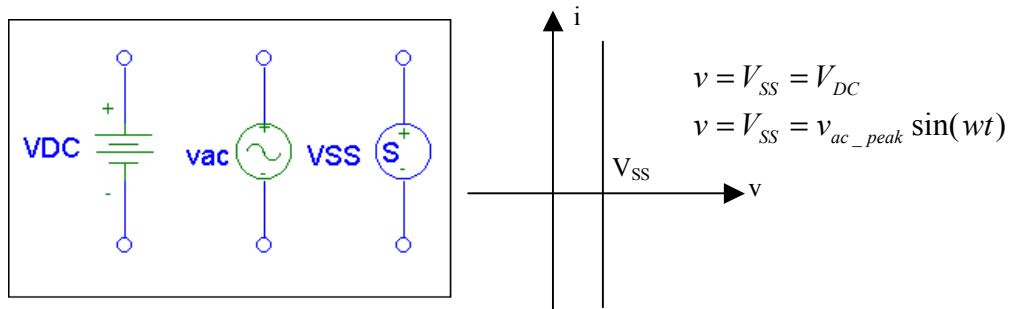


1.4 Irudia. Erresistentziaren ikurra, I - V kurba eta ekuazioa

Hau da, $R(\Omega)$ balioko erresistentzian erortzen den tentsioa hura bera zeharkatzen duen korrantearekiko proportzionala da, eta R da proportzioaren konstantea.

V_{ss} balioko Tentsio Sorgailu Independentea

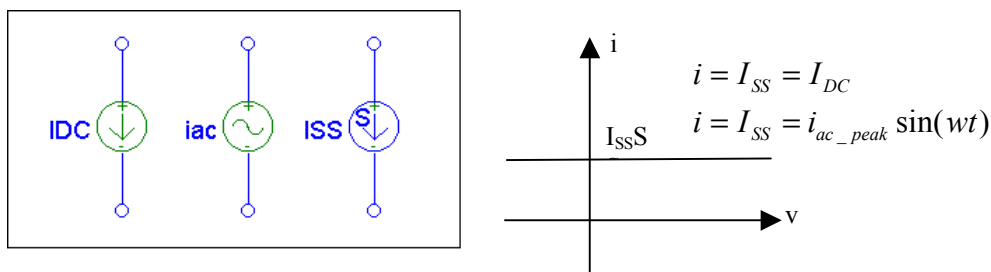
Sorgailu horrek V_{SS} balioan mantentzen du tentsioa beti, eta, horretarako, zirkuituak eskatzen duen korronea ematen dio (edo hartu).



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

I_{ss} balioko Korrone Zuzeneko Sorgailu Independentea:

Osagai horrek I_{SS} korronea injektatzen du beti zirkuitura, eta horretarako behar den tentsioa ematen du edo jasaten du.



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

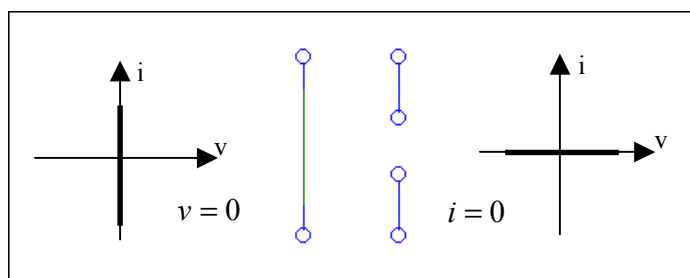
Zirkuitulaburra eta zirkuitu irekia

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

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

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

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

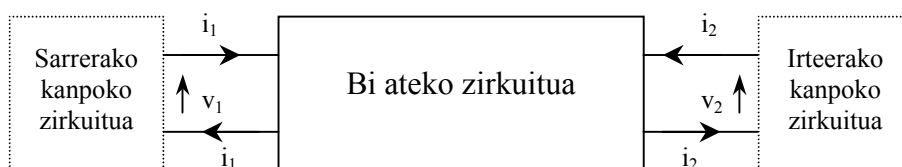


1.7 Irudia. Zirkuitulaburraren (ezk) eta zirkuitu irekiaren (esk) ezaugarri-kurbak, ikurrak eta ekuazioak

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

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

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



1.8 Irudia. Bi ateko zirkuitua

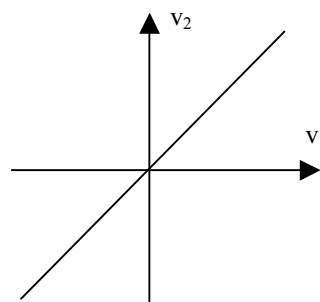
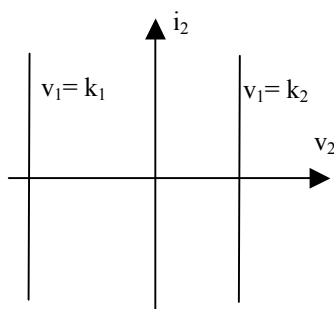
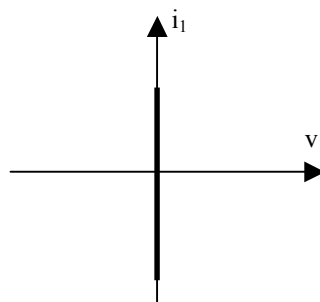
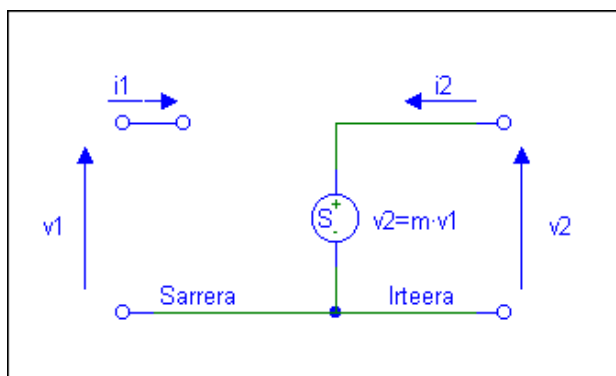
1.8 Irudian ikusten denez, badaude *lau aldagai* ezagutzen ez ditugunak, eta zirkuituak haien arteko bi erlazio ematen dizkigu. Kanpoko bi zirkuituek ekuazio bana emanaz, lau erlazio eta lau aldagai dituen sistema ebazten da.

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

Ondoren, bi ateko dispositibo batzuk aurkeztuko ditugu.

Tentsioaren bidez kontrolatutako tentsio-sorgailua:

Erlazioak honako hauek dira: $i_1 = 0$
 $v_2 = \mu \cdot v_1$



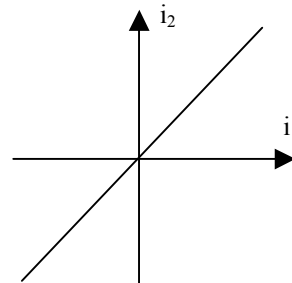
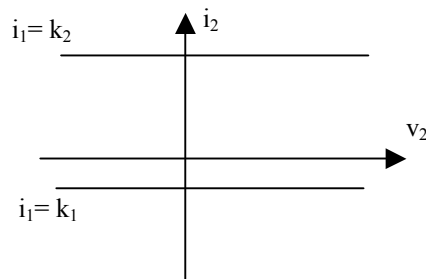
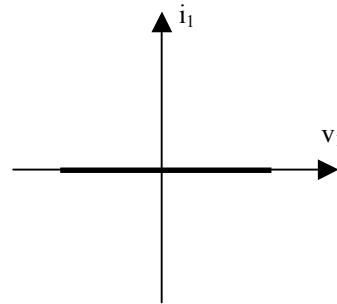
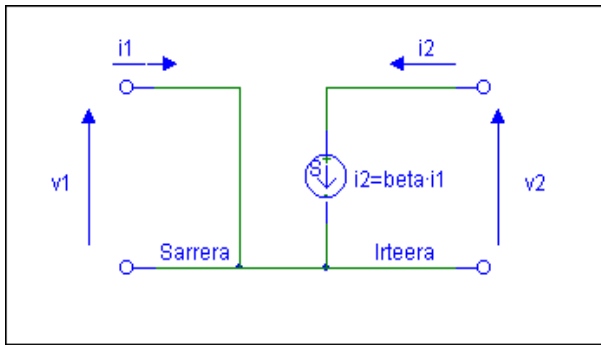
1.9 Irudia. Tentsioaren menpeko tentsio-sorgailua: a) ikurra b) sarrerako ezaugarria c) irteerako ezaugarria d) transferentzia-kurba

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

Korrontearen bidez kontrolatutako korronte-sorgailua:

Erlazio analitikoak honako hauek dira: $v_1 = 0$
 $i_2 = \beta \cdot i_1$

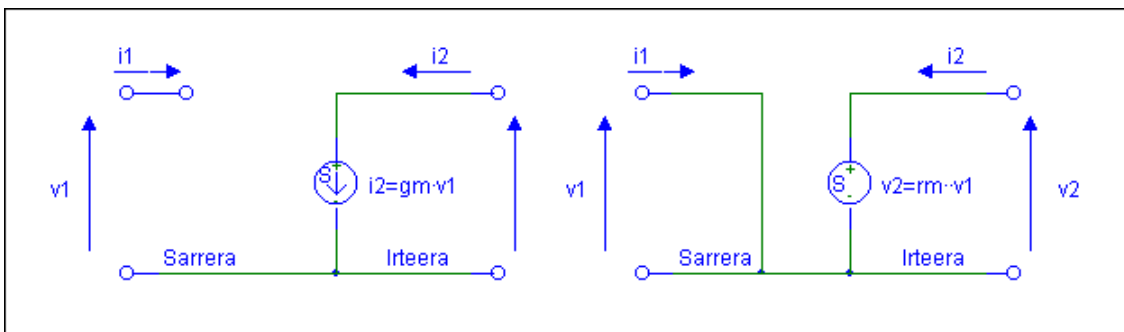
Irteera eta sarrera erlazionatzen dituen konstantea (β) transmitantzia da. 1.10.c Irudian i_2 eta v_2 aldagaien arteko erlazioa adierazteko, i_1 parametro gisa erabiltzen da.



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

Bi ateko beste dispositibo batzuk

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



a)

b)

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

2. ERDIEROALEEN EZAUGARRIAK

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

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

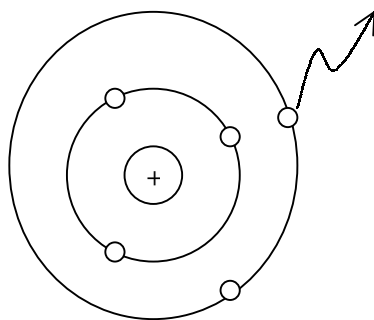
Bi ikuspegitatik abia gaitezke horretara:

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

Asignatura honetan batez ere lehenengo ikuspuntua erabiliko dugu.

2.1 Materialen sailkapena

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

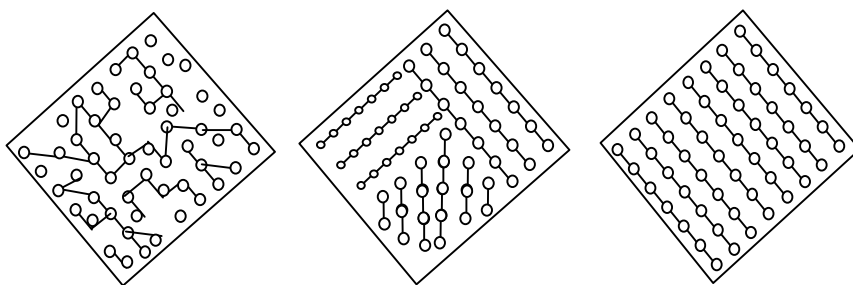


2.1 Irudia. Balentziako elektroiak

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

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

Solidoen ezaugarrietan ezberdintasun fisiko nabarmenak sumatzen ditugu barneko egituraren arabera.



2.2 Irudia. Solido amorfoa, polikristalinoa eta kristalinoa

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

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

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

Hemendik aurrera, solido kristalinoei buruz ariko gara.

Solido kristalinoak hiru mailatan sailka daitezke beren eroankortasuna kontuan hartuz:

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

METALAK:

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

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

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

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

Guri dagokigunez, erresistentzia txikia da temperatura tarte zabalean.

DIELEKTRIKOAK:

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

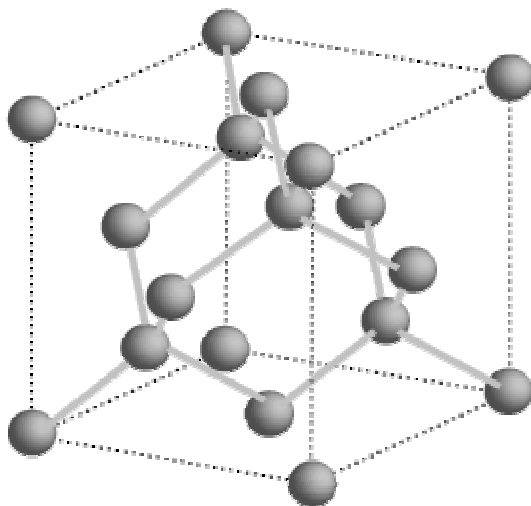
ERDIEROALEAK:

Giro-temperaturan ez dira ez eroale onak ez eta isolatzaileak ere. ρ $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ – $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ tartean dago. Temperatura baxuetan (oso baxuetan, $T = 30$ K), oso isolatzaile onak izaten dira eta temperatura altuetan eroale onak izan daitezke. Horren arrazoia elektroia askeen sorreran datza. Fenomenoa ulertzeko gakoa egitura kristalinoa denez, horixe izango da hurrengo puntua.

2.2 Berezko erdieroaleak edo erdieroale intrintsekoak. Egitura kristalinoa.

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

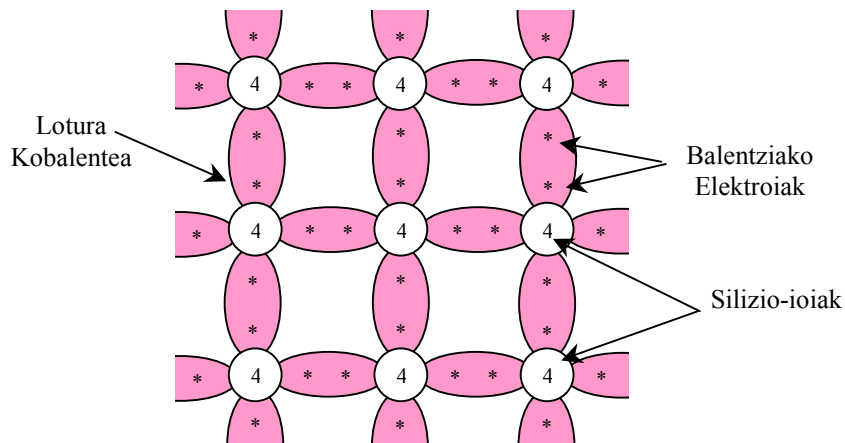
Ohiko erdieroaleetan (silizioan, germanioan), 2.3 irudian agertzen den estruktura hiru dimentsioetan errepikatuz egituratzen da kristala.



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

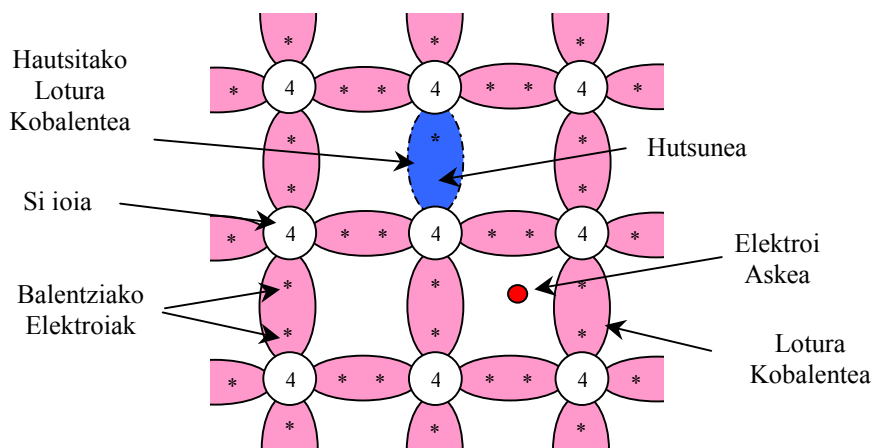
Silizio (14) eta germanio (32) atomoek lau elektroik beren azken geruzan. Jakinaenez, atomoen egoerarik egonkorrena azken geruzan zortzi elektroik izatea da. Horretarako, atomo bakoitzak bere lau elektroiak konpartitzen ditu inguruko beste lau atomoekin, eta horietako bakoitzetik bana hartu. Horrela,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

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



2.4 Irudia. Kristala tenperatura baxuan

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



2.5 Irudia. Kristala giro-tenperaturan

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

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

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

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

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

Siliziozko zentimetro kubiko batean:

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

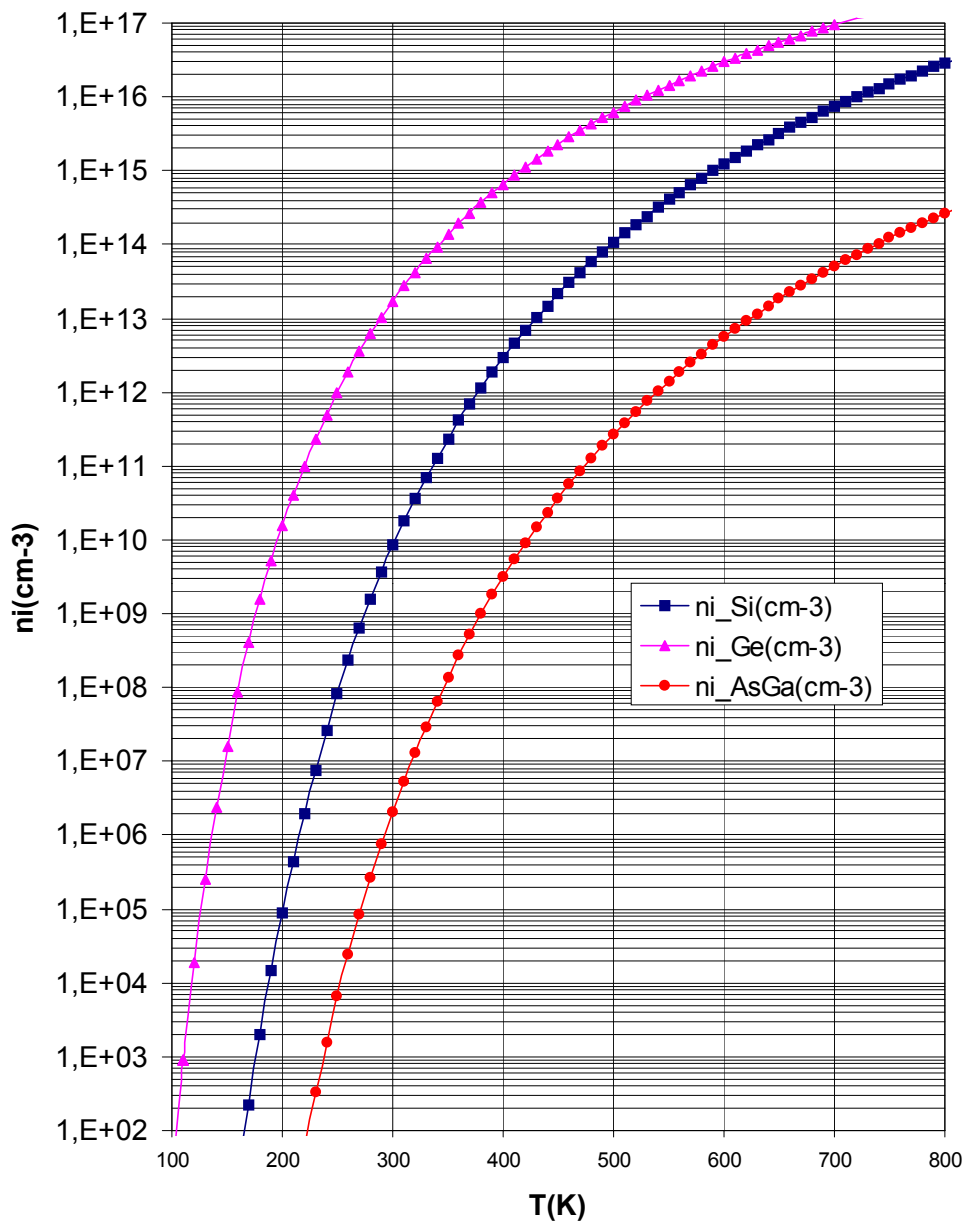
OREKA TERMODINAMIKOA

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

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

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

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



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

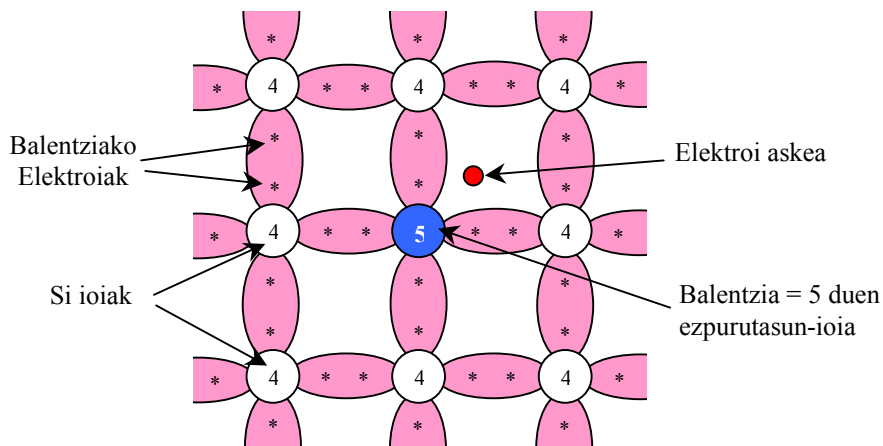
2.3 Erdieroale estrintsekoak: ezpurutasun emaile eta hartzaileak

Erdieroale material bat estrintsekoa da, bere baitan ezpurutasun nahikoak dituenean. Hots: berezko 10^9 atomoko ezpurutasun bat baino gehiago dugunean ($5 \cdot 10^{13}$ ezpurutasun/cm³).

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

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

2.3.1 N MOTAKO ERDIEROALEAK: EZPURUTASUN EMAILEAK



2.7 Irudia. Ezpurutasun emailea eta elektroia

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

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

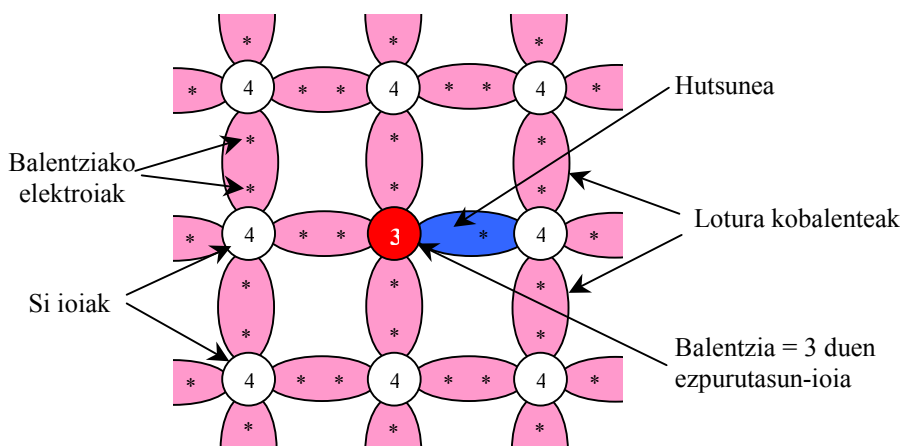
Fosforoak, orain, azken geruzan zortzi elektroiei dituenez, lotura ahuldu egin da: ez da beharrezkoa hain hurbil egotea. Beraz, elektroiei aske bat erraz sor daiteke (ioi positibo batekin batera). Ioiak mugitzerik ez duen bitartean, elektroiei bai.

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

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

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

2.3.2 P MOTAKO ERDIEROALEAK: EZPURUTASUN HARTZAILEAK



2.8 Irudia. Ezpurutasun hartzailea eta hutsunea

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

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

Hiru ohar:

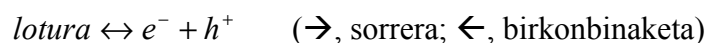
- Atomo dopagarriak dopatutako materialean berezko atomoen lekua hartzeko gai izan behar du. Silizioa dopatzeko, emaileen artean, fosforoa, antimonioa eta arsenikoa erabiltzen ditugu. Dopagarri hartzaileen artean, boroa, aluminioa, galioa eta indioa ditugu. Prozesu hori kristala haztean bertan edo gero, dispositiboaren fabrikazioan, kanpotik ezpurutasunak sarraraziz egin daiteke.
- Atomo dopatzaile batek eramaile bat sorraraztean, kontrako zeinuaz kargatzen da. (e^- bat sortu orduko, positiboki; h^+ bat sortzean, negatiboki). Eramaileak mugitu daitezke, korrontea eraman dezakete eta materialak horien bidez eroaten du. Ioia bertan dago, tinko finkaturik.
- Zentimetro kubiko bakoitzeko kontzentrazioak:
 $5 \cdot 10^{22}$ silizio atomo; 10^{10} eramaile bikote;
 10^{15} dopagarri atomo gehituz gero: 10^{15} ioi, kontrako motako 10^{15} eramaile (ugarrienak edo maioritarioak) eta ioien zeinu bereko eramaile batzuk (urrienak edo minoritarioak)

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

MASA-EKINTZAREN LEGEA

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

Gure kasuan, erreakzioa honako hau da:



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

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

Beraz, masa-ekintzaren legeak honako hau dio :

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

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

$$n \cdot p = n_i^2$$

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

KARGAREN NEUTRALITASUNAREN EKUAZIOA

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

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

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

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

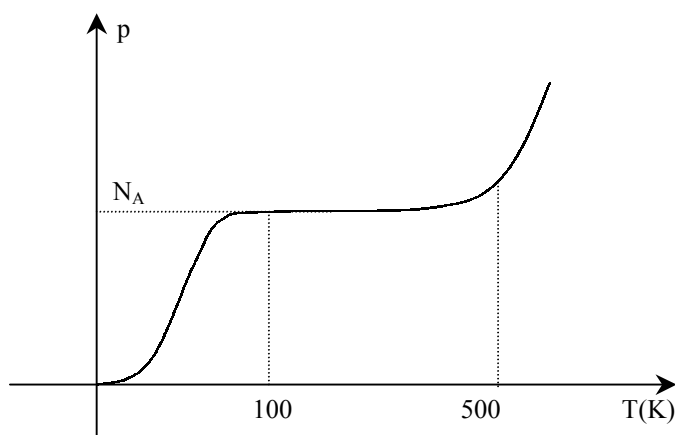
Gure ohiko kasuetan, temperatura 298-300 K (25-27°C) ingurukoa izaten denez, ezpurutasun guztiak ionizaturik egoten dira eta, beraz: $p + N_D - n - N_A = 0$;

BILAKAERA TENPERATURAREKIN [P motako erdieroale batean]

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

Beraz,

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



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

Hiru portaera ikusten ditugu:

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

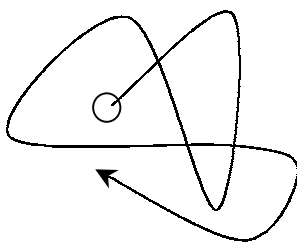
2.5 Eramaileri buruzko terminologiaren laburpena

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

3. KORRONTEAREN EROAPENA

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

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



3.1 Irudia. Elektroi baten mugimendu aleatorioa

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

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

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

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

3.1 Korrontearen eroapenaren mekanismoak:

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

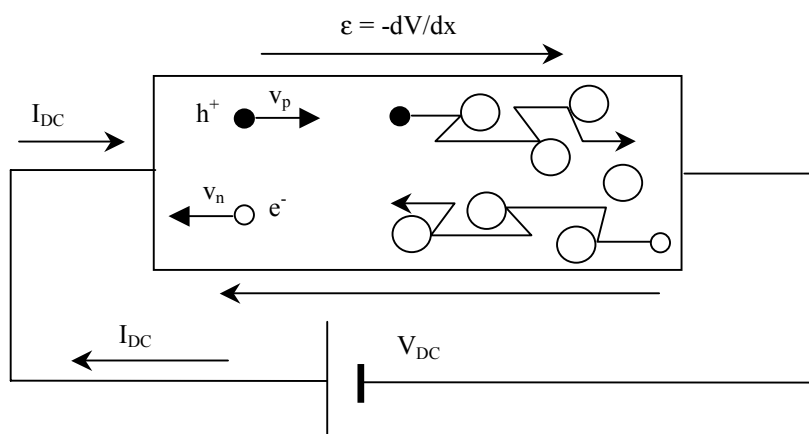
3.2 Atoiaren bidezko eroapena: Ohmen legea

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

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

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

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

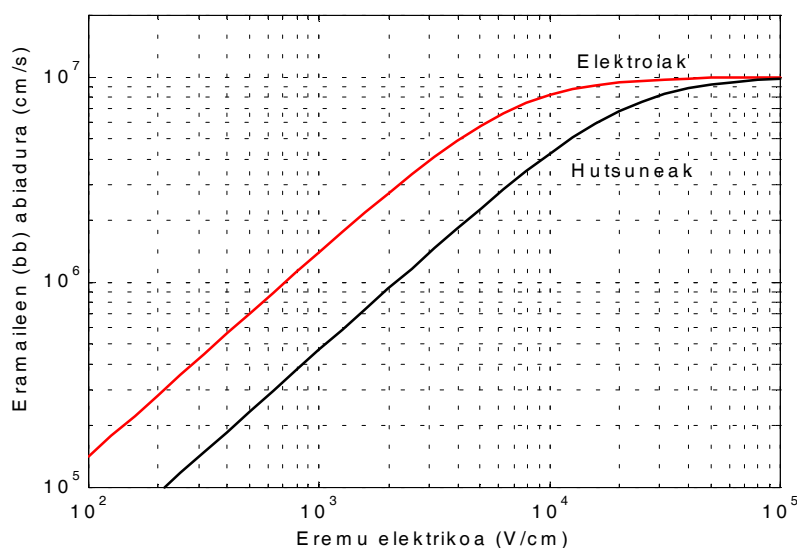


3.2 Irudia Atoiko korrontearen mekanismoa

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

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

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



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

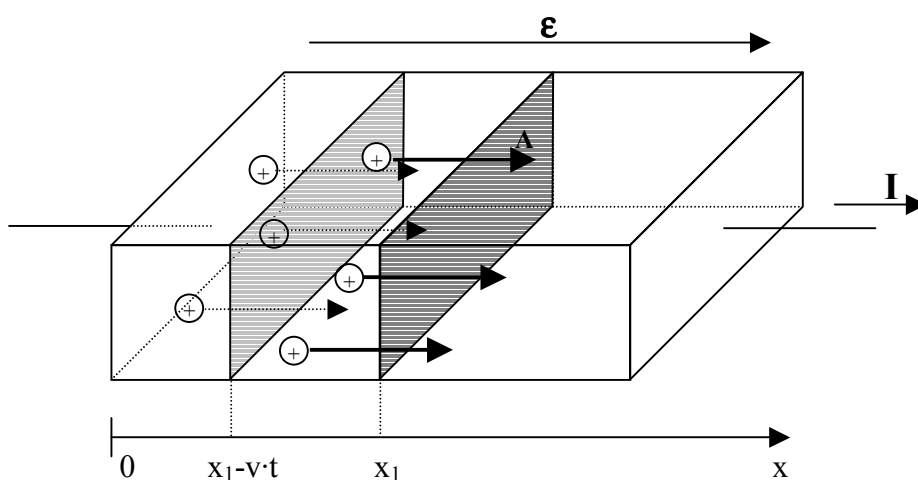
Beraz, eta eragiten duen abiaduraren noranzkoa kontuan hartuta, guri interesatzen zaigun tartean:

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

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

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

ATOIKO KORRONTEAREN ADIERAZPENAREN EBAZPENA:



3.4 Irudia. Atoiko korrontearen ebazpenerako eskema (hutsuneetarako)

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

c bolumeneko c motako eramaileen kontzentrazioa da

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

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

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

Korrontea = Karga / t = qcAv.

Korronte-dentsitatea = Korronte/A = qc·v.

Emaitza elektroietarako eta hutsuneetarako bereiziz gero:

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

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

Aurreko ekuazioetan abiaduren adierazpenak erabilia,

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

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

Beraz, atoiko korronea, guztira:

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

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

$$JA \times \rho (L/A) = \varepsilon \times L \rightarrow J = \varepsilon / \rho = \sigma \times \varepsilon$$

non σ eroankortasuna eta ρ erresistibitatea diren.

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

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

$$\rho_n = 1 / \sigma_n$$

$$\rho_p = 1 / \sigma_p$$

$$\rho_n = 1 / (1/\rho_n + 1/\rho_p)$$

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

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

➤ Erdieroale estrintseko batean, $M \gg m$ eta, beraz:

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

MUGIKORTASUNA, μ :

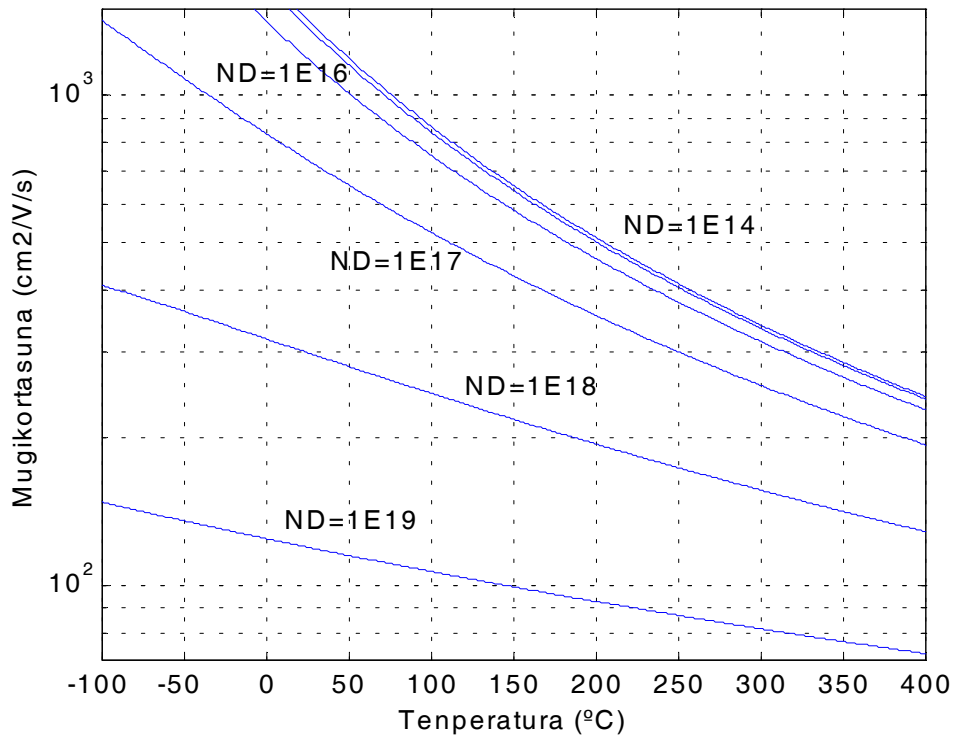
Atoiaren parametro nagusia aztertu behar dugu jarraian, hau da, mugikortasuna:

➤ Unitateak: $\text{cm}^2/\text{V/s}$

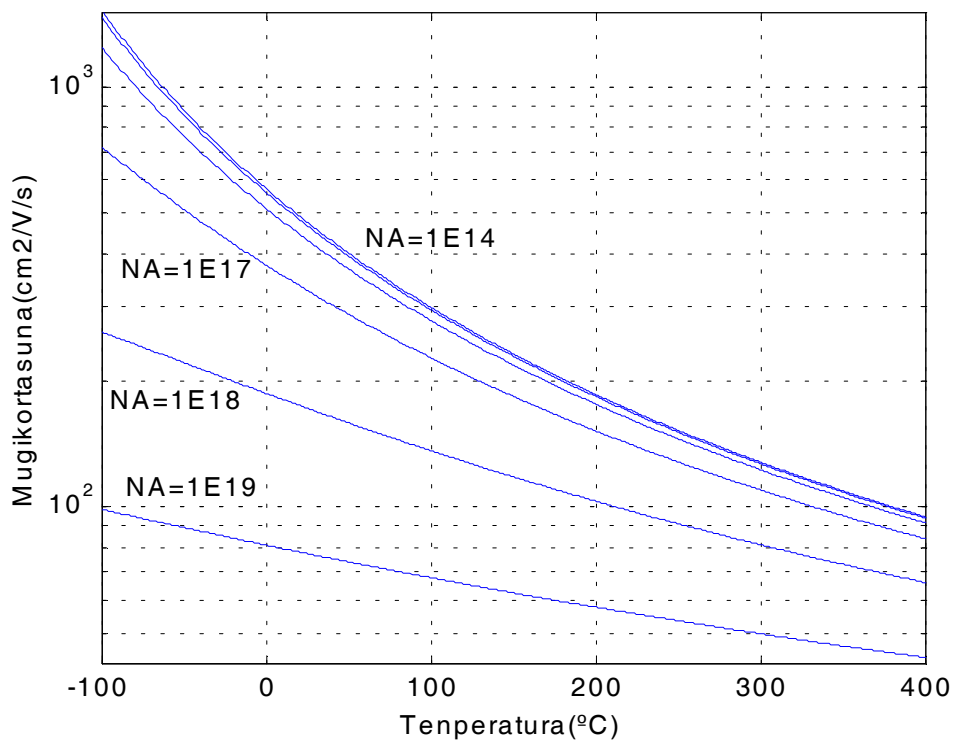
➤ Gure problemetan konstantea izango den arren, ez da zehazki konstantea. Tenperaturaren, ezpurutasun-kontzentrazioaren eta eremuaren menpe dago.

➤ Eramaile baten mugikortasunak, bere izenak adierazten duenez, eramaileak - eremu baten pean- duen mugitzeko erraztasuna adierazten digu.

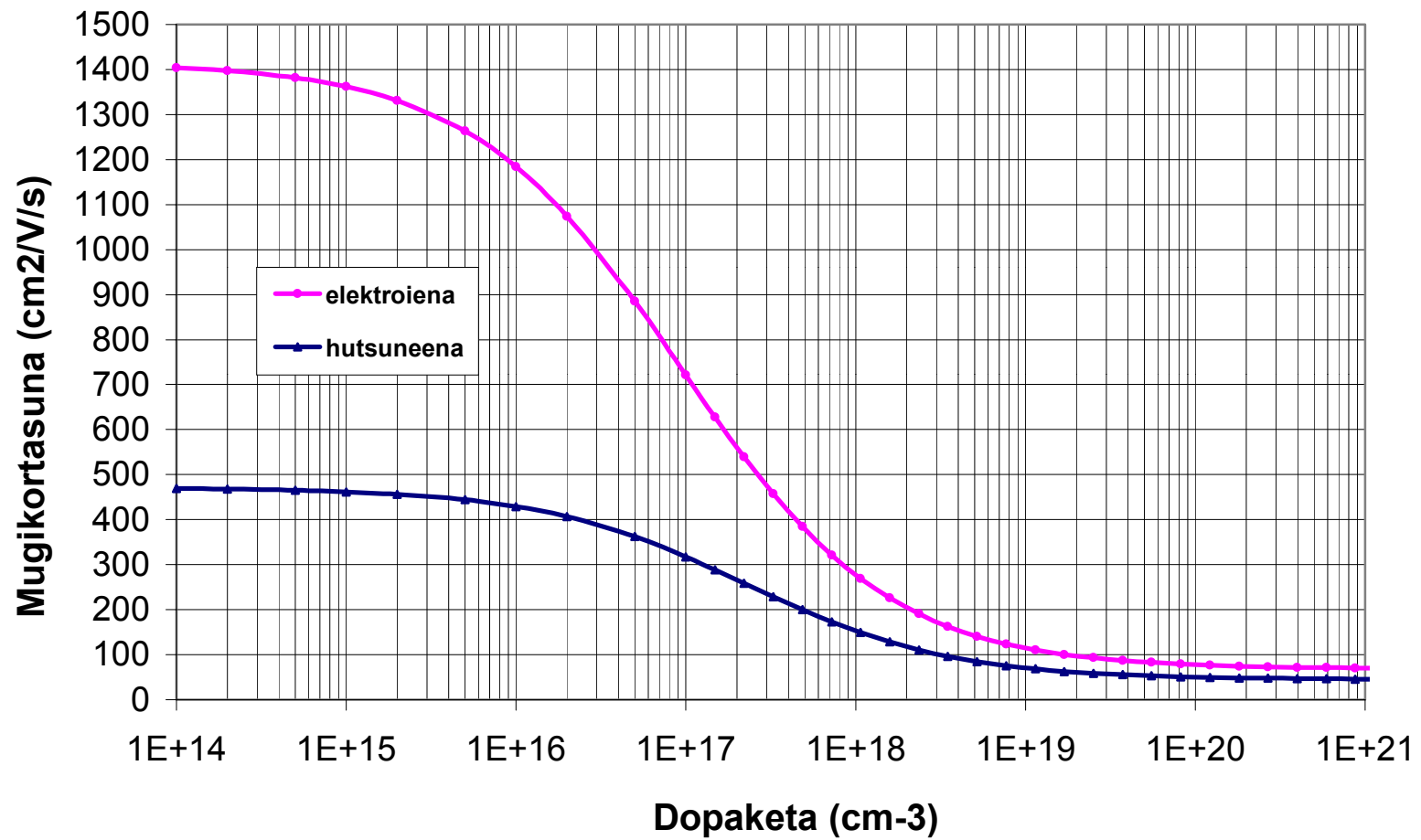
➤ Kasu gehienetan, $\mu_n > \mu_p$; Normalean izaten ditugun dopaketekin, $\mu_n \sim 2.5 \mu_p$. Horregatik, dopaketa berdina izanez gero, n motako erdieroaleak eroale hobeak izaten dira.



3.5 Irudia. Elektroien mugikortasuna temperaturaren eta dopaketaren arabera



3.6 Irudia. Hutsuneen mugikortasuna temperaturaren eta dopaketaren arabera



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

3.3 Barreiapeneko eroapena

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

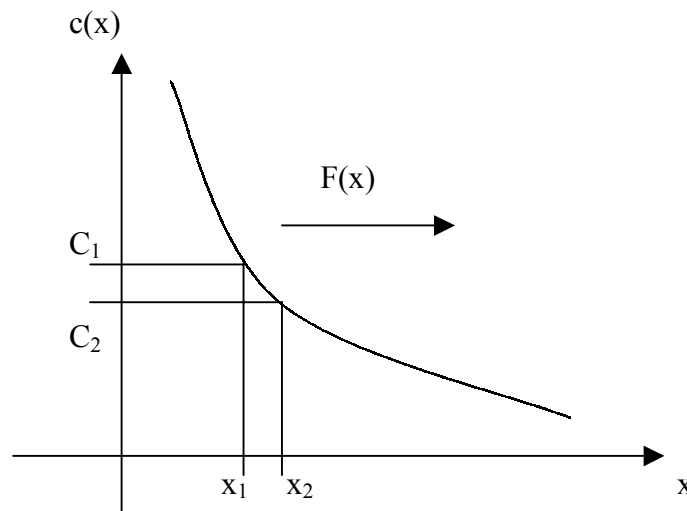
Talka baten ondoren, partikula bakoitzak edozein noranzko hartzeko probabilitate berak ditu. Hori dela-eta, eramaileak oso ugari diren tokietatik, oso urri direnetarantz mugitu edo barreiatzen dira. Gas-ihesak horren adibide izango dira.

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

Partikula horiek karga dutenean, difusioko jarioak korrante elektrikoa dakar.

BARREIAPENEN KORRANTEAREN ADIERAZPENAREN EBAZPENAK:

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



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

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

Matematikoki:

$$F = -K x (C_2 - C_1) / (D_2 - D_1).$$

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

$x_2 \sim x_1$ eginez,

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

$$F(x) = -D \times \nabla C(x) \quad (\text{Ficken lehenengo legea})$$

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

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

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

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

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

$$\mathbf{J}_{\text{n_barreiapen}} = -q \times (-D_n \times \nabla n(x)) = qD_n \nabla n = (\text{normalean}) \quad \mathbf{qD}_n \mathbf{dn}/\mathbf{dx}$$

$$\mathbf{J}_{\text{p_barreiapen}} = q \times (-D_p \times \nabla p(x)) = -qD_p \nabla p = (\text{normalean}) \quad -\mathbf{qD}_p \mathbf{dp}/\mathbf{dx}$$

Erdieroalean normalean bi eramaile motak izaten ditugunez,

$$\mathbf{J}_{\text{barreiapen}} = \mathbf{J}_{\text{n_barreiapen}} + \mathbf{J}_{\text{p_barreiapen}} = \mathbf{qD}_n \nabla n - \mathbf{qD}_p \nabla p = \mathbf{q(D}_n \nabla n - \mathbf{D}_p \nabla p)$$

3.4 Einsteinen erlazioa

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

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

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

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

Giro-tenperaturan, $KT/q = 0.0259 \text{ V}$.

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

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

3.5 Guztizko korronteak

Eroapena bi mekanismoez gertatzen denez, guztira:

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

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

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \times \boldsymbol{\varepsilon} + q(\mathbf{D}_n \nabla n - \mathbf{D}_p \nabla p) = \mathbf{J}_{ohm} + \mathbf{J}_{difusio}$$

$$\text{non } \sigma = \sigma_n + \sigma_p = q (n\mu_n + p\mu_p)$$

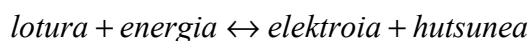
Hor ikusten dugunez, Ohmen legea ez da beti betetzen erdieroaleetan.

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

4. SORRERA ETA BIRKONBINAKETA

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

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



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

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

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

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

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

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

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

4.1 Birkonbinaketaren abiadura oreka termodinamikoetik kanpo

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

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

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

Zehazkiago:

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

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

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

$$n' = n - n_0$$

$$p' = p - p_0$$

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

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

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

INJEKZIO MAILAK: INJEKZIO BAXUA ETA INJEKZIO ALTUA

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

Injekzio baxuan izendapen orokorragoa aplikatuz:

$$m' \ll M_0$$

$$m = m_0 + m'$$

$$M = M_0 + M'$$

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

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

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

Oreka termodinamikoetik kanpo:

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

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

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

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

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

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

Injekzio baxuan, fenomenoak adierazpen nahiko simple batez adieraz daitezke:

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

Hau da,

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

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

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

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

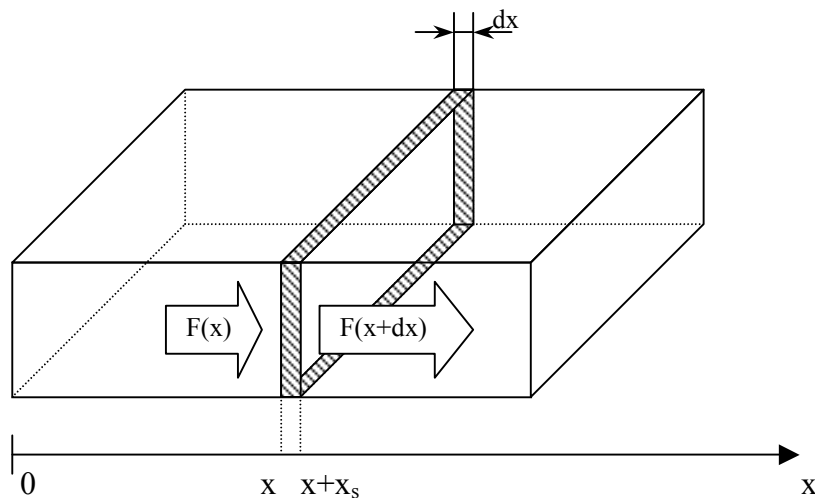
4.2 Gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera

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

GAINAZALEKO BIRKONBINAKETAREN ETA SORRERAREN JATORRIA

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

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



4.1 Irudia. Gainazala eskualde mehe baten bidez adierazita

ANALISI MATEMATIKOA (Injekzio baxuan)

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

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

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

Hori **bolumeneko birkonbinaketaren abiadura** da.

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

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

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

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

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

Hori **gainazaleko birkonbinaketaren abiadura** da.

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

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

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

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

Analisi bera errepika daiteke gainazaleko sorrerarako:

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

baina hemen ez da sorrera zinetikorik definitzen.

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

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

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

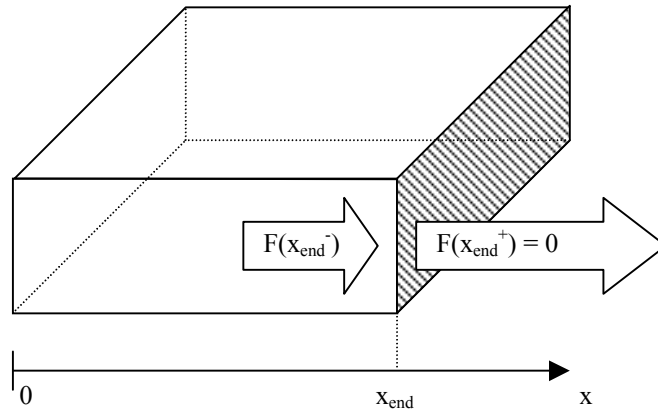
Hau da:

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

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

KASU BEREZIA: MATERIALAREN MUTURRAK

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



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

Adibidez, 4.2 Irudiko eskuineko muturra hartuz:

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

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

Eta injekzio baxuan bagaude:

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

Analogoki, ezkerreko muturretan, injekzio baxuan:

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

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

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

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

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

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

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

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

➤ **Sorrera eta birkonbinaketaren mugak**

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

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

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

5. EKUAZIO OROKORRAK

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

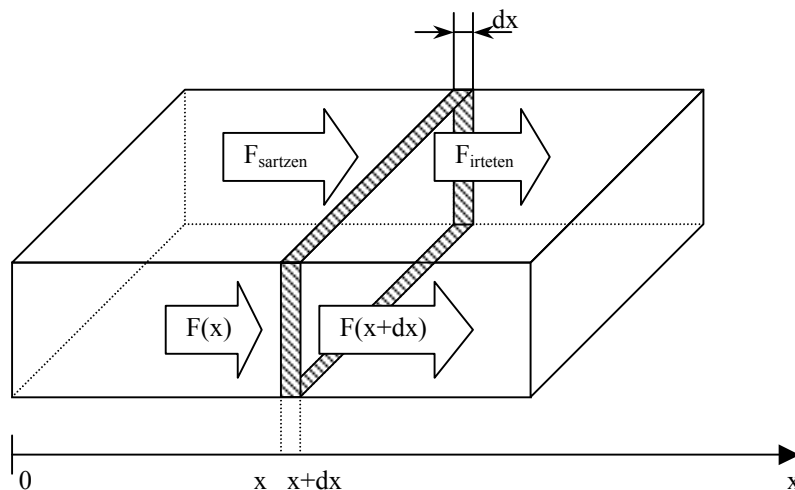
Bakoitza beraren aldetik analizatu badira ere, erantzun horiek guztiak batera gertatzen dira eta elkarren artean eragindako ondoriok kontuan hartu behar dira. Hori dela eta, fenomeno horiek guztiek kontzentrazioetan duten eragina kuantifikatzea izango da gure hurrengo helburua. Emaitza **jarraitutasunaren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

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

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

5.1 Jarraitutasunaren ekuazioak

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



5.1 Irudia. Eramailen jarraitutasuna aztertzea: lagin orokorra

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

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

Denbora joan ahala,

- Fluxuak bolumena zeharkatzean jasaten duen murrizketak kontzentrazioa handitzen du:

- $F(x)$ eramaile/cm²/s sartzen dira; eta $F(x+dx)$ irteten dira.
- Beraz, $F(x)-F(x+dx)$ eramaile/cm²/s geratzen dira barruan (dx luzeran).
- Beraz, cm³ eta segundo bakoitzeko $[F(x)-F(x+dx)]/dx = -dF/dx$ eramaile.

➤ Kanpoko Sorrerak kontzentrazioa handitzen du:

- G eramaile gehiago ditugu cm³-ko eta segundo bakoitzeko.

➤ Birkonbinaketak kontzentrazioa murrizten du:

- U eramaile gutxiago daude cm³-ko eta segundo bakoitzeko.

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

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial k}{\partial t} \right)_{\text{sorrera-birkonbinaketa}} + \left(\frac{\partial k}{\partial t} \right)_{\text{sarrerako fluxua-irteerako fluxua}}$$

Horrek, zuzenean, honako ekuazio hau dakar:

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

Hiru dimentsioak kontuan hartuz:

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

Eta, beraz, elektroietarako eta hutsuneetarako:

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

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

5.2 Egoeraren ekuazioak

Erdieroalezko laginaren ezaugarriak, bost ekuazio behar dira:

Poissonen ekuazioa:

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

Jarraitutasunaren ekuazioak:

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

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

Garraioaren ekuazioak:

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

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

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

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

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

5.3 Eramaileen denborarekiko aldaketa: erdibizitza

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

Analizatu eramaile-kontzentrazioaren denborarekiko bilakaera (geldikortasunera arte):

Hasi baino lehen:

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

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

- b) Injekzio baxuan gaudenez,

$$p'(t) \rightarrow n(x,t) = n_0 + p'(t) \sim N_D; \text{ eta } p(x,t) = p_0 + p'(t) = ?$$

Ariketa urrienez ebatziko dugu.

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

Beraz, hutsuneen jarraitutasunaren ekuaziotik abiatuz:

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

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

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

Ekuazio diferentziala ebatziz:

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

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

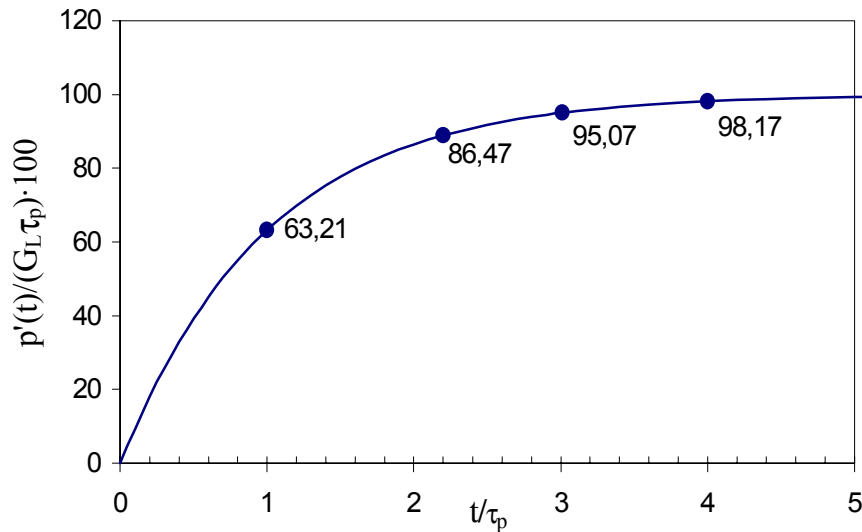
$$\text{Beraz, } p'(0^+) = G_L \cdot \tau_p + K \cdot \exp(0) = 0 \Rightarrow K = -G_L \cdot \tau_p$$

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

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

$$n(t) = n_0 + n'(t) = N_D + p'(t) \sim N_D$$

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



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

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

$$t/\tau_p = 1 \text{ denean} \rightarrow p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot 0.632$$

$$t/\tau_p = 2 \text{ denean} \rightarrow p'(t) = G_L \cdot \tau_p \cdot 0.865$$

Sorrera, birkonbinaketa eta hazkundearen analisia:

Sorrera: G_L

Konstantea

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

Gero eta handiagoa

Eta hazkundearen abiadura: $\frac{dp'(t)}{dt} = G_L \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$

Gero eta txikiagoa

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

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

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

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

Lehen bezala, hutsuneen soberakinari begira:

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

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

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

Ekuazio diferentziala ebatziz:

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

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

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

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

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

Sorrera: beti hutsa da.

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

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

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

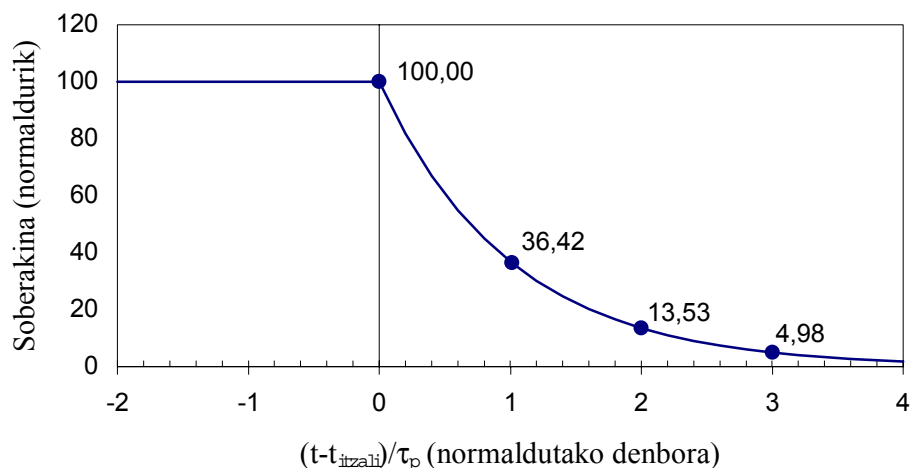
$$t = t_{itzali} + \tau_p: \quad p' = G_L \cdot \tau_p \cdot 0.368$$

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

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

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

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



5.3 Irudia. Denborarekiko bilakaera argia itzaltzean

5.4 Eramailen posizioarekiko aldaketa: barreiapeneko luzera

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

Datuak: $p'(0)$ eta τ_p .

Hasi baino lehen:

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

Urrienen soberakinaz ebatziko ditugu kontzentrazioak:

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

$$\text{eta } p'(0) = \text{datua} \quad \text{eta } dp = dp'$$

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

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

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

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

Injekzio baxuan gaudenez eta denborarekiko menpekotasunik ez dagoenez:

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

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

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

Bi (inguru) baldintza bete behar dira:

$p'(x \gg 0)$ finitua izango da

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

eta $p'(0)$ datua da.

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

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

agintzen du

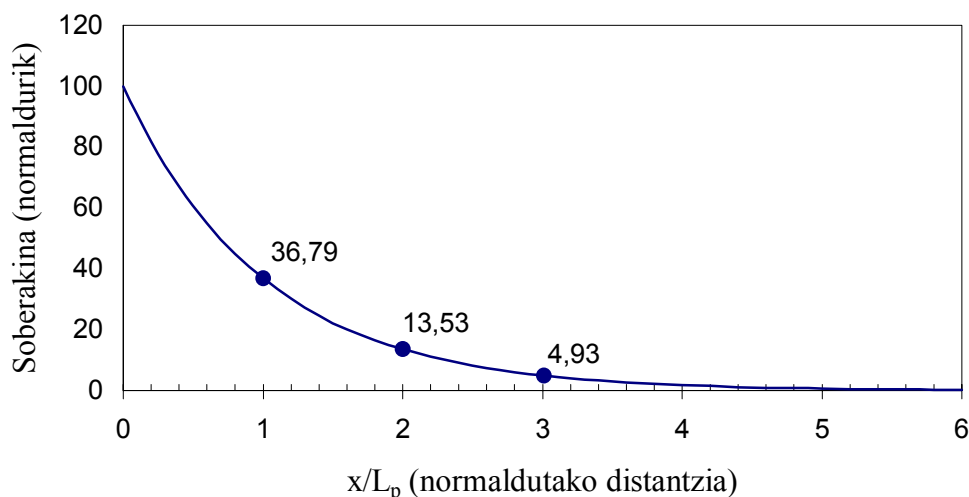
$$x = 0: \quad p'(0)$$

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

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

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

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



5.4 Irudia. Soberakin normalduaren espazioarekiko aldaketa

5.5 Gainazaleko birkonbinaketa

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

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

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

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

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

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

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

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

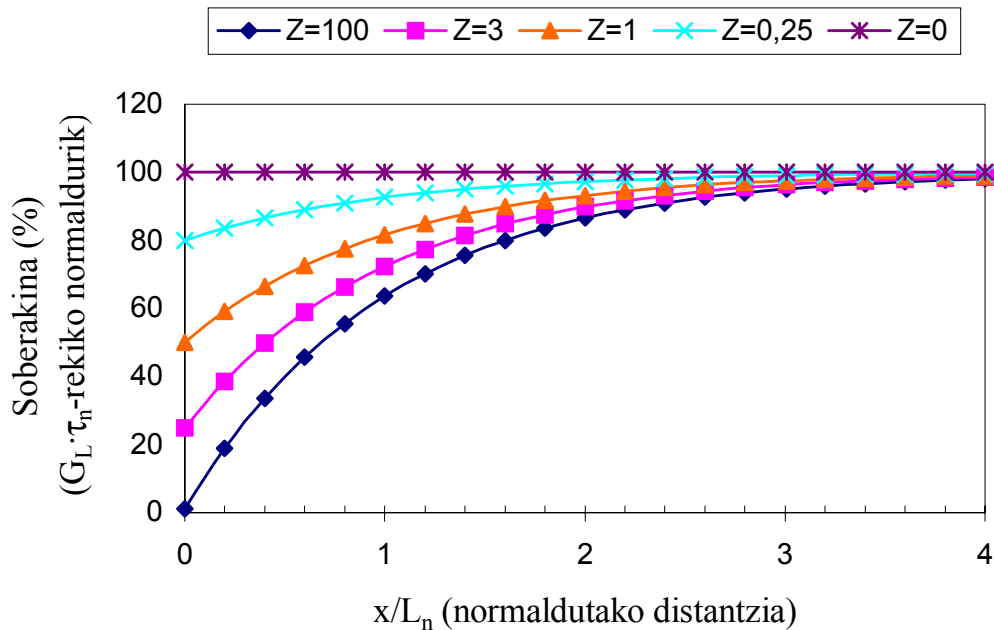
$$F_n(0) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \cdot \exp(-0) = K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} \Rightarrow -F_n(0) = -K_1 \cdot \frac{D_n}{L_n} = U_S$$

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

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

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

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



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

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

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

Muturreko bi kasu daude:

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

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

Erdieroale-metalen kontaktuak mota horretakoak izatea bilatuko dugu.

- $S = 0$ cm/s denean, gainazala *pasibaturik* dago, eta, bertako birkonbinaketa nulua denez, ez dago jariorik: $S \cdot n'(0) = 0 = U_s = -F(0) \text{ cm}^{-2} / \text{s}$. Kasu horretan ematen du materiala ez dela amaitzen (hemen ere, uniformea eta infinitua zenean lortzen zen profila agertzen da $n'(x) = G_1 \cdot \tau_n$).

Eranskina: ebatzi beharko ditugun ekuazio diferentzialak (injekzio baxuan)

A) Egoera iragankorrean, fluxuak konstanteak badira:

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

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

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

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

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

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

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

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

(Integrazio prozesutik sortu diren sasi-konstanteak dira)

C) Egoera geldikorrean, birkonbinaketa nulua bada:

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

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

Non A eta B mugaldeko baldintzetatik kalkulatzen baitira.

ERDIEROALEARI BURUZKO

ARIKETAK

1. ARIKETA: erdibizitza eta barreiapeneko luzera estatistikaren ikuspuntutik

Erdibizitza

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

$$t_1 = \frac{\int_0^{\infty} p'(t) \cdot dt}{p'(0)} \quad \text{Egiaztatu } t_1 \text{ urrienen erdibizitza dela.}$$

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

Barreiapeneko luzera

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

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

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

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

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

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

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

T(K)	0	200	248	249	250	251	300	400	500	700
N_{i0i}/N (%)	0	0	0	1	99	100	100	100	100	100
n_i (cm^{-3})	0	1E5	7E7	7E7	7E7	7E7	1E10	6E12	3E14	1E19

3. ARIKETA: egoera geldikorrak eta denborarekiko aldaketak

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

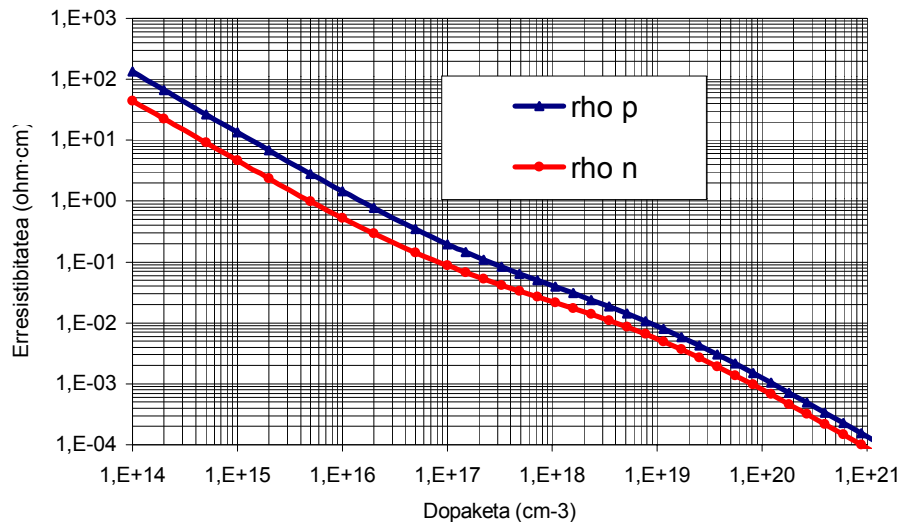
Elektroien erdibizitza $100 \mu\text{s}$ bada, kalkulatu lagineko eramaileen kontzentrazioak.

Argia itzali eta milisegundo batera ditugun kontzentrazioak kalkulatu.

4. ARIKETA: injekzio altua

Badugu $10 \Omega\cdot\text{cm}$ -ko erresistibitatea duen n motako siliziozko lagin bat, giro-tenperaturan ($n_i (300 \text{ K}) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

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



- b) Elektroien mugikortasuna $1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ bada, errepikatu aurreko atala.

Dakigunez, $U = R - R_{th} = kte (p n - n_i^2)$ (ia) beti betetzen bada ere, $U = m^{\prime}/\tau_{m}$ adierazpenak bakarrik injekzio baxuran balio du.

- c) Hutsuneen erdibizitza $1 \mu\text{s}$ bada, kalkulatu kte sasi-konstantearen balioa.

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

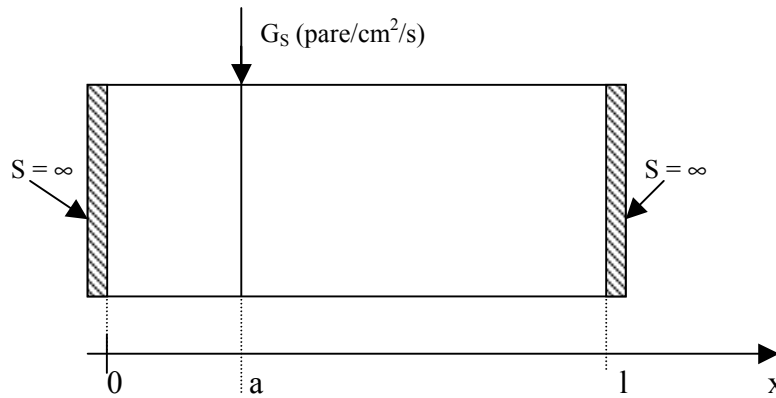
- d) Handik denbora luzera agertzen diren eramaile kontzentrazioak kalkulatu. Zer motako injekzioa dugu? Altua (indartsua) ala baxua (ahula)?

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

5. ARIKETA: gainazaleko birkonbinaketa eta sorrera

Badugu P motako erdieroale lagin homogeen bat. Bolumenean gertatzen den birkonbinaketa (U) ez da aintzat hartzeko modukoa, $U \sim 0$ erdibizitza (tau) oso handia baita. Laginaren luzera l da, Ezkerreko ertzetik a distantzian argi estu batez argiztatzen da, eta, plano horretan, G_S sorrera eragiten du (zentimetro **koadro** bakoitzeko eta segundo bakoitzeko G_S pare sortzen ditu: $G_S = G_V(\text{pare/cm}^3/\text{s}) \cdot x_s(\text{cm})$).

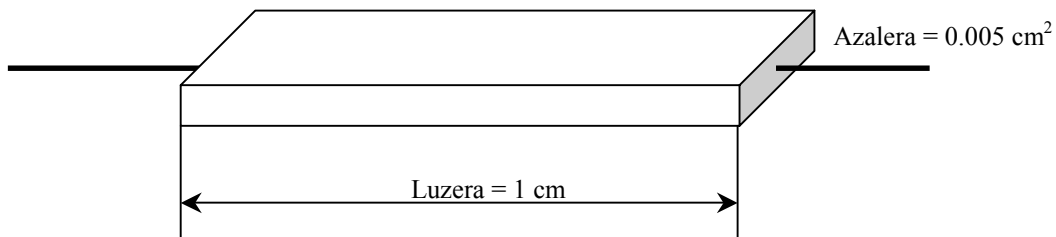
Kalkulatu soberakinen profila, kontaktuak ohmikoak direla jakinda.



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

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

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



Erdieroaleari buruzko ariketak

- a) Birkonbinaketa garbiaren abiaduraren adierazpen sinpleagoa lortu, elektroien soberakina (n') eta erdibizitza berri bat (τ) erabiliz. Kalkulatu erdibizitza horren balioa.
- b) Kalkulatu laginaren erresistentzia.
- c) Dispositiboa uniformeki argizatzen da (cm^3 eta segundo bakoitzeko $G_L = 2.36 \cdot 10^{18}$ pare sortzen dituen argi batez). Kalkulatu egoera geldikorreko soberakinak.
- d) Kalkulatu ilunpeko eta argipeko erresistentziak.
- e) $t = 0$ denboran argia itzaltzen bada, kalkulatu τ uneko erresistentzia.

7. ARIKETA: injekzio altua eta injekzio baxua

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

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

- a) Kalkulatu egoera geldikorreko profilak (kontzentrazioak).
[Gainazalek ez dute eraginik, oso urrun daudelako edo $S = 0$ cm/s delako].
- b) $t = 0$ unean, argia itzaltzen da. Hortik aurrera, urrienen soberakinak duen bilakaera irudikatu, eta baliorik esanguratsuenak azpimarratu.

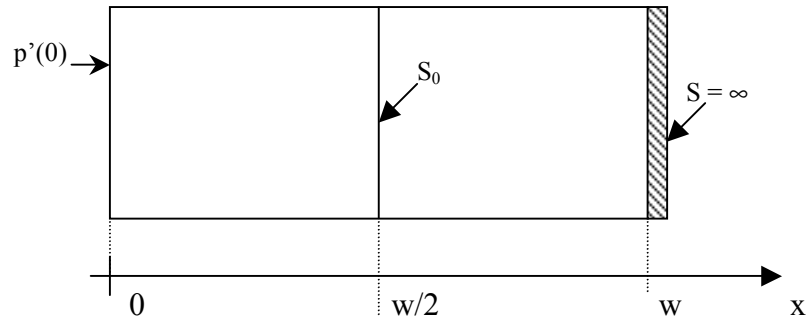
8. ARIKETA: gainazaleko birkonbinatzea

Badugu N motako erdieroale lagin bat, w luze.

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

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

Erdieroaleari buruzko ariketak



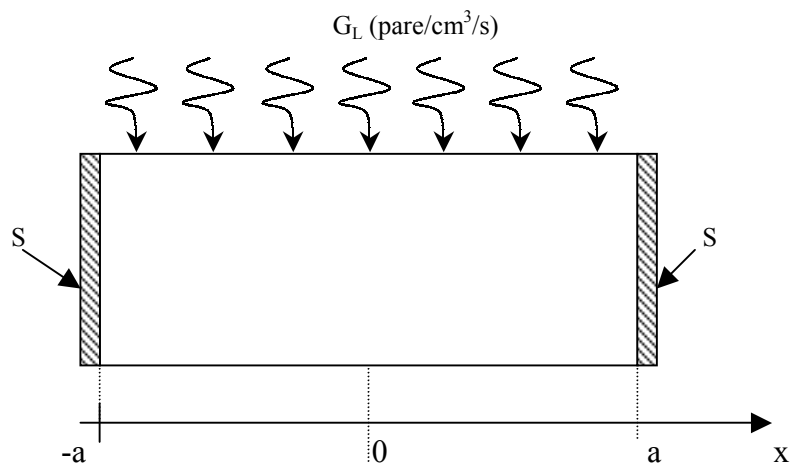
- a) Egituran zehar dagoen soberakinen profila kalkulatu (S_0 abiaduraren funtzio gisa).
- b) $S_0 = 0$ eta $S_0 = \infty$, kasua aztertu. Ondorioak atera.
- c) Segundo bakoitzeko eta cm^2 bakoitzeko $x = w/2$ eta $x = w$ gainazaletan birkonbinatzen diren eramaileak (pareak) lortu (S_0 parametroaren arabera).
- d) $S_0 = 0$ eta $S_0 = \text{infinetua}$ denean, kasua aztertu. Ondorioak atera.

9. ARIKETA: gainazaleko eta bolumeneko birkonbinaketa

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

$$\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/\text{V/s}; \mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V/s}; \tau_p = 10 \mu\text{s}; kT = 0.025 \text{ eV}; (kT/q = 25 \text{ mV})$$

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



Erdieroaleari buruzko ariketak

- Gainazaletarantz fluxurik ez balego (hau da, gainazaletako birkonbinatzea $S = 0$ cm/s izango balitz), bolumenean genukeen soberakina kalkulatu. Injekzio baxuan al gaude?
- Bi gainazaletan oso birkonbinatzea handia badugu ($S = \infty$ cm/s; hau da, kontaktuak ohmikoak badira), pentsatu soberakinen profilarren forma eta fluxuen noranzkoak nolakoak izango diren.
- Kalkulatu soberakinak. x ardatzaren jatorria laginaren erdian kokatuz. Ekuazio diferentzialaren soluzio gisa, sinu eta kosinu hiperbolikoak dituen erabiltzeak ekuazioak errazten ditu.
- Kalkulatu bolumenean eta bi gainazaletan gertatzen diren birkonbinatzeak ($B_{\text{BOLUMEN OSOAN}}$, pare/s; $B_{\text{BI GAINAZALETAN}}$, pare/s) eta sorrera osoa (G_{OSOA} pare/s). Bi birkonbinatzeen erlazioa kalkulatu eta ondorioak atera.

10. ARIKETA: grafiko logaritmikoak

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

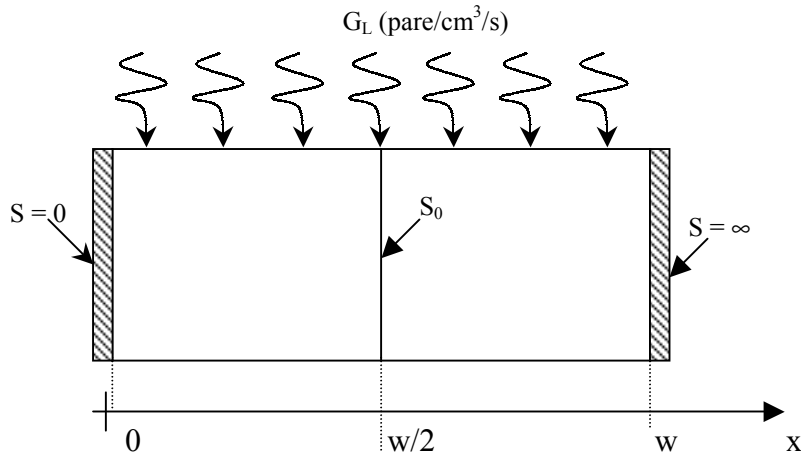
- Marraztu elektroien mugikortasun-eremuarekiko grafikoa (bospasei puntu hartuz). Erabili grafiko erdilogaritmiko bat, Y ardatza (μ) linealetan eta X ardatza (ϵ) logaritmikoetan jarri.

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

- Zenbat da mugikortasunaren kontzeptua onartzeko eremu maximoa?
- Mugikortasuna aplikagarria den tarte horretan, zenbat balio du k_2 malda logaritmikoak? Eta k_1 konstanteak? Zer da 10^{k_1} ?
- $k_2 = 3$ balitz, zein izango litzateke erlazioa.
- Saiatu $v = v(E)$ linealetan jartzen.

11. ARIKETA: gainazaleko birkonbinaketa

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



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

- Hutsuneen soberakina kalkulatu (S_0 aldagaiaren funtzio bezala). $S_0 = 0$, $S_0 = \infty$ eta erdiko kasu bat aztertu eta marraztu.
- Eramaile jarioak kalkulatu (S_0 aldagaiaren funtzio bezala) eta aurreko hiru kasuetako soluzioa marraztu.
- Zenbat pare birkonbinatzen dira segundo eta zentimetro koadro bakoitzeko erdiko gainazalean? Eta eskuinekoan?

12. ARIKETA: eskualde labur eta luzeak

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

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

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

Erdieroaleari buruzko ariketak

a) Egiaztatu:

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

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

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

$y \gg 1$ denean, $\exp(-y) \approx 0$ bada

b₁) L_p oso handia denean (w -rekin alderatuta): $p'(x) \approx p'(0) \cdot \exp\left[-\frac{x}{L_p}\right]$

b₂) L_p oso txikia denean (w -rekin alderatuta): $p'(x) \approx p'(0) \cdot \frac{w-x}{w}$

c) Aztertu honako bi kasu hauek:

c₁) Egiaztatu $U = 0$ denean b_1 kasua dugula.

c₂) Egiaztatu w infinitua denean b_2 kasua dugula.

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

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

13. ARIKETA: gainazaleko birkonbinaketa

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

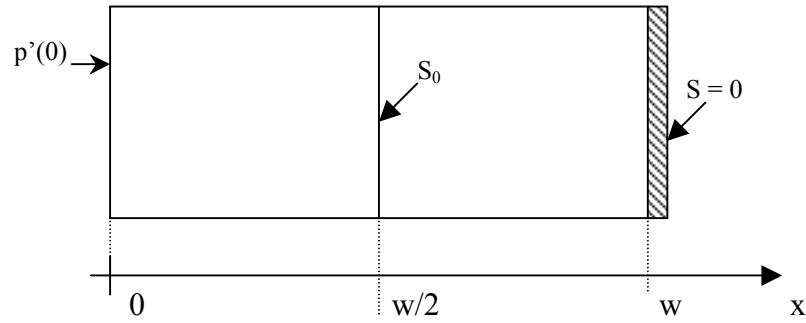
Ezkerreko ertzean, soberakin bat mantentzen da ezagutzen ez dugun bide batez ($p'(0)$, datutzat hartuko duguna). Eskuineko gainazala ($x = w$) pasibaturik dago ($S = 0$).

Bolumenean ez dago birkonbinatzeirik (ez eta sorrerarik ere).

a) Kalkulatu egoera horretan dugun hutsune-soberakina.

Erdieroaleari buruzko ariketak

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



- b) Kalkulatu hutsune-soberakina (S_0 aldagaiaren funtzioan). $S_0 = 0$, $S_0 = \infty$ eta erdiko kasu bat aztertu eta marraztu.
- c) Kalkulatu (S_0 aldagaiaren funtzioan) eramaile-jarioak eta aurreko hiru kasuetako soluzioa marraztu.
- d) Muturreko bi kasuetarako: zenbat pare birkonbinatzen dira, segundo eta zentimetro koadro bakoitzeko, erdiko gainazalean? Eta eskuinekoan?

Erdieroaleari buruzko ariketak

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, oinarritzkoa 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 kalkulatu 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

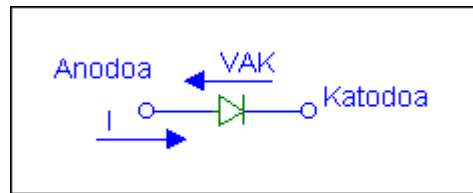
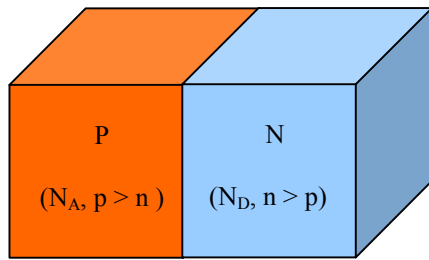
6.1.1 DEFINIZIOA

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 metalurgikoa 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 korronea.



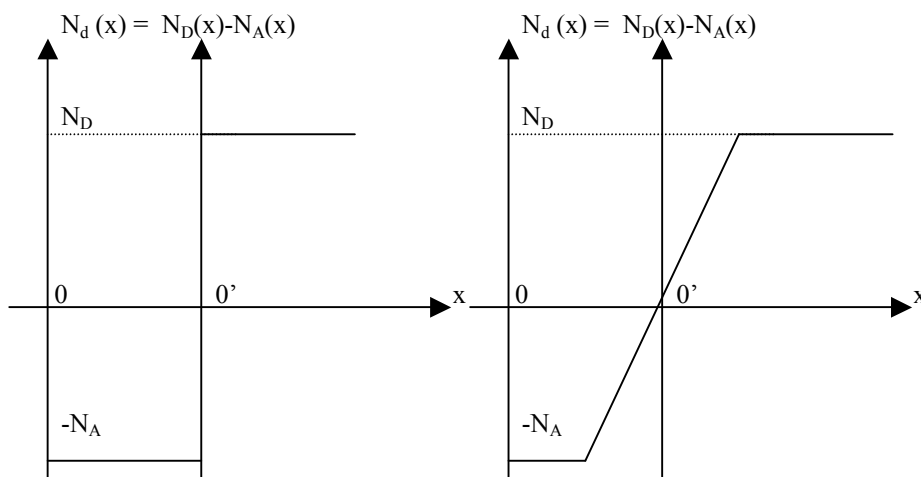
6.1 Irudia. Pn Juntura (ezk) eta diodoa (esk)

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 korrante itzela agertuko litzateke-eta).

6.2 Oreka termodinamiko 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.

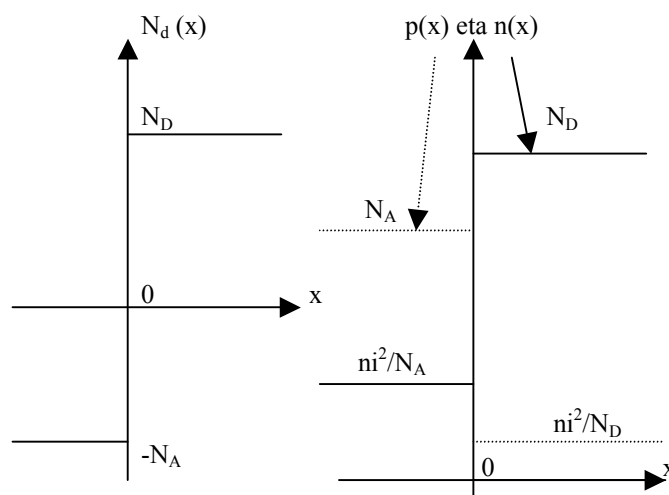
Beraz, tenperatura berean dago lagin osoa eta eramaile mota bakoitzaren fluxua zero da puntu guztietan.

6.2.1 OREKAKO PROFILEN SORRERA

Hasierako profil ezinezkoak

Elkarrekin jartzean, barreiaduraz, n eskualdetik p eskualderanzko elektroifluxu bat eta p eskualdetik n alderantz doan hutsune-jario bat agertuko dira, junturan dagoen kontzentrazio-alde itzela berdintzearen (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.

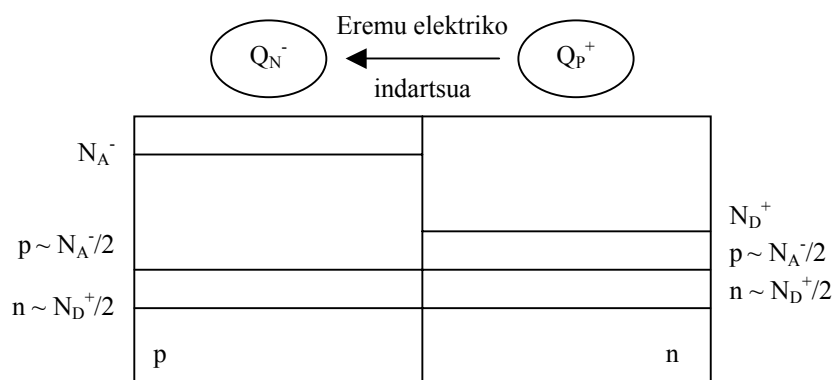


6.3 Irudia. Juntura latz lauan orekan agertzen diren kontzentrazioak: hasieran espero genitzakeen kontzentrazioak. Ezin dira orekakoak izan (fluxuak ez baitira zero)

Difusioa azken mugaraino eramanez gero lorturiko profil uniforme ezinezkoak

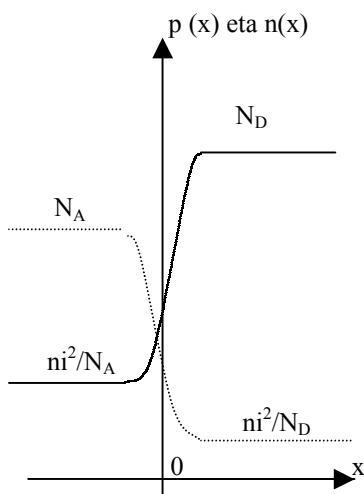
Demagun barreiapena azken mugaraino eramaten dela eta eramaile-jarioak egitura osoan zehar kontzentrazioak berdindu arte jarraitzen duela. Orduan, karga finkoek (ioiek) mugitzerik ez dutenez, eskualde bat positiboki eta bestea negatiboki kargatuko lirateke (ikus 6.4 Irudia). Egoera horretan, ez dago 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 geldituko da.



6.5 Irudia. *Oreka termodinamikoan agertzen diren profilak*

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

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

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

Ugarietak 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 termodinamikoan, 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 gehieneko 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. Emaizta *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:

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

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

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

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

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

Eta, beraz,

$$\varphi(n \text{ eskualdean}) - \varphi(p \text{ eskualdean}) = \frac{KT}{q} \times \ln\left[\frac{N_D}{n_i^2/N_A}\right]$$

$$\phi_T = \frac{KT}{q} \times \ln\left[\frac{N_D \times N_A}{n_i^2}\right]$$

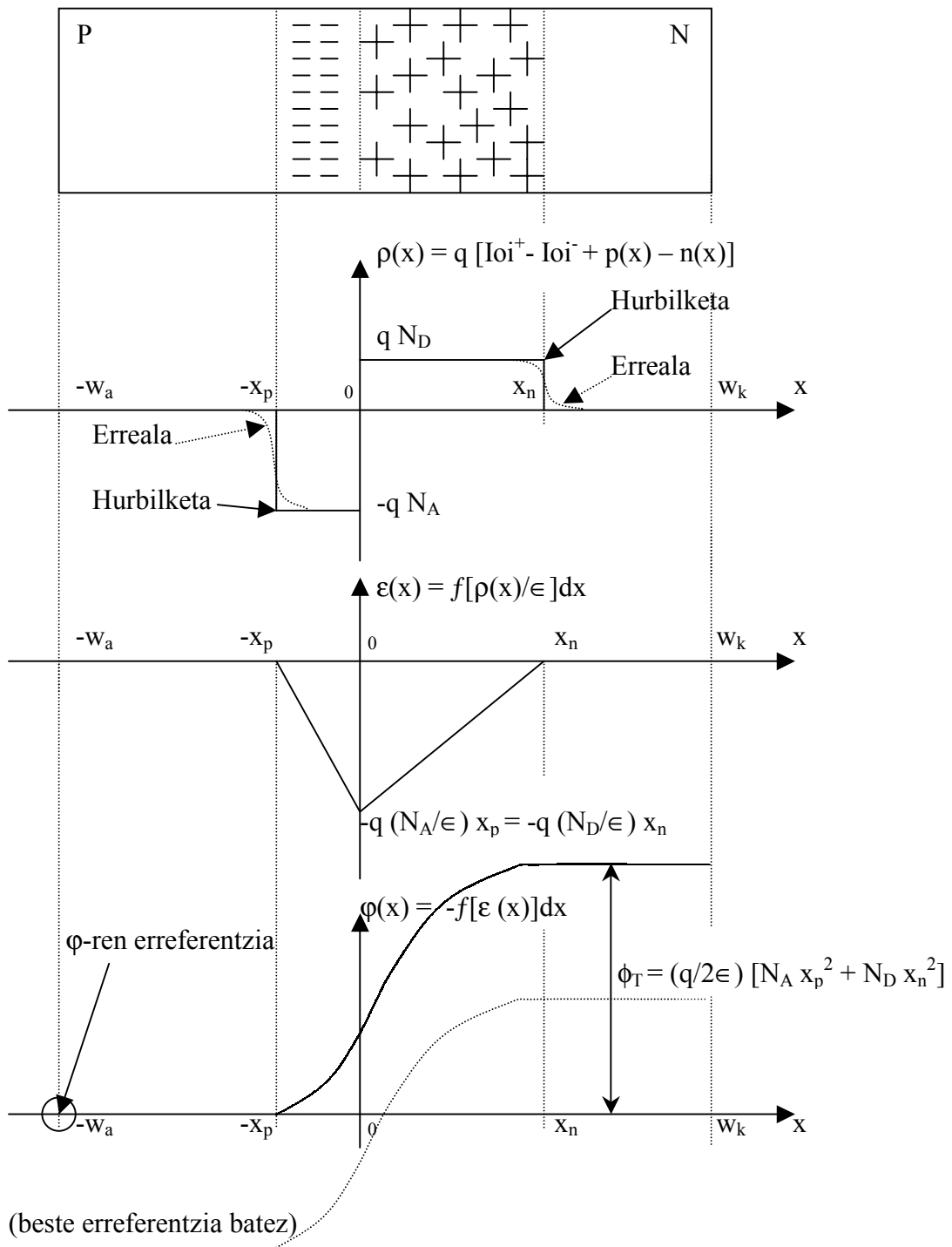
6.3 Eskualde dipolarra oreka termodinamikoan eta ϕ_T ebaztea

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 despokatzea, berriz, puntuez adierazten da. Ikusten denez, hurbilketa hori egitean, errorea txikia da eta, beraz, erraztasuna aitzaki, *erabateko despokatzearen hipotesia* ontzat eman daiteke.



6.5 Irudia. Eramailaz 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:

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

$$\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = -\frac{d^2\phi(x)}{dx^2}$$

non ϵ_s erdiekoalearen permitibitatea den. Normalean, parametro hau baino, hutsaren permitibitatearekin ($\epsilon_0 = 8.85E-14$ F/cm = 8.85 pF/m) erlazionatzen duen konstante dielektrikoa erabiltzen da datu gisa: silizioaren kasuan, $\epsilon_{rSi} = \epsilon_{erlatiboSi} = 11.8 \rightarrow \epsilon_{Si} = 104$ pF/m; germaniorako, $\epsilon_{rGe} = 16.3$.

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: $\mathcal{E}(x) = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon} \cdot dx$

Eskualdea	P neutroa	Kargaduna (P eskualderantz)	Kargaduna (N eskualderantz)	N neutroa
Eremuaren forma	K_1	$K_2 - qN_A/\epsilon_s x$	$K_3 + qN_D/\epsilon_s x$	K_4
Eremua	0	$-qN_A/\epsilon_s (x + x_p)$	$qN_D/\epsilon_s (x - x_n)$	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):
 $K_1 = 0$; $K_2 = -qN_A/\epsilon_S x_p$; $K_3 = -qN_D/\epsilon_S x_n$; $K_4 = 0$.
- Eremua jarraitua denez juntura metalurgikoan: $K_2 = K_3$; $-qN_A/\epsilon_S x_p = -qN_D/\epsilon_S x_n$; $x_n/x_p = N_A/N_D$

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

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

Gehieneko eremua: $\epsilon_{\max} = -qN_A/\epsilon_S x_p = -qN_D/\epsilon_S x_n$

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

Eskualdea	P neutroa	Kargaduna (P eskualderantz)	Kargaduna (N eskualderantz)	N neutroa
Eremua	0	$-qN_A/\epsilon_S (x + x_p)$	$qN_D/\epsilon_S (x - x_n)$	0
$\varphi(x)$ -ren forma	C_1	$C_2 + qN_A/\epsilon_S (x + x_p)^2/2$	$C_3 - qN_D/\epsilon_S (x - x_n)^2/2$	C_4
$\varphi(x)$	0 (erref.)	$qN_A/\epsilon_S (x + x_p)^2/2$	$qN_A/\epsilon_S (x_p)^2/2 + qN_D/\epsilon_S (x_n)^2/2 - qN_D/\epsilon_S (x - x_n)^2/2$	$qN_A/\epsilon_S (x_p)^2/2 + qN_D/\epsilon_S (x_n)^2/2 - \phi_T$

Honako mugalde-baldintza hauek jarritz:

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

Eta, beraz,

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

$$\phi_T = q/2 \epsilon_S [N_A x_p^2 + N_D x_n^2]$$

6.3.2 HUSTUTAKO ESKUALDEAREN ZABALERA

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

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

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

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

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

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

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:

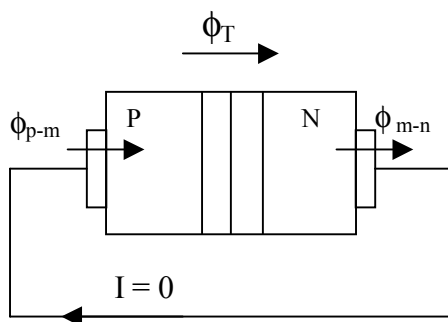
$$l = x_n \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right) \Rightarrow x_n = \frac{l}{1 + \frac{N_D}{N_A}} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot l \quad x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} \cdot l$$

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 *potenzial 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 kalkulatzeko dira.
6. Abiapuntua potentziala izango balitz, eremu elektrikoa deribatuz kalkulatu 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).

Eranskina: kontaktuetan agertzen den lan-potentziala eta Kirchoffen legea

Potentzial termodinamikoa oreka termodinamikoan agertzen da eta ez du inolako korronteirik 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 korronteirik 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

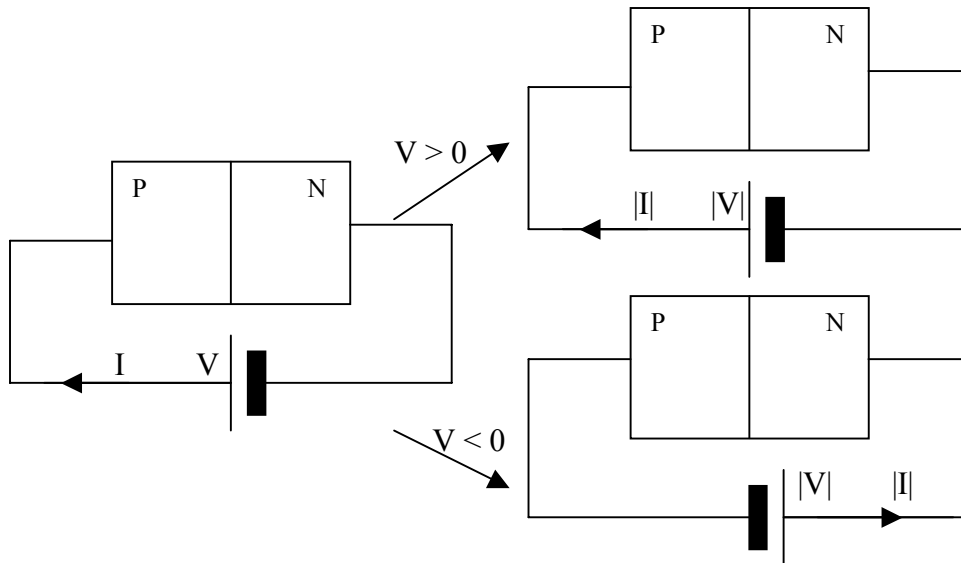
Ikasgai honetan, PN juntura polarizaziopean analizatuko dugu. Orekarekin alderatuz gero gertatzen diren aldaketen analisisan, honako puntu hauek ikusiko ditugu:

- 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, korronea, 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 ($\epsilon = J_{aM} / \sigma$) eta tentsioa ($V_{\text{eskneutroa}} \sim I \times L_{\text{eskneutroa}} / (\sigma A)$) 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: $I \cdot R_{\text{kontaktu}}$ eta $I \cdot R_{\text{esk neutro}}$, 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.

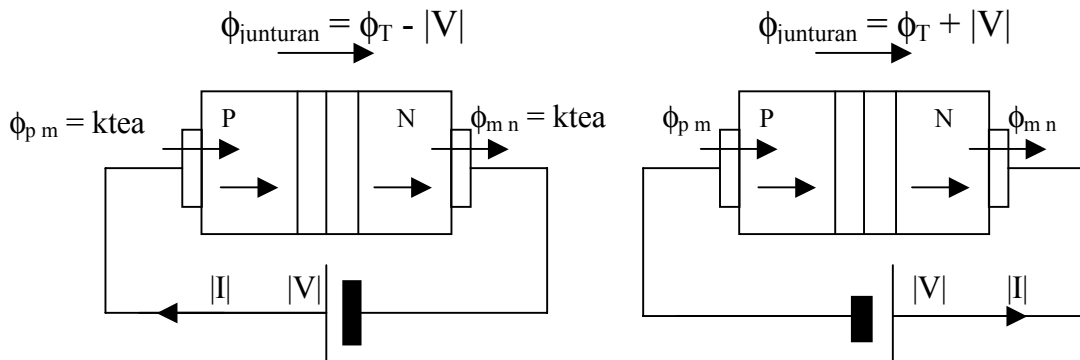
$V = 0$ kasuan, $\phi_T - k$, n eskualdea (katodoa) p eskualdea (anodoa) baino potentzial altuagoan zegoela esaten zigun.

$V > 0$ 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, elektroifluxu 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.

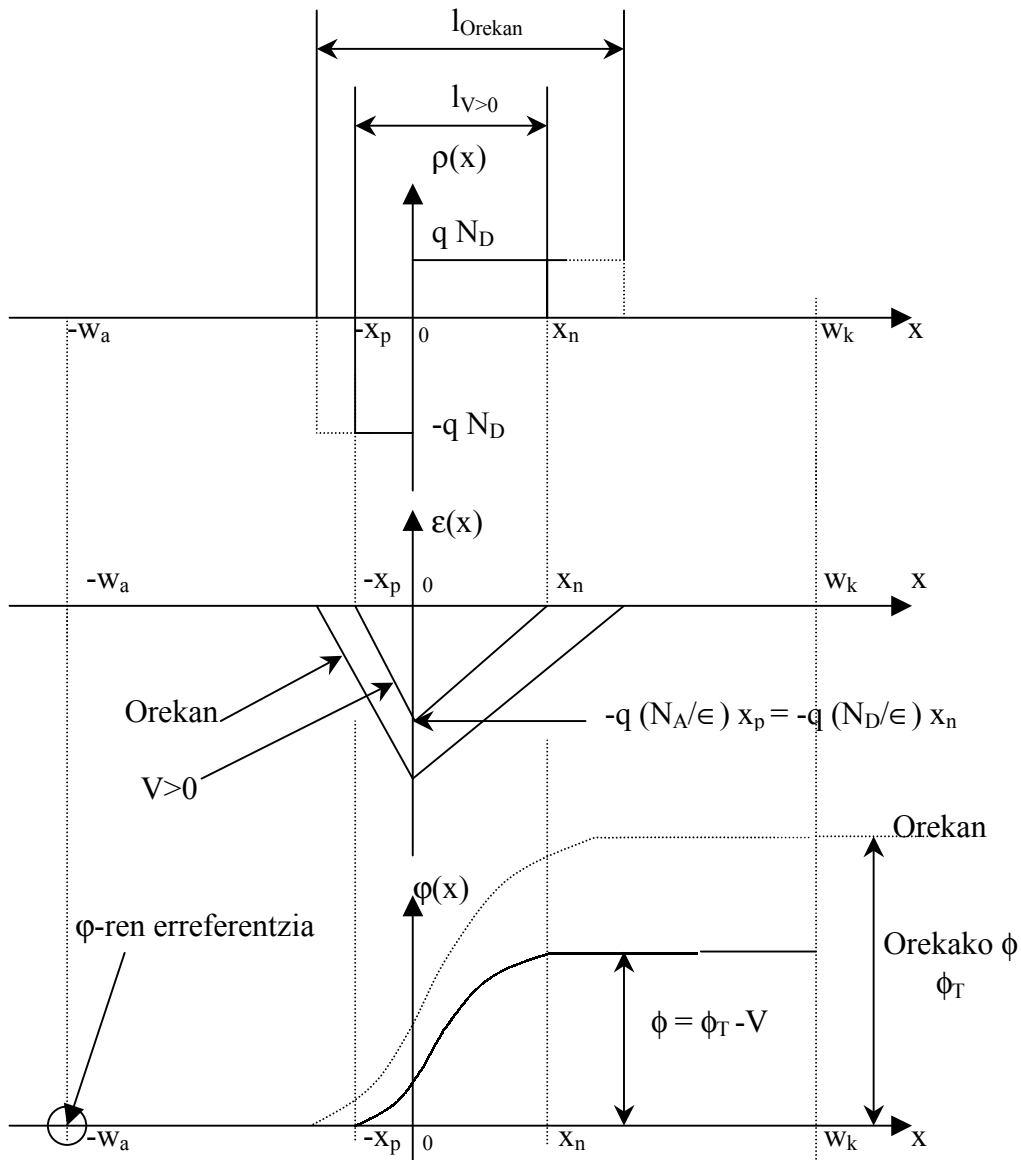
$V < 0$ bada, potentzial langa igotzen da eta eramaileek zailtasun handiagoak izango dituzte urrien diren eskualdera pasatzeko (horixe zen ϕ_T -ren helburua, eta orain $\phi_T - V > \phi_T$). Kasu honetan, atoiko korrontea, difusiokoa baino altuagoa da eta p eskualdetik n eskualdera elektroifluxu garbi bat doa; arrazoi bera dela-eta, paraleloan, hutsune-fluxu bat dago kontrari. 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 $\phi_{\text{junturan}} = \phi_T - V$ 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 formulaz agertzen den potentziala " $\phi = \phi_T - V$ " izango da:

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

Oharra:

Aplikaturako 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:

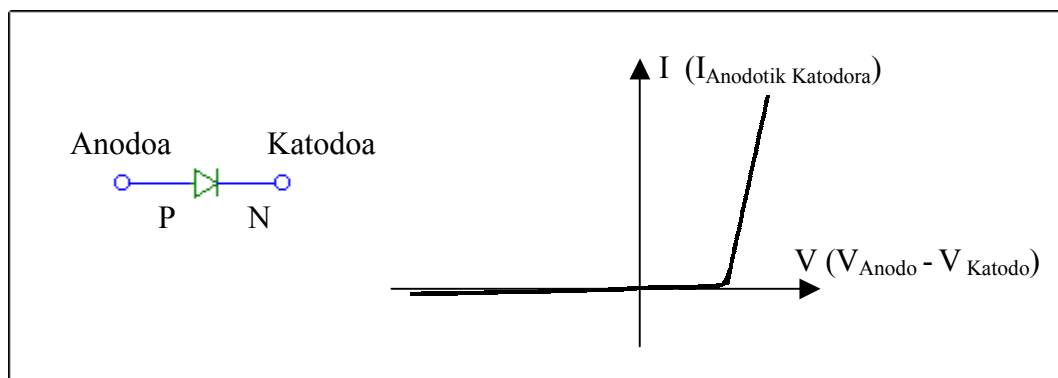
Hustutako eskualdean, $\phi_T - |V|$ potentziala dugu (non $|V| < \phi_T$). Beraz, orekarekin alderatuz gero, eremu txikiagoa eragingo du eta atoiko korronteak ez du barreiapeneko ezabatuko (gogoratu: barreiapeneko korronteak eramaileak ugarien diren puntutik urrien diren puntura daramatza). Beraz, n eskualdetik (katodotik) p eskualdera (anodora) doan elektrofluxu 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 ($n \rightarrow p$) eta hutsuneak ($p \rightarrow n$)] 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, orekako (ϕ_T) baino altuagoa da. Beraz, eremu handiagoa ekarriko du eta atoiko korronteak barreiapeneko korronteak gaitzen 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, korronte 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, korronte errazten da. Alderantzizko polarizazioan, aldiz, oso korronte txikia pasatuko da. Ondo dagokio, beraz, inbutu baten antzeko ikurra izatea.

Demagun badugula korronte alferno bat. Anodotik katodora doanean, diodoak pasatzen uzten dio. Alderantziz joaten saiatzen denean, berriz, eragozten dio. Geroago ikusiko dugunez, korronte alfernoa 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 errearen 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 korrontek konstanteak dira hustutako eskualde osoan zehar.
- Eskualde neutroetan, injekzio baxuan gaude (beraz $m \ll M_0$, $M \sim M_0$).
- Eskualde neutroetan urrien gutxi dagoenez eta eskualde horietako eremua hutsaren hurrengoa denez, ez dugu aintzat hartuko beren atoko 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,

$$n(x,t) = n(x) \rightarrow \frac{dn(x,t)}{dt} = 0; F_n(x,t) = F_n(x).$$

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, $n'_p(W_a) = 0$.

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

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

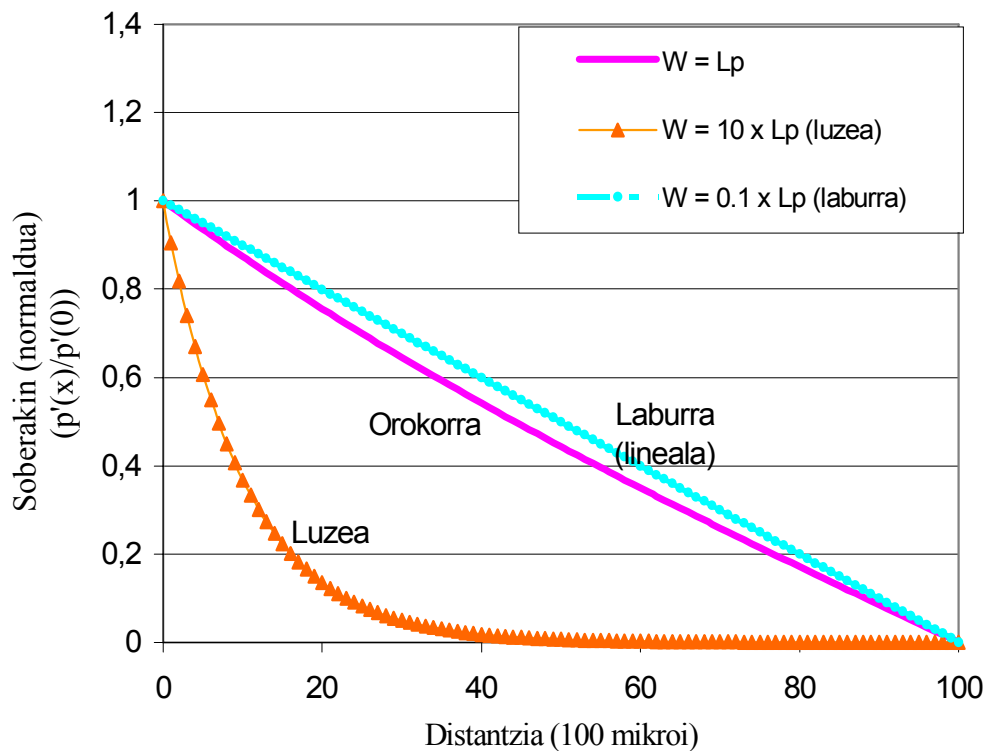
$$A = -B \cdot e^{-2W_a/L_n}$$

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

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

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

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



7.5 Irudia. *Urrienen soberakinaren profilaren forma hiru kasutan*

Beste eskualdean arrazoiketa bera eginez:

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

Eta barreiapeneko korronteak:

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

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

$$J_{osoa} = J_n + J_p$$

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 kalkulatzeko ditugu: bakarrrik difusioko osagaia duten lekuan. Kontuz, ordea zeinuekin. $J(x)$ positiboa denean, x positiboetarantz doa. Bi ardatz hartu ditugunez, bakarrera pasatzerakoan, eskualde bateko korronteen zeinuek 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;

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

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

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

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

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

JUNTURAKO URRIENEN SOBERAKINA:

Oreka termodinamikoan ebatzitako ekuazioa,

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

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 $n(x_2) = n_p(0)$; Gogoratu $\varphi(x_1) - \varphi(x_2) = \phi_T - V$

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

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

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

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

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

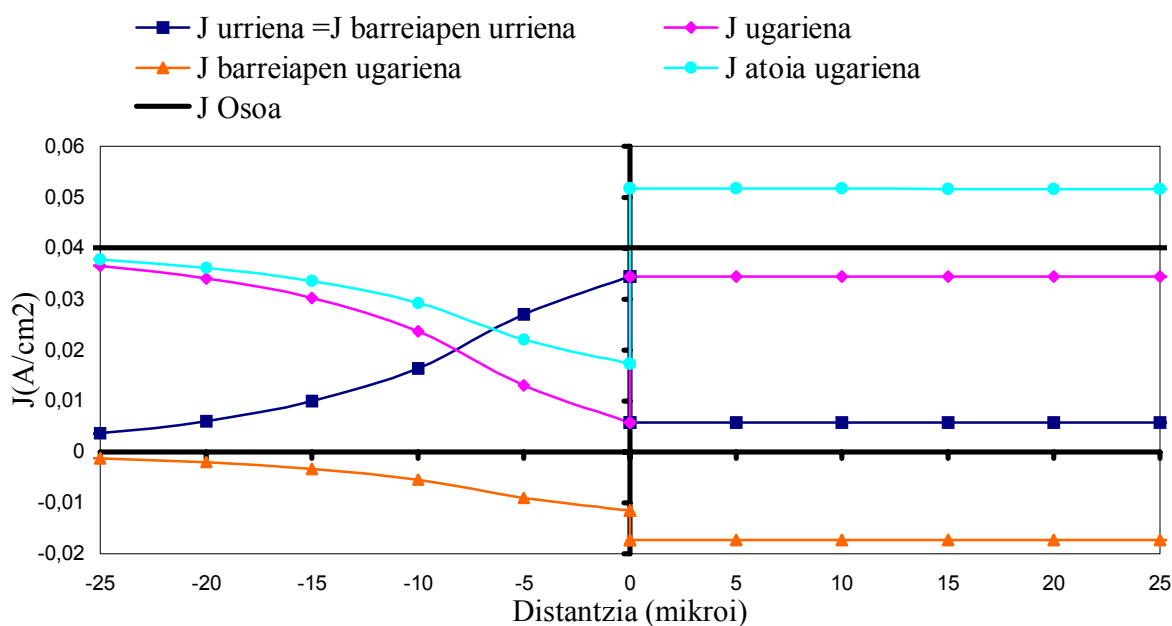
Era berean, katodoan,

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

Korrontea, beraz:

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

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



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: $D_p = 10$, $D_n = 30$, $n_i^2 = 10^{20}$, $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$, $N_D = 10^{16}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16}$, L_p (katodo) = $1000 \mu\text{m}$, L_n (anodo) = $10 \mu\text{m}$, Hortik, $J_{\text{sat}} = 11.2 \text{ pA/cm}^2$, $J(550\text{mV}) = 40.2 \text{ mA/cm}^2$

Prozeduraren urratsak:

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

7.3.3 SHOCKLEYREN EKUAZIOA

Ikusten denez, aplikaturiko tentsioa bakarrik esponentzian 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} asetarako korrantean biltzen baita:

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

(gogoratu: kontaktuak ohmikoak direnean bakarrik)

Zer esaten digu Shockleyren ekuazioak?

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

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

Diodo horretatik pasatzen den korrrontea taula gisa adierazita:

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

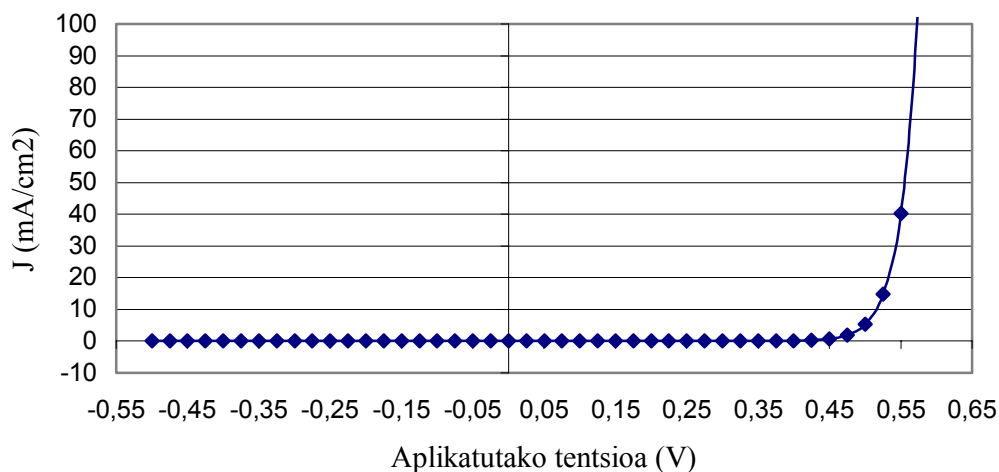
$V_D(\text{V})$	0	-0.05	-0.1	-0.5	-1	-5	-10	-50	-100
I_D	0	-9.7 pA	-11 pA	-11.2 pA	-11.2 pA	-11.2 pA	-11.2 pA	-11.2 pA	-11.2 pA

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

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

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

Ekuazioaren adierazpen grafikoa, diodoaren ezaugarri-kurba izango da:

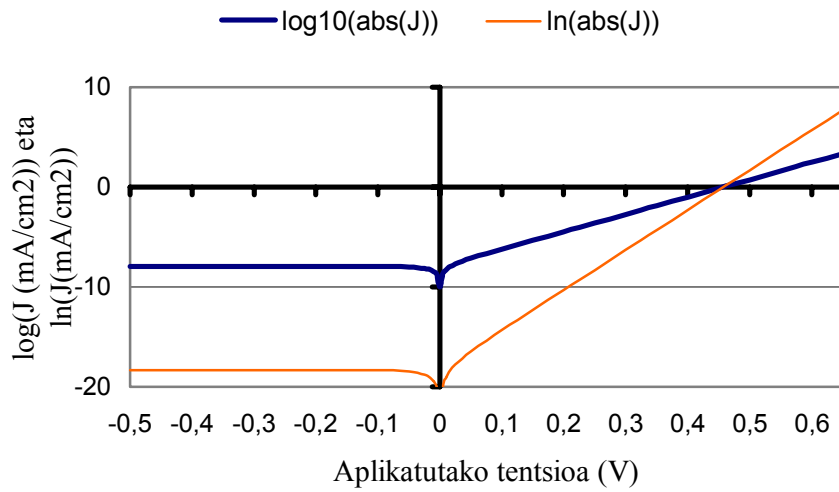


7.7 Irudia. Diodoaren ezaugarri-kurba ($J_{\text{sat}} = 11.2 \text{ pA/cm}^2$)

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

$$\text{Izan ere, } V \gg 25 \text{ mV bada, } \ln(I/I_{\text{sat}}) \sim V/V_T$$

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



7.8 Irudia. Aurreko diodoaren ezaugarri-kurba erdilogaritmikoetan

7.3.4 ASETASUNeko KORRONTEAREN ESANAHIA

Asetasuneko korronea, alderantzizko polarizazio indartsuetan agertzen den korronea da.

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

$J_{sat} = q \cdot \text{sorrera/birkonbinaketa termikoa orekan} \times \text{luzera eraginkorra}$

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, $n_i^2/N_A/\tau$).

$I_{sat} = AJ_{sat} = q \times \text{sorrera termikoa} \times (A \times \text{luzera eraginkorra})$

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

7.3.5 KASU BEREZIAK

DIODO ASIMETRIKOAK:

Demagun $N_A \gg N_D$ dela.

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

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 ASETASUNEN KORRONTEA:

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

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

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

Beraz, luzera fisikoak baino, barreiapeneko luzerak agintzen du.

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

OSO LABURRAK DIREN ESKUALDEEN ASETASUNEN KORRONTEA:

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

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

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

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

(kontaktuak ohmikoak direnean aplikatu daitezke bakarrik azken(formula) 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)

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

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

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

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

$$A = -B/W_a$$

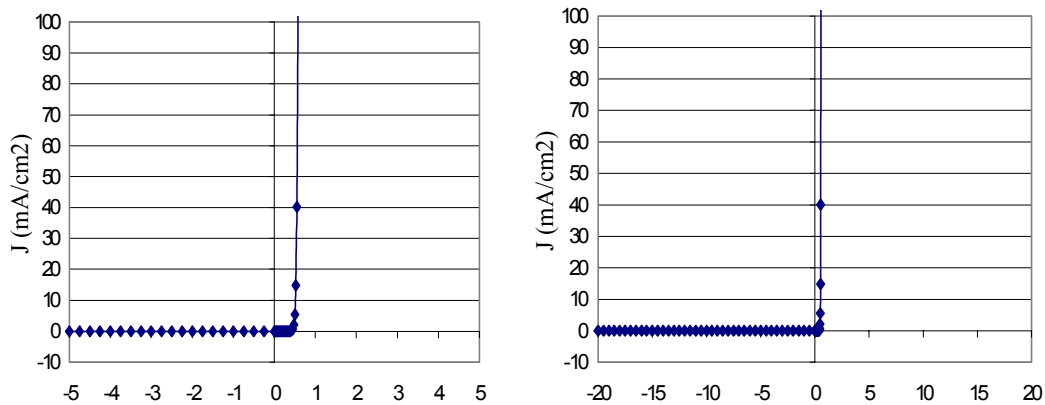
$$n'_p(x) = -B/W_a \cdot x + B = B \cdot \left(1 - \frac{x}{W_a}\right) = n'_p(0) \cdot \left(1 - \frac{x}{W_a}\right)$$

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

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

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 \rightarrow diodoaren erresistentzia hutsa da eta zirkuitulabur baten papera betetzen du. Alegia, ON egoeran dagoen etengailuarena egiten du.

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

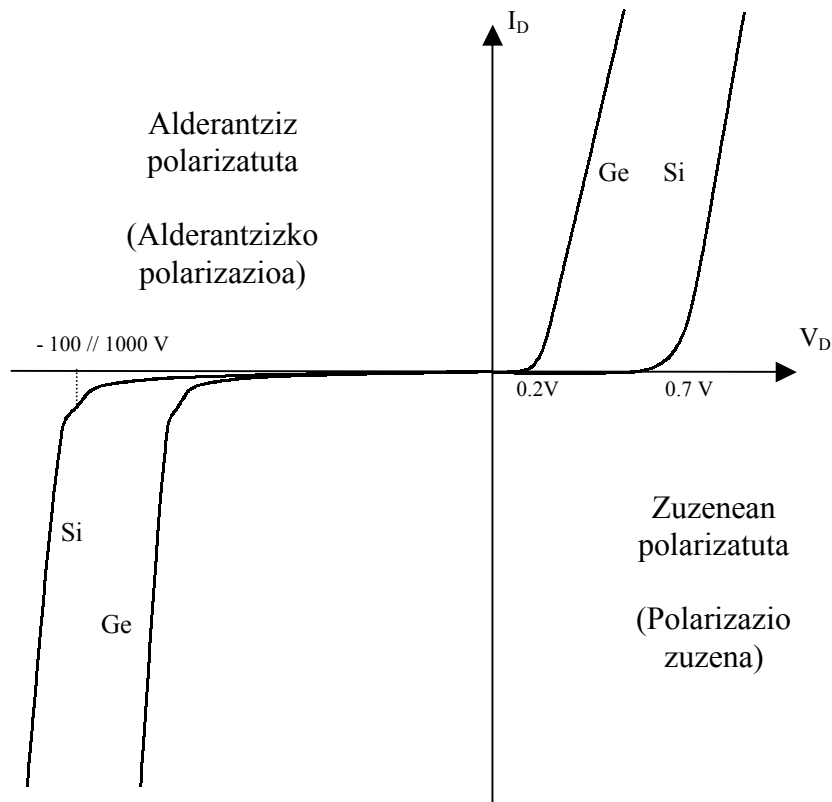
2. Alderantzizko polarizazioan, berriz, $i_D = 0$ eta v_D tentsioak edozein balio negatibo har dezake \rightarrow kasu horretan, haren zirkuitu baliokidea erresistentzia infinitu bat edo zirkuitu ireki bat da. OFF egoeran dagoen etengailua.

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

Horixe izango da diodo idealaren eredu (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)

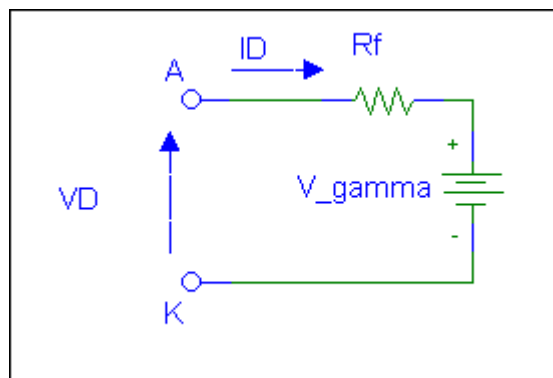
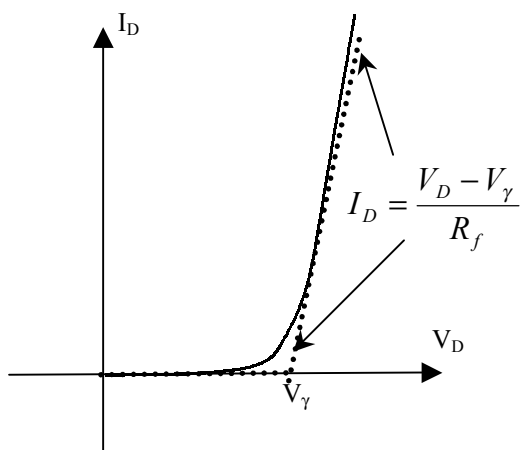


7.11 Irudia. Diodoen ezaugarri erreala

Errealitatean, berriz, korrante nabaria lortzeko, V_γ tentsioa aplikatu behar da gutxienez. Tentsio horretatik aurrera, korrantea 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, $V_\gamma = 0.5-0.7$ 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.

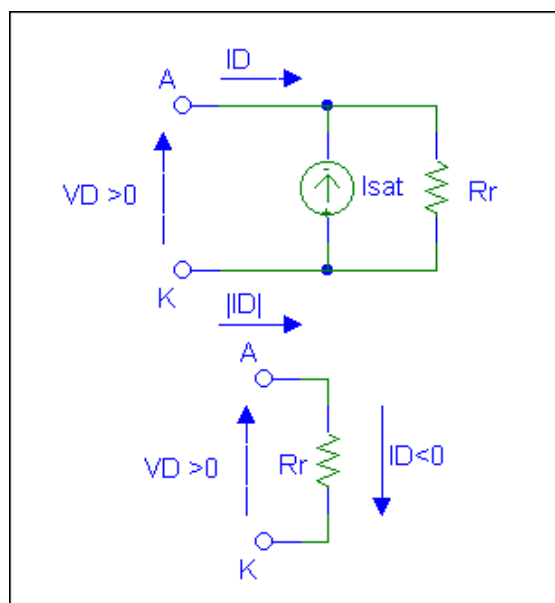
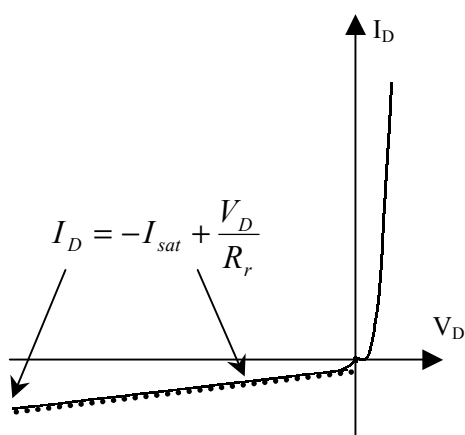


7.12 Irudia. Diodoaren eredu linealdua polarizazio zuzenean

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 berreraikitzeke erabili den erresistentzia baizik; diodoaren erresistentzia fisikoa seriean legoke eta txikiagoa litzateke].



7.13 Irudia. Diodoaren eredu linealdua polarizazio inbertsoan

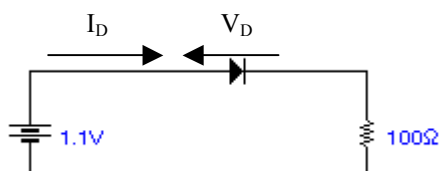
OFF egoeraren, zuzen baten bidez hurbil dezakegu etenaldiaren ezaugarria (7.13 Irudia). Zuzena jatorritik pasatzen da eta haren malda $1/R_r$ da, R_r erresistentziaren ezaugarriarekin bat datorrela. Horregatik, OFF egoeran, R_r erresistentziaz ordezkatu dezakegu diodoa. R_r nahiko handia denez (ehunka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

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

Eredu horeik seinale handiekin lan egiterakoan bakarrik balioko digute (hau da, $V > V_\gamma$ denean); esaterako, artzergailuetan. 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)

$$1.1 \text{ V} = I \cdot 100 + V_D; \quad (\text{zirkuituak ematen digun ekuazioa})$$

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

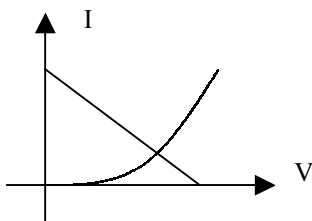
$$I = I_{sat} \cdot [\exp(V_D/25.9 \text{ mV}) - 1] \quad (\text{diodoak ematen digun ekuazioa})$$

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)

Ekuzio-sistema grafikoki adierazita:



7.15 Irudia. Polarizazioaren ebazpen grafikoa

Soluzioa bidegurutzea izango da.

7.5.2 ZIRKUITUAK EBAZTEA EREDU LINEALAK ERABILIZ

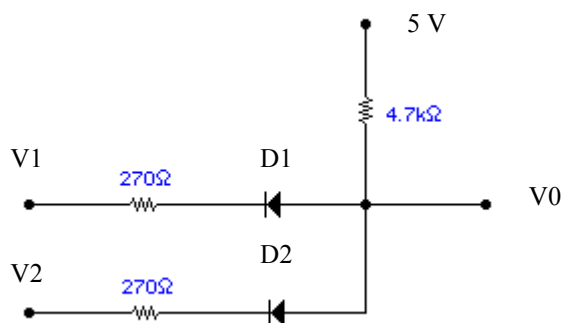
Aurreko prozedura erabiltzeak soluzio zehatzera garamatza, baina, bi diodo edo gehiago badaude, problema matematikoa zailtzen da eta nahiko emaitza hurbila lor daiteke eredu sinpleagoa erabiliz.

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 korronea 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:



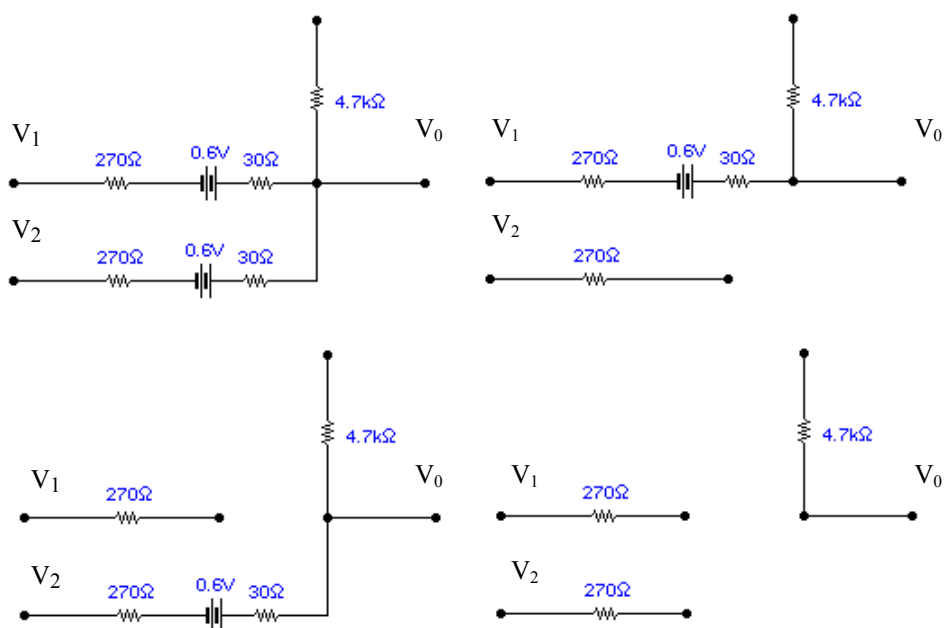
7.16 Irudia. Bi diodo dituen zirkuitua

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

Kalkulatu v_0 :

- $v_1 = v_2 = 5\text{ V}$ direnean.
- $v_1 = 5\text{ V}$; $v_2 = 0\text{ V}$ direnean.
- $v_1 = v_2 = 0\text{ V}$ direnean.

Lau aukera ditugu egoera bakoitzean:



7.17 Irudia. Polarizazio bakoitzaren lau aukerak

- a) Lehenengo kasuan ($v_1 = v_2 = 5 \text{ V}$), bakarrik laugarren konbinatzeak balio digu (zuzenean jo ditugun diodoetan, korronea kontrako noranzkoan –katodotik anodorantz- joango litzatekeelako). Beraz, korroneak zero dira eta $V_0 = 5\text{V}$.
- b) Bigarren kasuan, D_1 etenik dago eta D_2 , ON egoeran (3. konbinaketa), $V_0 = 0.86 \text{ V}$ dela eta diodotik pasatzen den korronea $+0.88 \text{ mA}$ 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 $I = 0.9 \text{ mA}$. $V_{D1} = V_{D2} = 0.63 > 0.6$. Beste konbinatzeetan, OFF egoeran zegoela pentsatu dugun diodoan (edo bietan), $V_D > 0.6\text{V}$ eta, beraz, ez dira zuzenak.

8. DIODO IDEALAREKIKO DESBIDERATZEAK

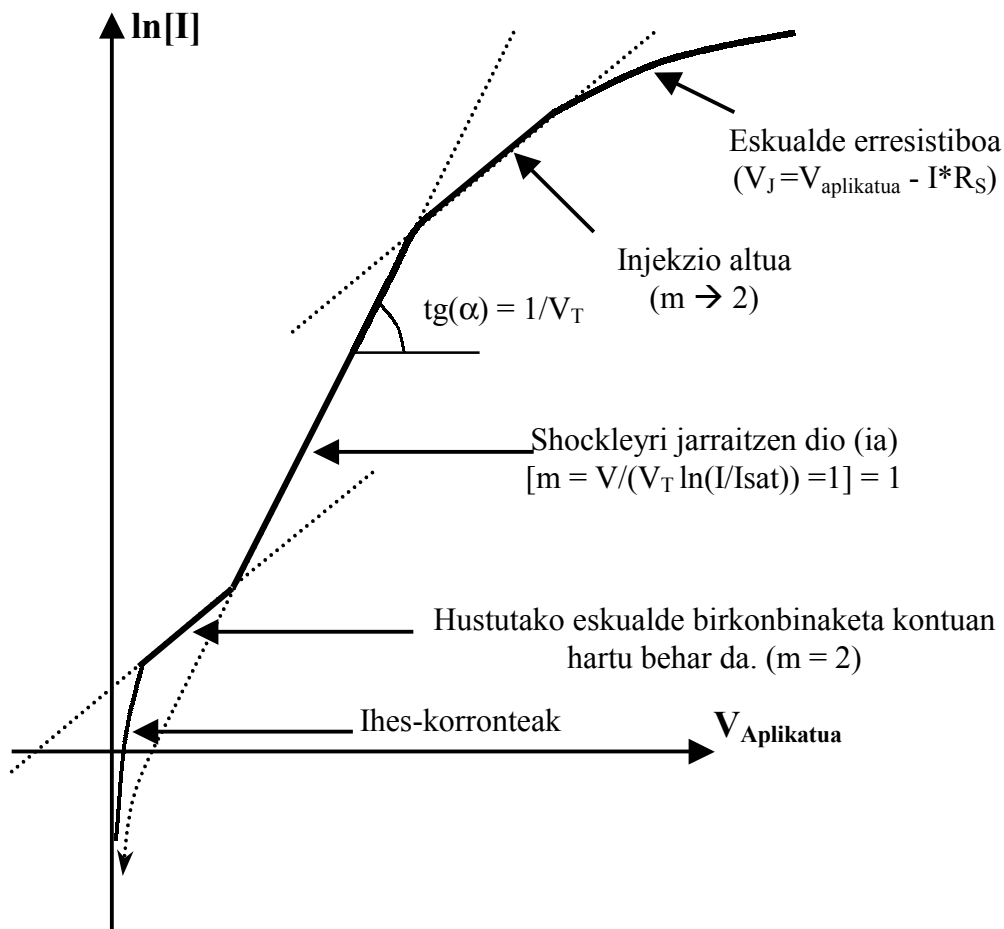
Diodorako ebatzi dugun ekuazioa, bat dator diodo errealen portaerarekin hurbilketa batzuk betetzen direnean —eta funtzionamendu puntu interesgarrietan betetzen dira—. Baina, egin ditugun hipotesiak batzuetan betetzen ez direnez, ezaugarri-kurba aldatzen da.

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.

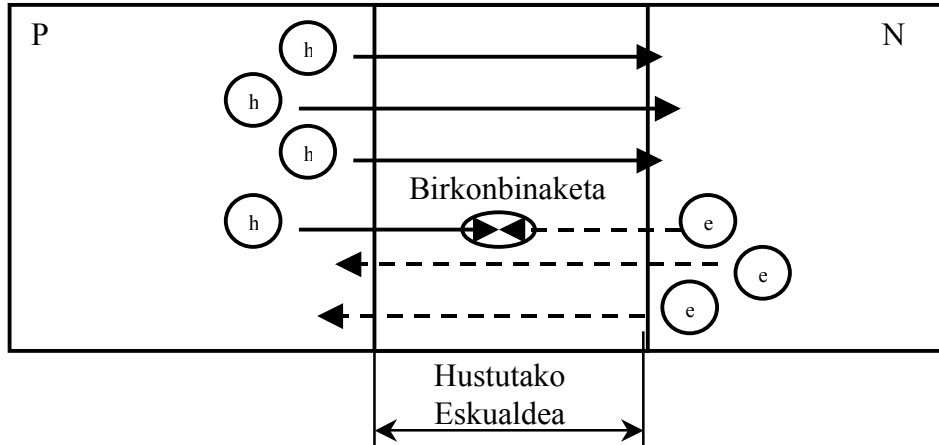


8.1 Irudia. *Korronte-tentsio ezaugarriaren desbideratzeak polarizazio zuzenean*

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:

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

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

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

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), korrontea nagusiaren (eskualde neutroen korrontearen) hazkundearen esponentziala moteltzen da.

Orduan, Shockley-ren ekuazioak kale egiten du eta korrontea-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, $I \times R = I \times \rho \times W / A$ 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,

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

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

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

Beraz, aplikatutako tentsio osoa $V_{aplikatua} = V_{juntura} + V_{R_{serie}}$ 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, fenomenoak 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.

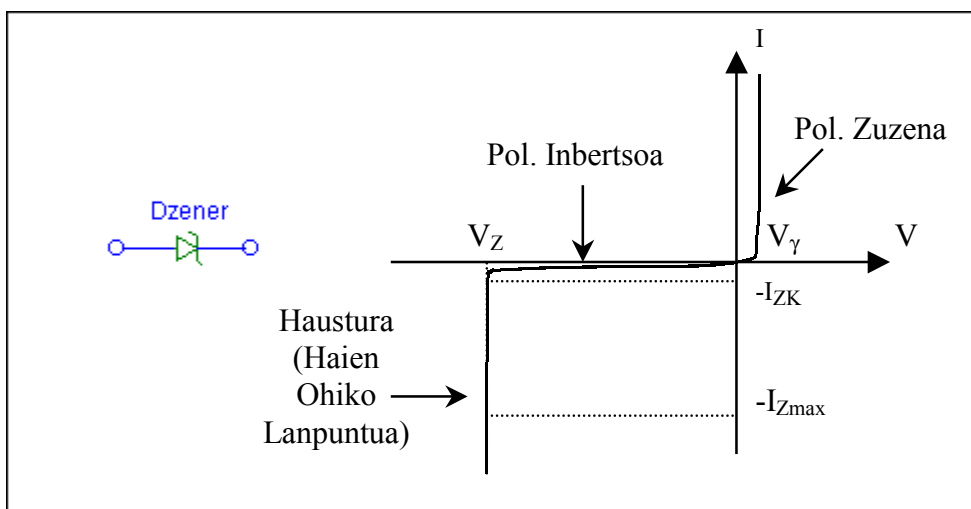
Tentsio negatiboa handitzen jarraitzen badugu, ordea, $-V_{BreakDown}$ tentsiora iristean, eroatea bat-batean errazten da hemen analizatuko ez ditugun mekanismoak direla medio (besteak beste, oldarrek edota tunel efektuak dakarten hustutako eskualdeko sorreraren bidez).

Orduan, tentsioa eta korrontea handiak izaten dira eta, xahutu behar den potentzia ($I \times V$) 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 hazkundera 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

Hausturan egoteko korronte minimoa eta maximoa

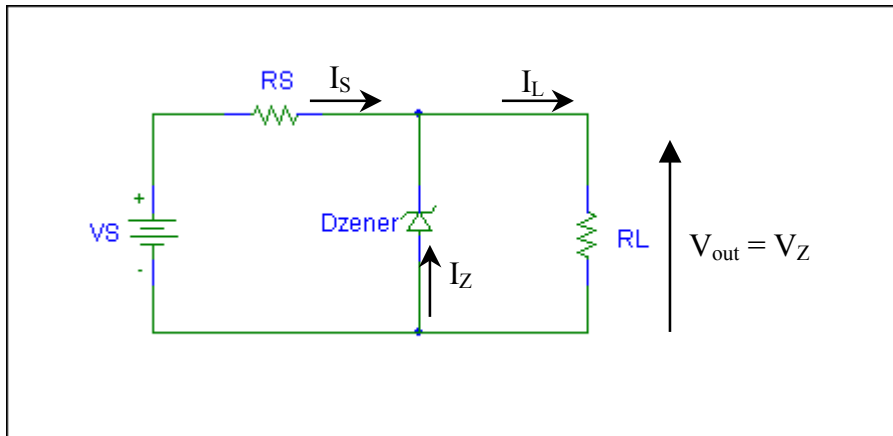
Ezaugarrian ikusten dugunez, korrontea I_{ZK} baino txikiagoa bada, ukondoan edo bihurgunean gaude eta ezin esan tentsioa V_Z denik. Beraz, zirkuituak egokiro funtzionatzen dutela ziurtatzeko korronte minimoa da I_{ZK} .

Bestela, diodoak gehieneko 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 korronea ikusi ditugun bi mugen artean badago):

$$I_L = V_Z/R_L \quad \text{eta} \quad I_S = (V_S - V_Z)/R_S$$

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

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

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

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

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

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

Lehenengo ezberdintasuna betetzen ez bada, Zenerrak korrone 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 korrone 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 konmutazioa. 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.

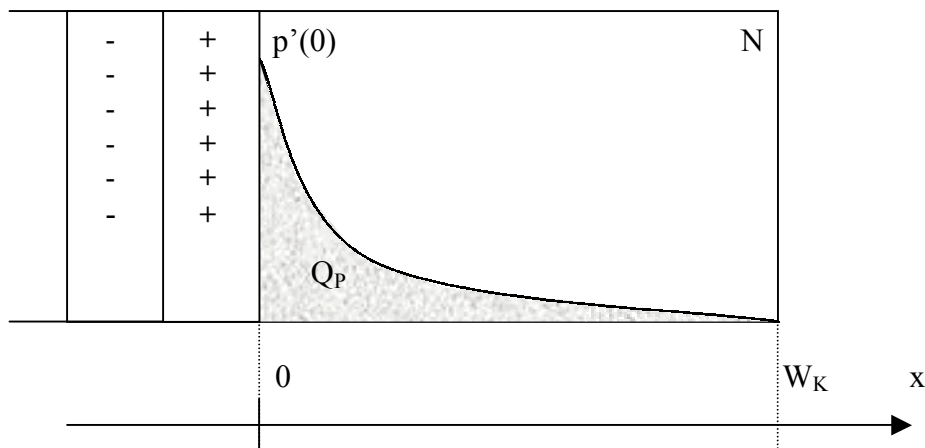
Estatikoan gaudenez, Shockleyren ekuazioa baliagarria da:

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

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

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

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

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

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

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

Horrek honako hau esan nahi du: erregimen geldikorrean (estatikoan), diodoaren korrontea birkonbinaketarako hutsuneak injektatzen ditu katodoan.

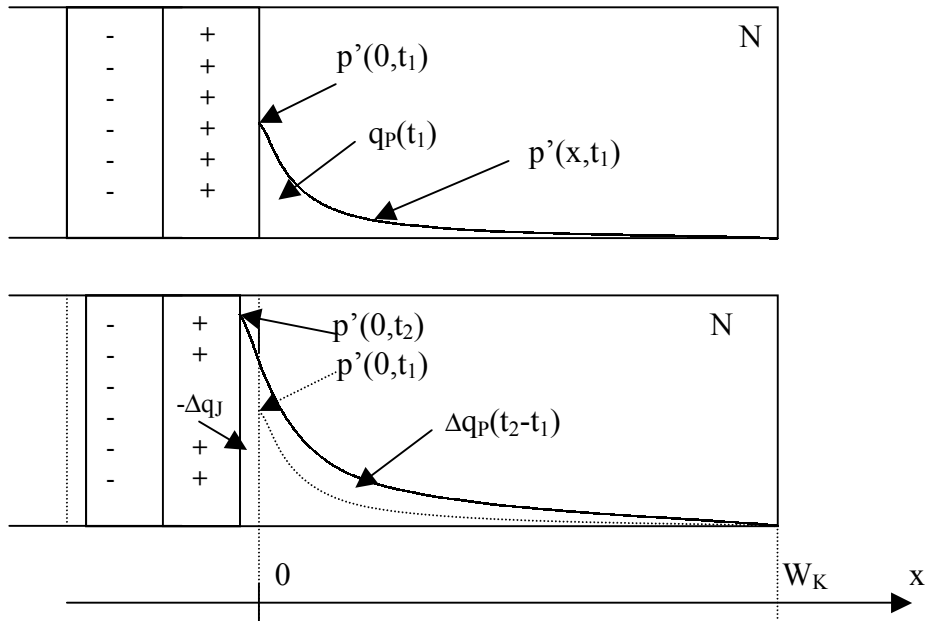
Kasu orokorrean, anodoari dagokion korronte-osagaia gehituz:

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

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 hazkundera behar duena: urrienen kontzentrazioaren hazkundera 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: $\text{luzera}/v = 10^{-4} \text{ cm} / 10^7 \text{ cm/s} = 10 \text{ ps} = \tau_t$.

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

$$p'_n(x,t) = p'_n(0,t) \cdot \exp\left[-\frac{x}{L_p}\right] \quad \text{katodoa luzea bada}$$

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

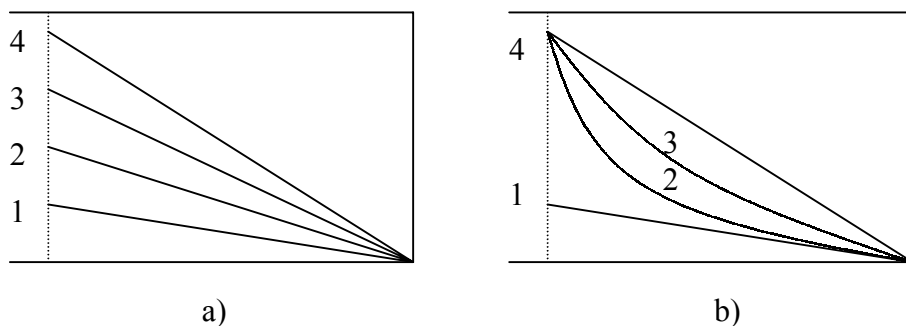
$$p'_n(x,t) = -p'_n(0,t) \cdot \text{Sh}\left[\frac{(x-W_c)}{L_p}\right] / \text{Sh}\left[\frac{W_c}{L_p}\right] \quad (\text{kontaktu ohmikoak})$$

Hau da, aldiuneko profila lortzeko behar den eramaile garraioa azkarrago gertatzen da tentsioen aldaketa baino. Une bakoitzeko egoera egoera geldikorrean bezala ebatzen 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 $< 100 \text{ kHz}$ bada. Diodo laburretan, profilen aldaketa azkarragoa izaten da eta, maiztasuna $\sim 25 \text{ Mhz}$ denean ere, hipotesia erabil daiteke. Hortik aurrera, profilek beste forma bat edukiko lukete.

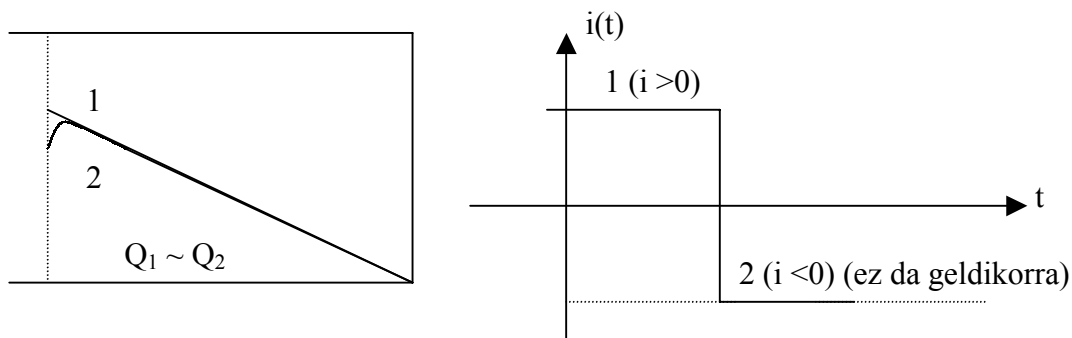
3. Kontaktuak ohmiko idealak dira eta ez dago tentsio-erorketarik eskualde neutroetan. Hori dela-eta, aplikatutako tentsio osoa junturan agertzen da. Hala ez balitz, erresistentzia bat jarri behar genuke seriean, tentsio horien berri emateko.



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

Estatikoan, $dp/dt = dn/dt = 0$ zen, eta korranteek 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: korrante gehigarri bat behar da.

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



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

AURREKO EKUAZIOAREN BESTE ADIERAZPEN BAT:

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

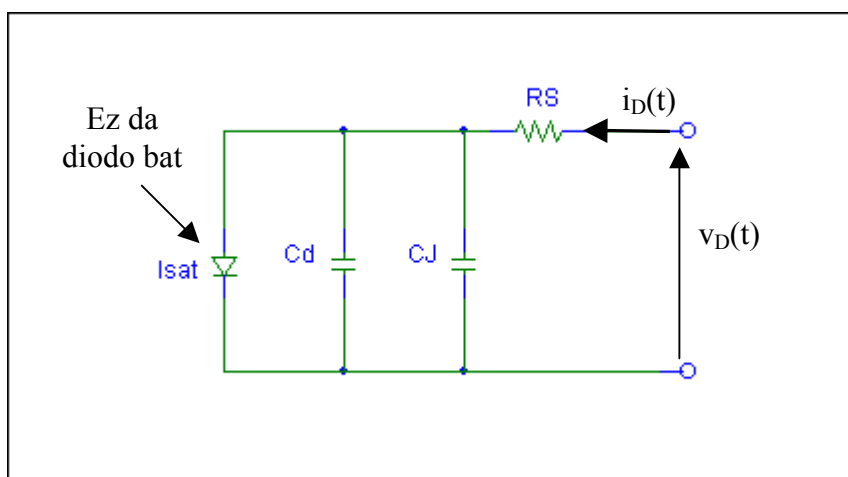
$$i_D(t) = \frac{q_H(v(t))}{\tau_p} + \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v} \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t} - \frac{\partial q_J(v(t))}{\partial v} \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t}$$

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

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

Osagaien esanahia:

- q_H/τ_p zatidurak egoera (sasi)geldikorreko korronea 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):

$$C_d = \frac{\partial q_H(v(t))}{\partial v} = \frac{\partial(I(v) \cdot \tau_p)}{\partial v} = \frac{\partial(I_{\text{sat}}(\exp(v/V_T) - 1) \cdot \tau_p)}{\partial v}$$

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

$$C_d = \frac{I_{\text{espero genuena}} + I_{\text{sat}}}{V_T} \cdot \tau_p \neq \frac{I_{\text{daukaguna}} + I_{\text{sat}}}{V_T} \cdot \tau_p$$

Junturakoa:

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

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

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

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

Beraz,

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

Juntura latz-laua ez bada:

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

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

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

C_{J0} orekako junturako kapazitatea da.

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

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

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

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

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

[$v(t)/\phi_T > 0.5$ 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, $C \sim C_J$.

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 analisisa: 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, $v_d(t) \ll V_T = 25.9 \text{ mV}$ (T_{ambient}).

Kasu horretan, tentsioen eta korronteen zati aldakorren arteko erlazioak linealak dira (eta ez esponenzialak / 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 ebatzea.]

Zuzenean dagoen p^+ 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 jarritz: $v_D(t) = V_D + v_d(t)$; non $V_D \gg V_T$

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

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

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

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

Beste era batean adierazita:

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

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

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

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.

$$\text{➤ } g_d = I_D / V_T$$

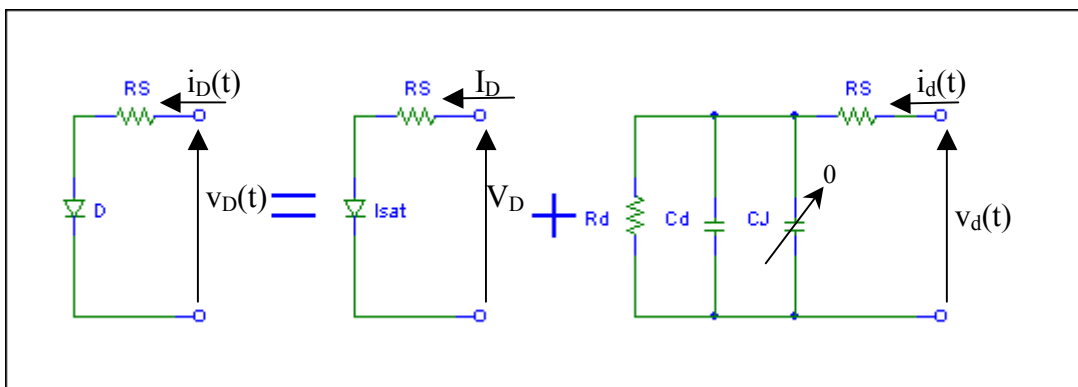
$$\text{➤ } C_d = I_D / V_T \cdot \tau_p = g_d \cdot \tau_p$$

(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 ($\ll 26 \text{ mV}$):
 - Seinale jarraituko (handiko) zirkuitua analizatuz, polarizazioko korranteak 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)*

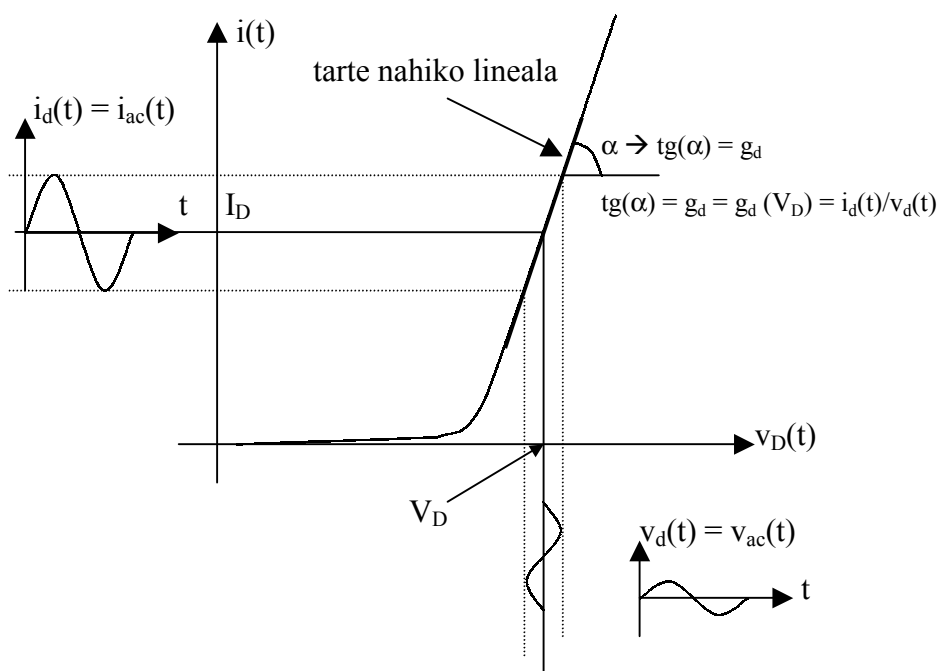
Seinale txikiko zirkuituko osagai guztiak linealak dira.

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:

$$v_d = V_{dm} \exp(j\omega t) \rightarrow i_d = V_{dm} \cdot \exp(j\omega t) \cdot [g_d + j\omega C_d]$$

Ikusten denez, desfasatu eta ahuldu egin daiteke, baina korronteak tentsioaren forma du eta horien bidez egindako zirkuituen arteko sarreren forma / itxura bera izango dute (seinaleak sinusoidalak badira). Maiztasun oso baxuen kasua berezia eta interesgarria da. Orduan, $\omega C_d \ll g_d$, 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 ebatzea 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:

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

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

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

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

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

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

9.4 Diodoaren portaera konmutazioan

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, bigarrenetan, zirkuitu irekia da, beraz. Diodoen ezaugarriarekin antza handia duenez, horiek ere noranzko bakar bateko etengailu gisa erabil daitezke.

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

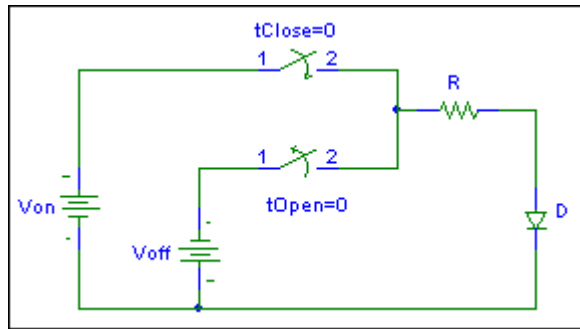
Zirkuitu horietan -bertan erabiliko diren diodoetan-, konmutazioaren abiadura funtsezkoa da.

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

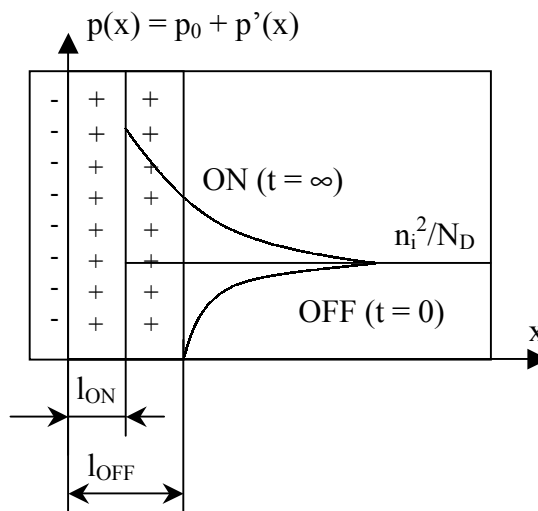
9.4.1 EROATEN HASTEAN (OFF → ON)

$t = 0^-$ 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 ($v_D \sim 0.7 \text{ V}$) 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



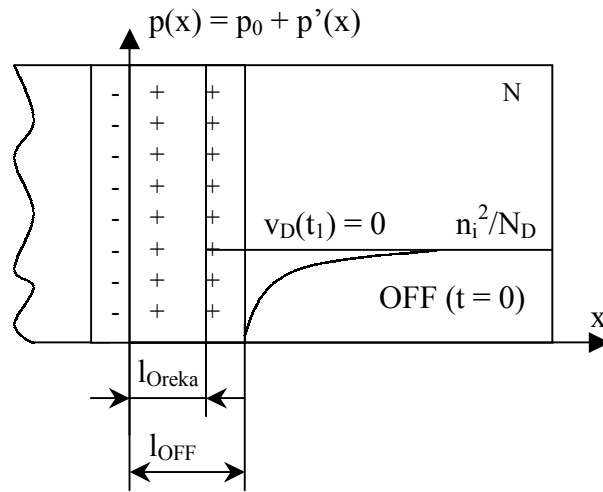
9.9 Irudia. $t = 0$ eta $t = \infty$ uneetan izango diren profilak

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 $i_D(0) = (V_{ON} - v_D)/R = (V_{ON} + V_R)/R$

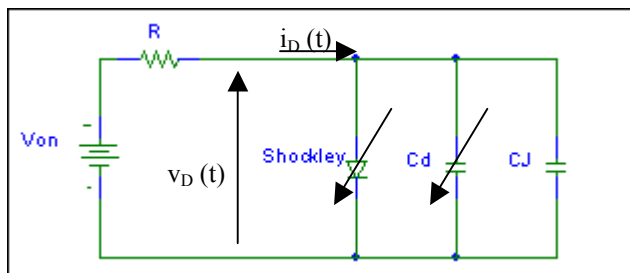
Bukaeran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON} - v_D)/R = V_{ON}/R$ (t_1 laburra izaten da)

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



9.10 Irudia. Hustutako eskualdeko zabalera aldatzea

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



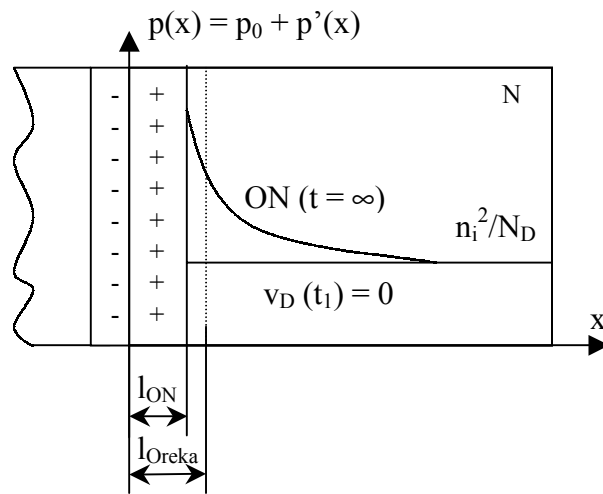
$$-V_{OFF} < v_D(t) < 0$$

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

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 aldatzea 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 $i_D(t_1) = (V_{ON} - v_D)/R \sim V_{ON}/R$.

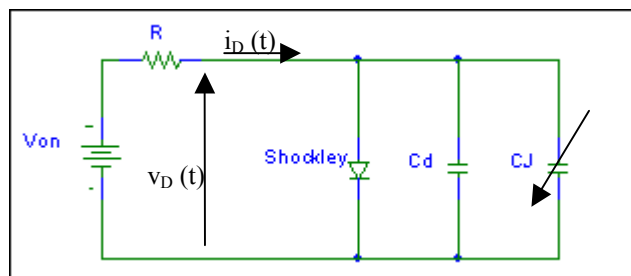
Orain, korranteak, eskualde neutroetako karga handitzeaz gain, karga mantendu ere egin beharko du (birkonbinaketa elikatuz).



9.12 Irudia. Eskualde neutroetako karga handitzea (birkonbinaketa mantenduz)

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

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



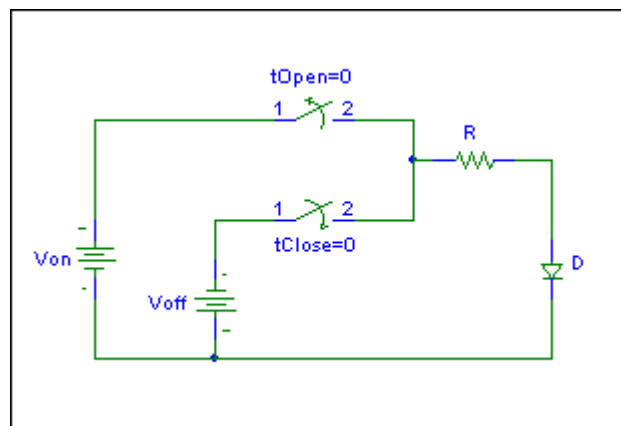
$$0 < v_D(t) < 0.7 \text{ V} \\ i_D(t) \sim V_{ON}/R$$

9.13 Irudia. Eskualde neutroetako urrienen karga handitzeari dagokion zirkuitua

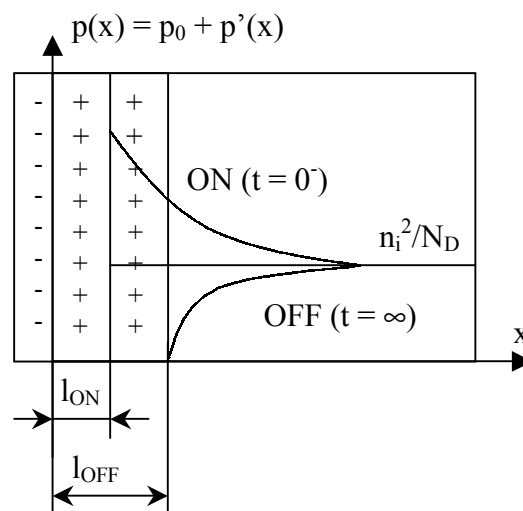
9.4.2 ETETEAREN ANALISIA (ON→OFF)

$t = 0^-$ denean, diodoa eroaten ari da, egoera geldikorrean; korrrontea $i_D = I_F$ eta tentsioa $v_D \sim 0.7 \text{ V}$ dira. Karga espazialeko eskualdea ia orekako 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 korrrontea negatiboa, baina ia nulua izango da ($i_D = -I_{\text{sat}}$). 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



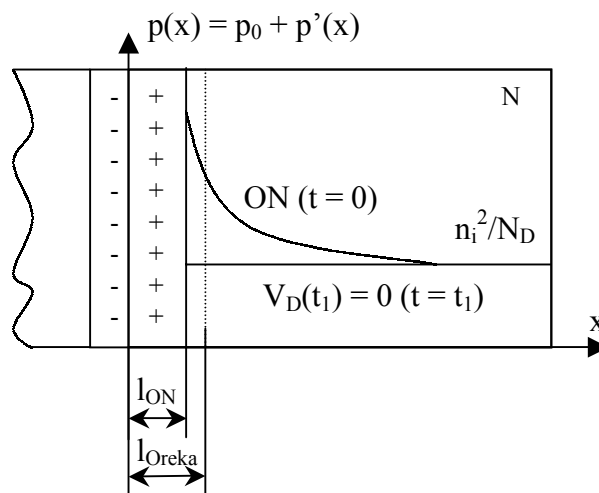
9.15 Irudia. Bi egoera geldikorrei ($t = 0^-$ eta $t = \infty$ uneei) dagozkien profilak

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 $i_D(0) = (V_{OFF} - v_D)/R \sim V_{OFF}/R$

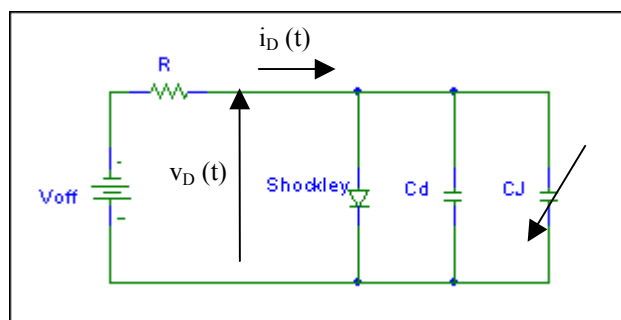
Eta, bukaeran, $v_D(t_1) = 0$ eta $i_D(t_1) = (V_{ON} - 0)/R = V_{ON}/R$

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



9.16 Irudia. Eskualde neutroetako karga murrizten (birkonbinaketa mantenduz)

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



$$0.7 > v_D(t) > 0$$

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

9.17 Irudia. Aurreko aldaketari dagokion zirkuitua

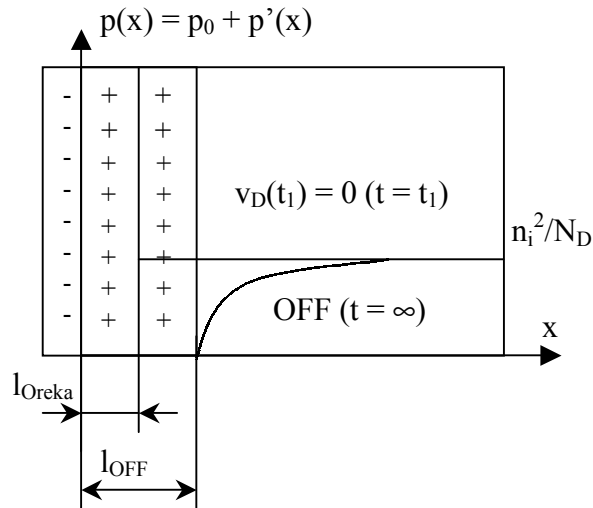
Jarraian, hustutako eskualdeko karga handitu egin behar da, eskualdea zabalduz eta inbertsoko tentsioa igoz (C_J kondentsadore aldakorra kargatuz).

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

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

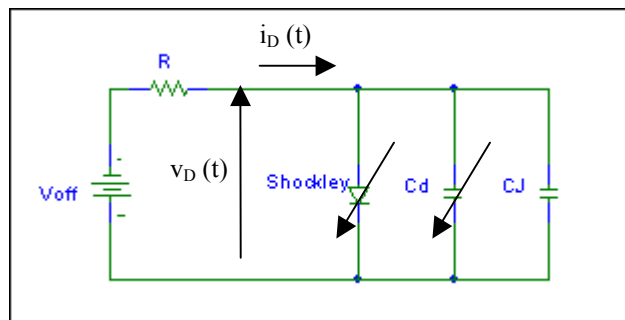
Normalean, $t_2 - t_1$ denbora laburra izaten da.

Korronteak junturako gunean karga sartu besterik ez du egiten.



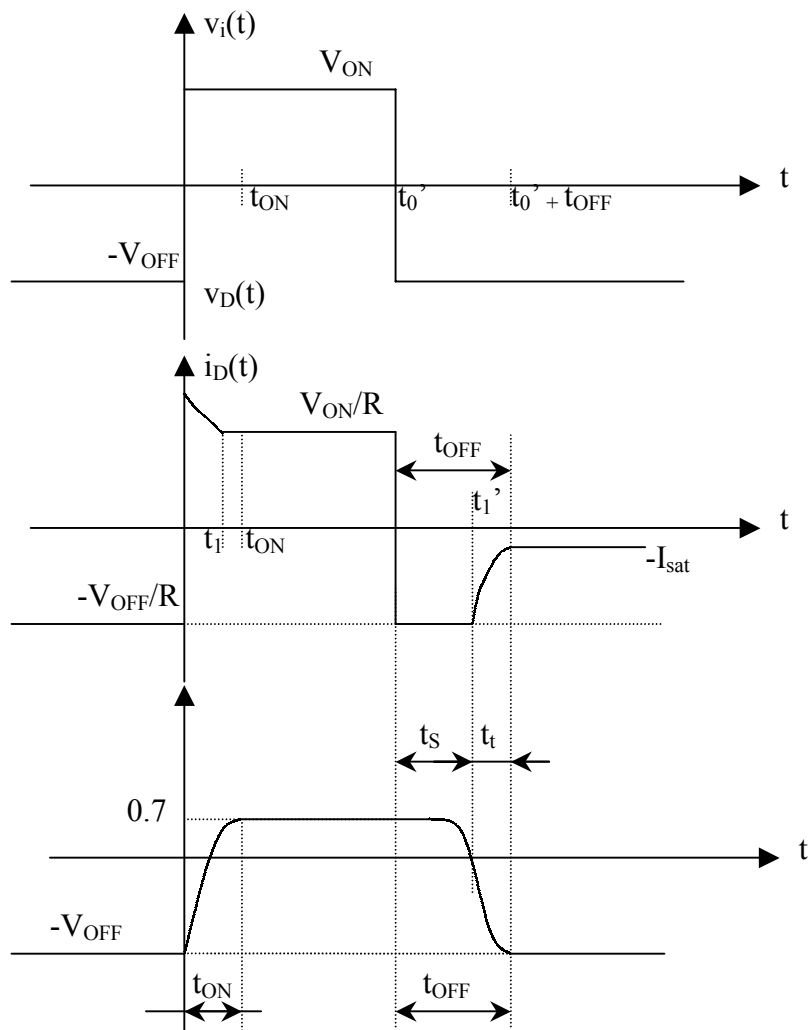
9.18 Irudia. Hustutako eskualdeko zabalera aldatzea

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



$$0 > v_D(t) > -V_{OFF} \\ -V_{OFF}/R > i_D(t) > -I_{sat}$$

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 ebakitzzaileak (mugatzzaileak). 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.

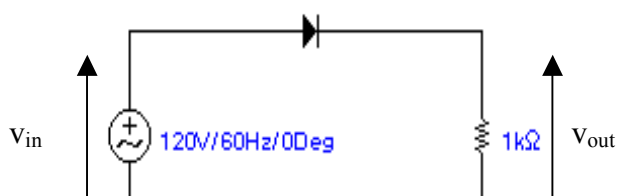
10.1 Zirkuitu zuzentzaileak: transferentzia-kurbak

Sare elektrikora konektatzen diren aparatu elektroniko gehienetan, barneko zirkuituak elikatzeke, 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 alferno 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 alfernoa izaten duenez, zuzentzearekin batera- seinalearen osagai alfernoa 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.

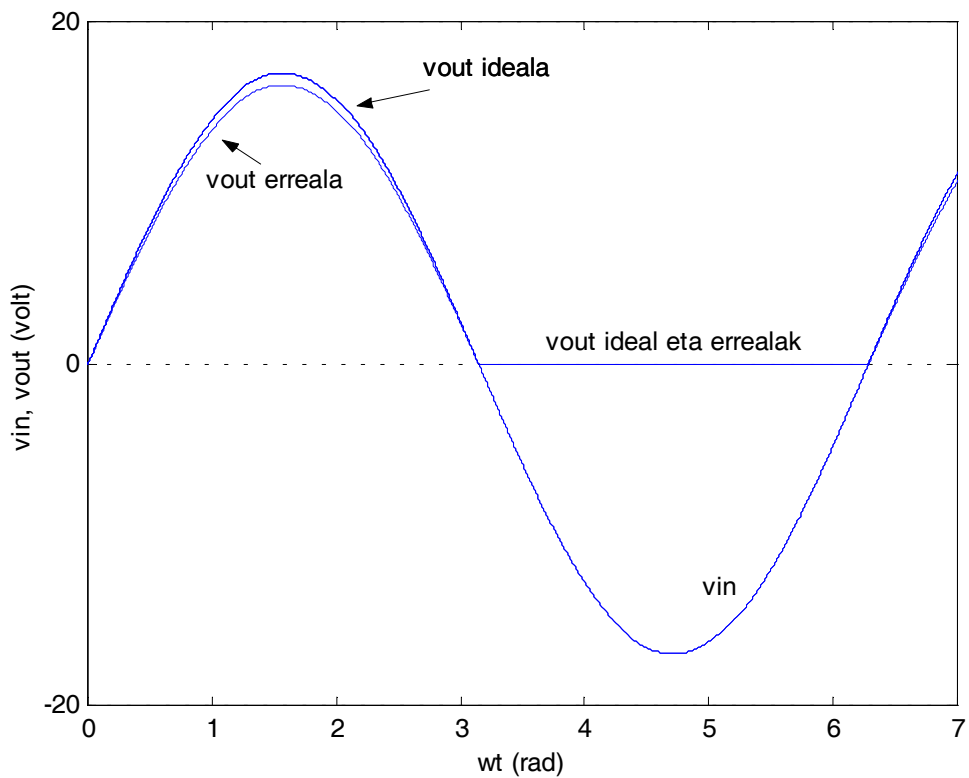
Erdiziklo negatiboan, diodoa inbertsoan dago, OFF egoeran. Erresistentziatik korronterik ez dagoenez, irteerako tentsioa hutsa da.

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.

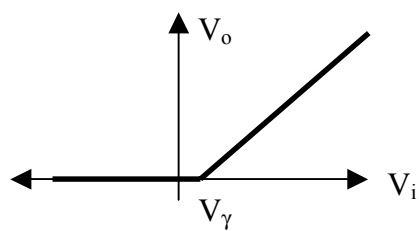
Eta, $V_i > V_\gamma$ denean, $V_o = V_i - V_\gamma$ (gutxi gorabehera).

Bi seinaleak 10.2 Irudian agertzen dira.



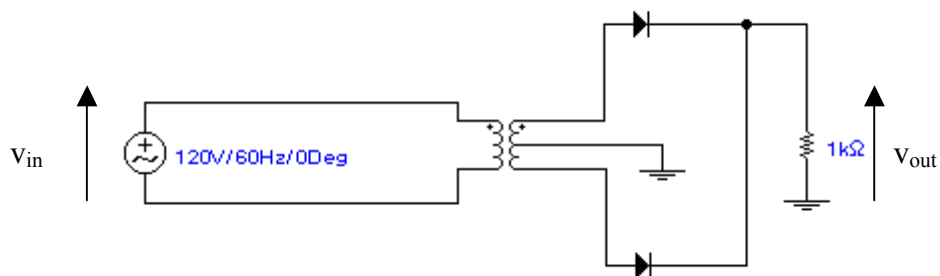
10.2 Irudia. *Uhin erdiko zuzentzailearen uhin-formak*

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



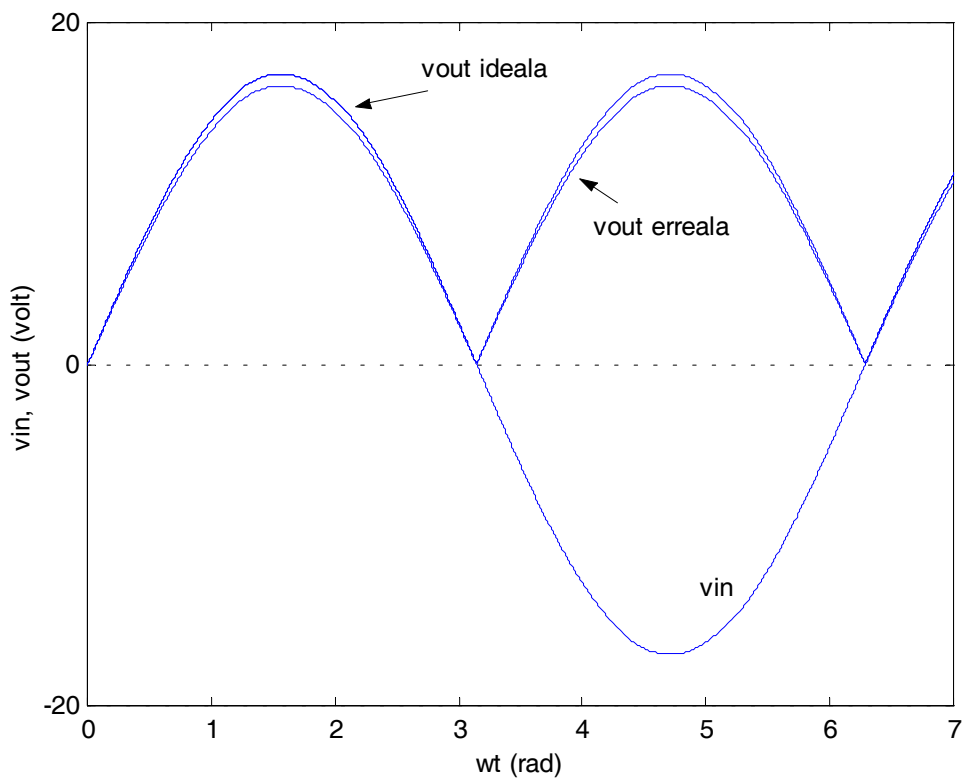
10.3 Irudia. *Uhin erdiko zuzentzailearen transferentzia-kurba*

10.1.2 UHIN OSOKO ZUZENTZAILEA



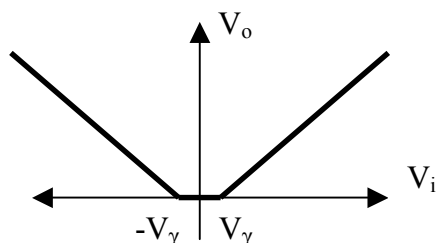
10.4 Irudia. Uhin osoko zuzentzailea

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:

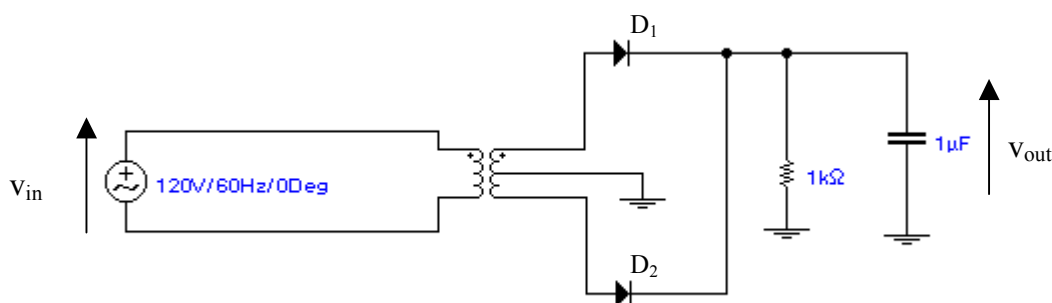


10.6 Irudia. Uhin osoko zuzentzailearen transferentzia-kurba

10.1.3 UHIN OSOKO ZUZENTZAILEA IRAGAZPENAREKIN

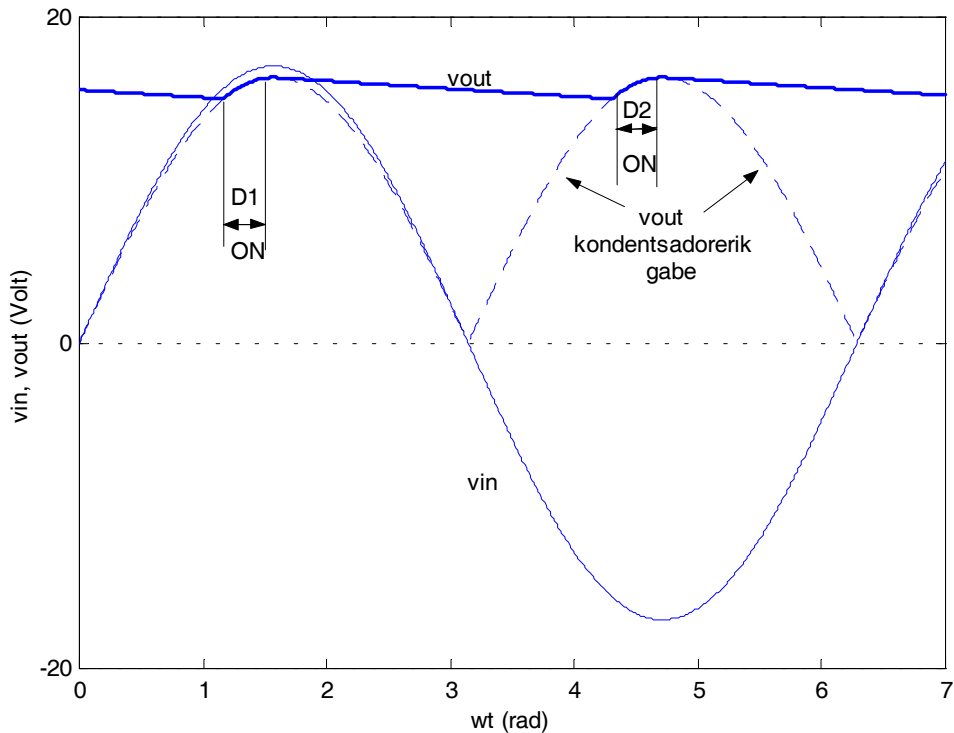
Zuzentzaileen helburua, gehienetan, ahalik eta jarraituen den seinalea lortzea izaten denez, behe-paseko iragazki bat erabiltzen da zuzenketarekin batera -osagai alternoa ahalik eta txikiena izan dadin-. Lehenengo hurbilketan, maiztasun txikiko osagaiei pasatzen uzten die iragazkiak, eta alternoak ezabatzen 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 $R \cdot C$ 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.

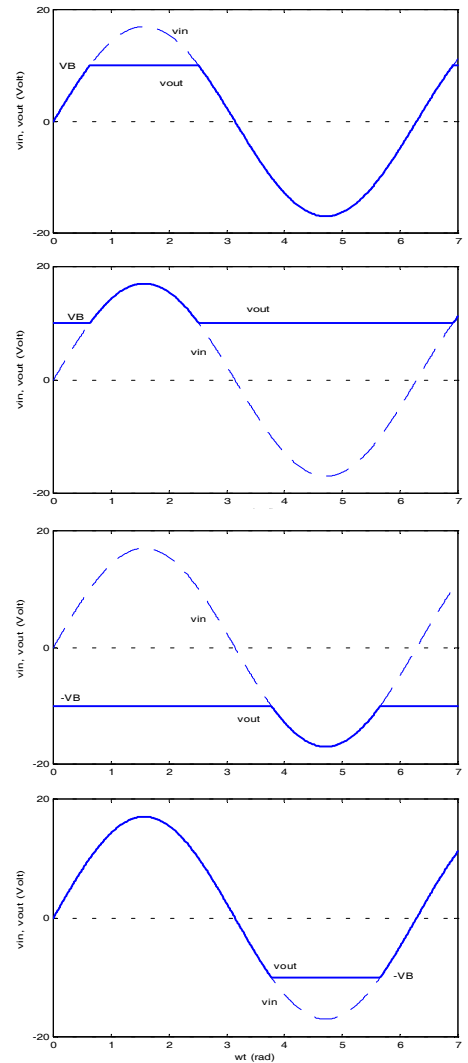
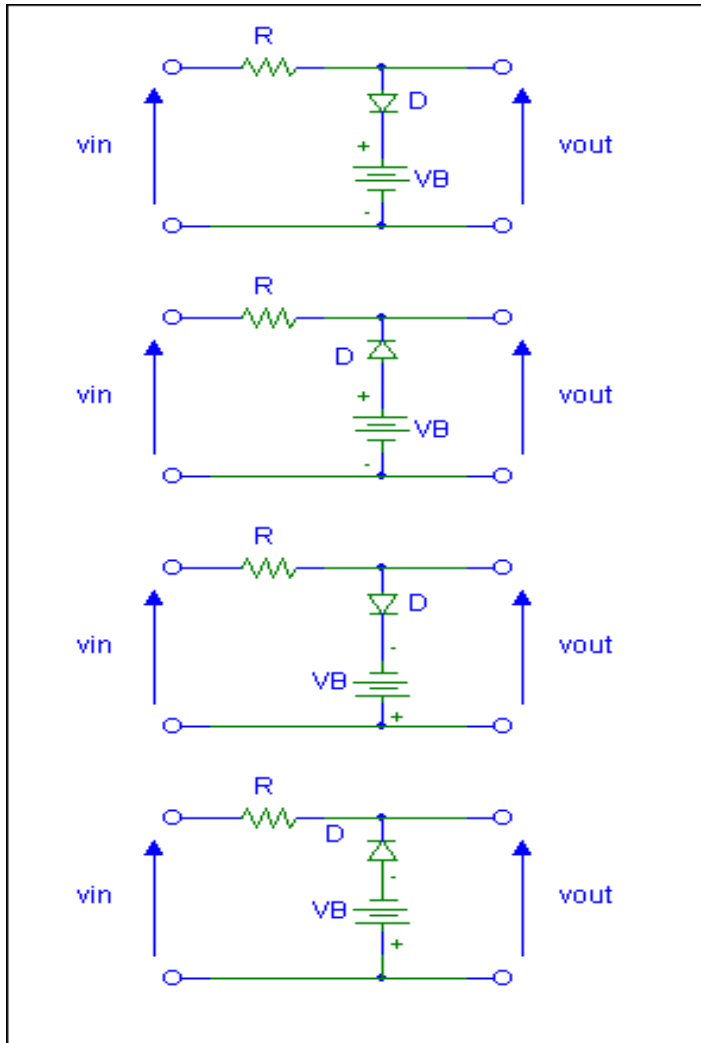
Gero, tentsio negatibo altuetan, D_2 diodoak eroango du denbora labur batez –hain zuzen ere, D_2 OFF egongo balitz $V_{kond} < -v_i(t)$ bihurtuko litzatekeen tartean-, eta kondentsadorea kargatzeko behar den korronea hartuko da iturritik: $V_{kond} = V_o = -v_i(t)$.

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

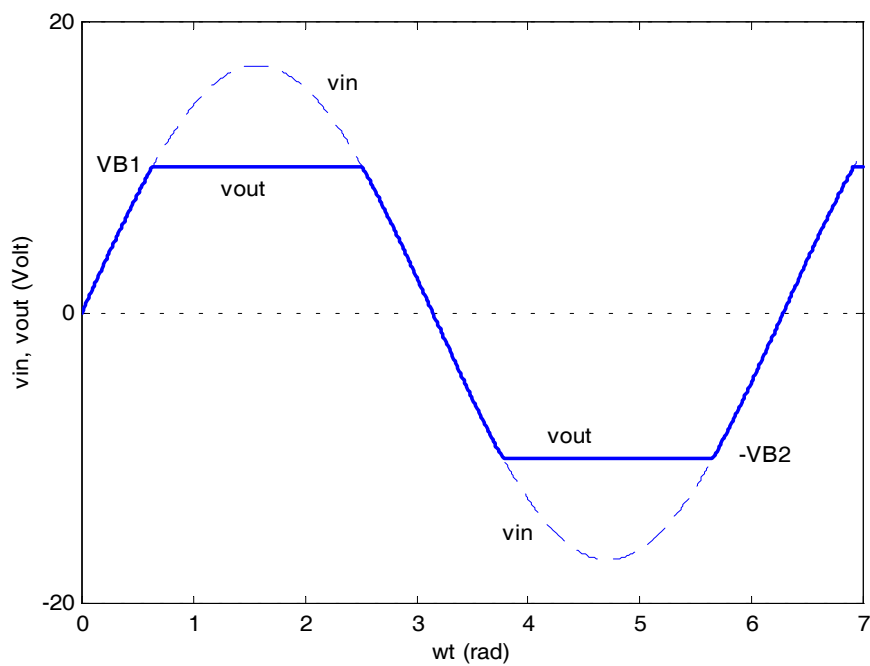
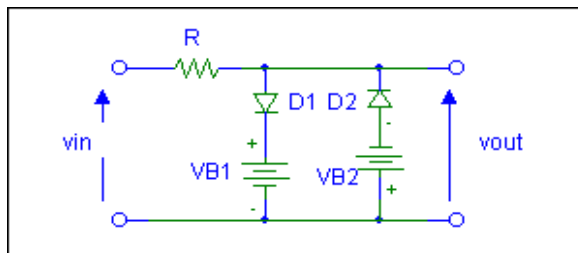
[Beste ikuspuntu batetik: pentsa dezagun kondentsadoreak kargatzeko, kargaz hornitzeko, puntako korrone altuak behar direla –batez ere kondentsadoreak handiak direnean-].

10.2 Zirkuitu ebakitzailak

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 ebakitzaila 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

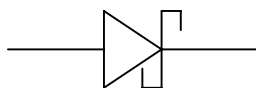
Siliziozko diodo zuzentzaileez eta Zenerrez gain, Schottky, LED, fotodiodoa eta zelula fotovoltaikoak dira diodo erabilienak.

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.

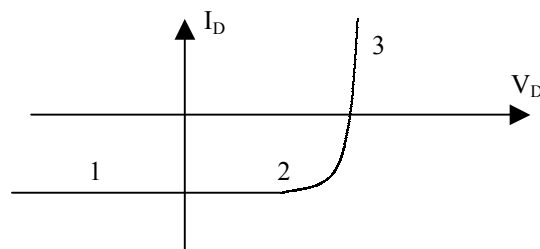
Azken kasu honetan, beraz, fotosorrerak katodotik anodora (korrante inbertsoaren noranzkoan) doan korrante bat (fotokorrantea, I_{FOTO}) eragiten du. Ohiko zeinuak erabiliz, esango genuke fotokorrantea *korrante negatiboa* dela. Fotokorrante hori diodoaren geometriaren, material erdieroalearen ezaugarrien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

FOTOSORRERA POLARIZAZIOAREKIN

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

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

Grafikoki:

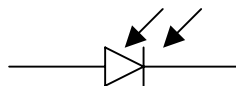


10.12 Irudia. Argiztaturiko diodo baten I - V ezaugarria

FOTODIODOA:

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

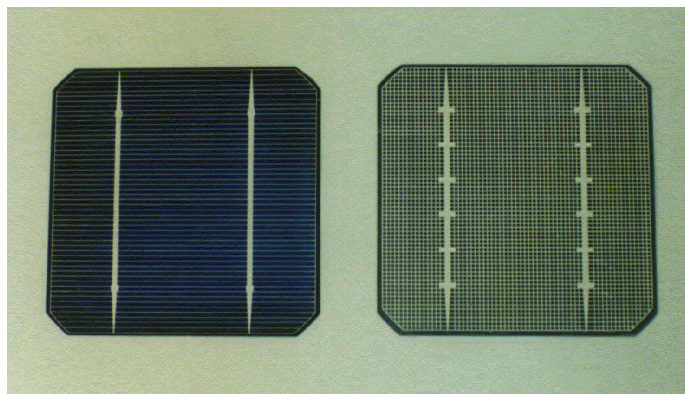
Lehenengo eskualdean lan egin dezan, inbertsoan polarizatu behar dugu beti.



10.13 Irudia. Fotodiodoaren zirkuitu-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

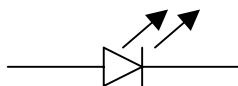
10.3.3 LIGHT EMITTING DIODES (LEDS)

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 polarizatzek ematen ditu birkonbinaketa elikatuko duten eramaileak.

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

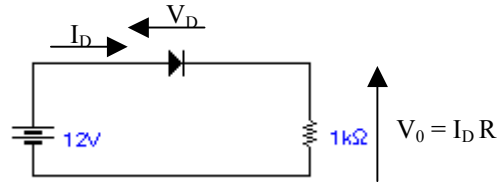


10.16 Irudia. LEDaren zikuitu-ikurra

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):

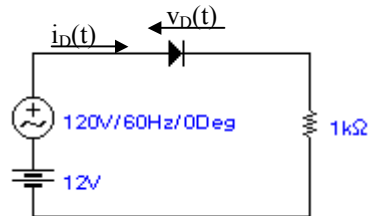
(Diodo bakar bat dugunean ere balio digu baina, normalean, bi diodo edo gehiago ditugunean erabiliko dugu)

- A) Diodoen egoera posible guztiak kontuan hartu → konbinaketak izendatu
- B) Aukera bakoitzeko:
 - Diodoak beren zirkuitu baliokideaz ordeztu(egoera hipotetikoaren arabera)
 - OFF → Korronea = 0 (eta tentsioa, negatiboa *)
 - ON → Tentsioa = 0-0,7 (eta korronea, positiboa *)
 - Lortutako zirkuitua ebatzi
 - Ustezko egoerak betetzen ote diren egiaztatu:
 - OFF → * Tentsioa negatiboa al da (korronea = 0)?
 - ON → * Korronea 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 aldezturik *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).

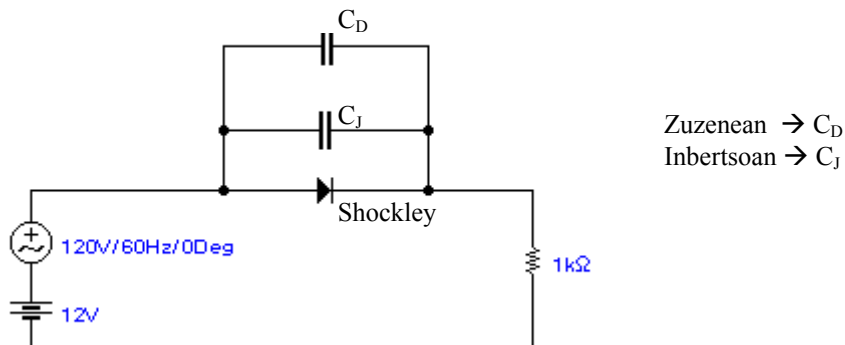


1.- Maiztasuna oso altua denean ($f > 1 \text{ MHz}$):

Ez dakigu nola ebazten den.

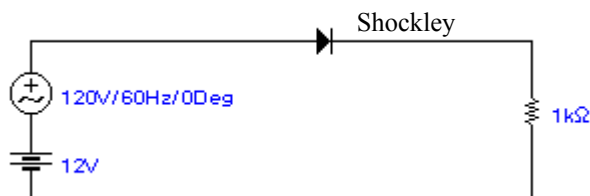
2.- Maiztasuna ertaina denean ($100 \text{ Hz} < f < 1 \text{ MHz}$):

Kargaren bidezko kontrol eredu osoa erabili behar da.



3.- Maiztasuna oso baxua denean ($f < 100 \text{ Hz}$):

Karga-kontrol ereduak, kondentsadoreak ez ditugu aintzat hartu.



Diodoari buruzko ariketak: zirkuituak ebazteko prozeduren laburpena

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

$V_D \gg V_T$ ETA $v_d(t) \ll V_T$ KASU BEREZIA: SEINALE TXIKIA

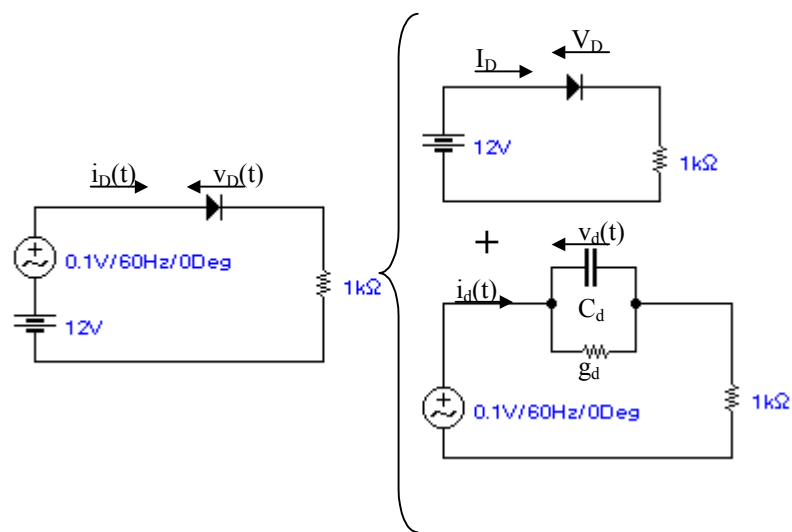
Gainezarpena erabil daiteke (azkenean, alternoaren erantzuna bakartu eta linealdu delako).

1.- Maiztasuna oso altua denean ($f > 1$ MHz):

Ez dakigu nola ebazten den.

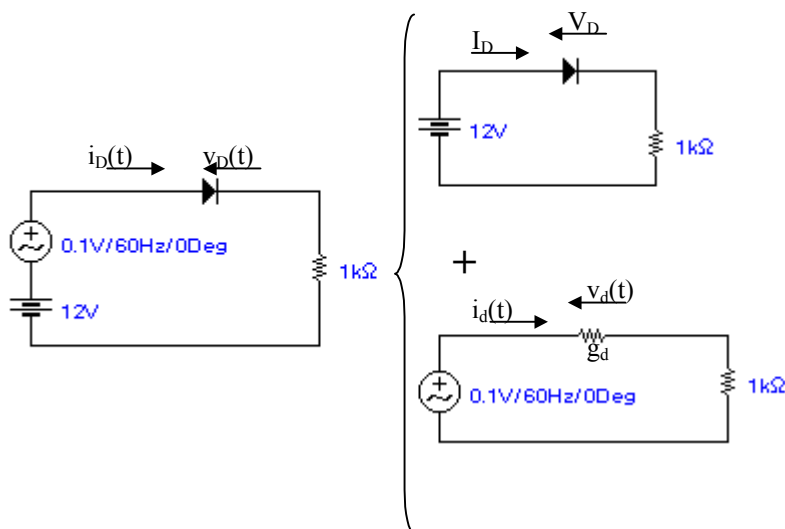
2.- Maiztasuna ertaina denean (100 Hz $< f < 1$ MHz):

Karga-kontrol eredutik ondorioztatzen zenez:



3.- Maiztasuna oso baxua denean ($f < 100$ Hz):

Karga-kontrol eredian, kondentsadoreak ez ditugu aintzat hartzen.



($V_D \gg 25$ mV eta $|v_d| \ll 25$ mV ezberdintasunak egiaztatu beharko genituzke)

Diodoari buruzko ariketak: zirkuituak ebazteko prozeduren laburpena

1. ARIKETA: juntura latz lau bati dagokion hustutako eskualdea

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

- Kalkulatu potentzial termodinamikoa (Φ_T) giro-tenperaturan gaudela jakinda (tenperatura horretan, $n_{iGE}^2 = 6 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-6}$).
- $V = 0 \text{ V}$ bada, kalkulatu hustutako eskualdean agertzen den eremuaren balio maximoa eta eskualdearen zabalera ($\epsilon_{Ge} = 6.3$; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$).
- Errepikatu aurreko atalak, tentsioa $V = -20 \text{ V}$ bada.

2. ARIKETA: korronteak eta korronte-dentsitateak

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

Datuak: $KT/q = 25 \text{ mV}$, $\epsilon_{Si} = \epsilon_{erlatiboa} \epsilon_0 = 650q \text{ F/um} = 104\text{pF/m} = 1.04 \text{ pF/cm}$ (edo $\epsilon_{rSi} = 11.8$), $\Phi_T = 0.67 \text{ V}$, $D_n = 6 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p = 15 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau_p = 50 \mu\text{s}$, $\tau_n = 50 \mu\text{s}$ 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, $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $L_p = 275 \mu\text{m}$ eta $w_k = 800 \mu\text{m}$.

Anodoan, $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $L_n = 15 \mu\text{m}$ eta $w_a = 5 \mu\text{m}$.

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/cm³/s sortu.

Diodoa zirkuitulaburtzen dugu ($V = 0 \text{ V}$, *short circuit* egoera behartuz).

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

Diodoari buruzko ariketak: enuntziatuak

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 analisisia

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

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

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

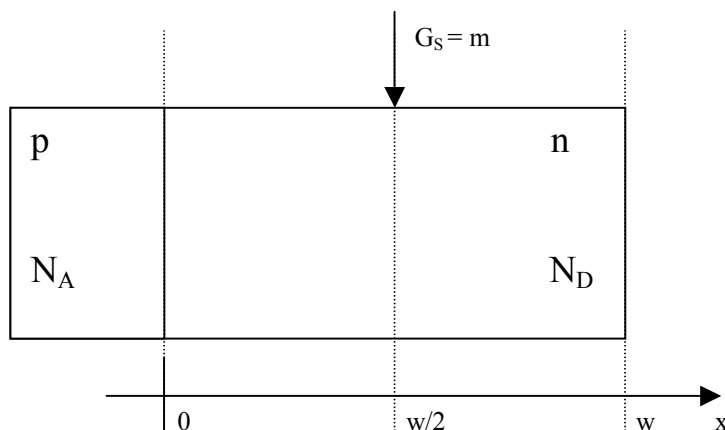
$n_i = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

- a) Hustutako eskualdea zeharkatzen duen korrontean, zenbat da (gutxi gorabehera) elektroien korrontearen garrantzia (%koetan)?
- b) Diodoaren sekzioa $A = 0.01 \text{ cm}^2$ bada, zenbat da asetasuren korrontea?

6. ARIKETA: katodoaren erdiko gainazalean argizatutako diodoa

Beheko irudian agertzen den pn juntura laser batez argizatzen 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.



Diodoari buruzko ariketak: enuntziatuak

Juntura zirkuitulaburrean badago ($V = 0$).

- Marraztu urrienen soberakinen profila. Kalkulatu $x = w/2$ gainazalean dagoen soberakina, $p'(W/2)$ ($U = 0$ hartu).
- Kalkulatu korrante-dentsitate osoa (J_L). Zein da haren noranzkoa?
- Zenbat da n eskualdean benetan dugun birkonbinaketa? Ontzat eman al daiteke $U \sim 0$ hurbilketa?

Laser-izpia hustutako eskualderantz daramagu:

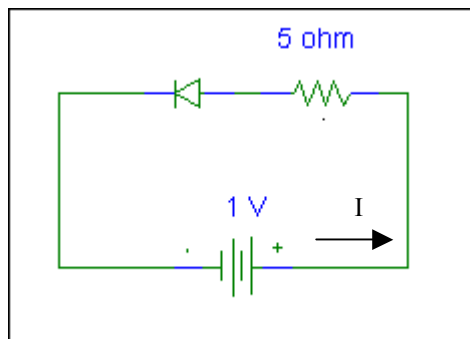
- Marraztu eta kalkulatu eramaile-profilak eta korrante-dentsitateak
- Zenbat da, aplikatu beharko genukeen tentsioa $J = 0$ korrantea lortzeko?

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

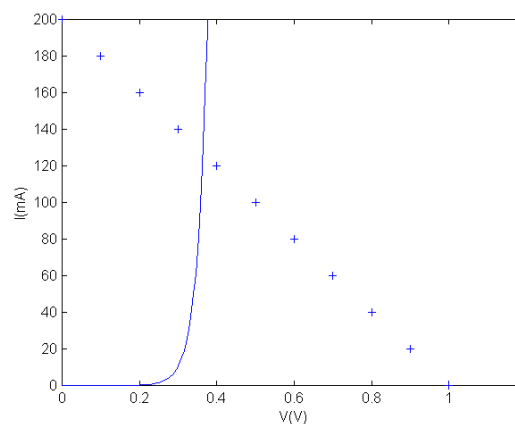
Katodoan, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $L_p = 200 \text{ }\mu\text{m}$; $\tau_p = 15 \text{ }\mu\text{s}$; $w = 100 \text{ }\mu\text{m}$.

7. ARIKETA: diodoak dituzten zirkuituak zehatz-mehatz ebaztea

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



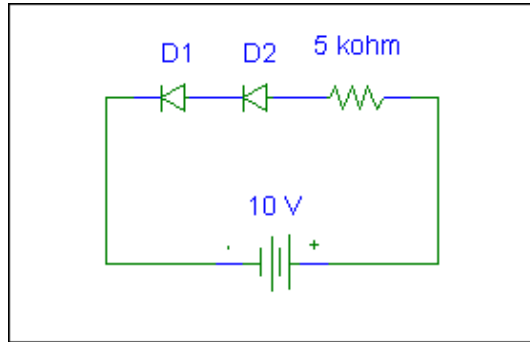
1. Irudia. Zirkuitua



2. Irudia. I-V kurba

Diodoari buruzko ariketak: enuntziatuak

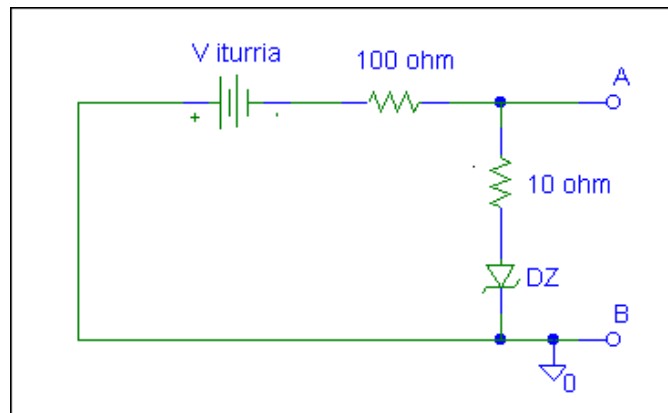
- b) Aurreko zirkuituan, ezaugarria izan beharrea $I_{\text{sat}} = 100 \text{ nA}$ (hau da, 10^{-7} A) datua ematen badigute, zenbat da V_D ? Eta I ?
- c) 3.n Irudiko zirkuituan, $I_{\text{sat1}} = 10 \text{ }\mu\text{A}$ eta $I_{\text{sat2}} = 20 \text{ }\mu\text{A}$ dira. Kalkulatu korrontea eta tentsioak.



3. Irudia. Azken ataleko zirkuitua

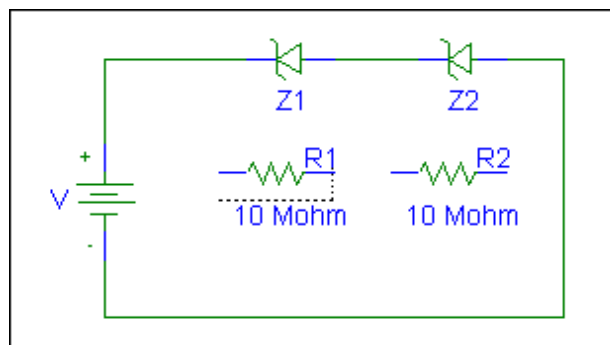
8. ARIKETA: tentsioa zener diodoen bidez mugatzea

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



9. ARIKETA: zener diodoak seriean

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



Diodoari buruzko ariketak: enuntziatuak

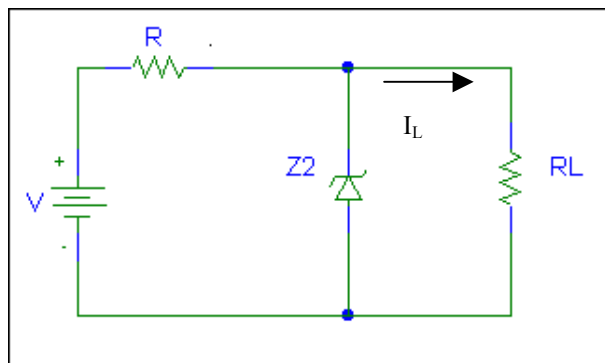
Kalkulatu:

- Diodo bakoitzaren tentsioa eta korronea, $V = 9\text{ V}$ denean.
- Diodo bakoitzaren tentsioa eta korronea, $V = 110\text{ V}$ denean.
- Eta paraleloan bi erresistentzia jartzen badizkiegu ($R_1 = R_2 = 10\text{ M}\Omega$)?

10. ARIKETA: zener diodoen ohiko aplikazioa eta mugak

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

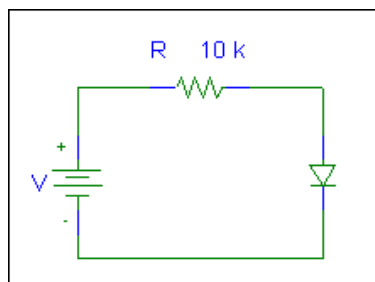
- Kalkulatu R , baldin eta I_L korronea 0 eta I_{\max} artean ($0 < I_L < I_{\max}$) dagoenean tentsioa 50 voltetan egotea nahi badugu. Elikadura-tentsioa $V_{\text{iturria}} = 200\text{ V}$.
- Zenbat balio du I_{\max} balioak?
- R a) atalekoa bada eta $I_L = 25\text{ mA}$ bada, zein dira V_{iturria} tentsioaren muturreko balio posibleak (zenerrak “egokiro” lan egiteko)?



11. ARIKETA: diodoaren ereduak (zuzeneko polarizaziopean)

Kalkulatu honako zirkuitu honetako I_D :

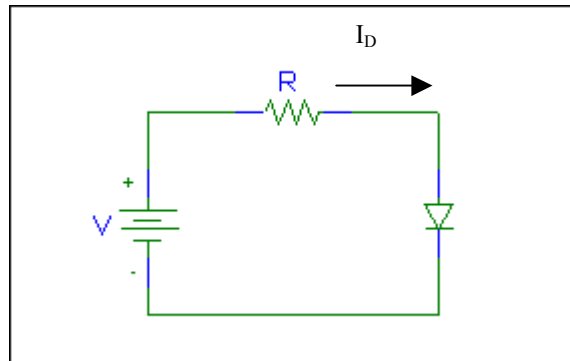
- $V_{\text{elikadura}} = 10\text{ volt}$ denean
- $V_{\text{elikadura}} = 1\text{ volt}$ denean



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

12. ARIKETA: zirkuitu baten ebazpena iteratzea

Beheko zirkuituan, I_D kalkulatu:



$V_{\text{elikadura}} = 15$ volt; $I_{\text{sat}} = 100$ nA; $R = 100 \Omega$.

($R_{\text{eskualde neutroak}}$ 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

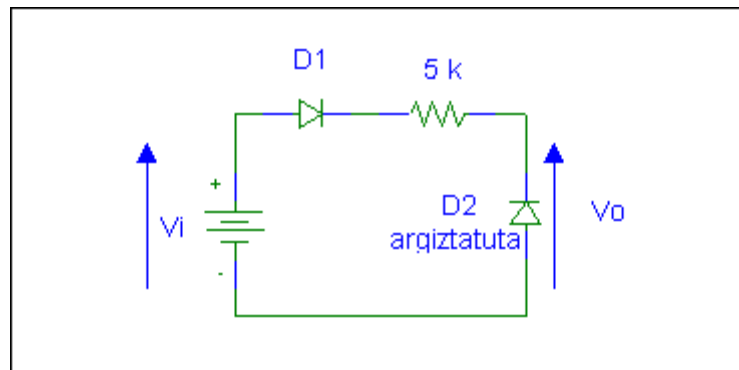
- Kalkulatu $I = I_0 \cdot [\exp(V/mV_T) - 1]$ ereduko m eta I_0 .
- Kalkulatu eredu lineala lortzeko behar diren V_γ eta R_f .

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

14. ARIKETA: argiztaturiko diodo bat duen zirkutua

Irudian agertzen diren bi diodoak berdina 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/cm² sortzen dira argiak sortzen ditu. Kontaktuak ohmikoak dira eta egoera geldikorrean gaude.

Diodoari buruzko ariketak: enuntziatuak



Kalkulatu:

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

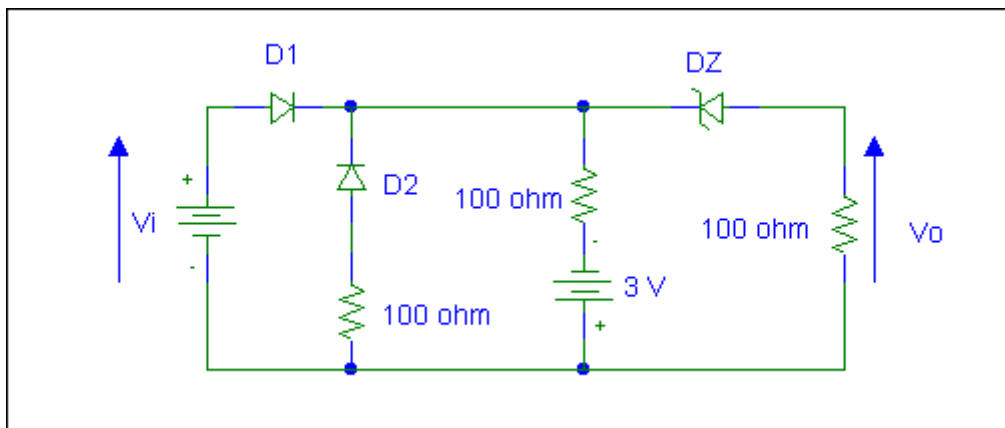
b) Diodoetan agertzen den tentsioa.

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

DATUAK: $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C; $n_i = 1,5e10$ cm⁻³, $A_1 = 0,1$ cm²; $A_2 = 2 \cdot A_1 = 0,2$ cm²; $\tau_p = 15$ μ s; $N_A \gg N_D = 1E15$ cm⁻³, $L_p = 200$ μ m. $W_{katodo} = 100$ μ m .

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: korrante handiek eskualde neutroetan eragiten duten tentsioa

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

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

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

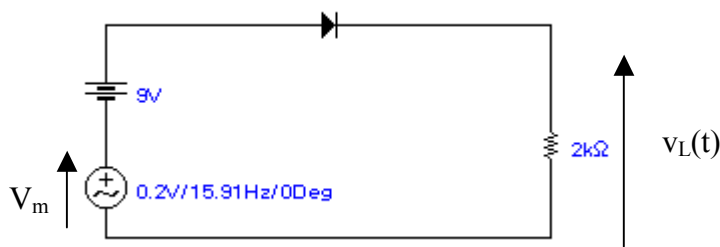
Azaldu tentsio hori nola banatzen den eskualde dipolarraren (V_j) eta eskualde neutroen (V_{anodo} eta V_{katodo}) artean.

17. ARIKETA: erregimen dinamikoa eta seinale txikia

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

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

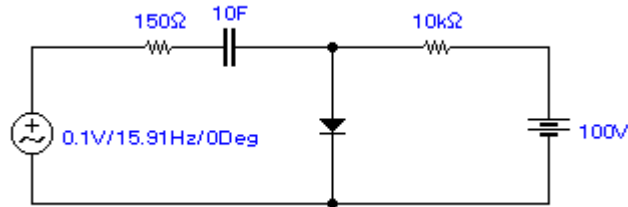
Kalkulatu kargan agertzen den tentsioa $v_L(t)$.



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: $I_{\text{sat}} = 1 \text{ nA}$; $R_s = 5 \text{ }\Omega$. Gainera, kommutazio-denbora neurtuz, eskualde neutroetako erdibizitza antzeman da: $\tau = 1 \text{ }\mu\text{s}$.

Diodoari buruzko ariketak: enuntziatuak

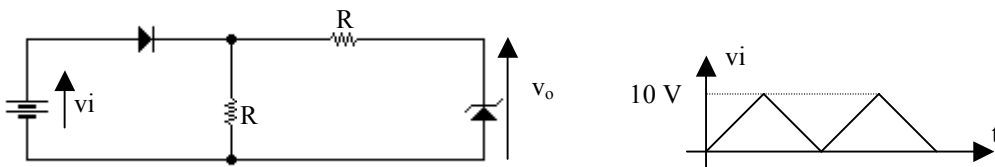


Kalkulatu:

- $v_i = 0$ denean, diodoa zeharkatzen duen korrontea (I_D).
- Aurreko egoeran diodoan dugun tentsioa (V_D).
- $v_i = 0.1 \sin(100t)$ denean, diodoan agertzen den tentsioa (osoa).

19. ARIKETA: transferentzia-kurbak

Beheko zirkuituan, diodoak idealak dira ($V_Z = 5 \text{ V}$).

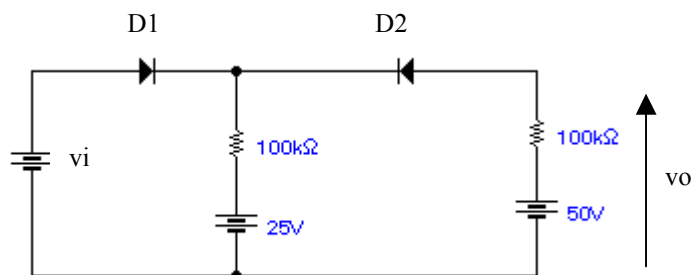


- Kalkulatu eta marraztu transferentzia-kurba.
- Marraztu $v_o(t)$, $v_i(t)$ ezkerreko irudikoa denean.

20. ARIKETA: transferentzia-kurbak

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

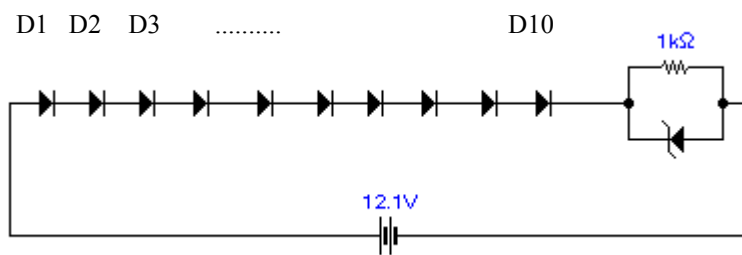
Irudikatu transferentzia-kurba (diodoak idealak dira).



21. ARIKETA: diodoen konbinaketak zehatz-mehatz ebaztea

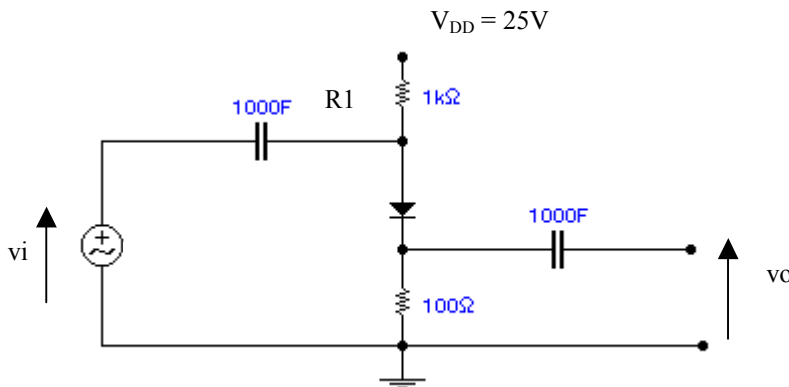
Beheko zirkuituko diodo zuzentzaileak berdin-berdinak dira, eta haien asetasuneko korrontea $I_{sat} = 1 \mu A$ da. Zener diodoaren ezaugarriei dagokienez: $V_Z = 12 V$; $I_{sat \text{ zener}} = 0.72 \mu A$ parametroak badakizkigu.

Erresistentziatik igarotzen den korrontea $1 \mu A$ bada, zenbat da R ?



22. ARIKETA: seinale txikia

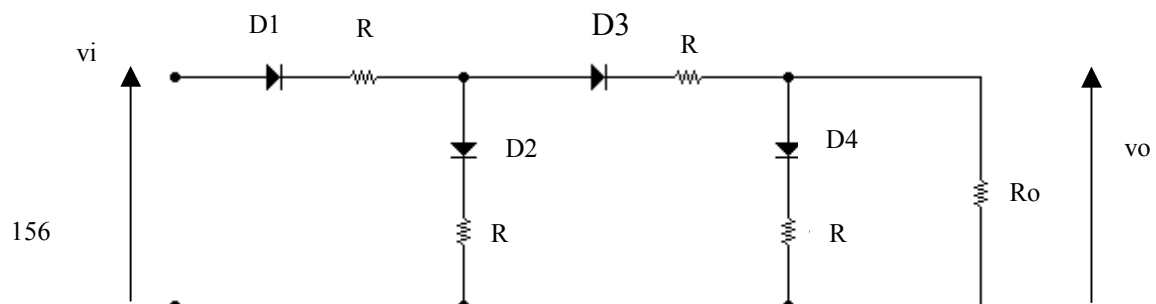
Kalkulatu R_1 erresistentziaren balioa, irteerako seinalearen anplitudea sarrerakoaren erdia izateko (maiztasun baxuetan).



Diodoa (jarraituan) idealtzat jo.

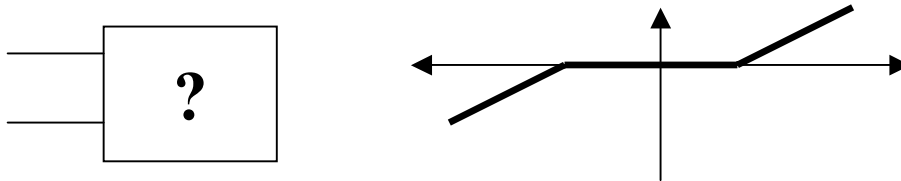
23. ARIKETA: transferentzia-kurba

Datuak. $V_\gamma = 0.4 V$ eta $R \ll R_o$.



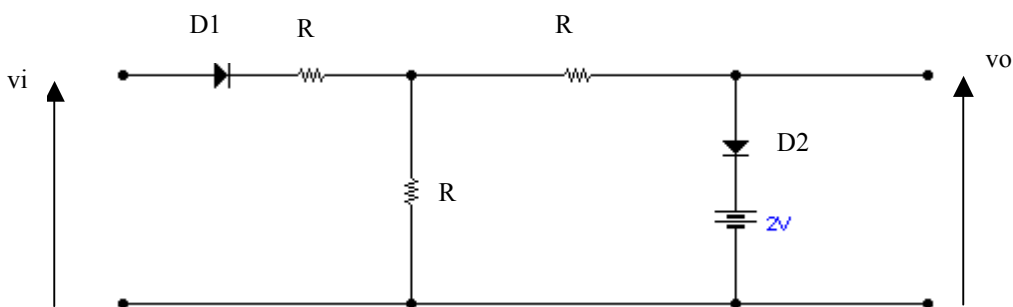
24. ARIKETA: transferentzia-kurba

Diseinatu beheko irudian agertzen den ezaugarria aurkeztuko duen zirkuitua.



25. ARIKETA: transferentzia-kurbak

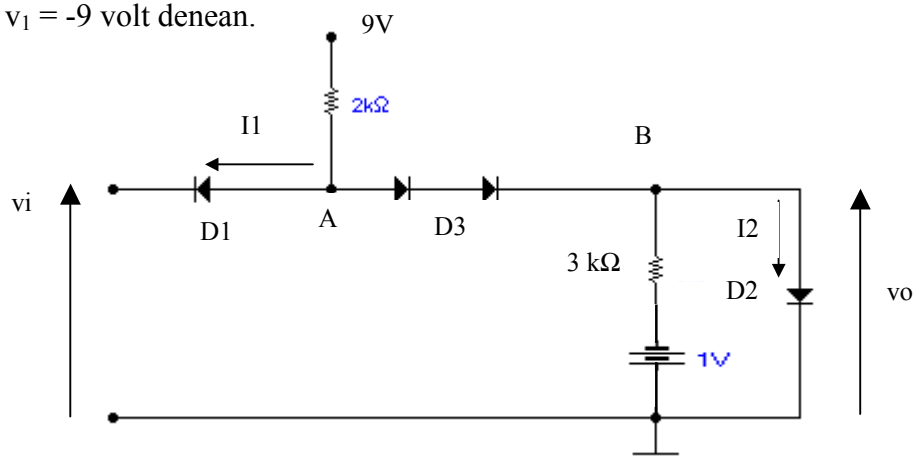
- Kalkulatu beheko zirkuituko transferentzia-kurba, diodoak idealak badira.
- Eta diodoen ukondoko tentsioa 0.7 bada, zer gertatzen da?
- Diodoak idealak direnean, nola alda genezake zirkuitua (eskuineko adarra) irteerako tentsioak 2 voltetan mugaturik jarrai dezan. Hau da, zein da eskuineko adarraren zirkuitu baliokide bat (kasu honetan).



26. ARIKETA: transferentzia-kurbak

Irudiko zirkuituan, diodoak idealak dira. Kalkulatu I_1 , I_2 eta v_0 :

- $v_1 = 0.2$ volt denean.
- $v_1 = -9$ volt denean.



27. ARIKETA: diodoak seriean eta paraleloan konbinatzea

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

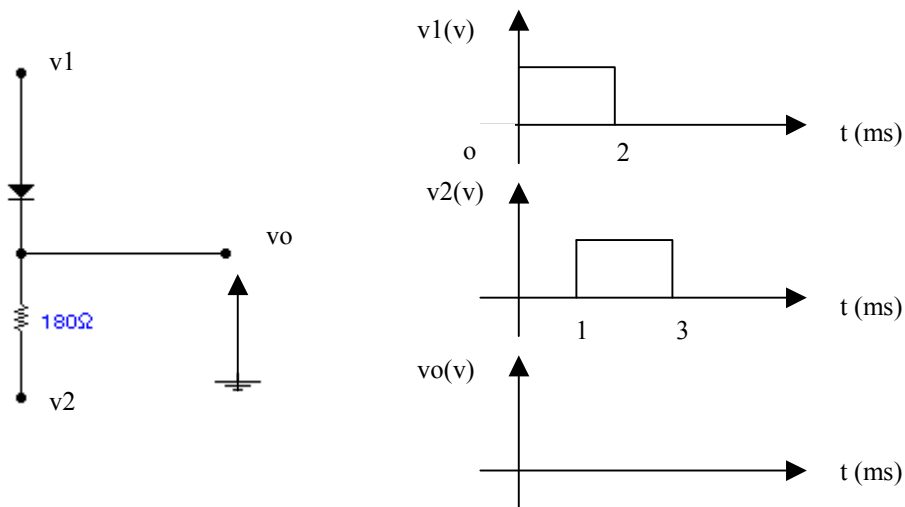
Dakigunez, D_1 diodoa zeharkatzen duen korronea $I_{D1} = 12 \text{ mA}$ denean bere tentsioa $V_{D1} = 0.62 \text{ volt}$ da.

- a) D_1 eta D_2 seriean badaude, eta haietatik korrone 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 $I_{D1} + I_{D2} = 4 \text{ mA}$ bada, kalkulatu diodo bakoitzean ditugun tentsio eta korroneak.

28. ARIKETA: logika digitala

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

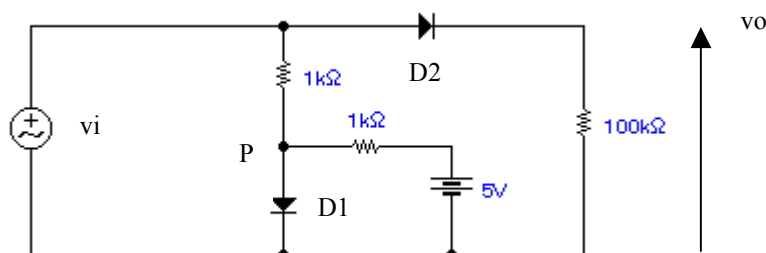
DATUAK: $V_\gamma = 0.6 \text{ V}$; $R_F = 20 \Omega$; Sarrereren puntako balioa 5 V da.



29. ARIKETA: transferentzia-kurbak

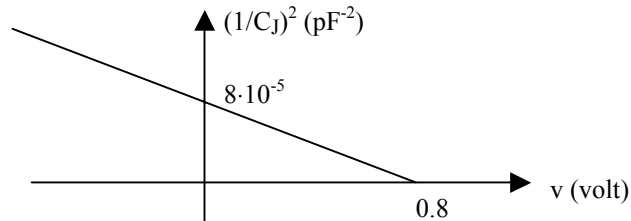
Irudikatu, diodoak idealak badira, zirkuituko $v_o(t)$ eta $v_p(t)$.

DATUA: $v_1(t) = 10 \sin(\omega t) \text{ V}$ da ($\omega = 2\pi f$ 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: $N_D \ll N_A$ 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 ($\epsilon_{\text{max_orekan}}$).

DATUAK: $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14}$ F/cm; $\epsilon_{rSi} = 11.8$, $A = 0.348$ mm²; $V_T/q = 25.9$ mV

31. ARIKETA: erregimen dinamikoa eta konmutazioa

Diodo bati $V_F = +10$ V tentsioa aplikatzen diogu 10 k Ω -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 μ s 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 korronea (baliorik adierazgarrienak agerian utziz).

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

Diodoari buruzko ariketak: enuntziatuak

11. TRANSISTORE BIPOLARRA EGOERA ESTATIKOAN

Diodoa, erresistentzia, harila edota kondentsadorea osagai pasiboak ziren; transistorea, berriz, aktiboa da; hau da, korronte-, tentsio- eta potentzia-irabaziak lor ditzake. Elektronika analogikoan eta telekomunikazioetan duen garrantzia, beraz, begi-bistakoa da, amplifikadorea nahitaezko etapa baita sistema elektronikoa gehienetan. Baina, gainera, erraz kontrolatzen den etengailua denez, elektronika digitalaren (eta gaur egungo munduaren) oinarria ere bada.

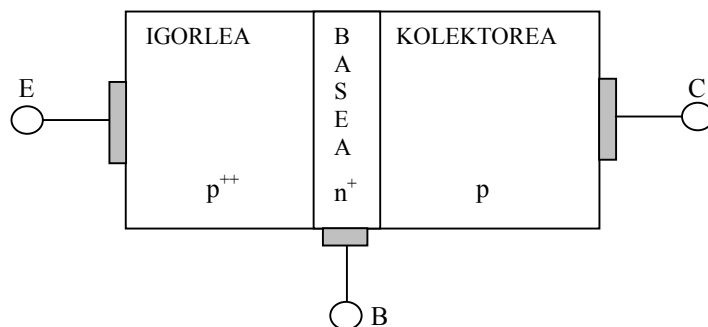
Transistoreak, orokorrean, bi mota nagusikoak izaten dira: bipolarrak eta eremu efektukoak. Datozen lau ikasgaietan, **transistore bipolarra** (BJT, Bipolar Junction Transistor) aztertuko dugu, eta, hurrengoetan, eremu efektuko transistorea edo FETa (Field Effect Transistor) analizatuko da.

Transistore bipolarra pn junturako eragingailu bat da, eta, bere funtzionamenduan bi eramaile motek parte hartzen dutenez, **bipolar** izena jasotzen du.

BJTari buruzko lehenengo ikasgai honetan, eragingailuan aplikatutako tentsio eta korronteen noranzkoak definituko ditugu eta BJTaren egitura eta fabrikazioa deskribatuko dira. Funtzionamenduko lau eskualdeak ikusiko ditugu, arreta gune aktiboan jarriz, modurik erabiliena baita. Aktiboan, garraio-faktorea (α_T), injekzio-eraginkortasuna (γ) eta korronte jarraituko irabaziak (α eta β parametroak) definituko dira.

11.1 Transistore bipolarren egitura eta fabrikazioa

Transistore bipolarra, edo junturako transistorea, bi pn juntura oso hurbil dituen dispositibo erdieroalea da. Bi junturek eskualde bat elkarbanatzen dutenez, guztira hiru eskualde daude. Erdiko eskualdearen dopaketa eta muturreko eskualdeena mota ezberdinekoa da.



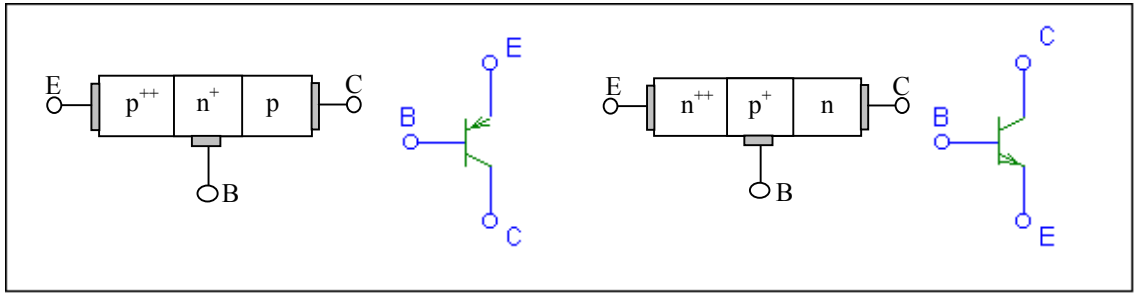
11.1 Irudia. Transistorearen egitura (pnp transistorea)

Egitura fisikotik eratortzen denez, oinarriko bi BJT egitura edo mota daude: **nnp** eta **pnp**. Horrela deitzen dira, haien eraikuntzan erabiltzen diren eskualde motak horiek direlako. Bi motak asko erabiltzen dira, bai dispositibo diskretu gisa bai zirkuitu integratuetan, baina, diseinu askotan, npn mota nahiago dugu, zeren eta, azkarrago konmutatzeaz gain, haren anplifikazioaren irabazia normalean handiagoa baita.

Erdiko eskualdea *oinarri* edo *base* deitzen da eta oso estua izan behar du; hau da, oso laburra bertako urrienen barreiapeneko luzerarekin alderatuta. Horretan oinarrituko da, hain zuzen ere, transistore-efektua.

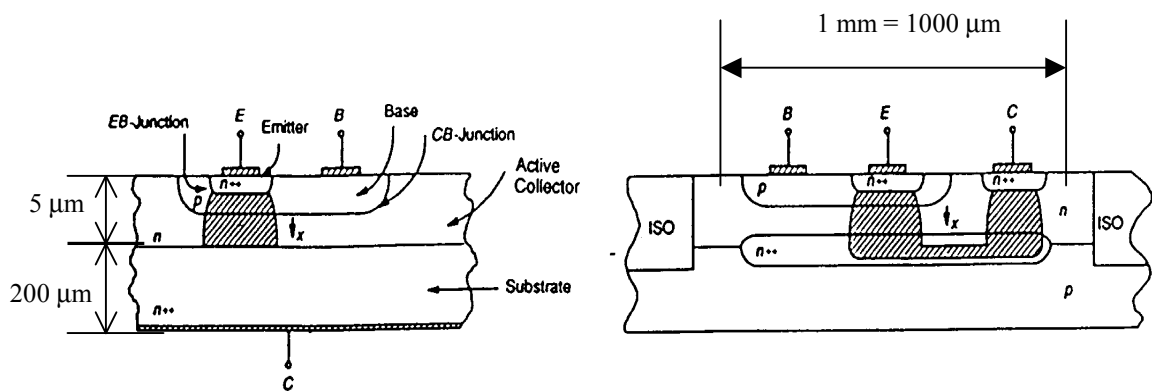
Ertzetako bi eskualdeak *igorlea* (emisorra) eta *kolektorea* (biltzailea) dira. Hasiera batean, bi eskualde horiek trukagarriak direla pentsa genezake, baina, dispositibo errealetan, igorleko dopaketa kolektorekoa baino altuagoa da (oinarriaren dopaketa beste bien bitartekoa da). Hori dela eta, igorlea eta kolektorea trukatzeko ez da funtzionamenduaren koska aldatzen, baina ezaugarri elektrikoak bai (beraz, muntaietan ezin ditugu trukatu).

11.2 Irudian, pnp eta npn transistoreen zirkuitu-ikurrak azaltzen dira. IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) delakoan adostutako irizpidearen arabera, korronteak positibotzat hartzen dira dispositibora sartzen direnean. Geziak, igorle/oinarri-juntura zuzenean polarizatzerakoan, korronteak hartzen duen noranzkoa adierazten du (beraz pnp edo npn motak bereizten ditu).



11.2 Irudia. Oinarrizko BJTen egiturak eta zirkuitu-ikurrak: ezkerrean, pnp egitura, eta, eskuinean, npn mota

FABRIKAZIOA



11.3 Irudia. n^+pn transistorea eraikitzeke erabiltzen diren bi egitura: diskretua (ezkerrean) eta integratua (eskuinean)

Egitura diskretua n^{++} substratu batetik edo olata batetik abiatzen da. Horretan, erresistibitate handiko n motako geruza epitaxiala (kolektorea) hazten da. Ondoren, oxidoz estaltzen da eta, leiho bat ireki ondoren, p motako oinarria barreiatzen da (tenperatura altuan). Azkenean, n^{++} igoilea barreiatzen da eta metalezko kontaktuak gauzatzen dira (Al-Si aleazioaz).

Zirkuitu integratuetan, BJT guztiak oinarri edo substratu bera dute eta, arrazoi teknologikoak direla eta, kontaktu guztiak gainazal bakarrean egoten dira. Kasu horretan, erresistibitate handiko p motako olata batetik abiatzen gara. Bertan, n^{++} eskualde txiki bat (lurperaturiko geruza izango dena) barreiatzen da. Jarraian, kolektorearen papera beteko duen n motako geruza epitaxiala hazten da. Gero, p motako basea barreiatzen da. Azkenik, n^{++} motako bi eskualde barreiatzen dira: bata igoilea izango da; besteak, berriz, kolektorean

kontaktu ohmikoa lortzea erraztuko du. Goiko irudian, transistorearen eskualde erabilgarria marraztu da (lurpeko geruzaren funtzioa, erresistentzia txikiko bidea aurkeztea da).

ISO izenaz adierazitako eskualdeak material dielektriko (isolatzaile) batez eratzen dira eta dispositiboak elektrikoki isolatzeko erabiltzen dira. Normalean, SiO₂ siliziozko oxidozko putzuak izaten dira. Isolamendua lortzeko erabili ohi den beste prozedura p-n juntura isolatzaileak dira (alderantziz polarizatuak).

11.2 Funtzionamendu moduak edo lan-guneak

BJT transistorearen junturak zuzenean edo alderantziz polariza daitezkeenez, lau polarizazio-konbinaketa ditugu. Ondorioz, lau lan-gune bereizten dira.

Taula 11.1. Junturen polarizazio posibleak eta lan-guneak

Igorle-Oinarria	Kolektore-Oinarria	Lan-gunea
Zuzenean	Alderantziz	Gune aktiboa
Alderantziz	Alderantziz	Etendura
Zuzenean	Zuzenean	Asetasuna
Alderantziz	Zuzenean	Alderantzizko gunea

BJTek **eskualde aktiboan** lan egin ohi dute. Seinale anplifikadore lineal ia guztietan (adibidez, anplifikadore operazioaletan), transistoreak eskualde horretan polarizatzen dira, bertan irabazirik handiena eta distortsiorik txikiena lortzen direlako.

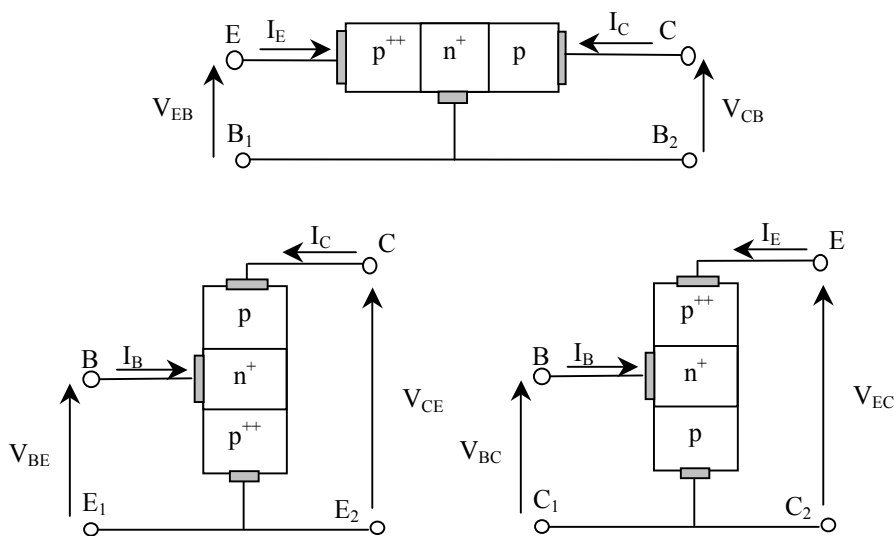
Itxitako etengailuek oso tentsio txikia dute beren terminalen artean nahiz eta korrante handia eroan. Kasu hori BJT transistoreen **asetasunari** dagokio. Egoera horrek ‘zero’ - edo maila logiko baxua- du izena zirkuitu logiko batean.

Etenik dagoenean, zirkuitu irekian dago, etengailu irekien antzera. Egoera horrek ‘bat’ - edo maila logiko altua- du izena zirkuitu logiko batean.

Alderantzizko gunean, igorleak eta kolektoreak beren ohiko paperak trukatu dituzte. Seinale-irabazirik bilatzen ez denean erabilgarria izan daiteke: adibidez, elektronika digitaletan (TTL Transistor-Transistor-Logic logikan).

ERABILERA KO KONFIGURAZIOAK

Zirkuitu aplikazioetan, transistorearen terminal bat sarreran eta irteeran agertzen da. Hiru terminal ditugunez, hiru egitura erabili ohi dira (ikus 11.4 Irudia) : base komunekoa (igorletik sartuz), igorle komunekoa eta kolektore komunekoa (azken bi horietan basetik sartuz).



11.4. Irudia. Konfigurazio posibleak

Geroago ikusiko ditugun arrazoiengatik, igorle komuneko konfigurazioa erabili ohi da BJTa tentsio-anplifikadore gisa erabiltzeko.

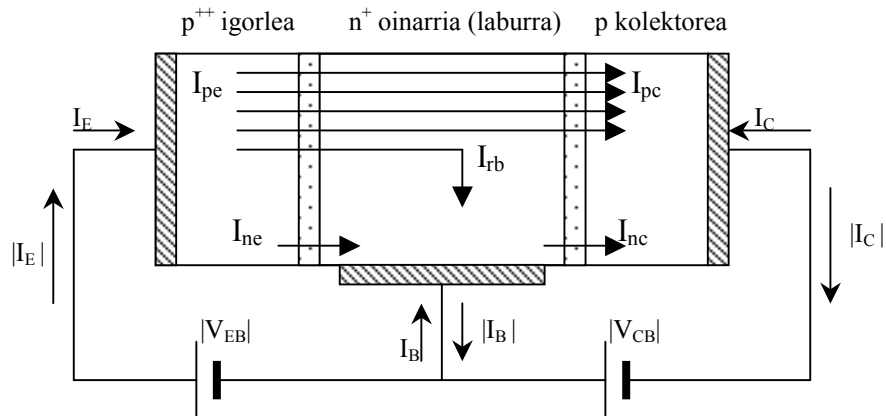
11.3 Funtzionamendu kualitatiboa: transistore-efektua

Demagun pnp motako BJT bat dugula (npn baten kasua guztiz analogoa da).

Bi pn juntura ditugu eta, beraz, diodorako esandakoak hemen ere balio du. Φ_T , $\epsilon(x)$ eta $\rho(x)$, orduan bezala ebazten dira bi juntura horietan ere.

Demagun pnp transistorea tarte aktiboan polarizatzen dugula; hau da, igorlearen eta basearen arteko juntura zuzenean ($V_{EB} > 0$) eta basearen eta kolektorearen artekoa alderantziz ($V_{CB} < 0$) polarizatzen ditugu.

11.5 Irudian, tentsio horiek eta eragiten dituzten korroneak adierazi ditugu.



11.5 Irudia. Modu aktiboa: tentsioen polaritateak, korronteen osagaien noranzkoak eta E, B eta C terminalen korronteen noranzkoak azaldu dira

Hurrengo hipotesiak onetsiko ditugu:

- Igorlea, basea eta kolektorea homogeneoak dira.
- Kontaktuak ohmikoak dira (ez dago erresistentziarik eta $S_{\text{kontaktu}} = \infty$).
- Junturak latzak dira eta bertan Erabateko Despopulatzaren Hipotesia zuzenesten da.
- Eskualde neutroetan ez da tentsiorik agertzen (nahiko dopatuta daudenez, beren erresistentziak oso baxuak dira).
- Espazioko kargako eskualdeetan ez dago sorkuntzarik ez eta birkonbinaketarik (korrontek konstante mantentzen dira hura zeharkatzean).
- Injekzio baxuan gaude.

Hipotesiak onartuta, kanpotik aplikatzen den tentsio osoa junturretan agertzen da.

IGORLEA

Igorleko juntura zuzenean polarizatuz, potentzial langa jaisten da eta, horren ondorioz, igorlean hain ugariak diren hutsuneak basera pasa daitezke (I_{pe}). Gauza bera gertatzen da baseko elektroiekin, igorlera pasatzen baitira (I_{ne} korrontea, igorletik basera).

Beraz, igorletik baserako, korronte handia agertzen da ($I_e = I_{pe} + I_{ne}$).

Diodoren analisitik dakigunez, $I_{pe} = K_1 \cdot \exp(V_{EB})$ eta $I_{ne} = K_2 \cdot \exp(V_{EB})$.

Igorlea basea baino askoz dopatuagoa denez, $K_1 \gg K_2$, $I_{pe} \gg I_{ne}$

eta $I_e \approx I_{pe}$.

KOLEKTOREA

Bestalde, kolektoreko juntura alderantziz polarizatu dugunez ($V_{CB} < 0$), urrienen igarotzea errazten da (hutsuneak erraz pasatzen dira basetik kolektorera; halaber, elektroiak kolektoretik basera).

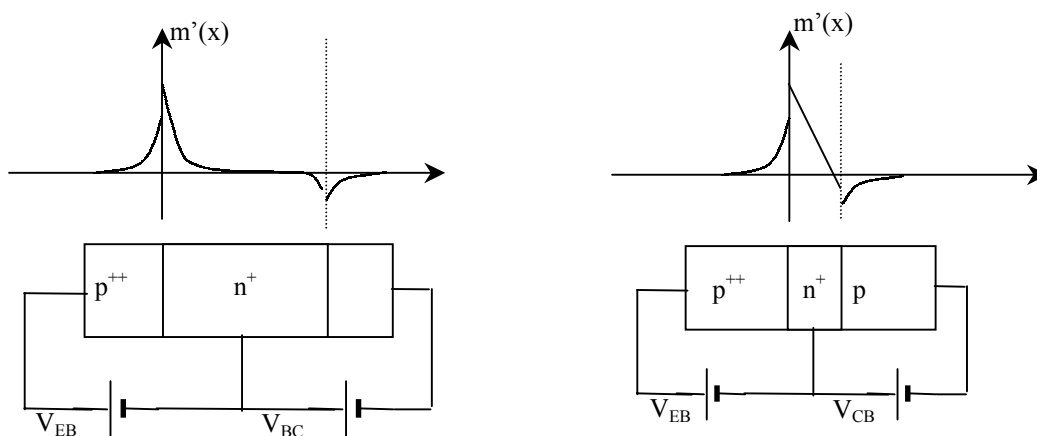
Kolektoretik, elektroi gutxi batzuk (termikoki sortutakoak) basera pasatuko dira. Horiek dakarten korronea –gogoratu diodoaren analisia- kolektoreari dagokion ajetasuneko korronea da: oso korrone txikia ($I_{nc} = I_{sat \text{ kolektore}}$).

Kolektoreko junturako hutsuneen korronearen neurria, berriz, oso bestelakoa da. Izan ere, igorletik basera injektatu diren hutsuneei (I_{pe}/q), kolektoreko junturaraino heltzekotan, ez dute arazorik izango hura zeharkatzeko. Gainera, basea (barreiatzeko luzerarekin alderatuz) luzea balitz, oso hutsune gutxi helduko liriateke kolektoreko junturaraino, baina, oinarria oso laburra denez, birkonbinatzen (bidean galtzen) diren hutsuneei oso gutxi izaten dira ($I_{rb}/q < 0.01 \cdot I_{pe}/q$). Beraz, igorletik injektaturiko hutsuneei gehienak kolektorera pasatzen dira: $I_{pc} = I_{pe} - I_{rb} \approx I_{pe}$.

Kolektoreak, igorleak igorritako eramaileak jasotzen (biltzen) dituzenez, BC junturako korronea oso altua izaten da (hutsuneei korronea, batik bat: $|I_c| \approx I_{pc}$). Beraz, **transistore efektua** deitzen den portaera hori dela eta, BC junturak, korrone handia jasotzen du nahiz eta alderantziz polarizatu.

BASEA

Aurrekoaren gakoa oinarria laburra izatean datza. Bestela, igorletik kolektorera bidalitako eramaileak ez liriateke haraino iritsiko, eta I_{pc} sorkuntza termikoki dagokiona litzateke. Orduan, kolektoreko korronea aintzat ez hartzeko modukoa litzateke: $I_c = I_{pc} + I_{nc} = I_{sat}$ (ikus 11.6 Irudiko profilak).



11.6 Irudia. Eramaileen kontzentrazioen profilak, basea luzea denean (ezkerrean) eta laburra denean (eskuinean).

Basetik irtengo den korronterako, beraz:

$$|I_b| = (I_{ne} - I_{nc}) + (I_{pe} - I_{pc}) = I_{ne} - I_{nc} + I_{rb}$$

TERMINAL BAKOITZEKO KORRONTEAK

Barne-korronteen noranzkoak ondorioztatu egiten ditugunez, positiboak izango dira. Terminal bakoitzeko korronteak -positiboak direnean- sartu egiten direnez, zeinuak egokiro jarri behar dira (irteten den osagaia negatiboa izango da eta sartzen dena, positiboa):

$$I_E = I_{pe} + I_{ne}$$

$$I_C = - [I_{pc} + I_{nc}]$$

$$I_B = - [I_{ne} - I_{nc} + I_{rb}]$$

Ikusten denez, $I_E + I_C + I_B = 0$ $I_{pe} - I_{pc} = I_{rb}$ (Kirchoff betetzen da).

Diseinu egokia erabiliz $N_e > N_b > N_c$ eta $W_b \ll L_{pb}$ betetzen direnez,

$$I_E \approx I_{pe} \quad (I_{ne} \ll I_{pe}, N_e \gg N_b)$$

$$I_C \approx - I_{pc} \quad (I_{pc} \gg I_{nc}, I_{pc} \approx I_{pe} \text{ eta } I_{nc} \propto I_{sat BC})$$

$$I_B \approx - I_{ne} - I_{rb} \quad (I_{nc} \propto I_{sat BC})$$

$$I_B \approx - I_{ne} \quad (\text{basea laburra denez, } I_{rb} \text{ oso txikia da})$$

Hurbilketak egin ondoren, Kirchoffen legeak ez dira, itxura batean, betetzen. Baina $I_E + I_C + I_B = 0$, noski.

Kontuan hartu aktiboan I_B oso txikia dela eta $|I_E| > |I_C|$ betetzen dela:

1. $I_{pc} = I_{pe} - I_{rb}$ (nahiz eta txikia izan, positiboa da)
2. $I_{ne} > I_{nc}$. I_{ne} polarizazio zuzeneko korronte bat da, eta I_{nc} alderantziz polarizatutako diodo bateko eskualde bati dagokio.

BASEKO KORRONTEAREN GARRANTZIA

I_B , oso txikia izan arren, behar-beharrezkoa da transistorearen funtzionamendurako. I_B korronteak bi osagai nagusi ditu: batetik, basetik igorlerantz injektatu behar diren elektroiena ($-I_{ne}$); eta, bestetik, igorletik abiatu eta kolektorerraino iritsiko ez diren hutsunekin birkonbinatzeko behar diren elektroiena ($-I_{rb}$). Bi kasuetan, basetik sartu beharreko elektroiak dira.

Baseko korrante hori tamainaz txikia baina ezinbestekoa denez, kontroleko aldagai gisa erabil daiteke aplikazio batzuetan.

Baina, gainera, I_C kolektoreko korranteak, baseko korrantearen forma bera izaten du, baina tamainaz handiagoa da. I_B sarreratzat eta I_C irteeratzat hartzen baditugu, transistoreak, nolabait, korrantea amplifikatu egiten du.

Adibidez, $I_{ce} = 0.99 \cdot I_{pe}$ bada, $I_C \approx -0.99 \cdot I_E$; eta, -Kirchoff aplikatuz, $I_B = -0.01 I_E$.

Beraz, $I_C \approx 99 \cdot I_B$, ia ehun aldiz handiagoa den korrantea lortzen da.

Orain artekoa, zeinuak aldatuz, **n⁺pn transistoreentzat** ere aplikagarria da:

$V_{BE} > 0$, $V_{BC} < 0$, $I_E < 0$, $I_B > 0$, $I_C > 0$

Heltzen diren urrienak jasotzeko, nahikoa da kolektore-base juntura alderantziz polarizatzea. Beraz, **aktiboan** (EB juntura zuzenean eta BC juntura alderantziz daudenean), **I_C ez dago BC junturako tentsioaren menpe** lehenengo hurbilketan.

11.4 Modu aktiboaren analisi kuantitatiboa: zirkuituko parametro nagusiak

Transistore-efektua areagotzearen, igorleko korrante guztia kolektoreko korrante bilakatzea komeni zaigu, baina hori ezin da %100ean lortu. Efectua kuantifikatzeko, BJTaren barne-parametro batzuk definituko ditugu. Horien bidez, transistorea modu aktiboan karakterizatu eta modelatuko dugu.

Garapen horretan pnp transistore motarekin lan egiten dugu (nnp transistoreen kasua analogoa da).

IGORPEN EFIZIENTZIA EDO INJEKZIO ERAGINKORTASUNA (γ)

$$\gamma = \frac{\text{Igorleak basean injektatutako eramaileen korrantea}}{\text{Igorleko korrante osoa}}$$

$$\gamma = \frac{I_{pe}}{I_E} = \frac{I_{pe}}{I_{pe} + I_{ne}} = \frac{I_{pe}/I_{ne}}{I_{pe}/I_{ne} + 1}$$

$$\gamma_e \equiv \frac{I_{pe}}{I_{ne}} \text{ injekzioaren erlazioa definituz, } \gamma = \frac{\gamma_e}{\gamma_e + 1}$$

$\gamma \approx 1$ izatea komeni zaigunez, γ_e oso altua izatea bilatuko dugu.

BASEKO GARRAIO FAKTOREA (α_T)

$$\alpha_T = \frac{\text{Igorletik basera injektaturik, kolektorera heltzen diren eramaileak}}{\text{Igorletik basera injektatzen diren eramaileak}}$$

$$\alpha_T = \frac{I_{pc}}{I_{pe}} = \frac{I_{pc}}{I_{pc} + I_{rb}} = \frac{I_{pc}/I_{rb}}{I_{pc}/I_{rb} + 1}$$

$$\beta_b \equiv \frac{I_{pC}}{I_{rB}} \text{ bada, } \alpha_T = \frac{\beta_b}{\beta_b + 1}$$

$\alpha_T \approx 1$ izatea –hau da, β_b oso altua izatea- komeni zaigu guri. Eta, horretarako, base laburrek dakarten I_{rb} txikia behar dugu.

SEINALE HANDIKO IRABAZIAK: α ETA β PARAMETROAK

α_T parametroaren definiziotik:

$$I_{pc} = \alpha_T \cdot I_{pe} = \alpha_T \cdot \gamma \cdot I_E$$

$$I_C = -[I_{pc} + I_{nc}] = -[\alpha_T \cdot \gamma \cdot I_E + I_{nc}]$$

eta $\alpha \equiv \alpha_T \cdot \gamma$ definituz ($0 < \alpha < 1$, beti),

$$I_C = -\alpha \cdot I_E - I_{nc}$$

Diseinutik $\alpha_T \approx 1$ eta $\gamma \approx 1$ badira, $\alpha \approx 1$.

Igorlea zirkuitu irekian utziz base-kolektore juntura alderantziz polarizatzen badugu, kolektoreko terminaletik BC *diodoaren* alderantzizko korronea (asetasuneko korronea) lortuko dugu. Kanpotik erraz neur daiteke parametro hori, eta I_{CB0} edo I_{C0} deitzen diogu.

$$I_{CB0} \equiv I_{C0} = I_C \Big|_{I_E=0 \text{ eta } V_{CB}<0} = -I_{nc} \text{ (irteten denez, negatiboa da).}$$

$$I_{sat} = I_{nc} + I_{pcinjektorikgabe} \approx I_{nc}$$

Beraz, transistorea **tarte aktiboan badago:**

$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{C0}$$

Zeinuei dagokienez, beraz: $I_C < 0$, $I_{C0} < 0$ eta $I_E > 0$.

Npn transistoreetan, ekuazio bera erabil daiteke, baina korronteen zeinua kontrakoak dira ($I_C > 0$, $I_{C0} > 0$, $I_E < 0$).

Honakoa hau izan daiteke ekuazioaren beste adierazpen bat:

$$\alpha = -\frac{I_C - I_{C0}}{I_E - 0} = \frac{|I_C - I_{C0}|}{|I_E - I_{E0}^*|}$$

I_{E0}^* I_{C0} neurtzean dugun erreferentziako I_E igorleko korrontea adierazteko asmatu dugu, baina I_{E0} izena beste parametro baterako erabiltzen da: I_{C0} korrontearen analogoarako, hain zuzen ere; beraz, I_{E0} , $I_C = 0$ behartuz eta EB juntura alderantziz polarizatuz igorletik sartzen den korrontea da.

Igorlea sarreratzat eta kolektorea irteeratzat hartzen baditugu, α korronte-irabazia litzateke. Hori dela eta, **α parametroa seinale handiko base komuneko konfigurazioaren** noranzko zuzeneko **korronte-irabazia** da.

$$\alpha = \alpha_T \cdot \gamma = \frac{I_{pc}}{I_{pe}} \cdot \frac{I_{pe}}{I_E} = \frac{I_{pc}}{I_E}$$

α , kolektorera iristen den igorleko korrontearen adierazlea da. Beraz, basean gertatzen diren galeren berri ematen digu eta transistore efektuaren adierazle nagusietakoa da. Transistoreen diseinuak $\alpha \approx 1$ lortzea bilatuko du.

Askotan, β parametroa erabilgarriagoa gertatzen da:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \text{ formulaz definitzen da (eta, beraz, } \alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \text{)}$$

$$I_C = -\frac{\beta}{\beta+1} \cdot I_E + I_{C0} \text{ eta}$$

$$I_E = -\frac{\beta+1}{\beta} \cdot [I_C - I_{C0}]$$

$I_C + I_B + I_E = 0$ aplikatuz,

$$-\frac{\beta+1}{\beta} \cdot [I_C - I_{C0}] + I_B + I_C = 0$$

$$-(\beta+1) \cdot I_C + (\beta+1) \cdot I_{C0} + \beta \cdot I_B + \beta \cdot I_C = 0'$$

$$-I_C + (\beta+1) \cdot I_{C0} + \beta \cdot I_B = 0'$$

Eta $I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{C0}$ (formula horrek bakarrik tarte aktiboan balio du).

Ekuazio horretan ikusten denez, I_C , I_B eta I_{C0} korronteek noranzko berbera dute.

[npn transistoreen ekuazioetan, zeinu berberak erabiltzen dira]

Igorle komuneko egituran (hau da: sarreratzat, basea eta, irteeratzat, kolektorea hartuz) korronteen arteko erlazioak analizatzen baditugu:

$$I_C - I_{C0} = \beta \cdot I_B + \beta \cdot I_{C0} \Rightarrow \beta = \frac{I_C - I_{C0}}{I_B + I_{C0}} = \frac{I_C - I_{C0}}{I_B - (-I_{C0})} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

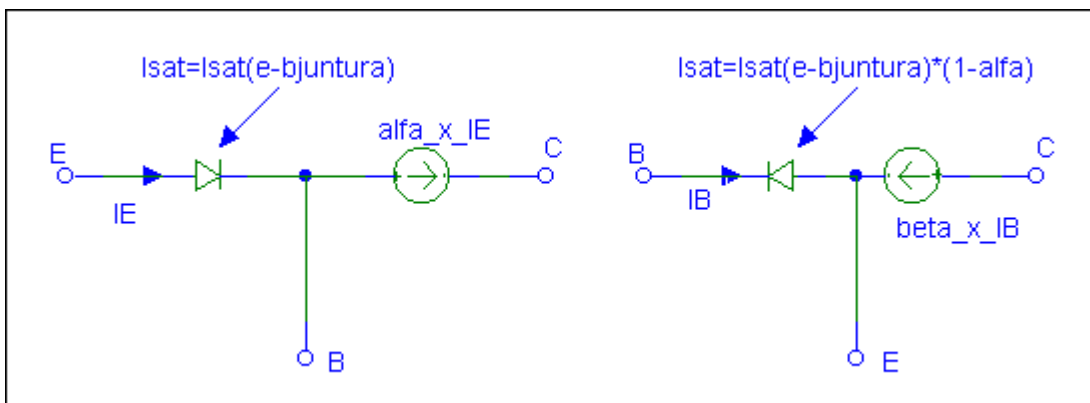
$I_E = 0$ eta $V_{CB} < 0$ direnean $I_B = -I_{C0}$ dela kontuan hartuz, β , $I_E = 0$ denetik oraingo egoerara (aktibora) pasatzen garenean dauden kolektoreko(-aren?) eta baseko(-aren?) korronteen hazkundeen arteko erlazioa da. Ondorioz, **β parametroa, seinale handiko igorle komuneko** noranzko zuzeneko **korrante-irabazia** da.

Lehenago kualitatiboki esandakoa orain kuantitatiboki egiaztatzen dugu: I_B txikiaz, I_C handia lortu edo kontrolatzen dugu. Horrek aplikadoreak eraikitzeko aukera ematen digu.

Transistore efektua nabaria bada, β handia izango da (baita β_b eta γ_e ere). Hau da: α_T eta $\alpha \sim 1$ badira, β nahiko handia da. Aplikazioen eta diseinuen arabera, 10-10.000 tarteko β duten transistoreak erabiliko ditugu (guk laborategian erabiliko ditugun ohiko transistoreen β 50-300 ingurukoa izaten da).

ZIRKUITU BALIOKIDEAK

Hala, modu aktiboan (I_{C0} arbuiauz), transistorearen zirkuitu baliokideak 11.7 Irudikoak izaten dira.



11.7 Irudia. Transistorearen zirkuitu baliokideak modu aktiboan (I_{C0} aintzat hartu gabe)

DISEINURAKO BALDINTZAK

Aurreko garapenak honako bi baldintza hauek dakartza diseinurako:

1. Igorle-base juntura oso asimetrikoa izatea, eta horretarako igorlea oso dopatuta egotea ($N_E \gg N_B \Rightarrow \gamma \approx 1$).
2. Basea oso laburra izatea ($w_B \ll L_{pB} \Rightarrow \alpha_T \approx 1$).

12. TRANSISTORE BIPOLARRAREN SEINALE HANDIKO EREDUAK

Aurreko ikasgaietan, ikusi dugu transistore bipolarren polarizazioan lau gune edo modu posible daudela. Zein gunetan lan egiten ari den jakiteko, tentsioei begiratu behar diegu. Modurik garrantzitsuenean –aktiboan- erabiltzeko ekuazio eta zirkuitu baliokideak lortu bagenituen ere, komeniko litzateke ekuazio multzo orokor bat lortzea, aplikatutako edozein tentsiorekin (edozein lan-gunetan) aplikatzeko.

Tentsioak finkatu orduko, bi eredu ditugu korranteak jakiteko:

- Ebers-Mollen eredu, klasikoa.
- Gummel-Poonen eredu, simulazio-programetan erabiliena (Spice programan, adibidez).

Ikasgai honetan, Ebers-Mollen eredu analizatuko da.

Lortuko ditugun ekuazioek edozein polarizaziorako ezaugarritatzen digute BJTa eta haien adierazpen grafikoa BJTaren ezaugarri-kurbak dira. Guk teoriako analisisia egingo badugu ere, fabrikatzaileen *Datu Liburuetako* kurba esperimentalekin lan egingo dugu normalean.

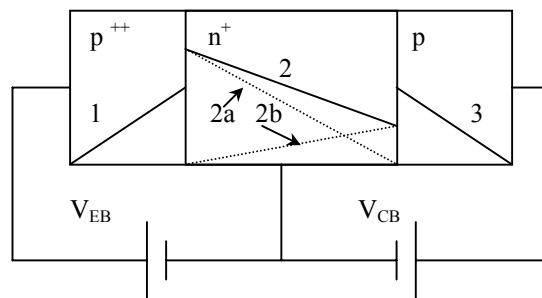
Azkenean, Ebers-Mollen ereduak kontuan hartzen ez dituen idealarekiko bi desbideratze (edo bigarren mailako efektu) analizatuko dira: Early efektua eta β -ren I_C -rekiko menpekotasuna.

12.1 Ebers-Mollen ereduak

12.1.1 EREDUAREN DEDUKZIOA

Pnp motako BJTa analizatuko dugu. Oso hurbil dauden bi pn junturaz eratzen da hori eta bi junturen lotura elektrikoa oso laburra den basearen bidez egiten da.

Demagun transistorea bi tentsio positiboz polarizatzen dugula: $V_{EB} > 0$, $V_{CB} > 0$. Orduan, transistorea asetasunean dago. Baseko profila bitan deskonposatuz, juntura bakoitzeko tentsioak profilean duen eragina agerian geratzen da (ikus 12.1 Irudia). Profilen —eta fluxuen— gainezarpena aplikagarria denez, deskonposaketaren ikuspuntua esanguratsua da.



12.1 Irudia. Pnp transistorearen profila asetasunean

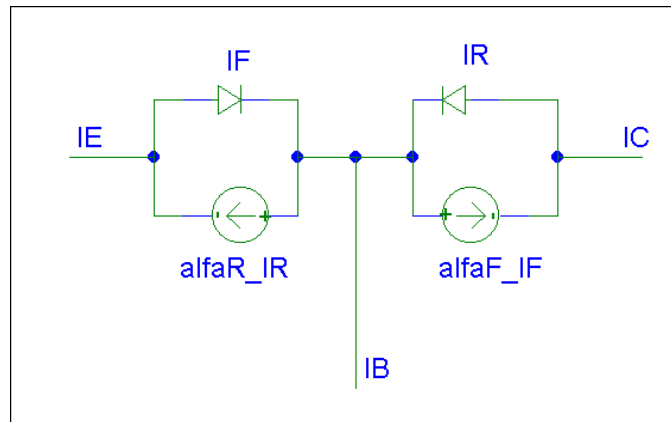
Igorleko korronteak bi osagai ditu:

- 1.- I_F juntura horretako polarizazioa dela-eta agertzen den korrontea da $(1+2a)$.
- 2.- Kolektoreko juntura oso hurbil dagoelako agertzen den korrontea da $(2b)$. Hau da, kolektoreko junturan sortutako korrontea I_R bada, igorleko junturaraino heldu eta igorlerra pasatzen den korronte horren zatia: $\alpha_R \cdot I_R$.

Gauza bera esan dezakegu **kolektoreko korronteari buruz**. Bi osagai daude:

- 1.- I_R juntura horretan polarizazioa dela-eta agertzen den korrontearen osagaia da $(2b+3)$.
- 2.- Igorleko junturatik iristen den korrontea $(2a)$ da; hau da, kolektorerraino heltzen den I_F igorleko junturako korrontearen zatia: $\alpha_F \cdot I_F$.

Hala, 12.2 Irudiko zirkuitu baliokidea ulertzeko moduan gaude:



12.2 Irudia. Ebers-Mollen zirkuitu baliokidea (pnp transistorearentzat)

- 1.- Agertzen diren diodoak BJTaren junturak dira.
- 2.- Menpeko bi korrante-sorgailuak bi junturen arteko loturak dira.
- 3.- α parametroak, transmisioaren adierazleak dira. Azpi-indizeei dagokienez, F (Forward) transmisio zuzena da, eta R (Reverse), alderantzizko transmisioa.
- 4.- $\alpha_F < 1$ eta $\alpha_R < 1$, juntura batean sortutako korrontea ez baita beste junturaraino osorik heltzen (aurreko ikasgaietan ikusi genuenez, badira transistore efektuan parte hartzen ez duten osagaiak, eta baseko birkonbinaketa, nahiz eta txikia izan, ez da hutsa).

Orduan, korrontek honela geratzen dira:

$$I_E = I_F - \alpha_R \cdot I_R$$

$$I_C = I_R - \alpha_F \cdot I_F$$

$$I_B = -[I_E + I_C] = -[I_F - \alpha_R \cdot I_R + I_R - \alpha_F \cdot I_F] = -(1 - \alpha_F) \cdot I_F - (1 - \alpha_R) \cdot I_R$$

Non:

$$I_F = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) \quad \text{eta} \quad I_R = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

I_{ES} eta I_{CS} igorleko eta kolektoreko junturen asetasuneko korrontek dira (bakoitza bere bi osagaiekin).

Formulak trinkotuz, pnp transistoreen Ebers-Mollen ereduaren ohiko adierazpena lortzen da:

$$I_E = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_C = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_B = (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) + (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Eredu horrek edozein polarizaziopean balio du.

α_F , α_R , I_{ES} eta I_{CS} dopaketaren eta geometriaren menpe daude.

Baina, lau aldagai horien artean, $\alpha_F \cdot I_{ES} = \alpha_R \cdot I_{CS} \equiv I_S$ betetzen da betiere, non I_S transistorearen asetasuneko korronea baita (definizioz). Aurreko ekuazioa **elkarrekikotasunaren erlazioa** da.

Elkarrekikotasunaren erlazioa kontuan hartzen badugu, hiru parametro behar ditugu BJT dispositiboa ezagutzeko: α_R , α_F eta I_S , adibidez.

Zergatik betetzen da? Batea berbera delako bi junturentzat.

$\alpha_F I_{ES}$ igorleko junturako tentsioak baseko profilararen bidez kolektoreko junturan eragiten duen korronea da; hau da, I_{ES} -ren baseko osagaitik kolektoreko junturaraino heltzen dena. Era berean, $\alpha_R I_{CS}$ da baseari dagokion kolektoreko asetasuneko korronearen osagaia ($\gamma_C I_{CS}$). Elkarrekikotasunaren erlazioak islatzen duenez, baseko analisi hori berdina da bi junturentzat.

$$I_{ES} = I_{ESB} + I_{ESE} \quad (\text{eta } I_{ESB} = \gamma_E \cdot I_{ES} = I_{satB})$$

$$I_{CS} = I_{CSB} + I_{CSC} \quad (\text{eta } I_{CSB} = \gamma_C \cdot I_{CS} = I_{satB})$$

$$\alpha_T \cdot (\gamma_C \cdot I_{CS}) = \alpha_T \cdot (\gamma_E \cdot I_{ES}) = \alpha_T \cdot (I_{satB}) = \alpha_T \cdot \frac{q \cdot D_{mB} \cdot n_i^2}{W \cdot N_B} \cdot \text{Azalera} = I_S$$

I_S korroneak bi junturek konpartitzen duten osagaia adierazten du eta dispositiboaren oinarritzko konstantea da.

Korronteen eta tentsioen zeinuak aldatuz lortzen ditugu npn transistoreen ekuazioak. I_S beti positiboa bada ere, kontuan hartu behar da I_E , I_C eta I_B korronteen zeinua, transistore motaren eta polarizazioaren menpe daudela.

Basea oso luzea balitz ($W_B \gg L_{urrien}$), basea zeharkatuko lukeen korronea oso txikia litzateke ($\alpha_R, \alpha_F \ll 1$, I_{TB} oso handia litzatekeelako). Orduan, beraz, transistore efektua desagertuko litzateke. Kasu horretan ere, Ebers-Mollen ereduak baliagarria izaten jarraitzen du, eta terminal komun bat duten bi diodo independente dituen eredura garamatza.

12.1.2 $\alpha_F, \alpha_R, I_{ES}$ ETA I_{CS} PARAMETROEN KALKULU ESPERIMENTALA

Ebers-Mollen ereduan agertzen diren parametroak kanpoko parametrotzat har ditzakegu, esperimentalki neur baitaitezke.

Hala, pnp batean $V_{CB} = 0$ behartzen badugu (bi terminal horiek zirkuitulaburtuz):

$$I_R = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{0}{V_T}\right) - 1 \right) = 0$$

$$I_E = I_F - \alpha_R \cdot 0 = I_F \Rightarrow I_E = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_C = 0 - \alpha_F \cdot I_F = -\alpha_F \cdot I_F = -\alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$\text{eta, beraz, } \alpha_F = -\frac{I_C}{I_E} \Big|_{V_{CB}=0} \quad \left(\text{aktiboko } \alpha = -\frac{I_C - I_{C0}}{I_E - 0} \Big|_{akt} \right)$$

α_F , beraz, base komuneko korrone-irabazia da, irteera zirkuitulaburrean dagoenean. I_{ES} igorleko junturako asetasuneko korronea da, irteera (base-kolektore juntura) zirkuitulaburrean badago.

Era berean,

$$I_C \Big|_{V_{EB}=0} = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) \quad \text{eta} \quad \alpha_R = -\frac{I_E}{I_C} \Big|_{V_{EB}=0}$$

Ondorioz, α_R base komuneko alderantzizko korrone-irabazia da, sarrera zirkuitulaburrean dagoenean. I_{CS} kolektoreko junturako asetasuneko korronea da, baldin eta sarrera (base-igorle juntura) zirkuitulaburrean badago.

12.1.3 EBERS-MOLLEN EKUAZIOEN BESTE ADIERAZPEN BAT (pnp batekin)

$$I_E = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) \Rightarrow$$

$$I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) = I_E + \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_C = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_F \cdot \left[I_E + \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) \right] \Rightarrow$$

$$I_C = -\alpha_F \cdot I_E + (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$\text{Era berean, } I_E = -\alpha_R \cdot I_C + (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

I_{C0} eta I_{E0} korronteen definizioa gogora ekarriz:

$$I_{CB0} = I_{C0} \equiv I_C \Big|_{\substack{I_E=0 \\ V_{CB}<0}} = (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot (0 - 1) \Rightarrow I_{C0} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS}$$

$$I_{E0} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{ES}$$

$$I_C = -\alpha_F \cdot I_E - I_{C0} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_E = -\alpha_R \cdot I_C - I_{E0} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Ebers-Mollen beste adierazpen bat dira.

Tentsioetan eta korrontetan, zeinuak kontuan izan behar ditugu, eta, npn transistoreen kasuan, korronte eta tentsio guztien zeinuak aldatu (azkenean, tentsioen kasuan azpi-indizeak trukatu, besterik ez da egin behar).

α_R eta α_F erabili beharrean, β_R eta β_F (**igorle komuneko** konfigurazioko irabaziak) erabil daitezke:

$$\beta_F \equiv \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \quad \beta_R \equiv \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

Bestalde:

$$\alpha_F \cdot I_{E0} = -\alpha_F \cdot (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{ES} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_S$$

$$\alpha_R \cdot I_{C0} = -\alpha_F \cdot (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_S$$

Eta, beraz, $\alpha_F \cdot I_{E0} = \alpha_R \cdot I_{C0}$

Elkarrekikotasunaren erlazioa, zirkuitu irekiko korronteekin ere betetzen da.

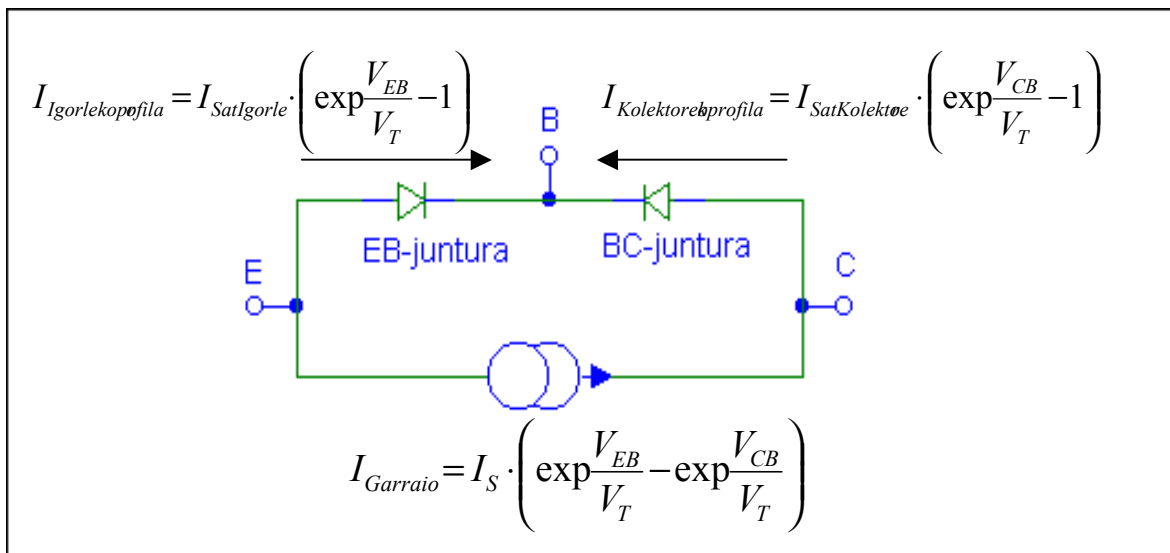
12.1.4 EBERS-MOLLEN EREDUA GARRAIOAREN IKUSPUNTUTIK

Transistorea igorletik kolektorera zeharkatzen duen korrontea parametro nagusizat hartuz, ekuazioak beste forma batez adieraz daitezke. $I_{pe} \sim I_{pc}$ ($\alpha_T \sim 1$) onartuz:

$$I_{pe} = I_{pc} = -qD_{mB} \text{malda} = q \frac{n_i^2}{N_B} \frac{D_{mB}}{W_B} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right]$$

$$I_E = I_{pe} + I_{ne} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] + I_{sat\text{GORLEKOPROFIL}} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_C = -I_{pe} + I_{Nkolektorekoprofiletik} = -I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] + I_{sat\text{KOLEKTOREKOPROFIL}} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$



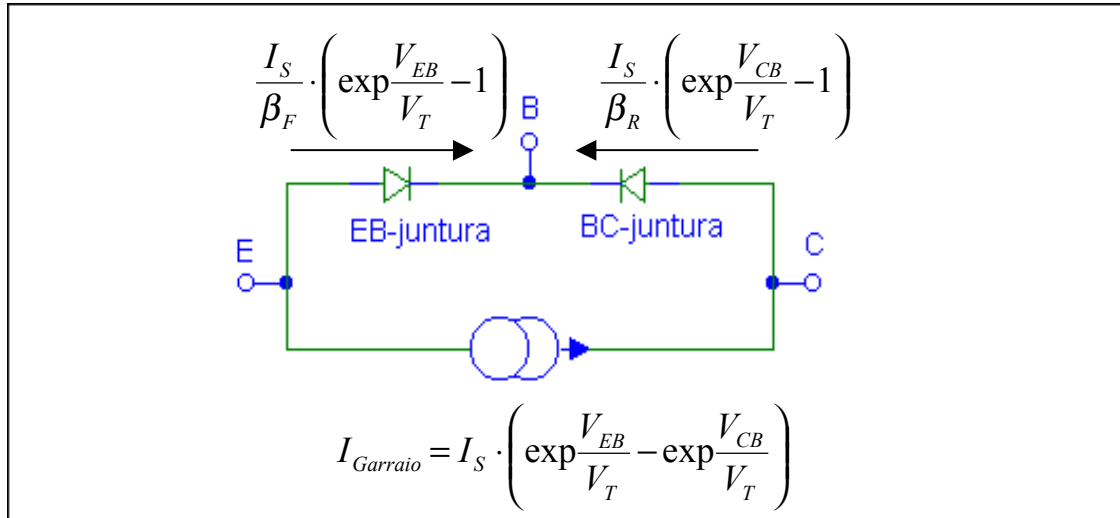
12.3 Irudia. Zirkuitu baliokidea garatzea: garraiatzen den korrontea eta beste osagaiak

$$I_{sat\text{GORLE-BASEJUNTURA}} = I_{sat\text{GORLEKOPROFIL}} + I_S = (1/\gamma) I_S = I_S / \alpha_F \Rightarrow$$

$$I_{sat\text{GORLEKOPROFIL}} = I_S (1/\alpha_F - 1) = I_S \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F} = I_S \frac{1}{\beta_F}$$

$$I_{sat\text{KOLEKTORRE-BASEJUNTURA}} = I_{sat\text{KOLEKTORREKOPROFIL}} + I_S = (1/\gamma') I_S = I_S / \alpha_R \Rightarrow$$

$$I_{sat\text{KOLEKTORREKOPROFIL}} = I_S (1/\alpha_R - 1) = I_S \frac{1 - \alpha_R}{\alpha_R} = I_S \frac{1}{\beta_R}$$



12.4 Irudia. Zirkuitu baliokidea, garraiatzen den korronea ardatz gisa hartuz

$$I_E = I_{pe} + I_{ne} = I_S \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{EB}}{V_T} \right) - \exp \left(\frac{V_{CB}}{V_T} \right) \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{EB}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

$$I_C = -I_{pe} + I_{Nkolektorekoprofiletik} = -I_S \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{EB}}{V_T} \right) - \exp \left(\frac{V_{CB}}{V_T} \right) \right] + \frac{I_S}{\beta_R} \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{CB}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

Transistoreak aktiboan lan egiten duenean, BC junturako korronea ez da aintzat hartzeko modukoa, eta 12.4 Irudiko zirkuitutik aurreko ikasgaien lortzen genuen zirkuitu baliokidera iristen gara (ikus 11.7 Irudia).

12.1.5 EBERS-MOLLEN EKUAZIOEN KASU BEREZIAK

Jarraian, aurreko ekuazioek lau lan-guneetan dituzten adierazpen erraztuak garatuko dira. Analisia pnp transistoreentzat egiten da bakarrik, npn motaren kasua analogoa delako.

MODU AKTIBOAN

$$V_{EB} > 0 \text{ eta } V_{CB} < 0, \exp(V_{EB}/V_T) \gg 1, \exp(V_{CB}/V_T) \ll 1$$

$$I_E = I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) + \alpha_R \cdot I_{CS} \approx I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$I_C = -I_{CS} - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) \approx -\alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$I_B = (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \approx (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

Beraz, $I_E > 0$ eta I_C eta $I_B < 0$; $\alpha_F \sim \alpha$

ASETASUNEAN

$$V_{EB} > 0 \text{ eta } V_{CB} > 0, \exp(V_{EB}/V_T) \gg 1, \exp(V_{CB}/V_T) \gg 1$$

$$I_E = I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$$I_C = -I_{CS} - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) \approx -\alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$I_B = (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \approx (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

Korronteen noranzkoa (zeinua) V_{CB} eta V_{EB} balioen menpe dago (hori bai, asetasunean, I_B negatiboa da):

- $V_{EB} > V_{CB} > 0$ badira, orduan, $I_E > 0$ eta $I_C < 0$: Zuzeneko Asetasuna
- $V_{CB} > V_{EB} > 0$ badira, orduan, $I_E < 0$ izan liteke eta $I_C > 0$: Alderantzizko Asetasuna

➤ $V_{EB} = V_{CB} > 0$ badira, $I_E > 0$, $I_C \neq 0$

I_B korrontearen balioa modu aktiboan baino handiagoa da eta, beraz, I_C/I_B erlazioa murrizten da.

ETENDURAN

$V_{EB} < 0$ eta $V_{CB} < 0$, $\exp(V_{EB}/V_T) \ll 1$, $\exp(V_{CB}/V_T) \ll 1$

$$I_E = -I_{ES} + \alpha_R \cdot I_{CS}$$

$$I_C = -I_{CS} + \alpha_F \cdot I_{ES}$$

$$I_B = -(\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} - (\alpha_R - 1)$$

$I_E < 0$, $I_C < 0$ eta $I_B > 0$, eta ez daude tentsioen menpe.

ALDERANTZIZKOAN

$V_{EB} < 0$ eta $V_{CB} > 0$, $\exp(V_{EB}/V_T) \ll 1$, $\exp(V_{CB}/V_T) \gg 1$

$$I_E = -I_{ES} - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \approx -\alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$$I_C = I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) + \alpha_F \cdot I_{ES} \approx I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$$I_B = -(\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} + (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \approx (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$I_E < 0$, $I_C > 0$ eta $I_B < 0$, eta V_{CB} tentsioak agintzen du.

Aktiboarekin alderatuz, ez dugu funtzionamendu berbera (irabazia, esaterako) lortzen.

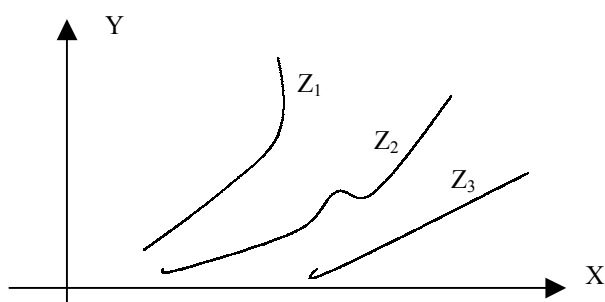
Zergatik? Kasu honetan I_{CS} korrontean baseak agintzen duelako ($N_B > N_C$). Kolektorearen injekzio-eraginkortasuna eta korronte-irabaziaz txikiagoak dira igorlearenak (aktibokoak) baino.

12.2 Ezaugarri-kurbak (pnp transistoreentzat)

Ebers-Mollen ekuazioak grafikoki adierazten baditugu, BJT transistorearen ezaugarri-kurbak (I-V kurbak) lortzen ditugu.

Egitura bakoitzean, erlazionatu beharreko lau aldagai daude bakarrik: sarrerako eta irteerako korrante eta tentsioak, beste bi aldagaiak Kirchoffen legeak aplikatuz ebatzen baitira. Gainera, Ebers-Mollen ereduak bi ekuazio independente ematen dizkigunez, dispositiboan bi aldagai aske daude. Ondorioz, $Y=Y(X,Z)$ formako bi ekuazio izaten ditugu.

Hori dela-eta, *kurba parametrikokoak* erabili behar ditugu, non, aldagai bat konstante mantenduz (parametrozat hartuz), beste bi aldagai erlazionatzen baitira.

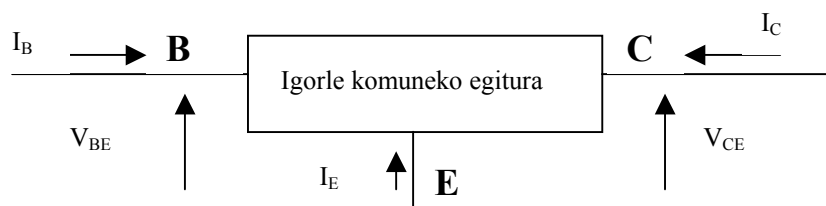


12.5 Irudia. $Y = Y(X,Z)$ funtzioaren adierazpena kurba parametrikoen bidez (parametroa, Z da)

Gainera, transistoreak zirkuituan hartzen duen posizioa dela-eta, igorleko juntura zuzenean polarizaturik egoten da eta $V_{CB} < V_{EB}$ izaten da (pnp batean). Beraz, $V_{EB} > 0$ eta $V_{CE} < 0$ ezberdintasunak onartzen dira (pnp motaren kasuan). Hau da, transistorea gune aktiboan edo asetasunean egoten da.

Azkenean, sarrerako eta irteerako ezaugarri-kurbak erabili ohi dira.

Adibidez, igorle komuneko konfigurazioan:



12.6 Irudia. Igorle komuneko konfigurazioa

Kasu honetan, sarrerako aldagaiak: I_B , V_{BE} ; eta irteerako aldagaiak: I_C , V_{CE} dira.

Hala, kurbak honako hauek dira:

- Sarrerako ezaugarri- kurba $I_B = I_B(V_{BE})$, V_{CE} parametro gisa erabiliz.
- Irteerako ezaugarri-kurba $I_C = I_C(V_{CE})$, parametrotzat I_B korronea hartuz.

Esan dugunez, zirkuitua dela-eta, normalean (pnp transistoreetan) $V_{EB} > 0$ eta $V_{EC} > 0$. Hori dela-eta alderantzizko modua ez da I-V ezaugarrietan irudikatzen.

12.2.1 SARRERAKO I-V KURBA

$$-I_B = (1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Aktiboan bagaude, $V_{CB} < 0$, $V_{EB} > 0$.

Askotan, $V_{CE} \ll 0$ V izango da, eta, orduan:

$$-I_B = (1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] - (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}$$

Hau da, I_B korroneak ez du $-$ ia- V_{CB} tentsioarekiko menpekotasunik eta kurba bakarra agertzen da.

Asetasunean bagaude, $0.7 > V_{CB} > 0$, $0.7 > V_{EB} > 0$ (beraz, $0 > V_{CE} > -0.7$ V tartean egongo da kasu guztietan). $V_{EB} \gg 0$ eta $V_{CB} \gg 0$ onartuz:

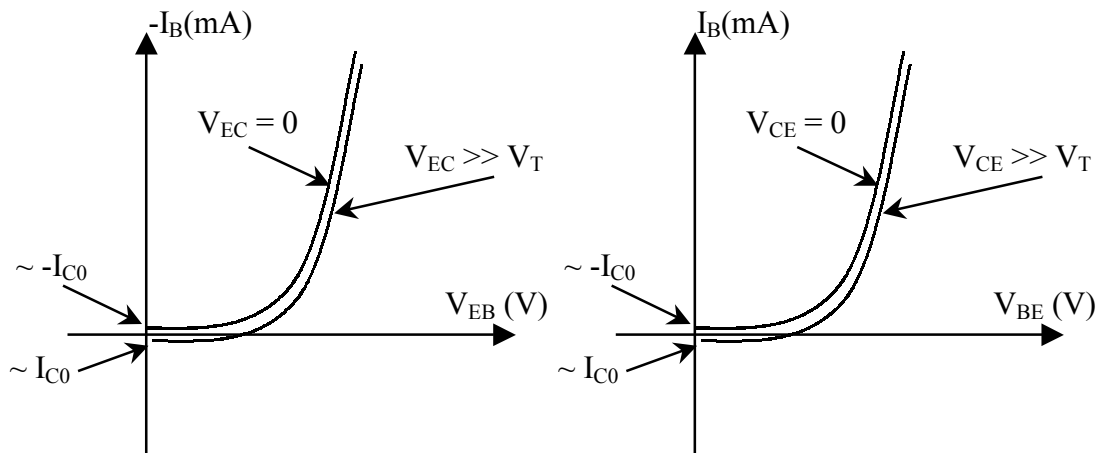
$$-I_B = (1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

Adibidez, $V_{CE} \sim 0$ denean, ($V_{CB} = V_{EB} \gg 0$).

$$-I_B = [(1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}] \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

eta kurba diodoaren kurbaren antzekoa da.

($0 > V_{CE} > -0.7$ denean, ez dakigu zehatz-mehatz asetasunean edo aktiboan gauden. V_{BC} tentsioaren balioa kalkulatu beharko genuke).



12.7 Irudia. Sarrerako ezaugarri-kurbaren forma, pnp (ezkerrean) eta npn (eskuinean) transistoreen kasuetan.

12.2.2 IRTEERAKO I-V KURBA:

$$I_C = I_{CS} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right] - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Aktiboan bagaude, $V_{CB} < 0$, $V_{EB} > 0$.

Adibidez, $V_{CE} < -0.7$ V den kasu guztietan (aktiboan nahiko sartuta gaude, eta $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} < 0$):

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{C0}. \quad (I_C \sim \beta \cdot I_B)$$

Eta I_C ez dago V_{CB} tentsioaren menpe (lehenengo hurbilketan). Beraz, ez du V_{CE} tentsioarekiko menpekotasunik ere (V_{EB} konstantea bada)

Bestalde, $I_B = 0$ denean, aktiboan egon gaitezke, baina praktikoki transistorea ia etenik dago eta, beraz, $I_C = I_{C0}$.

Asetasunean bagaude, $0.7 > V_{CB} > 0$, $0.7 > V_{EB} > 0$ (beraz, $0 > V_{CE} > -0.7$ beteko da kasu guztietan).

Orduan, baseko profilarren malda (I_{pe} eta I_{pc}) aktiboan baino txikiagoak dira $-I_C$ txikiagoa- baina baseko korrontea areagotzen da: batetik, bi junturek eramaileak injektatzen dituztelako eta, bestetik, baseko soberakina eta birkonbinaketa areagotzen direlako. Hau da, I_B korrontearen balio jakin baterako, I_C txikiagoa dugu.

Adibidez, $V_{CE} \sim 0$ denean, ($V_{EB} > 0$, $V_{CB} = V_{EB}$):

$$I_C = I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) = (I_{CS} - \alpha_F \cdot I_{ES}) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

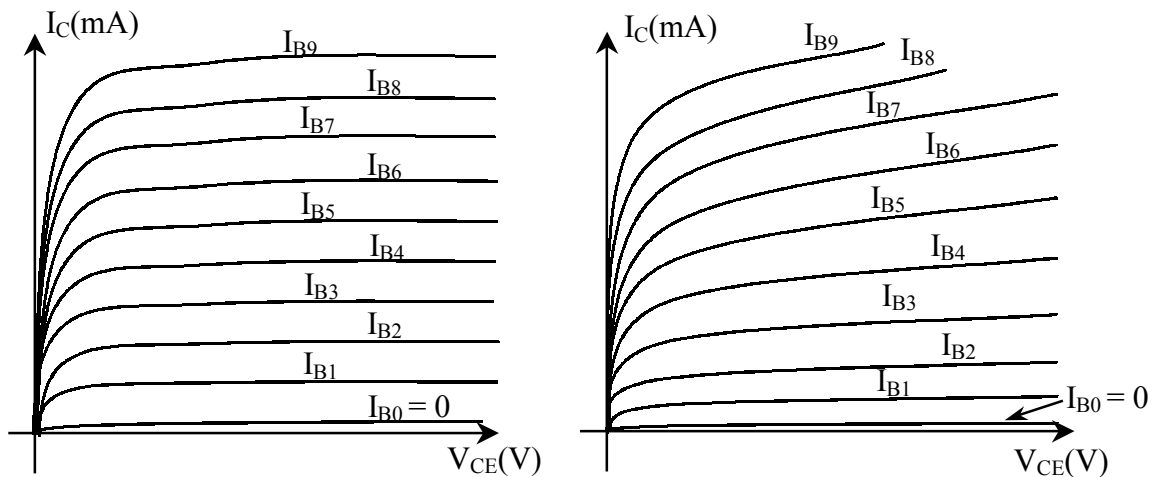
$$I_C = I_{CS} \cdot (1 - \alpha_R) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$-I_B = ((1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$-I_B = ((1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$V_{CE} \sim 0$ denean, transistorea asetasunean dago ($V_{CB} = V_{EB} > 0$), bi junturak zuzenean daude eta I_C nahiko txikia izan daiteke junturak elkarren kontra ari direlako. Baseko profila laua da, malda = 0 eta, beraz, $I_{pe} = I_{pc} = 0$; $I_C \sim 0$.

Izan ere, muturreko kasu honetan, I_C negatiboa da.



12.8 Irudia. Irteerako ezaugarri-kurba ideal eta errealak

Gogoratu aktiboaren eta asetasunaren arteko muga $V_{BC} = 0$ berdintasunak (hau da, $V_{CE} = V_{BE}$ betetzen duen tentsioak) zehazten duela.

12.3 BJT idealarekiko desbideratzeak

BJT idealetik errealerera pasatzerakoan, zenbait ezberdintasun ikusten ditugu. Horietako garrantzitsuenak bi dira:

- Early efektua.
- β parametroaren kolektoreko korrontearikiko menpekotasuna.

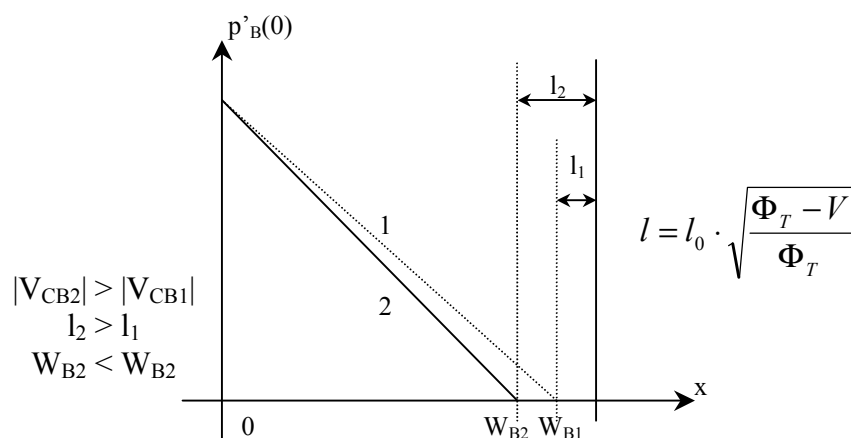
12.3.1 EARLY EFEKTUA

Orain arte erabilitako Ebers-Mollen ereduan, baseko zabalera (W_B) konstantetzat hartu dugu, baina igorleko eta kolektoreko junturretan aplikatutako tentsioek espazioko karga-gunea aldarazten dute. Hau da, V_{EB} eta V_{CB} tentsioek baseko eskualde neutroaren zabalera modulatzten dute.

Zabaleraren aldaketaren ondorioz, zenbait parametro $-\beta$, besteak beste- aldatzen dira. Aktiboari dagokionez, I_C kolektoreko korrontearen V_{CE} tentsioarekiko menpekotasuna da ondorio nagusia.

PN juntura gogoratuz, hustutako gunea zabaltzen da, kolektoreko alderantzizko tentsioa haztean (zuzeneko polarizazioak ere modulatzten du, baina alderantzizkoan efektua nabarmenagoa da). Kolektoreko alderantzizko tentsioa hazten bada, W_B pixka bat murrizten da (adibidez 0.05 mikroi). Baina, oinarria laburra denez, aldaketa txiki hori nabaritzen da. 12.9 Irudian, tentsioa aldatzeak dakarren profilaren aldaketa irudikatu da (basea laburra denez, bertako profila zuzen batez marraztu da).

Basea laburtuz, **transistore-efektua errazten da**: urrien gutxiago birkonbinatzen direnez, errazago heltzen dira kolektoreko junturaraino. Hori 12.9 Irudian ikus daiteke bai kolektoreko korronteari begiratzuz, bai azalerari begiratzuz:



12.9 Irudia. Early efektua eta baseko profila: bigarren kasuan, kolektoreko junturako (alderantzizko) tentsioa handiagoa da

Kolektoreko junturaren inguruan profilaren malda handiagoa da orain: I_C hazten da ($I_{pe} = K \cdot malda \uparrow, |I_C| \uparrow$).

Bestalde, birkonbinaketari dagokionez, profilaren azpiko *azalera* gutxitzen denez, basean metatzen diren urrienen karga gutxitzen da eta, beraz, I_{FB} murrizten da:

$$I_{rB} = q \cdot A \cdot \int_0^{w_B} \frac{urrien'(x)}{\tau_B} dx = \frac{Q_{base}}{\tau_B}$$

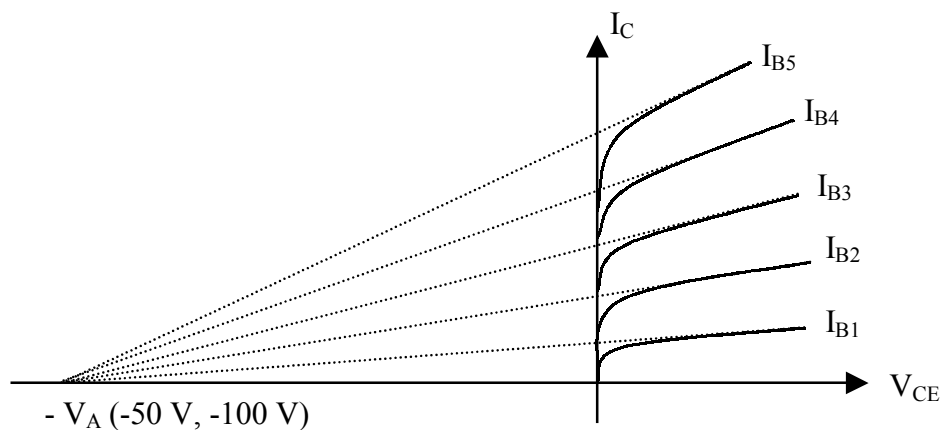
I_B korrontea txikiagotzen da.

Eta, beraz, α_T handitzen da (gauza bera gertatzen da α eta β parametroekin).

Early efektuaren ondorioz, kurbetan, V_{CB} (eta, beraz, V_{CE}) tentsioarekiko menpekotasunak agertzen dira: I_C korrontea ez da V_{CE} tentsioa igotzean asetzen (malda txiki bat izango du) eta I_B korrontek kurba bat baino gehiago ditu V_{CE} parametroa aldatzean.

Gainera, α eta β parametroen artean dagoen erlazioa dela-eta, α -ren aldaketa txikiek β parametroan eragin handia dute (α -ren %5eko aldaketak, %30koa eragiten du β -n).

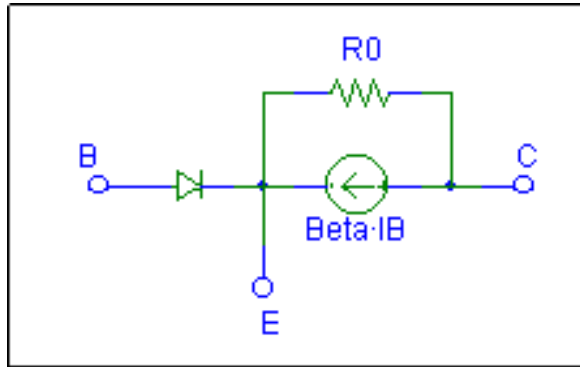
12.10 Irudian, npn baten I_C - V_{CE} ezaugarriak agertzen dira. Bertan ikusten denez, gune aktiboko kurben tarte zuzenen luzapenek puntu berean ebakitzen dute V_{CE} ardatza: $-V_A$ balioan, hain zuzen ere. Tentsio horrek **Early tentsioa** du izena eta, normalean, 50-100 volt inguruan egoten da.



12.10 Irudia. Npn transistoreen $I_C(V_{CE})$ ezaugarria eta Early tentsioa

Efektua, gehitu beharreko korronte txiki bat izaten denez, erresistentzia baten bidez adierazten da zirkuitu baliokideetan (menpeko korronte-sorgailuarekin paraleloan jarritz). Early tentsioa jakinez gero, jakineko polarizazio batean (I_C , V_{CE} batean) dagoen malda kalkula daiteke: $dV_{CE}/dI_C = R_0(\Omega)$.

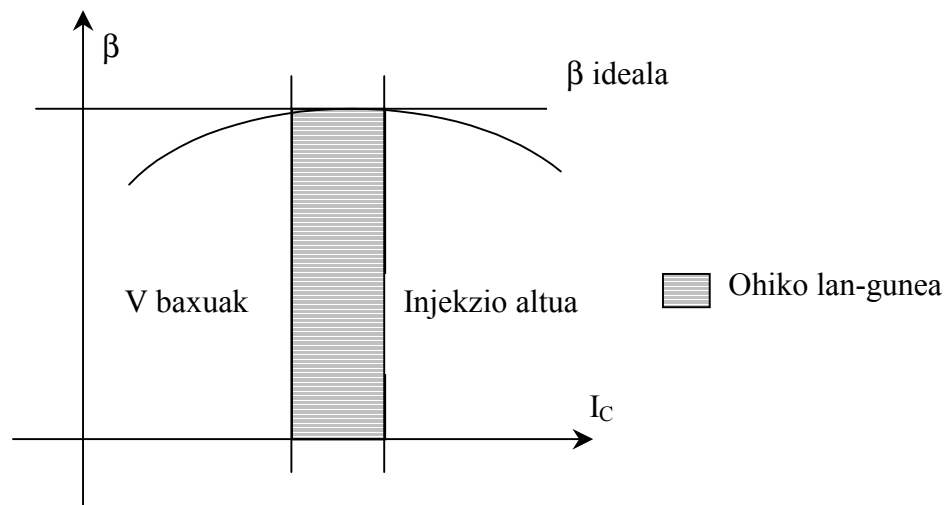
R_0 erresistentzia, kanpoko erresistentziak baino askoz handiagoa izaten denez, zirkuitutik kentzen da maiz.



12.11 Irudia. Early efektuaren erresistentzia zirkuitu baliokidean (aktiboan)

12.3.2 KOLEKTOREKO KORRONTEAREKIKO β PARAMETROAREN MENPEKOTASUNA

12.12. Irudian, β parametroak I_C korrontearekiko duen menpekotasuna islatu da.



12.12 Irudia. β parametroaren aldaketa I_C korrontea aldatzean

Tentsio baxuetan, I_B esandakoa baino handiagoa da, gune dipolarretako korronteak (hemen baztertu ditugunak) aintzat hartu behar baitira. I_C korrontearen analisisa bakarrik barreiapeneko osagaietatik eratortzen denez, β eraginkorra (I_C/I_B) txikiagoa da.

Tentsio altuetan, basea injekzio altuan sartu eta Augerren birkonbinaketa nabari daiteke. Ondorioz, I_{TB} eta I_B igotzen dira (eta, ondorioz, β txikiagotu). Gainera, korronte

altuetan kolektorean nahiko eskualde erresistiboa denez, tentsio ohmiko bat agertu, eta $I_C(V_{CE})$ kurba makur daiteke.

Bi kasuetan, I_C/I_B korrante-irabazia murrizten da: β jaisten da. Hori dela-eta, I_C-V_{CE} grafikoetan, kurben arteko aldea ez da konstantea: $I_C = \beta (I_B)$. Guk, zirkuitu integratuek bezala, grafikoaren erdiko tartean lan egingo dugu, non β konstante mantentzen baita.

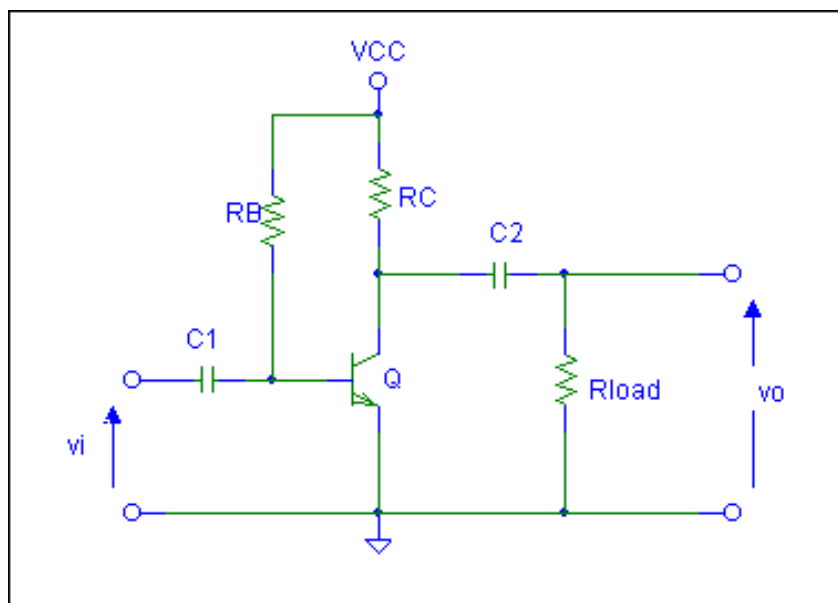
12.4 Transistore bipolarren lan-puntua finkatzea: karga-zuzen estatikoa

Lan-puntua (Q), funtzionamendu-puntua edo atsedeen-puntua (*atseden-puntua*, sarrerako seinale alternorik ez dagoela adierazten duelako), polarizazioak eragiten dituen korrante eta tentsio jarraituen multzoa da. Normalean, I_C eta V_{CE} jakitea nahikoa izaten da lan-puntua ezagutzat jotzeko.

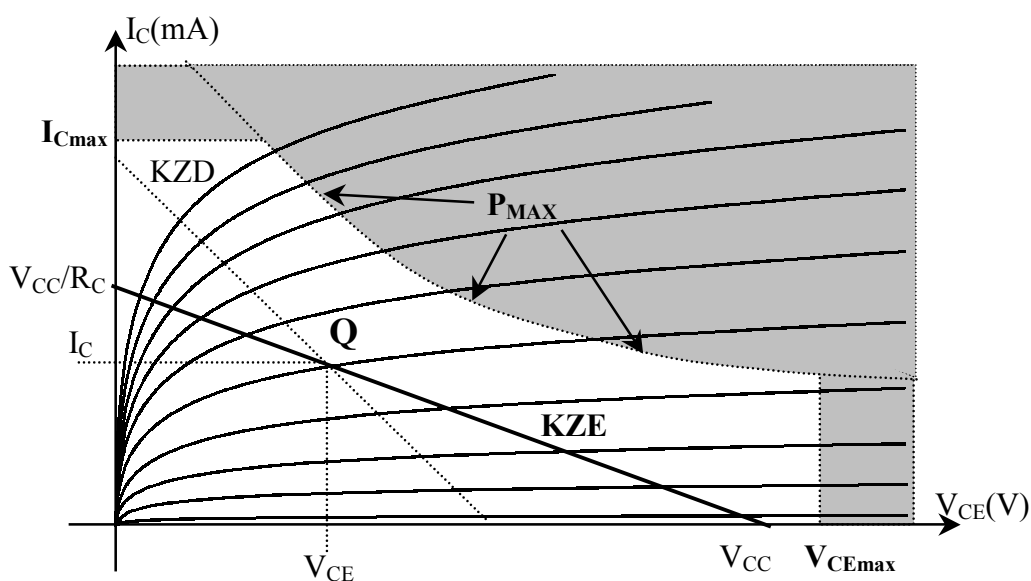
Haren garrantziaren adierazle diren hiru puntu aipatzeagatik:

- Transistorearen bidez, seinale alferno bat anplifika dezakegu; hau da, irteeran, sarrerako seinalearen forma bera, baina anplitude handiagoa dituen seinalea lor daiteke. **Hurrengo ikasgaietan ikusiko dugunez, Q egokia aukeratuz gero, anplifikazioaren irabazia doi edo alda dezakegu.**
- Bestalde, irteerako seinaleak ezin du nahi adinako balioa hartu, horrek transistorea modu aktibotik atera dezakeelako (asetasunera edo etendurara eramanez), edo, modu aktiboan jarraituz, linealtasuna gal dezakeelako. Horren ondorioz, **distortsioa** agertu ohi da: irteerako seinalearen forma ez zaio sarrerakoaren formari zehazki egokitzen. Irteerako seinaleak distortsiorik gabe har ditzakeen balio minimo eta maximoaren arteko aldeari (anplituderik handienari) **tarte dinamikoa** deitzen diogu.
Bada, Q ondo aukeratuz gero, tarte dinamikoa zabaltzen dugu.
- Gainera, transistoreak kanpora dezakeen gehieneko potentzia (P_{max}) eta jaso dezakeen gehieneko korranteak (I_{Cmax}) eta tentsioak (V_{BEmax} , V_{CEmax}) finituak dira.

12.13 Irudiko igorle komuneko zirkuituaren irteerako ezaugarria 12.14 Irudian islatu da, Q posible batzuk adieraziz. Elikadura (V_{CC}) eta erresistentziak egokiro aukeratu beharko ditugu, bipolarren nahi dugun Q puntuan lan egin dezan.



12.13 Irudia. Transistorea polarizatzeko zirkuitua



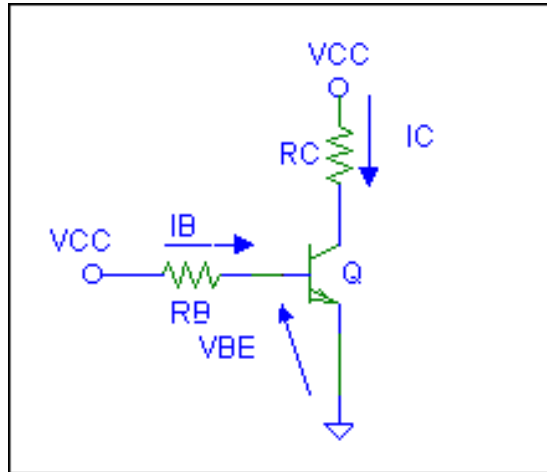
12.14 Irudia. Transistorearen polarizazio-puntua eta saihestu beharreko eskualdeak

Aurreko zirkuituko kondentsadoreen funtzioa osagai jarraituak eta alfernoak banatzea da. Hala, sarrerako eta irteerako seinaleek osagai alfernoa bakarrik izango dute, eta beste etapetako osagai jarraituek ez dute polarizazioan inolako eraginik izango. Horretarako, gure zirkuituetan ditugun kondentsadoreen kapazitatea nahiko altua izaten da, eta, korrante jarraituan zirkuitu irekiak badira ere, zirkuitulaburtzat joko ditugu korrante alfernoan (sarrerako seinalearen maiztasunean). Hau da: v_i tentsioak osagai jarraiturik baleuka ere, horrek ez luke polarizazioan inolako eraginik izango; eta kasu horretan lortzen den v_o irteerak ez dauka osagairik jarraiturik. Ondorioz, polarizazio-

puntua analizatzeko, osagai alternoko sorgailuak zirkuitulaburtzen ditugu eta kondentsadoreak zirkuitu irekiez trukutzen ditugu. Hori dela-eta, C_1 eta C_2 *paseko edo bypasseko kondentsadoreak* dira. Osagai jarraituak blokeatzen dituzte eta seinaleko (alternoko) tentsioei pasatzen uzten diete.

POLARIZAZIOAREN EBAZPENA: KARGA-ZUZEN ESTATIKOA

Kondentsadoreak zirkuitu irekiez (eta alternoko tentsio sorgailuak zirkuitu laburrez) aldatuz gero:



12.15 Irudia. Polarizazio-zirkuitua

Zirkuituko osagai guztiak jakinda, analitikoki ebatz ditzakegu korrronteak eta tentsioak.

Transistorea, normalean, modu aktiboan egongo da (hala dagoela onartuz ebatzi ondoren, aktiboaren hipotesia egiaztatu beharko dugu).

Adibidez: $R_B = 10k$; $R_C = 50\Omega$, $V_{CC} = 10\text{ V}$; $\beta = 100$;

$$V_{BE} + I_B \cdot R_B = V_{CC}$$

$$0,7V + I_B \cdot 10k = 10V \Rightarrow I_B = (10 - 0.7)Volt / 10k = 0.93mA$$

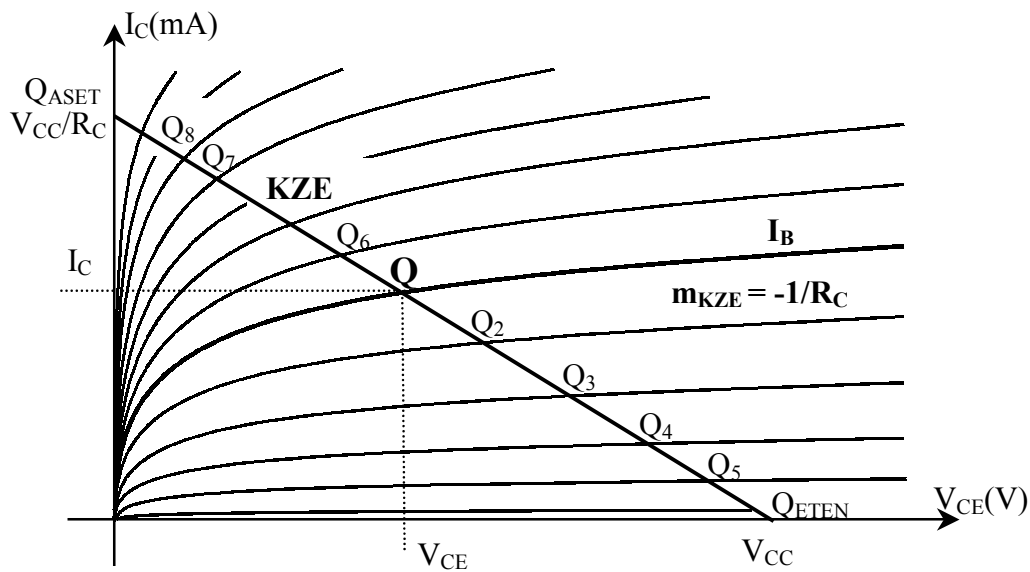
$$I_C = \beta \cdot I_B = 93mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C \Rightarrow V_{CE} = 10V - 93mA \cdot 50\Omega = 10V - 4.65V = 5.35V$$

Baina, diseinatzerakoan balio posible guztiak kontuan hartzeko, errazagoa da grafikoki lan egitea. Horretarako, R_B jakin ezean ere:

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C \cdot R_C \rightarrow I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$$

Eta V_{CC} eta R_C finkatuz gero, $I_C = I_C(V_{CE})$. Funtzio hori ($I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$) zuzen bat da eta ezaugarri-kurban gainezar dezakegu:



12.16 Irudia. Ebazpen grafikoa: kargaren zuzena (estatikoan)

Kurba horren eta ezaugarriaren arteko gurutzean dago Q. Ezaugarri posible asko daudenez, modu errazean aukera dezakegu guk nahi dugun Q puntua.

Q posibleen zuzena, **kargaren zuzena** edo karga-zuzena deitzen diogu.

R_C aukeratuz gero, zuzenaren malda finkatzen dugu ($-1/R_C$). V_{CC} finkatzean, ordea, x ardatza ebakitzen duen puntua. Bien zatidurak gehienezko I_C korrontea adierazten digu.

Grafikoki Q finkatu ondoren, I_C , V_{CE} eta I_B ateratzen ditugu. Nahi dugun I_B korrontea jakinda, R_B ebazten da.

Askoz errazagoa izaten da, beraz, grafikoki diseinatzea analitikoki diseinatzea baino (tentsio-irabazi jakin bat lortu nahi badugu, ordea, seinale txikiko zirkuitutik hasi behar dugu).

12.5 Polarizazioaren egonkortasuna

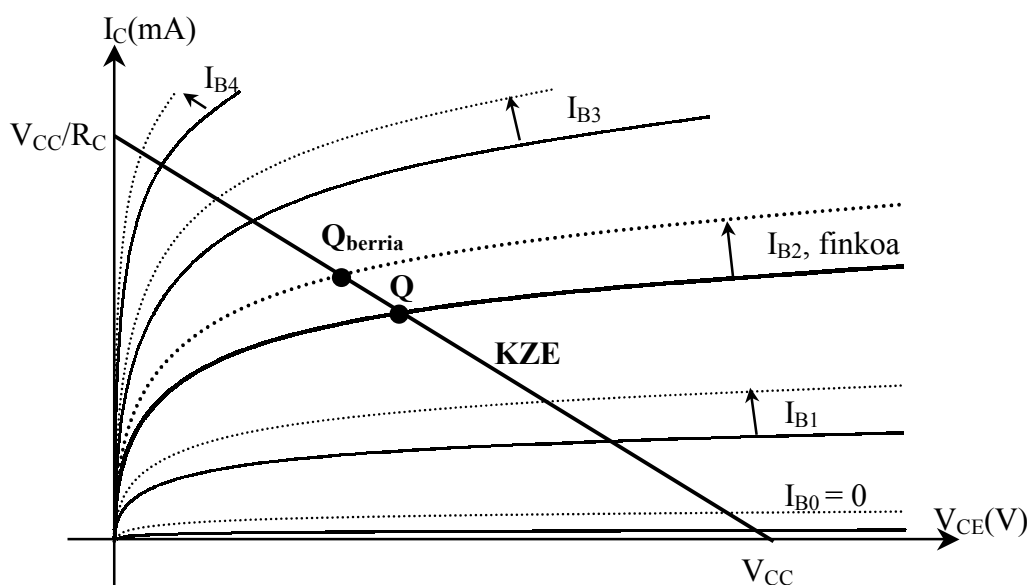
12.5.1 Q PUNTUAREN ALDAKETAK

Transistoreen fabrikazioan parte hartzen duten prozesu guztien kontrol zehatza posible ez denez, I_{C0} eta β ez dira berdinak ez eta multzo bereko transistoreetan ere. Hau da: $\beta, I_{C0} = \beta, I_{C0}(\text{alea})$. Era berean, transistoreen β tenperaturarekin aldatzen da: $\beta = \beta(T)$.

Hori dela-eta, (behin Q lan-puntua aukeratuz gero) Q puntua β edo I_{C0} parametroekiko ahalik eta independenteena izatea komeniko litzaiguke, diseinatutako

zirkuituak transistore askorekin eta baldintza askotan egokiro lan egin dezan. Puntu horretan, aldaketan aurrean (aldaketak saihesteko / eragozteko) zirkuitu batzuek aurkezten duten sentikortasuna analizatuko da.

12.13 Irudiko zirkuituan, adibidez, erresistentzien balioak jakinez gero (eta balio horiek, normalean, ez dira temperaturarekin edo osagai batetik bestera aldatzen), I_B kalkulatu dugu. Jarraian, transistorearen β jakinez gero, $I_C \sim \beta \cdot I_B$. Baina fabrikazio multzo bereko transistoreetan edota temperaturarekin aldatzen da β hori (fabrikatzaileen datu-orrietan, gehienezko, gutxienezko eta batez besteko β -k agertu ohi dira). Ondorioz, lan-puntua nabarmenki alda daiteke (ikus 12.13 Irudia).



12.17 Irudia. β igotzean (I_B mantenduz) Q nola aldatzen den

Efektu berdintsuak agertzen dira I_{C0} eta V_{BE} (V_T) temperatura dela-eta aldatzen direnean: temperatura $1\text{ }^\circ\text{C}$ igotzean, I_{C0} bikoizten da eta V_{BE} 2.5 mV jaisten da.

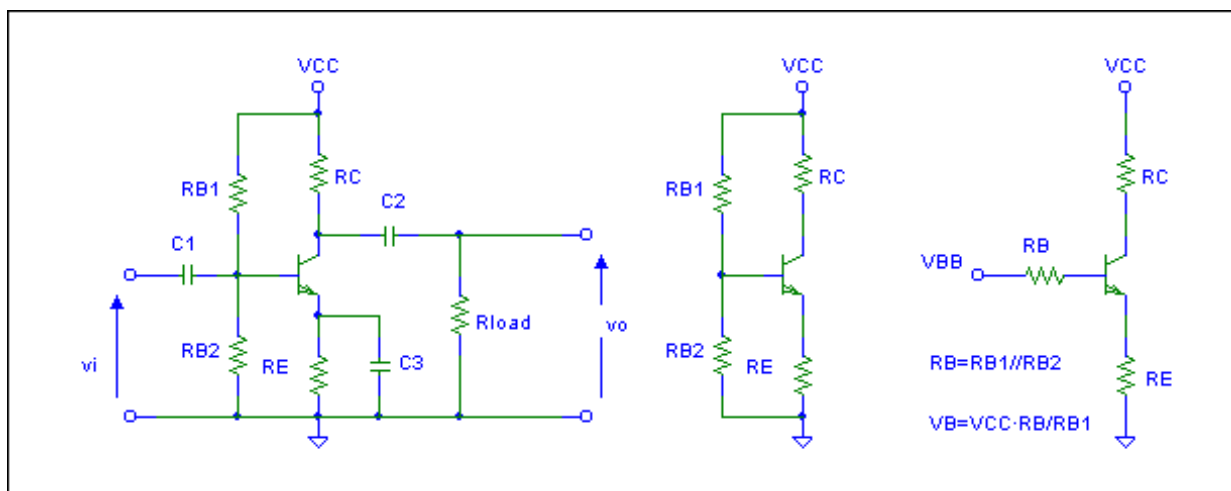
Q puntuaren aldaketa horiek onartezinak gerta daitezke batzuetan, BJTa asetasunean edo etenduran ere sar baitezakete. Normalean, Q (hau da, I_C eta V_{CE}) mantentzea oso komenigarria da, I_B aldatu behar bada ere.

Horregatik, lan-puntuaren egonkortasuna areagotzen (edo ziurtatzen) duten beste hainbat zirkuitu proposatzen dira.

Guk, β -ren aldaketetan jarriko dugu arreta. eta temperaturarekin gertatzen diren Q puntuaren aldaketak ez ditugu sakonean analizatuko.

12.5.2 AUTOPOLARIZAZIO ZIRKUITUA EDO IGORLEAREN BIDEZKO
POLARIZAZIOA: BERRELKADURA NEGATIBOA

β -ren aldaketekin Q egonkorra lortzeko, 12.14 Irudiko zirkuitua erabil dezakegu (autopolarizazio-zirkuitua).



12.18 Irudia. Autopolarizazio-zirkuitua: igorle komuneko egitura

Zirkuitu hori aurrekoarekin alderatuz (ikus 12.13 Irudia) ikusten dugun alderik nabarmenena R_E da. C_3 kondentsadorea nahiko handia izaten da, seinale jarraituan zirkuitu ireki eta altxatzen den zirkuitulabur bihurtzen da. Hala, R_E polarizazioa analizatzerakoan baino ez da agertzen. Hori dela-eta, igorleko kondentsadorea ezabaketakoa edo desakoplamendukoa dela esaten dugu.

Lan-puntua egonkortzea da R_E erresistentziaren helburua. Hori lortzeko prozedura honako hau da:

- Demagun I_C igotzen dela, adibidez β igotzen delako (edo, temperatura igo dela-eta, I_{C0} hazi eta V_{BE} tentsioaren murriztu direlako).
- Ondorioz, R_E erresistentzian erortzen den tentsioa hazten da.
- Horren ondorioz, I_B jaisten da, zeren eta $I_B = (V_{THB} - V_{BE} - V_{RE}) / R_{THB}$
- Eta horrek I_C txikiagoa dakar.

Gauza bera gertatzen da I_C jaisten denean: I_C jaisten bada (β edo temperatura jaisten direlako), R_E erresistentzian erortzen den tentsioa gutxitzen da. Horren ondorioz, I_B hazten da eta I_C handitzen du horrek.

Beraz, efektu batek (I_C korrontearen igoerak edo jaitsierak) kontrako erreakzioa ekarri du (murrizketa edo hazkundea). *Berrelkadura negatiboa* deitzen zaio ziklo horri.

Zirkuitu horretan, beraz, I_B ez da konstantea, eta nekezago kalkulatu da. I_B ez da lehen bezain egonkorra, baina I_C egonkorragoa da eta korrante horrek du garrantzirik handiena Q puntuari dagokionez.

Jarraian, β -rekiko menpekotasunaren murrizketa hori analitikoki ikusiko dugu.

12.5.3 I_C -REN β -REKIKO EGONKORTASUNA: SENTIKORTASUNA

$$V_{BB} - V_{BE} = I_B \cdot R_B + (I_B + I_C) \cdot R_E$$

$$\text{Baina } I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{C0} \Rightarrow I_B = \frac{I_C - (1 + \beta) \cdot I_{C0}}{\beta}$$

$$\text{Beraz } V_{BB} - V_{BE} = \frac{I_C - (1 + \beta) \cdot I_{C0}}{\beta} \cdot (R_B + R_E) + I_C \cdot R_E$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE} + \frac{(1 + \beta) \cdot I_{C0} (R_B + R_E)}{\beta}}{\frac{R_B + R_E}{\beta} + R_E}$$

$$I_C = \frac{\beta}{R_B + R_E (\beta + 1)} \left[V_{BB} - V_{BE} + \frac{(1 + \beta) \cdot I_{C0} (R_B + R_E)}{\beta} \right]$$

β parametroaren ohiko balioekin, $(\beta + 1)/\beta \sim 1$, eta, beraz, β aldatzen denean mako artekoak ia konstante jarraitzen du (gutxi gorabehera).

$$I_C = \frac{\beta}{R_B + R_E (\beta + 1)} \left[V_{BB} - V_{BE} + \frac{(1 + \beta) \cdot I_{C0} (R_B + R_E)}{\beta} \right] = \frac{K \cdot \beta}{R_B + R_E (\beta + 1)}$$

Ikusten denez, $\beta \cdot R_E \gg R_B$ denean, I_C ez dago β -ren menpe.

Baina, egonkortasuna kuantifikatzeko, β -ren igoera eta I_C korrantean agertzen zaigun hazkundera erlazionatu behar ditugu (eta hazkundera erlatibizatu):

$$\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} = \frac{\frac{K \cdot \beta_2}{R_B + R_E (\beta_2 + 1)} - \frac{K \cdot \beta_1}{R_B + R_E (\beta_1 + 1)}}{\frac{K \cdot \beta_1}{R_B + R_E (\beta_1 + 1)}}$$

$$\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} = \frac{\beta_2 [R_B + R_E (\beta_1 + 1)] - \beta_1 [R_B + R_E (\beta_2 + 1)]}{\beta_1 [R_B + R_E (\beta_2 + 1)]}$$

$$\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} = \frac{R_B + R_E}{\beta_1 [R_B + R_E (\beta_2 + 1)]} (\beta_2 - \beta_1)$$

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{R_B + R_E}{[R_B + R_E (\beta_2 + 1)]} \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta_1}$$

$$\text{Sentikorta suna } I_C^{\beta} \equiv \frac{\frac{\Delta I_C}{I_C}}{\frac{\Delta \beta}{\beta_1}} = \frac{R_B + R_E}{[R_B + R_E (\beta_2 + 1)]}$$

Hau da, sentikortasunak, definizioz, aldaketa erlatiboen arteko erlazioa ematen digu. Zenbat eta sentikortasun handiagoa, orduan eta menpekotasun handiagoa, ezegonkorragoa. Parametro horretan, berriro egiazta dezakegu I_C korrontearen β -rekiko egonkorra izateko baldintza: $\beta \cdot R_E \gg R_B$.

Beraz, Q puntuaren egonkortasuna ziurtatzeko, autopolarizazio-zirkuitua erabiltzeaz gain, $R_B \ll \beta R_E$ ezberdintasuna bete behar da.

Orduan, β hazten bada, I_C ere hazten da, baina –hunekotan- β baino gutxiago.

Diseinuetan zer zirkuitu erabili behar dugun ez badigute esaten, autopolarizaziokoa erabiliko dugu Q puntuaren egonkortasuna dela-eta (eta $R_B \ll \beta R_E$ ziurtatuz).

Gainera, datorren ikasgaian ikusiko dugunez, Q puntua, ahal izanez gero, kargazuzen *dinamikoaren* erdian kokatu beharko dugu.

12.5.4 ALDAKETAK TENPERATURAREKIN: SENTIKORTASUN-FAKTOREAK

Tenperatura aldatzen denean, I_{C0} , V_{BE} eta β aldatzen dira eta, beraz, I_C polarizazio-korrontean, aldaketak agertzen dira. Tenperatura 1 °C igotzean, adibidez, I_{C0} bikoizten da eta V_{BE} 2.5 mV txikiagoa da.

12.1 Taula. Transistorearen zenbait parametroren aldaketak tenperaturaren arabera

T^a (°C)	I_{C0} (pA)	V_{BE} (V)	β
-65	0.2	0.85	20
20	100	0.65	50
100	20.000	0.48	80

I_C korronteak parametro horiekiko dituen aldaketak aurreikusteko, I_C korrontearen sentikortasunak (S) erabiltzen dira, honela definituta:

$$S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \Rightarrow \frac{\partial y}{y} = S_x^y \frac{\partial x}{x} \text{ askotan } S_x^y = \frac{\partial y}{y} (\partial x/x = 1, \text{ edo } \%1) \text{ edo } S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x}$$

$$S(I_{C0}) = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{C0}} \right|_{\text{beste parametroak konstante mantenduz}}, S(V_{BE}) = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} \right|_{\text{bpkm}} \text{ eta } S(\beta) = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} \right|_{\text{bpkm}}$$

Orduan, I_C -ren hazkundera (gutxi gorabehera) kalkulatzeko, honako formula hau erabil daiteke:

$$\Delta I_C = S(\beta) \cdot \Delta \beta + S(I_{C0}) \cdot \Delta I_{C0} + S(V_{BE}) \cdot \Delta V_{BE}$$

M, EGONKORTASUN FAKTOREA

Batzuetan, sentikortasuna honela adierazten da:

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{R_B / R_E + 1}{\beta_1 \frac{R_B / R_E + (\beta_2 + 1)}{1 + \beta}} \cdot \frac{1}{1 + \beta} \Delta \beta = \frac{R_B / R_E + 1}{\beta_1 / M} \cdot \frac{1}{1 + \beta_2} \Delta \beta$$

$$\text{non } M = \frac{1 + \beta_2}{R_B / R_E + (\beta_2 + 1)}$$

M antzeko beste analisi batzuetan agertzen da.

$$\text{Orduan, } \frac{\Delta I_C}{I_C} = M \frac{R_B / R_E + 1}{\beta_1 (1 + \beta_2)} \cdot \Delta \beta \approx (\beta_2 \gg 1) \approx (R_B / R_E + 1) \frac{M}{\beta_1 \beta_2} \cdot \Delta \beta$$

Eta I_C β parametroaren aldaketen aurrean egonkorra izateko,

$$(R_B / R_E + 1) \frac{M}{\beta_1 \beta_2} \ll 1 \text{ behar dugu.}$$

Horretarako, nahikoa da $R_B \ll R_E$ eta $M \sim 1$; hau da $R_B \ll \beta R_E$.

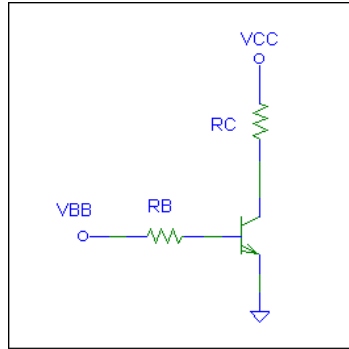
M egonkortasun-faktorea deitzen da, I_C korrontearen menpekotasunak ebazteko balio baitu, bai β -rekin, (ikusi dugun bezala) bai I_{C0} edo V_{BE} parametroekin. M nahiko konplexua gertatu bada ere, beste bi kasuetan ere agertuko litzatekeelako aipatu dugu hemen.

$I_C = I_C(\beta, V_{BE}, I_{C0})$, beste zirkuitu batzuetan, ezberdina da, baina, $-M \sim 1$ bada-
 $R_B \ll \beta R_E$ betearaziz, egonkortasuna ziurtatzen dugu.

ZIRKUITU JAKIN BATZUEN SENTIKORTASUN-PARAMETROAK

$$S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \Rightarrow \frac{\partial y}{y} = S_x^y \frac{\partial x}{x} \text{ askotan } S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x}$$

Polarizazio finkoa



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

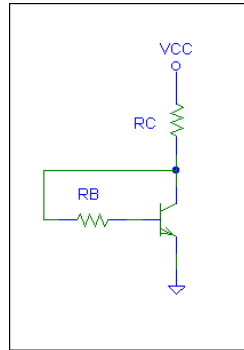
$$I_C \approx \beta \cdot \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$S(I_{C0}) = (\beta + 1)$$

$$S(V_{BE}) = -\frac{\beta}{R_B}$$

$$S(\beta) = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

Polarizazioko berrelikadurarekin



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C}$$

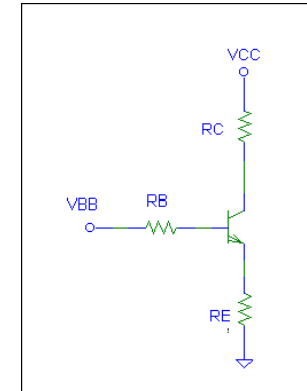
$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C} \approx \left\langle \beta \gg \frac{R_B}{R_C} \right\rangle \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C}$$

$$S(I_{C0}) = (\beta + 1) \cdot \frac{1 + R_B/R_C}{\beta + 1 + R_B/R_C}$$

$$S(V_{BE}) = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C}$$

$$S(\beta) = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \cdot \frac{1 + R_B/R_C}{1 + \beta_2 + R_B/R_C}$$

Igorleko polarizazioarekin



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E} \approx \left\langle \beta \gg \frac{R_B}{R_E} \right\rangle \approx \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

$$S(I_{C0}) = (\beta + 1) \cdot \frac{1 + R_B/R_E}{\beta + 1 + R_B/R_E}$$

$$S(V_{BE}) = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

$$S(\beta) = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \cdot \frac{1 + R_B/R_E}{1 + \beta_2 + R_B/R_E}$$

13. TRANSISTORE BIPOLARRA ERREGIMEN DINAMIKOAN

Aurreko bi ikasgaietan, BJTa egoera geldikorrean zegoen. Hau da, tentsioak eta korronteak denbora luzez aplikatzen genituen. Halere, aplikazio gehienetan, denborak aurrera egin ahala aldatzen diren seinaleak izaten ditugu.

Erregimen dinamikoaren garrantzia begi-bistakoa da, eta, batez ere, honako kasu hauek izango dira interesgarriak:

- BJTan korrontea agertze eta desagertzearen erregimen iragankorrak, BJTak kommutadore edo etengailu gisa lan egiten duenean dituen ezaugarriak markatzen dituelako. Hau da, potentziako elektronika eta elektronika digitalean agertuko diren kommutazio-abiadura eta korronteak finkatzen ditu.
- BJTak seinale txikiak amplifikatzen dituzenean agertzen diren erlazio linealak. Guk, aplikazio hauetan jarriko dugu arreta.

BJTaren prozesu dinamikoak orokorrean ikertzea posible izan arren, horrek ez luke praktikotasunik izango. Horregatik, nahiko orokorra eta aplikagarria den eredu sinple bat ikusiko dugu: kargaren bidezko kontrol-eredua. Hortik abiatuta, eredu are sinpleago eta bereziagoa ebatziko dugu BJTak amplifikadore gisa lan egiten duenerako.

13.1 Kargaren bidezko kontrol-eredua

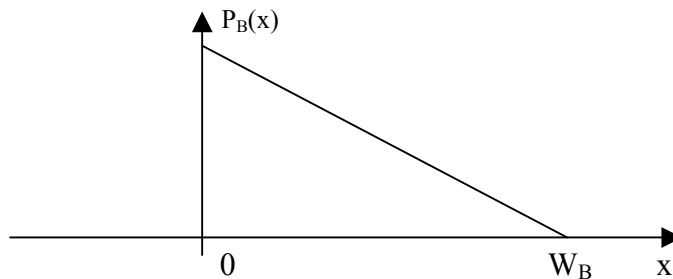
Demagun pnp transistore bat dugula, eta horrek gune aktiboan lan egiten duela. Zergatik gune aktiboan?

- BJTa seinale txikiko amplifikadore modura erabiltzean gune aktiboan erabili ohi delako; irabazirik handiena eta distortsiorik txikiena eskaintzen dituelako.
- Kommutadore gisa erabiltzen dugunean (ON) asetasunetik (OFF) etenaldira (edo alderantziz) pasatzean gune aktiboa zeharkatzen delako beti.

13.1.1 KARGAREN BIDEZKO KONTROL EREDUA EGOERA GELDIKORREAN

Demagun erregimen geldikorrean gaudela. Aurreko ikasgaietan ikusi dugunez, I_E eta I_C korronteen osagai nagusia igorletik kolektorera igorritako eta bertara heldutako hutsunek (baseko urrienek) osatzen dute.

Baseko urrienen profila funtzionamenduaren ardatz gisa hartuko dugu ($I_{C0} \sim 0$ eta $\alpha_T \sim 1$ onartuz).



13.1 Irudia. Baseko urrienen profila gune aktiboan (pnp transistorean)

Dakigunez,

$$p_B(x) = p_B(0) \cdot \left(1 - \frac{x}{W_B}\right) = p_{B0} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) \cdot \left(1 - \frac{x}{W_B}\right)$$

$$I_C = -|I_C| \approx -I_{pC} = -qAD_p \cdot \left(-\frac{dp'_B(x)}{dx}\right)_{x=W_B} = qAD_p \cdot \left(-\frac{p_B(0)}{W_B}\right)$$

$$I_C = -qAD_p \frac{p_B(0)}{W_B}$$

Bestalde, baseko urrienen soberakinaren karga, Q_B :

$$Q_B = qA \cdot \int_0^{W_B} p'_B(x) \cdot dx \approx qA \cdot \int_0^{W_B} p_B(x) \cdot dx$$

$$Q_B = qA \cdot \int_0^{W_B} p_B(0) \cdot \left(1 - \frac{x}{W_B}\right) \cdot dx$$

$$Q_B = qA \cdot p_B(0) \cdot \left[x - \frac{x^2}{2W_B} \right]_0^{W_B}$$

$$Q_B = qA \cdot p_B(0) \cdot \left[W_B - \frac{W_B^2}{2W_B} \right] = qA \cdot p_B(0) \cdot \frac{W_B}{2}$$

Beraz,

$$\frac{I_C}{Q_B} = \frac{-\frac{D_{pB}}{W_B}}{\frac{W_B}{2}} \cdot \frac{qA p_B(0)}{qA p_B(0)} \Rightarrow I_C = -Q_B \cdot \frac{2D_{pB}}{W_B^2}$$

$$I_C = -\frac{Q_B}{\tau_T} \quad \text{non } \tau_T = \frac{W_B^2}{2D_{pB}}$$

τ_T igarotze-denbora (transition time) da: urrienek basea barreiapenez zeharkatzeko behar duten batez besteko denbora.

Bestalde, baseak elektrikoki neutroa izan behar du. Hau da, eskualde hori nahiko ugarienez hornitu behar da, Q_B urrienen karga hori neutralizatzeko. Nork hornitzen du basea elektroiez? Igorleko edo kolektoreko junturatik pasatzea ezinezkoa denez (eremu elektrikoa aurkan topatzen dute), baseko terminaletik sartzen dira:

$$I_B = -k \cdot Q_B = -\frac{Q_B}{\tau_B}$$

τ_B baseko batez besteko sasi-erdibizitza gisa azal daiteke ($\tau_B \neq \tau_{pB}$). Nahiz eta baseko ohiko birkonbinaketaren antza izan, kontzeptualki zeharo ezberdinak dira, bi elektroiei mota daudelako: (1) baseko birkonbinaketa elikatze behar direnak eta (2) —eta hau izaten da handiena— igorlean injektatzen diren elektroiak.

Laburbilduz,

$$\left. \begin{aligned} I_C &= -\frac{Q_B}{\tau_T} \\ I_B &= -\frac{Q_B}{\tau_B} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} I_C &= \beta \text{ denez, } \tau_B = \beta \cdot \tau_T = \beta \cdot \frac{W_B^2}{2D_{pB}} \end{aligned}$$

$$I_E = -[I_C + I_B] = k_2 \cdot Q_B$$

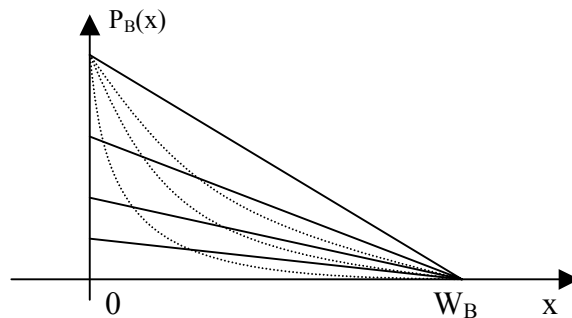
Ekuazio horiek osatzen dute kargaren bidezko kontrol-eredua egoera geldikorrean.

OHARRAK:

- Ekuazioak npn transistoreentzat ebatzi arren, npn kasuan ere balio dute (kasu horretan Q_B negatiboa denez, I_C eta I_B korrronteak positiboak izango dira).
- Ez dugu Early efektua kontuan hartu (hurbilketa bat da).
- Ekuazio horiek -gune aktiboan- Ebers-Mollen ereduaren parekoak dira.

13.1.2 KARGAREN BIDEZKO KONTROL EREDUA EGOERA DINAMIKOETAN

Diodoetan bezala, kargaren kontrol-eredua egoera estatikotik egoera dinamikora egokitzea nahiko erraza gertatzen da diodoetan bete behar zen baldintza betetzen baldin bada: aplikatutako tentsioaren bilakaerarekin konparatuz gero baseko profilaren aldaketa (egokipena) oso azkarra baldin bada. Hala bada, baseko profila linealtzat jo dezakegu une oro eta erregimen dinamikoa erregimen estatikoen segida gisa analiza dezakegu. Eta hala izaten da maiztasun baxuetan ($f < 100$ kHz denean).



13.2 Irudia. Erregimen dinamikoa erregimen estatikoen segida gisa analizatzea
(puntu irudikatzen den bilakaera ez dakigu analizatzen)

Diodoetan gertatzen zen bezala, junturetako ertzetan dagoen soberakinak ia berehala jarraitzen dio tentsioari; nahiko maiztasun altuetan ere ($f < 10$ MHz) betetzen da hori.

Aurreko hipotesia onartuta eta $q_B(t)$ basean dagoen (urrienen) kargatik abiatuz, zuzenean dagoen junturan dugun tentsioa igotzen badugu:

- a) Kolektoreko korronea lehenagoko adierazpenak ematen digu ($x = W_B$ puntuan dugun maldak ematen digu) (unean uneko karga):

$$i_C(t) = -\frac{q_B(t)}{\tau_T}$$

- b) Baseko korroneak, berriz, bi osagai ditu:

- i_{B1} , urrienen soberakinaren sasi-birikonbinaketa elikatzeko behar dena (baseko benetako birikonbinaketa elikatzeko eta igorlera injektatzeko behar diren urriena). Pnp transistorearen basera sartzen diren elektroiak dira: i_{B1} negatiboa da (q_B positiboa da).
- Eta i_{B2} , urrienen soberakinaren hazkundera orekatzen duten ugarienen kopurua gehitzeko behar dena (neutraltasuna gordetzearren). Pnp transistorean $dV > 0$ bada, elektroiak basera sartzen dira eta i_{B2} negatiboa da ($dq_B > 0$).

$$i_B(t) = i_{B1}(t) + i_{B2}(t) = -\frac{q_B(t)}{\tau_B} - \frac{\partial q_B(t)}{\partial t}$$

(beraz, bi osagaiak “-“ zeinuarekin)

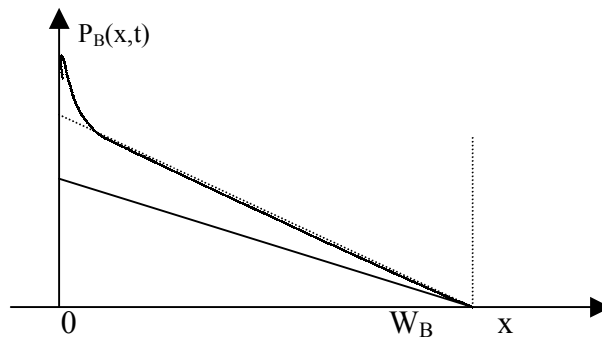
- c) Igorleko korronea Kirchoff erabiliz kalkulatu dugu:

$$i_E(t) = -[i_B(t) + i_C(t)] = \frac{q_B}{\tau_B} + \frac{q_B}{\tau_T} + \frac{\partial q_B}{\partial t}$$

Hau da, igorleko junturatik baserantz pasatzen diren eramaileek (baseko urrienek, hutsuneek pnp batean) barreiaduraz lehenengo profila mantentzeaz gain, profil hori pixka bat hazaraziko dute.

Beraz, maiztasun baxuetan eta ertainetan ($f < 100$ kHz) aplikagarria izango da ondoren egingo den garapen matematikoa (erregimen dinamikoa erregimen estatikoetan deskonposatzen duen analisia).

Aurreko hiru ekuazioek kargaren bidezko kontrol-eredua osatzen dute erregimen dinamikorako. Erregimen geldikorrean (estatikoan), $d/dt = 0$ eta, argi dagoenez, lehenago estatikoan ikusitako uredura itzultzen gara.



13.3 Irudia. *Hurbilketaren errorea. Azalerari dagokionez txikia bada ere, nahiko altua da maldei dagokienez (batez ere $x = 0$ puntuan)*

Estatikoan, $I_E \approx I_C$ betetzen zen (profil lineala hartuz, $I_{PC} = I_{PE}$ eta horiek ziren korronteen osagai nagusiak); orain, berriz, nahiko ezberdinak izan daitezke. Nola da posible profil linealaren hurbilketa ontzat hartzen badu?

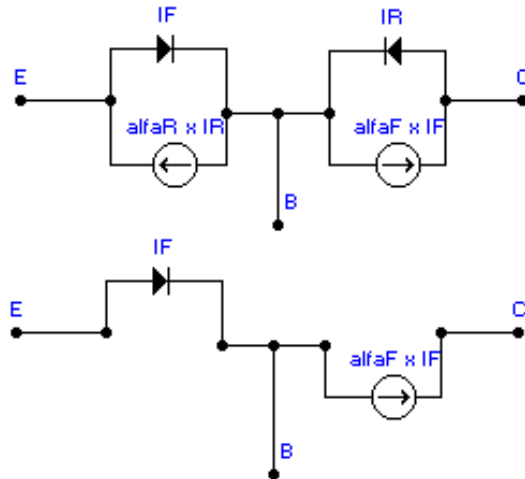
Profil lineala hartzen dugunean egiten ari garen hurbilketa nahiko ona izaten da kargaren (azaleraren) ikuspuntutik: uste izandako karga (puntu marraturiko zuzenak mugaturikoa) eta benetakoa (goiko kurbaren azpikoa) bat etortzen dira —gutxi gorabehera—. Maldetan, aldiz, nahiko errore handia gerta liteke; $x = 0$ puntuko maldak ematen digu i_C ; eta i_E , $x = W_B$ puntukoak. Kolektoreko junturako malda nahiko antzera geratzen bada ere, igorleko junturakoa nahiko ezberdina izan daiteke (bertako urrienen kontzentrazioaren integrala berdintsu mantentzen bada ere).

Horregatik, erregimen dinamikoan, igorleko eta kolektoreko korronteez ez dute hain parekoak (ia berdinak) izan behar: i_E eta i_B tentsioak eta tentsioaren aldaketaren abiadurak markatzen dute; i_C , berriz unean uneko tentsioak behartzen du (maiztasuna altuegia ez bada).

Era berean, egindako hurbilketa, $p_B(0,t)$ igorle-base junturako urrienen kontzentrazioa edo $v_{BE}(t)$ tentsioa kalkulatzekoan, errore handia ager liteke. Hori dela-eta, tentsioak ebazteko, nahiko ondo kalkulatu diren korronteez eta kanpoko zirkuituak erabiliko dira normalean.

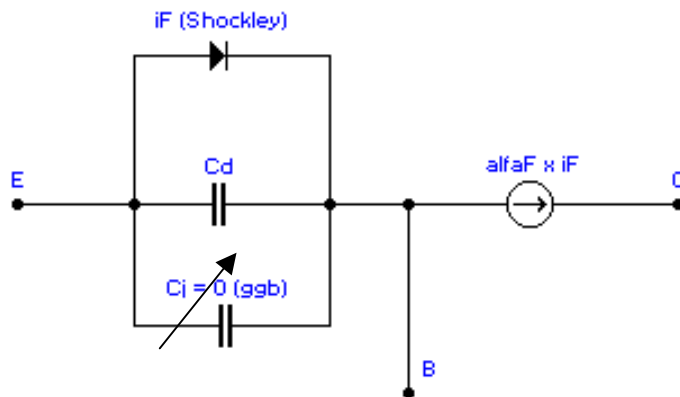
13.1.3 AURREKO EKUAZIOAK EBERS-MOLLEN ERREDUTIK LORTZEA

Ebers-Mollen baliagarritasuna mantentzen dela onartuta eta, modu aktiboan, $I_R = -I_{CS} \sim 0$ denez:



13.4 Irudia. Ebers-Mollen eredua aktiboan

eta igorleko juntura diodo gisa analizatuz:



13.5 Irudia. Diodoa bere zirkuitu baliokideaz trukatur gero dugun zirkuitua

$$i_C(t) = -\alpha_F \cdot i_F = -\alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] \approx -\alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right)$$

$$i_C(t) = -I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) = -\frac{qAD_{pB}p_{B0}}{W_B} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) = -\frac{qAD_{pB}p_B(0)}{W_B}$$

$$i_C(t) = -qA \frac{D_{pB}}{W_B} \frac{p_B(0)W_B/2}{W_B/2} = -\frac{D_{pB}}{W_B^2/2} \cdot q_B(t) = -\frac{q_B(t)}{\tau_T}$$

$$i_B(t) = -(1-\alpha_F) \cdot \frac{I_S}{\alpha_F} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - C_d \cdot \frac{dv_{EB}}{dt} = -(1-\alpha_F) \cdot \frac{\alpha_F}{\alpha_F} \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - C_d \cdot \frac{dv_{EB}}{dt}$$

$$i_B(t) = -\frac{I_{ES}}{\beta} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - C_d \cdot \frac{dv_{EB}}{dt} = \text{betikoa} + -C_d \cdot \frac{dv_{EB}}{dt}$$

$$i_B(t) = -\frac{q_B(t)}{\tau_B} - C_d \cdot \frac{dv_{EB}}{dt} \quad \text{non } -\frac{q_B(t)}{\tau_B} = -(1-\alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right)$$

Parametroen balioak

$$\tau_B = \frac{-q_B(t)}{-(1-\alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right)} = \frac{-\left(qAp_{B0} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) \cdot W_B/2\right)}{-(1-\alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right)}$$

$$\tau_B = \frac{qAp_{B0} \cdot W_B/2}{(1-\alpha_F) \cdot I_{ES}} = \frac{qAp_{B0} \cdot W_B/2}{I_{ESigorleadelaeta}} = \frac{qAp_{B0} \cdot W_B/2}{qAD_{nE} \cdot n_{E0}/L_{nE}} = \frac{N_E \cdot L_{nE} \cdot W_B}{N_B \cdot 2D_{nE}}$$

$$\tau_B = \beta \cdot \tau_T = \beta \cdot \frac{W_B^2}{2D_p}$$

$$\beta \approx \frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{N_E}{N_B} \cdot \frac{L_{nE}}{W_B}$$

$$\alpha = \frac{I_S}{I_S + I_{ES}} = \frac{D_p \cdot \frac{n_i^2}{N_B} \cdot \frac{1}{W_B}}{D_p \cdot \frac{n_i^2}{N_B} \cdot \frac{1}{W_B} + D_n \cdot \frac{n_i^2}{N_E} \cdot \frac{1}{L_{nE}}}$$

$$\alpha = \frac{\frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{N_E}{N_B} \cdot \frac{L_{nE}}{W_B}}{\frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{N_E}{N_B} \cdot \frac{L_{nE}}{W_B} + 1} = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

($\alpha_T = 1$ hartu dugulako)

13.1.4 AURREKO EKUAZIOEN EBAZPENA GARRAIOAREN IKUSPUNTUTIK

Kargaren bidezko kontrol-ereduaren formulak:

$$i_C = -\frac{q_B}{\tau_T} \quad \text{eta} \quad i_B = i_{B1} + i_{B2} = -\frac{q_B}{\tau_B} - \frac{\partial q_B}{\partial t}$$

$$\text{non } q_B(t) = -qA \cdot \frac{h \cdot W_B}{2} \approx -qA \cdot \frac{W_B}{2} \cdot n_{B0} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$i_C = \text{estatikakoa} = I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$i_B = i_{B1}(\text{estatikakoa}) + i_{B2}(\text{k arg aren_aldaketa})$$

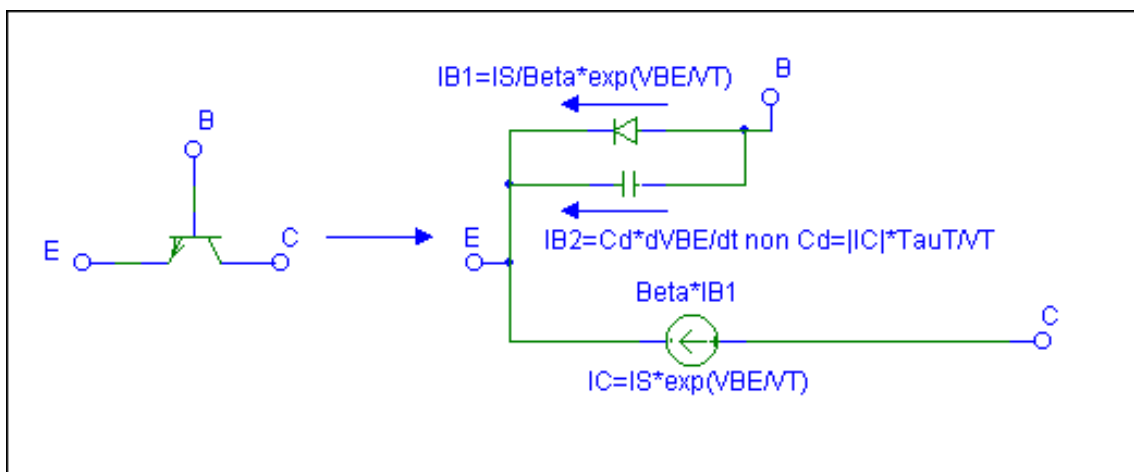
$$i_B = \frac{i_C}{\beta} - \frac{dq_B}{dv_{BE}} \frac{dv_{BE}}{dt} = \frac{I_S}{\beta} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + C_d \frac{dv_{BE}}{dt}$$

non

$$C_d = -\frac{dq_B}{dv_{BE}} = qA \cdot \frac{W_B}{2} n_{B0} \cdot \frac{d\left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)\right]}{dv_{BE}}$$

$$C_d = qA \cdot \frac{W_B}{2} n_{B0} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \cdot \frac{1}{v_T} = \frac{q_B(t)}{v_T} \Rightarrow C_d = \frac{|i_{B1}| \cdot \tau_B}{v_T} = \frac{|i_C| \cdot \tau_T}{v_T}$$

Zirkuitu baliokidea



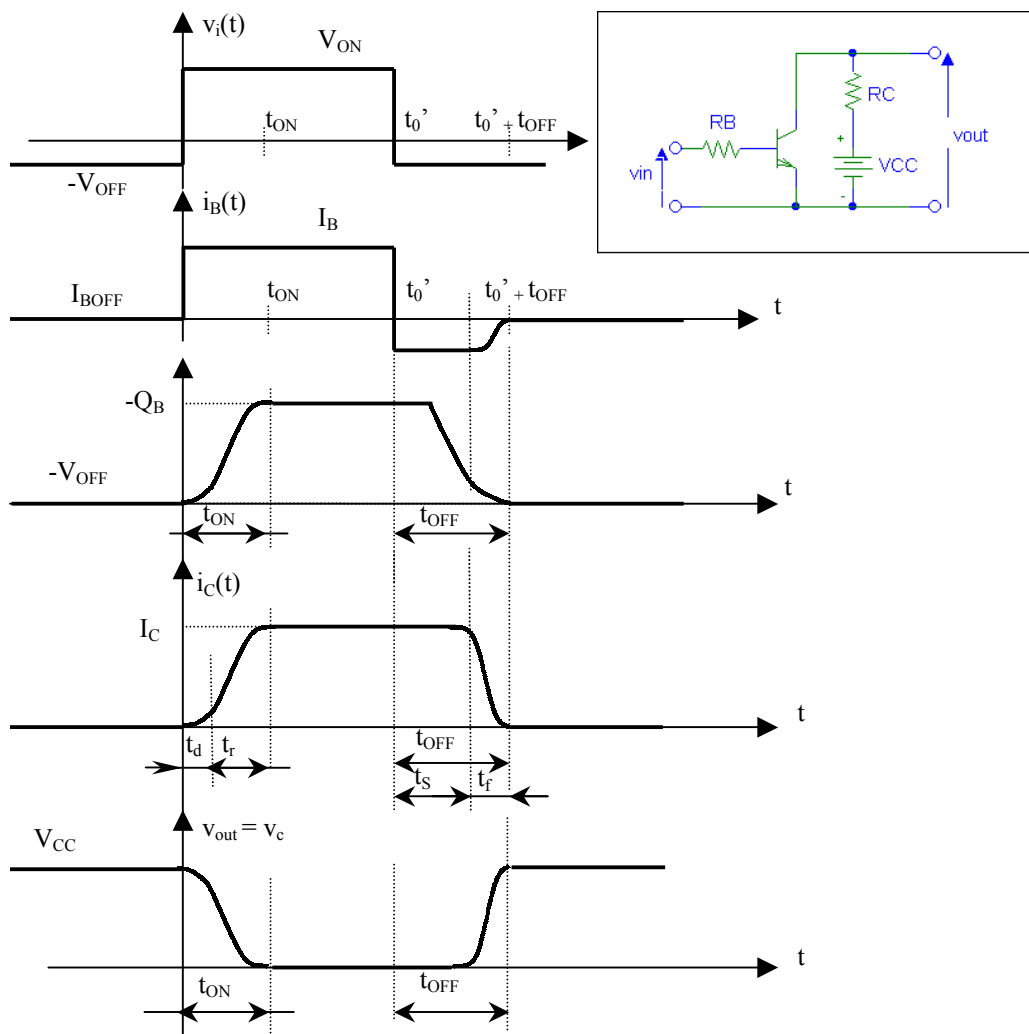
13.6 Irudia. Seinale txikiko zirkuitu baliokidea, garraioaren ikuspuntutik

13.2 BJTa kommutadore gisa

Elektronika analogikoan eta, batez ere, digitalean BJTaren kommutazioak garrantzi handia duen arren, ez dugu hemen sakonean analizatuko: diodoaren kasuaren estrapolazioa egingo dugu, eta ondorio nagusiak aurkeztu.

Diodan bezala, hemen ere, kommutazioa muturreko bi egoeren arteko aldaketa da. OFF-i, korrorterik gabeko egoerari, transistorearen etendura dagokio. ON kasuari, eroapeneko egoerari, berriz, gune aktiboa eta asetasuna egokitzen zaizkio.

Lan-gune batetik besterako karga hazkundera/murrizketa eta hustutako eskualdearen laburtzea/zabaltzea ezaugarritzatzeko, kargaren bidezko kontrol-eredua erabili behar dugu. Horren bitartez, denboran zehar agertzen diren aldiuneko korronte eta tentsioak kalkula ditzakegu, eta, horien bilakaerari begira, parametro nagusiak diren kommutazio-denborak ezaugarritzatzera hel gaitzke.



13.7 Irudia. Oinarrizko kommutazio-zirkuitua eta agertu ohi diren kargak, korronteak eta tentsioak

Aurreko irudian, OFF-ON eta ON-OFF aldaketetan transistorearen aldagaiek duten bilakaerak irudikatu dira.

Zirkuitu horretan, OFF-ON trantsizioan, baseko korrontea ia konstantea da, junturan agertuko den tentsioa oso txikia izango baita. Hau da, ia berehala iristen da egoera geldikorreko balioraino.

$$i_B(t) = \frac{V_{ON} - v_{BE}(t)}{R_S} \approx \frac{V_{ON}}{R_S} \equiv I_B$$

Kolektoreko korrontea, berriz, ez du estatikoko balioa (aktiboan geratuko bada, $\beta \cdot I_B$; asetasunean sartuko bada, V_{CC}/R_L) berehala hartuko. Izan ere, kolektoreko korrontea igotzen hasi baino, lehen t_d (delay time, atzerapen-denbora) pasatzen da, igorleko juntura alderantzizko polarizaziotik atera behar baitugu (C_{JE} kondentsadorea kargaz hornituz, hustutako eskualdearen zabalera laburtuz). Jarraian, baseko karga handituz joango da eta kolektoreko korrontea bere baliora igoko da, t_r (rise time, igoera-denbora) erabiliz.

ON-OFF trantsizioan, baseko korrontea negatiboa eta askotan –gutxi gorabehera– konstantea izaten da. Basean metatzen den karga gutxitzeko, bi prozedura daude: birkonbinaketa eta baseko korrontea. Asetasunetik abiatzen bagara, hasteko, aktibora pasatu behar dugu eta, bide horretan, kolektoreko korrontea eta profila konstante mantentzen dira. $i_C(t)$ korrontean aldaketak agertu baino lehen igarotzen den denbora t_s (storage time, metaketa-denbora) da. Gero, baseko kargaren profilaren malda aldatzen hasten denetik etendurako egoeraraino heldu arte, kolektoreko korrontea gutxituz doa, t_f (fall time, jaitsiera-denbora).

Trantsizio-denbora horietan guztietan, oinarritzko denborek eta kanpoko zirkuituko osagaiek (tentsioek eta korronteeek) markatzen dituzte τ_B eta τ_T :

$$t_d \approx \frac{2C_{JE}}{I_B} f(\phi_T, V_{OFF}) + (1 + 0.11 \cdot \beta) \tau_T$$

$$t_r \approx 2.2 \cdot \beta \cdot \tau_T$$

$$t_s \approx \tau_S \cdot \frac{I_B - I_{CSAT} / \beta}{-I_{OFF}} \text{ non } \tau_S \text{ asetasuneko erdibizitza baliokidea baita.}$$

$$t_f \approx \tau_B \cdot \ln \left[1 - \frac{I_B}{I_{OFF}} \right]$$

13.3 Transistore bipolarra seinale txikian: zirkuitu baliokidea

13.3.1 SEINALE TXIKIKO KORRONTE OSAGAIK

Seinale txikian (diodoetan bezala), alternoko seinale askoz txikiago bat gehitu ohi diogu polarizazioko seinale nahiko handi bati (V_C, V_E, V_B): $v_{\text{alternoa}}(t) < V_T$.

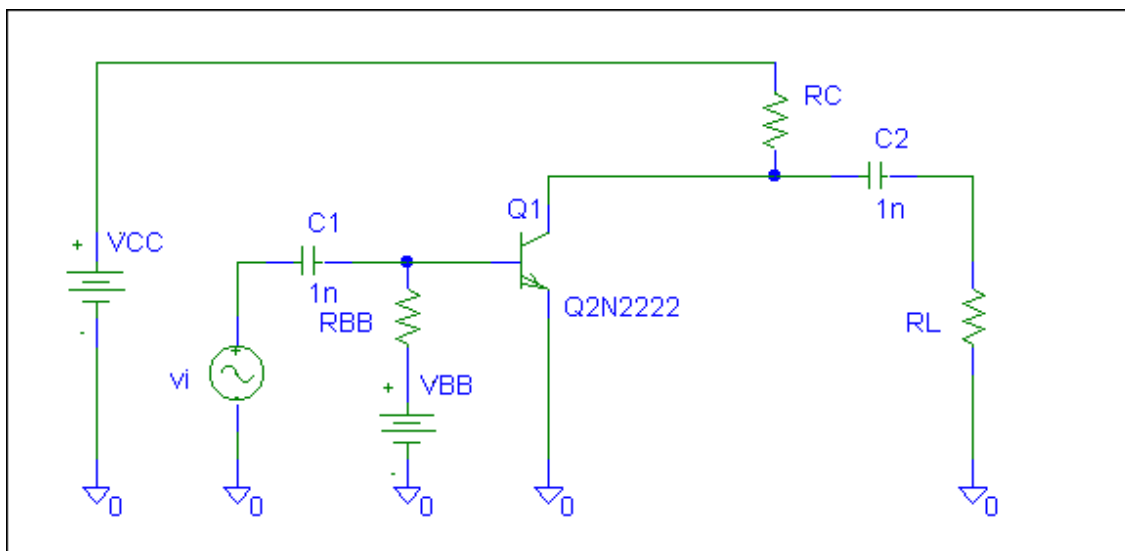
Diodoetan bezala, bitan banatuko dugu puntu batean dagoen seinalea: alde batetik, osagai jarraitua (\rightarrow polarizazioa) eta, beste alde batetik, osagai alternoa (\rightarrow seinale txikia) analizatuko ditugu. Ikusiko dugunez, $v_{ac}(t) \ll V_T$ betetzen bada, ekuazioak lineal bihur daitezke, eta seinaleen deskonposaketa (eta gainezarpena) erabil daitezke.

Seinale txikiko zirkuitua analizatzeko, transistorea (seinale txikiko) zirkuitu baliokide batez aldatzen dugu. Askotariko ereduak badaude ere, erabilienetakoak, π -zirkuitu hibridoak, hainbat abantaila ditu:

- Seinale txikiko zirkuitu baliokidean parte hartuko duten osagaiak kalkulatzeko berehalakoa da Q (polarizazioko korroneak eta tentsioak) jakinez gero.
- Maiztasun nahiko altuetan ere ($f < 500$ kHz), zirkuituko osagaiak maiztasunaren independenteak dira.

Seinale txikiko zirkuitua ebatziz, anplifikadorearen irabazia eta sarrerako zein irteerako inpedantziak kalkulatu ditugu. Anplifikadore gisa lan egiteko, lan-punturik onenak (distortsiorik gabeko irabazirik handiena ematen dutenak) gune aktiboan daude. Hori dela eta, hemendik aurrera, BJTa gune aktiboan dagoela onartuko dugu.

Beheko zirkuitua ohiko anplifikadore bat da.



13.8 Irudia. Igorle komuneko anplifikadorea

$v_{BE}(t) = V_{BE} + v_{be}(t)$ ($V_{BE} \rightarrow$ polarizazioa $> V_T$, $v_{be} \rightarrow$ seinale txikia $< V_T$)

$$q_B(t) = -qA \cdot \int_0^{W_B} n'_B(x,t) \cdot dx \approx -qA \cdot \int_0^{W_B} n_B(x,t) \cdot dx$$

$$q_B(t) = -qA \cdot \int_0^{W_B} n_B(0,t) \cdot \left(1 - \frac{x}{W_B}\right) \cdot dx = -qA \cdot n_B(0,t) \cdot \frac{W_B}{2}$$

$$q_B(t) = -qA \cdot \frac{W_B}{2} \cdot n_{B0} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) = -qA \cdot \frac{W_B}{2} \cdot n_{B0} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE} + v_{be}}{V_T}\right)$$

$$q_B(t) = -qA \cdot \frac{W_B}{2} \cdot n_{B0} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{v_{be}}{V_T}\right) = Q_B \cdot \exp\left(\frac{v_{be}}{V_T}\right)$$

baina, seinale txikian, $\exp\left(\frac{v_{be}}{V_T}\right) \approx 1 + \frac{v_{be}}{V_T}$

$$q_B(t) = Q_B \cdot \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T}\right) = Q_B + Q_B \cdot \frac{v_{be}}{V_T} = Q_B + q_b(t)$$

Analizatzen, kargaren bidezko kontrol-eredua erabiliko dugu (npn batentzat):

$$i_B = -\frac{q_B}{\tau_B} - \frac{\partial q_B}{\partial t}$$

Eta, laburbilduz,

$$Q_B = -qA \cdot \frac{W_B}{2} \cdot n_{B0} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

$$q_b(t) = Q_B \cdot \frac{v_{be}}{V_T} = \frac{Q_B}{V_T} \cdot v_{be}$$

$$q_B(t) = Q_B + q_b(t)$$

Beraz, *seinale txikian*, basean metatutako karga bi osagitan deskonposa dezakegu: alde batetik, polarizazioak sortzen duena, Q_B (V_{BE} tentsioarekin menpekotasun esponentziala duena), eta, beste alde batetik, seinale txikiak eragiten duena, $q_b(t)$ (horrek $v_{be}(t)$ tentsioarekiko menpekotasun zuzena du eta, hortaz, batzuetan, positiboa eta, besteetan, negatiboa izango da).

Hiru ondorio nagusi atera ditzakegu:

- Seinale txikiko seinaleak eragiten duen karga polarizazio-puntuaren menpe dago.
- Seinale txikiko tentsioaren eta eragiten duen kargaren arteko erlazioa lineala da eta, beraz, tentsio eta korrante alfernoen arteko erlazioak linealak izango dira (kargaren bidezko kontrol-ereduak korranteak eta karga linealki erlazionatzen dituelako).
- Eta gainera gainezarpina aplikagarria da.

Korronteen ekuazioetatik:

$$i_B = -\frac{q_B}{\tau_B} - \frac{\partial q_B}{\partial t} = -\frac{Q_B + q_b(t)}{\tau_B} - \frac{\partial(Q_B + q_b(t))}{\partial t} = -\frac{Q_B}{\tau_B} - \frac{q_b(t)}{\tau_B} - \frac{\partial q_b(t)}{\partial t}$$

$$i_B = -\frac{Q_B}{\tau_B} - \frac{\frac{Q_B}{V_T} \cdot v_{be}}{\tau_B} - \frac{\partial\left(\frac{Q_B}{V_T} \cdot v_{be}\right)}{\partial t} = -\frac{Q_B}{\tau_B} - \frac{Q_B}{V_T \tau_B} \cdot v_{be} - \frac{Q_B}{V_T} \cdot \frac{\partial v_{be}}{\partial t}$$

$$i_B = I_B + i_b(t)$$

$$I_B = -\frac{Q_B}{\tau_B}$$

$$i_b = -\frac{Q_B}{V_T \tau_B} \cdot v_{be} - \frac{Q_B}{V_T} \cdot \frac{\partial v_{be}}{\partial t} = g_{be} \cdot v_{be} + C_{be} \cdot \frac{\partial v_{be}}{\partial t}$$

$$\text{non } g_{be} = -\frac{Q_B}{V_T \tau_B} = \frac{I_B}{V_T}$$

$$\text{eta } C_{be} = -\frac{Q_B}{V_T} = \frac{I_B}{V_T} \cdot \tau_B = \frac{I_C}{V_T} \cdot \tau_T = \beta \cdot g_{be} \cdot \tau_T$$

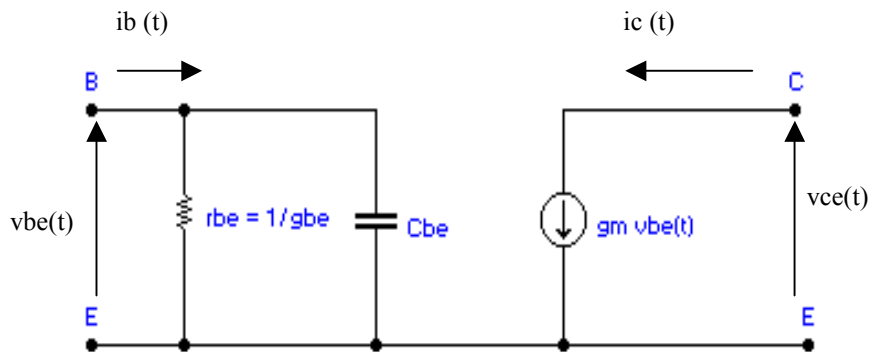
$$i_C = -\frac{q_B}{\tau_T} = -\frac{Q_B + q_b(t)}{\tau_T} = -\frac{Q_B}{\tau_T} - \frac{q_b(t)}{\tau_T} = -\frac{Q_B}{\tau_T} - \frac{\frac{Q_B}{V_T} \cdot v_{be}}{\tau_T}$$

$$i_C = I_C + i_c(t)$$

$$I_C = -\frac{Q_B}{\tau_T}$$

$$i_c(t) = -\frac{Q_B}{V_T \cdot \tau_T} \cdot v_{be} = g_m \cdot v_{be} \quad \text{non } g_m = -\frac{Q_B}{V_T \cdot \tau_T} = \frac{I_C}{V_T} = \beta \cdot g_{be}$$

13.3.2 π ERAKO ZIRKUITU BALIOKIDEA



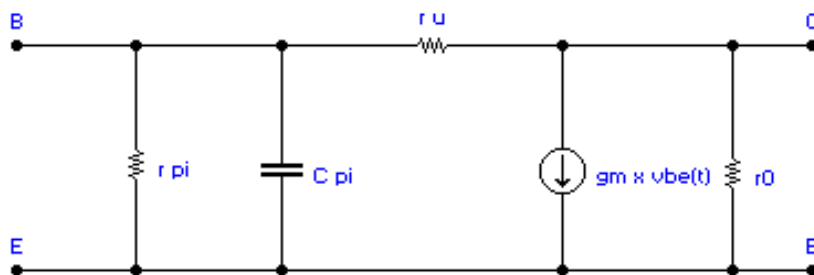
13.9 Irudia. Aurreko ekuazioak islatzen dituen zirkuitua. Seinale txikiko zirkuitu baliokidea igorle komuneko egituran

Pnp transistoreentzat zirkuitu bera lortuko genuke $i_b(t)$, $i_c(t)$ eta $v_{be}(t)$. Aurreko formulak erabilia g_b eta g_m negatiboak izango lirateke . Baina korronteen noranzkoa arrazoituz eta aldagaitzat v_{be} hartuz, g_b eta g_m positiboak geratzen dira beti ($|I_C|/V_T$ eta $|I_B|/V_T$). Hau da, **pnp edo npn transistoreen zirkuitu baliokidea 13.9 Irudikoa da eta g_b eta g_m positiboak dira beti.**

Aurreko garapenean (eta beraz aurreko zirkuituan) ez da **Early efektua** kontuan hartu. Kontuan hartuz gero, beste bi osagai agertzen zaizkigu:

$$g_\mu = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CB}} \right|_{V_{CE}, V_{BE}} \quad r_\mu = 1/g_\mu \quad (\text{ihes korrante baten berri emanez})$$

$$g_0 = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_{V_{CE}, V_{BE}} \quad r_0 = 1/g_0 \quad (\text{Early efektua})$$

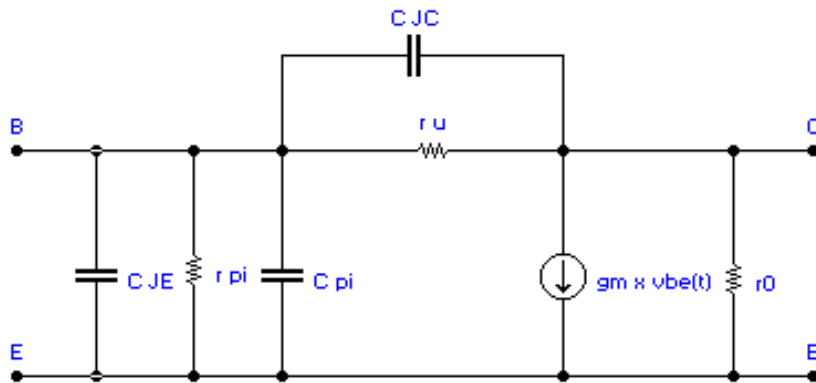


13.10 Irudia. Bigarren mailako efektuak kontuan hartzen dituen zirkuitua

Gehienetan, $g_\mu = 0 = g_0$ hartuko ditugu (eta efektu horiek baztertu).

Edozein kasutan, $g_\mu < 100 g_0$ izaten denez, g_μ ia beti aintzat ez hartzeko modukotzat jotzen dugu.

Azkenik, hustutako eskualdeetako karga-aldaketak kontuan hartzen baditugu, beste bi kondentsadore agertzen dira:



13.11 Irudia. Zirkuitu osoa: π erako eredu hibridoa (maiztasun nahiko altuetan)

$$C_{JE} = \frac{C_{JE0}}{\left[1 - \frac{V_{BE}}{\Phi_{T,E}}\right]^{1/m}}; \quad C_{JC} = C_\mu = \frac{C_{JC0}}{\left[1 - \frac{V_{BC}}{\Phi_{T,C}}\right]^{1/m}}$$

(C_{JE0} eta C_{JC0} tentsiorik ez dagoenean ditugun junturetako kapazitateak dira).

Oharrak:

- Maiztasun baxuetan, kondentsadoreen efektuak aintzat ez hartzeko modukoak dira (zirkuitu ireki bilakatzen dira).
- Maiztasun oso altuetan ($f > 10\text{MHz}$), aurrekoak ez digu balio (kargaren bidezko kontrol-ereduak kale egiten du).

Honako hauek dira beste erlazio erabilgarri batzuk:

$$C_b = \beta \cdot g_b \cdot \tau_T = \frac{I_C}{V_T} \cdot \tau_T = g_m \cdot \tau_T$$

$$g_m = \beta \cdot g_b$$

Seinale sinusoidaletarako:

$$i_b(t) = v_{be}(t) \cdot (g_b + j\omega C_b) \qquad i_c(t) = v_{be}(t) \cdot g_m$$

$$\frac{i_c(t)}{i_b(t)} = \frac{g_m}{g_b + j\omega C_b} = \frac{g_m / g_b}{1 + \frac{j\omega C_b}{g_b}} = \frac{I_C / I_B}{1 + \frac{j\omega C_b}{g_b}} = \frac{\beta}{1 + \frac{j\omega C_b}{g_b}}$$

Seinale txikiko korrante-irabazia ez da, orokorrean, seinale handiko korrante-irabazia, baina bai maiztasun baxuetan (orduan, $\omega \cdot C_b \ll g_b$).

13.4 BJTa koadripolo gisa

Seinale txikiari dagokionez, seinaleen arteko erlazioak **linealak** direnez eta sarrera eta irteera nahiko argi bereiz daitezkeenez, koadripoloen teoria oso lagungarria da.



13.12 Irudia. Koadripoloaren korrante eta tentsioak (V_1 , V_2 , I_1 eta I_2 seinale txikiko tentsio eta korranteak dira)

Koadripolo ezberdina izan dezakegu bi baldintza kontuan hartuta:

1. Konfigurazioa edo egitura (igorle, base edo kolektore komuneko kasuetan, sarrera eta irteerak ezberdinak dira)
2. Lan-puntua (seinale txikian zirkuituaren portaera Q puntuaren menpe dagoelako, π zirkuituan ikusten genuenez)

Hainbat abantaila aurkituko ditugu. Batetik, osagaiak kanpotik neur daitezke. Bestetik, zirkuituen analisi matematikoa errazten da.

Azkenean, koadripolo modura analizatzea, transistorearen ezaugarri fisikoak eratoritzen diren ezaugarri elektrikoei begiratu beharrean, lau terminaleko kutxa baten ezaugarri elektrikoei so egitea da.

13.4.1 PARAMETRO HIBRIDOAK

Koadripoloetan agertzen diren lau aldagaiak erlazionatzeko (dauden bi ekuazioak adierazteko), inpedantzia-parametroen matrizea, admitantzia-parametroak edo parametro hibridoak erabil daitezke:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow V = Z * I$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow I = Y * V; Y = Z^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} V_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = H * \begin{pmatrix} I_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

Parametro horiek guztiak erlazionatuta daude eta egituraren –hau da, sarrera eta irteera zeintzuk diren- eta polarizazioaren menpe egoteaz gain, maiztasunaren menpe ere badaude. Hiru baldintza horiek finkatuz gero, esperimentalki kalkulatzeko nahiko erraza da.

$$z_{11}(egitura, f, Q) = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

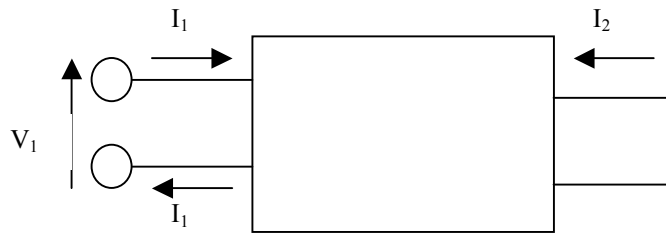
$$h_{11}(egitura, f, Q) = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} \text{ esperimentalki}$$

$$\text{edo, } Z \text{ matrizea baldin badakigu, } h_{11} = z_{11} - \frac{z_{12} \cdot z_{21}}{z_{22}}$$

Beraz, h_{11} parametroa (orokorrean H matrizea) kalkulatzeko, bi bide ikusten ditugu:

a) Esperimentalki neurtzea

$$h_{11}(egitura, f, Q) = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0}$$



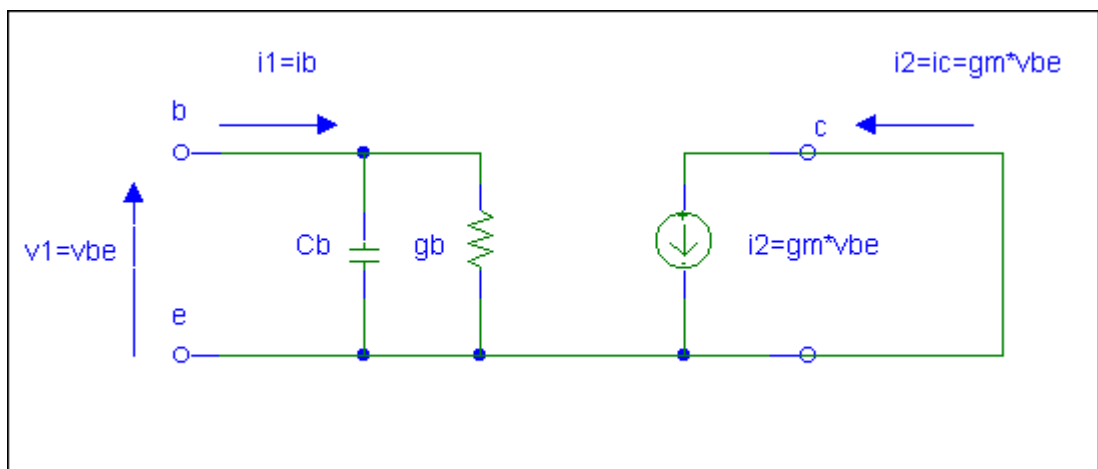
13.13 Irudia. h_{11} parametroa neurtzea (v_1 - i_1 ezaugarria marraztu)

b) Koadripoloa karakterizatzen duten beste parametro batzuekin erlazionatzea

$$h_{11}(\text{egitura}, f, Q) = z_{11} - \frac{z_{12} \cdot z_{21}}{z_{22}}$$

Guk lehenengo bidea erabiliko dugu H matrizea teorikoki kalkulatzeko (π erako zirkuitu baliokidetik). h_{21} parametroa kalkulatu dugu hiru konfigurazioetan.

Igorle komuneko konfigurazioko h_{21} parametroaren kalkulu teorikoa:



13.14 Irudia. Igorle komuneko egiturako korrante eta tentsioak

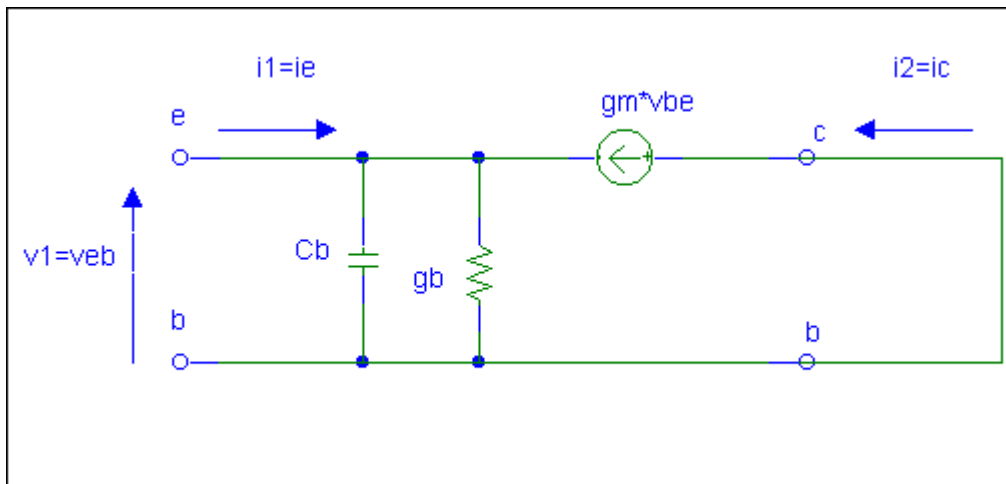
$$h_{21}(\text{igorle_komunean}, f_ertainean, Q) = h_{21e} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{\text{irudian}(V_2=0)}$$

$$h_{21e}(f, Q) = \frac{g_m \cdot v_{be}}{v_{be} \cdot (g_b + j\omega C_b)} = \frac{g_m}{g_b + j\omega C_b}$$

Kolektore komuneko konfigurazioko h_{21} parametroaren kalkulu teorikoa (sinplifikatutako π zirkuitu baliokidetik):

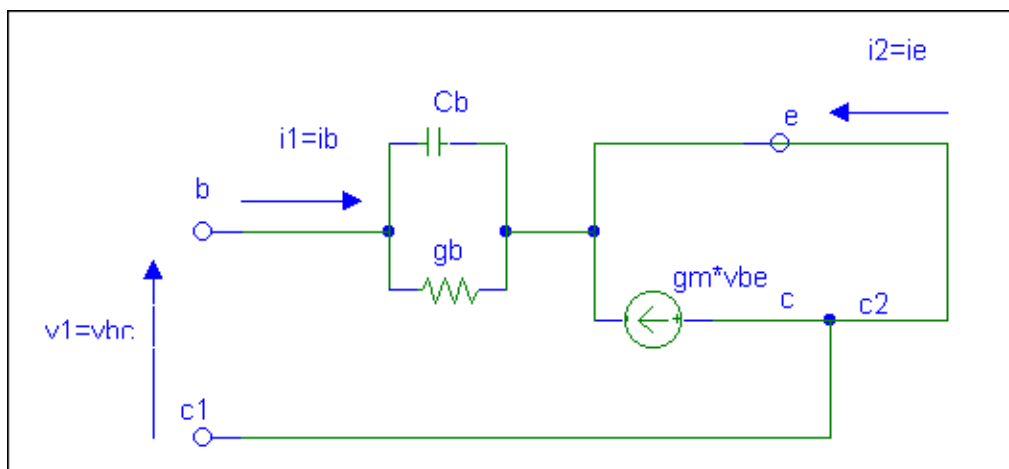
$$h_{21}(kolektore_komuna, f_ertaina, Q) = h_{21c} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{irudia(V_2=0)} = \frac{-(i_b + i_c)}{i_b}$$

$$h_{21c} = \frac{-[v_{be} \cdot (g_b + j\omega C_b) + g_m \cdot v_{be}]}{v_{be} \cdot (g_b + j\omega C_b)} = -\frac{g_b + j\omega C_b + g_m}{g_b + j\omega C_b} = -1 - \frac{g_m}{g_b + j\omega C_b} \approx -(\beta + 1)$$



13.15 Irudia. Kolektore komuneko egiturako korrante eta tentsioak

Base komuneko konfigurazioko h_{21} parametroaren kalkulu teorikoa (sinplifikatutako π zirkuitu baliokidetik):



13.16 Irudia. Base komuneko egiturako korrante eta tentsioak

$$h_{21}(base_komuna, f_ertaina, Q) = h_{21b} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{irudia(V_2=0)} = \frac{i_c}{i_e} = \frac{i_c}{-(i_c + i_b)}$$

$$h_{21b} = \frac{g_m \cdot v_{be}}{-[g_m \cdot v_{be} + v_{be} \cdot (g_b + j\omega C_b)]} = -\frac{g_m}{g_m + (g_b + j\omega C_b)} = -\frac{1}{1 + \frac{g_b + j\omega C_b}{g_m}} \approx -\alpha$$

Normalean, izendapena ez da h_{ij} , baizik eta:

h_{input} konfigurazioa = h_{11}

i, input, sarrerako tentsioaren eta korrontearen arteko erlazioa delako (irteera zirkuitulaburtuta dagoenean) Nolabait, sarrerako inpedantzia berezi bat da.

$h_{forward}$ konfigurazioa = h_{21}

f, forward, irteerako eta sarrerako korronteen arteko erlazioa delako (irteera zirkuitulaburtuta dagoenean). Nolabait, zuzeneko transferentziaren neurria da.

$h_{reverse}$ konfigurazioa = h_{12}

r, reverse, sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioa delako (sarrera zirkuitu irekian dagoenean). Nolabait, alderantzizko transferentziaren neurria da.

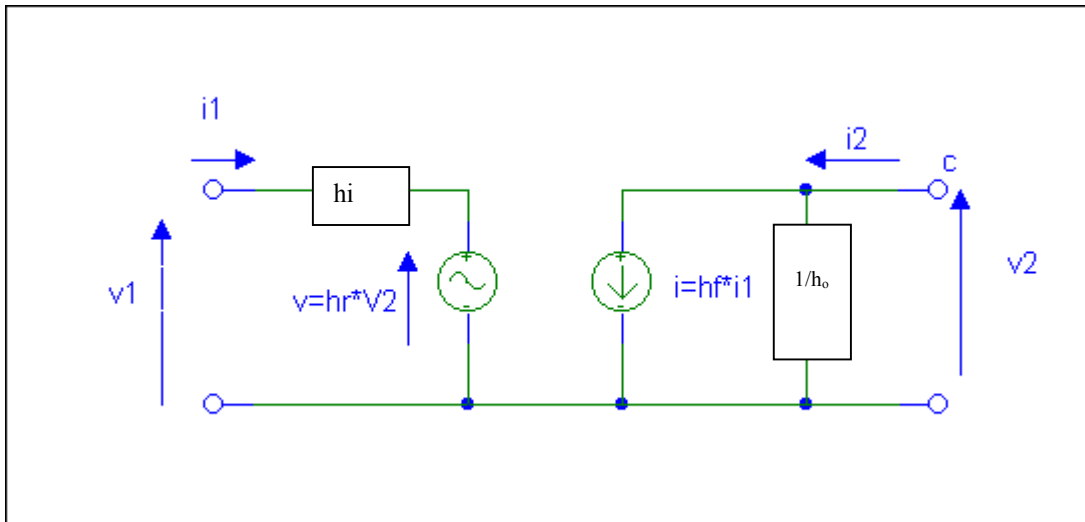
h_{output} konfigurazioa = h_{22}

o, output, irteerako korrontearen eta tentsioaren arteko erlazioa delako (sarrera zirkuitu irekian dagoenean). Nolabait, irteerako admitantzia berezia da.

Beraz, lan-puntu bakoitzeko (eta maiztasun jakin bakoitzeko), $3 \times 4 = 12$ parametro hibrido daude transistore bakoitzeko: $H_E \rightarrow h_{ie}, h_{fe}, h_{re}, h_{oe} \diamond H_C \rightarrow h_{ic}, h_{fc}, h_{rc}, h_{oc} \diamond H_B \rightarrow h_{ib}, h_{fb}, h_{rb}, h_{ob}$. Gauza bera gertatzen da Z edo Y matrizeekin. Laukote bat jakinez gero, besteak erraz kalkula daitezke, azkenean, transistorea bakarra da eta.

Zirkuitu hibrido:

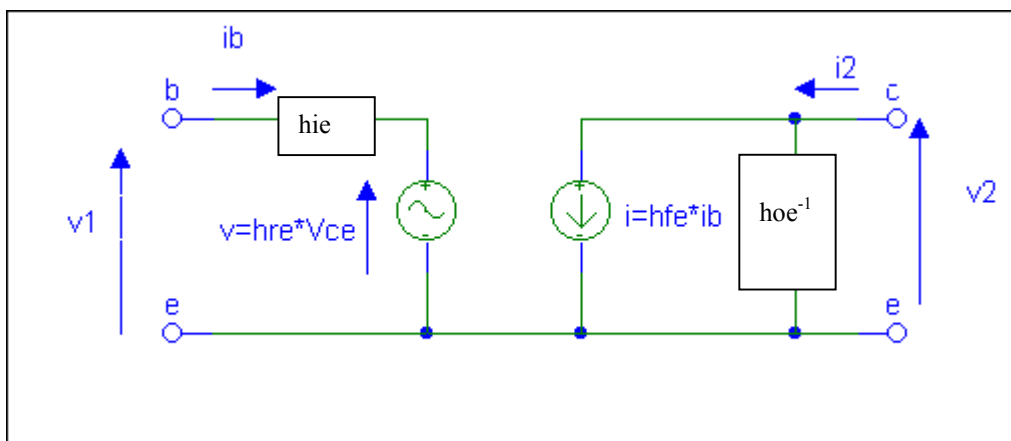
h parametroak erabiliz, zirkuitu sinple batez irudika dezakegu transistorea:



13.17 Irudia. Egitura orokor bati dagozkion korranteak eta tentsioak

non terminalak eta h_x konfigurazioa, kasu bakoitzean (egitura bakoitzean), ezberdinak izango baitira (balio zehatza, Q eta f parametroekin ere aldatuko da)

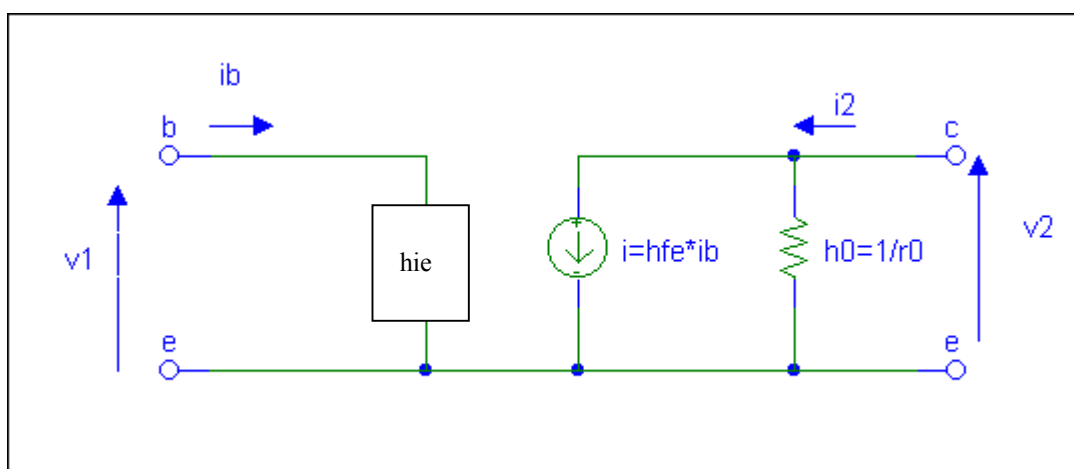
h parametroetako erabilienak igorle komuneko egiturakoak dira, batetik, konfiguraziorik usuena izaten delako eta, bestetik, korrontearen amplifikazioa (transistore-efektua) agerian uzten duelako:



13.18 Irudia. Igorle komuneko h parametroak darabiltzan zirkuitu baliokidea

$$h_{ie} = \frac{1}{g_b + j\omega C_b} \quad h_{fe} = \frac{g_m}{g_b + j\omega C_b} \quad h_{re} \approx 0 \quad h_{oe} = 1/R_0 \approx 0$$

Normalean $h_{re} \sim 0$ hartzen denez, zirkuitua errazten da:

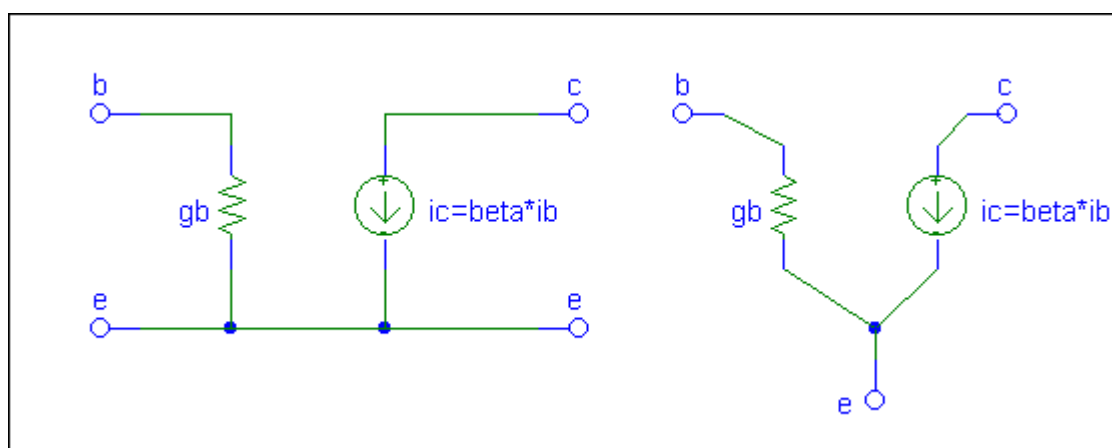


13.19 Irudia. Igorle komuneko h parametroak: lehenengo sinplifikazioa

Maiztasun baxuetan,

$$h_{ie} = \frac{1}{g_b + j\omega C_b} \approx \frac{1}{g_b} \quad h_{fe} = \frac{g_m}{g_b + j\omega C_b} \approx \frac{g_m}{g_b} = \beta \quad h_{re} \approx 0; \quad h_{oe} \approx 0$$

eta zirkuitua honela geratzen da:



13.20 Irudia. Igorle komuneko ohiko zirkuitu baliokidea

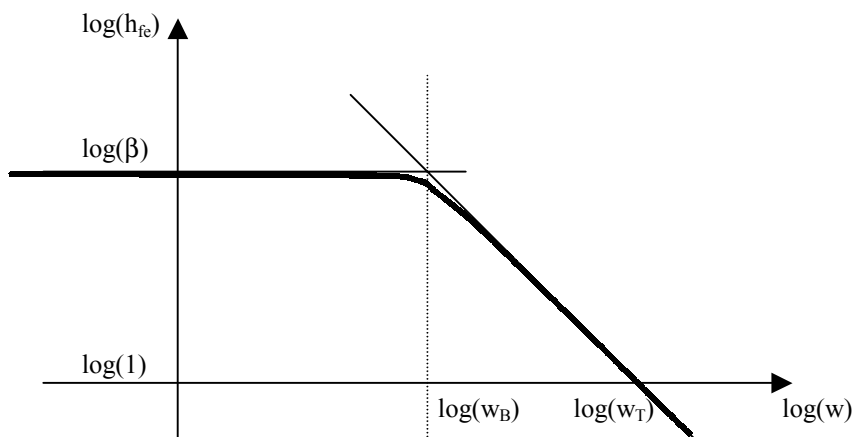
Oso zirkuitu sinplea da eta, **nahiz eta igorle komuneko konfiguraziotik eratorri, konfigurazio guztietan erabil daiteke.**

13.4.2 EBAKETA MAIZTASUNA

Maiztasunarekin, h_{fe} , korrontearen transferentzia zuzena ez da konstante mantentzen.

$$h_{fe} = \frac{g_m}{g_b + j\omega C_b} \left\{ \begin{array}{l} \text{maiztasun baxuetan} \approx \frac{g_m}{g_b} = \beta \\ \text{maiztasun ertainetan} \approx \frac{g_m}{g_b + j\omega C_b} < \beta \\ \text{maiztasun altuetan} \approx \frac{g_m}{j\omega C_b} \ll \beta \\ \text{maiztasun oso altuetan} \approx \text{ez dakigu (ez dugu eredurik)} \end{array} \right.$$

Grafikoki –logaritmikoetan- irudikatuz:

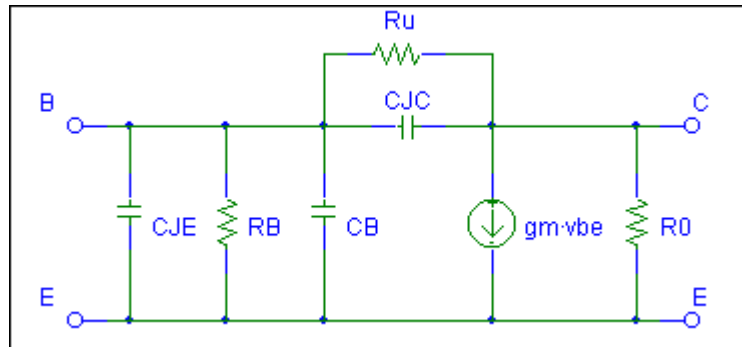


13.21 Irudia. Maiztasunaren efektua h_{fe} parametroan

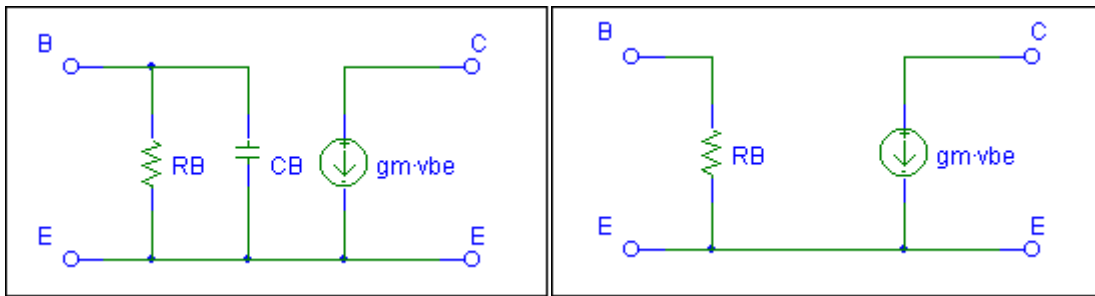
$$\omega_T = g_m/C_b; \quad \omega_B = \omega_T / \beta = g_b/C_b \quad (\omega_T = 1/\tau_T = 2D_{mB} / W_B^2);$$

Hau da, transistore, efektua galduz doa maiztasuna igo ahala: $f_B = \omega_B/2\pi$ frekuentzian galtzen hasten da, eta $f_T = \beta \cdot f_B$ maiztasunean erabat desagertu da.

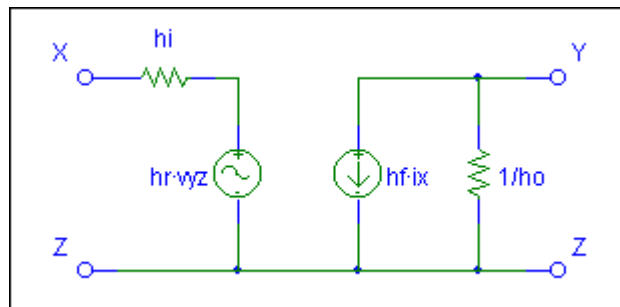
Eranskinak (I): π zirkuituaren eta h parametroen zirkuituen konparazioa (I)



13.22 Irudia. π -erako zirkuitua: Edozein maiztasunetan (parametroak lan-puntuaren arabera dira)

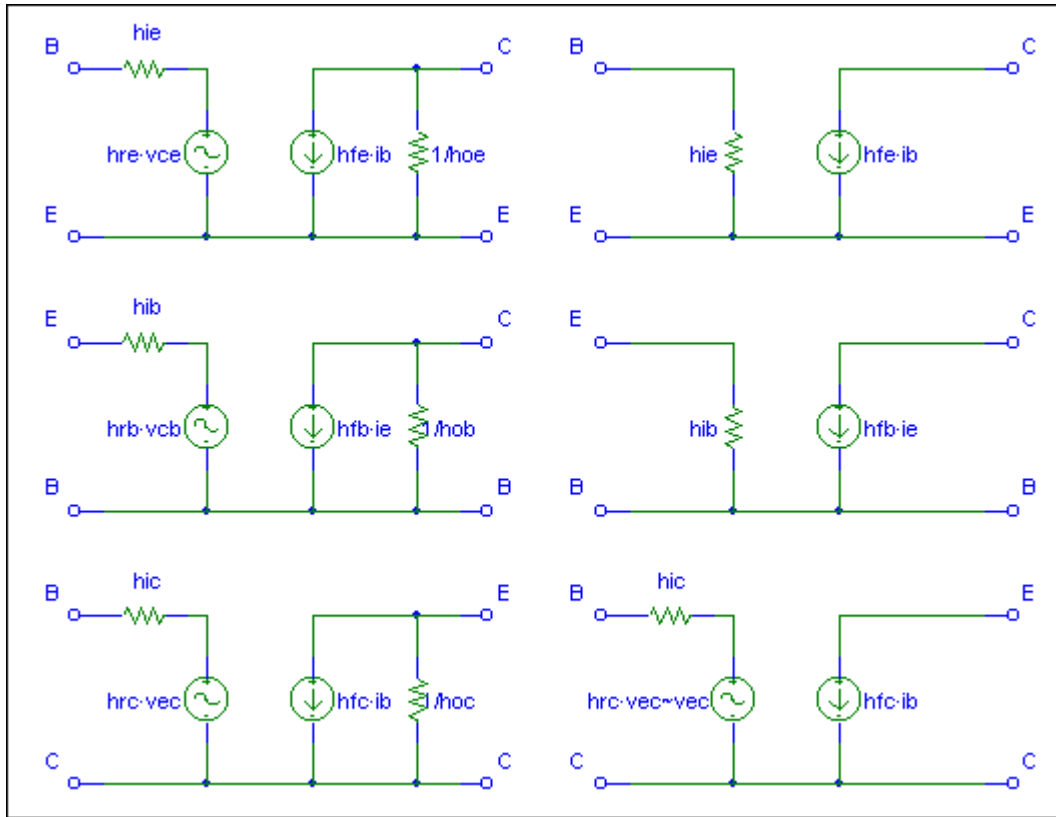


13.23 Irudia. π erako zirkuitu erraztua: Maiztasun ertain (ezk.) eta baxuetan (esk.)



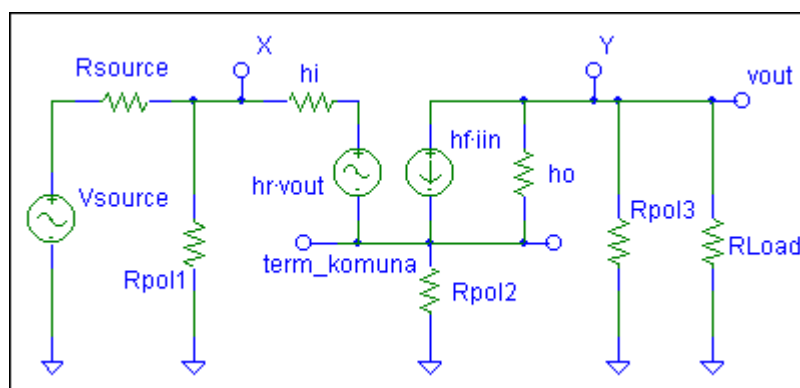
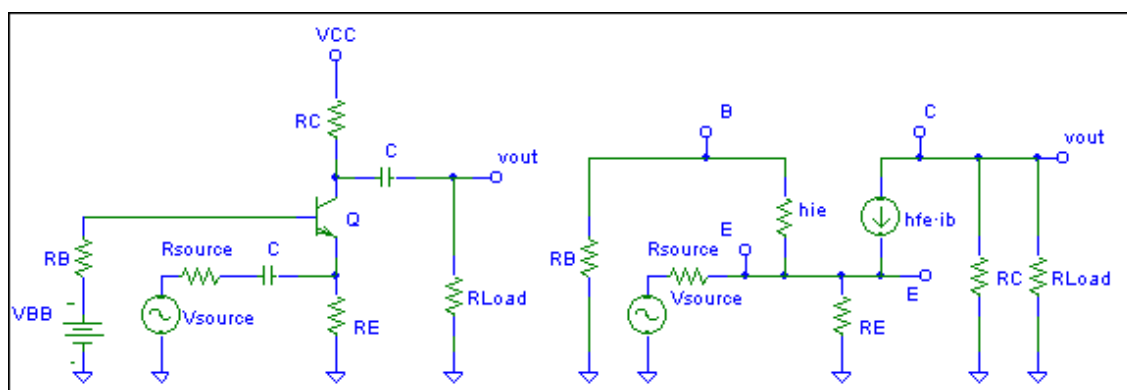
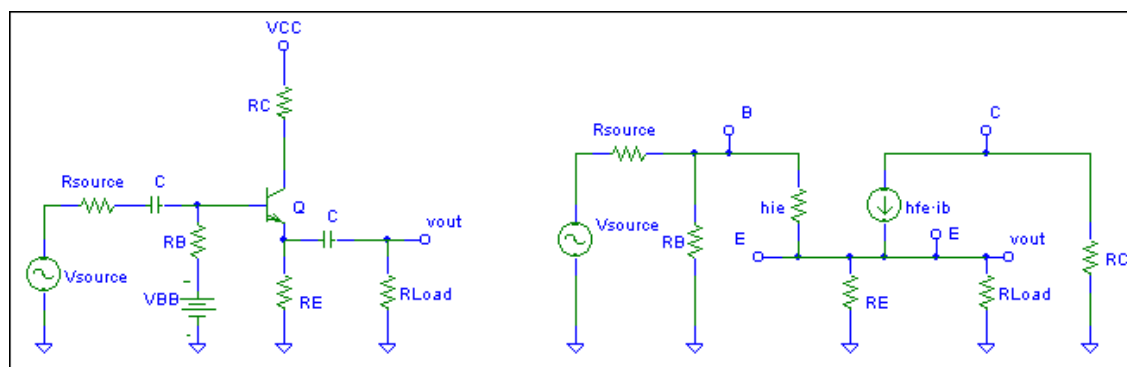
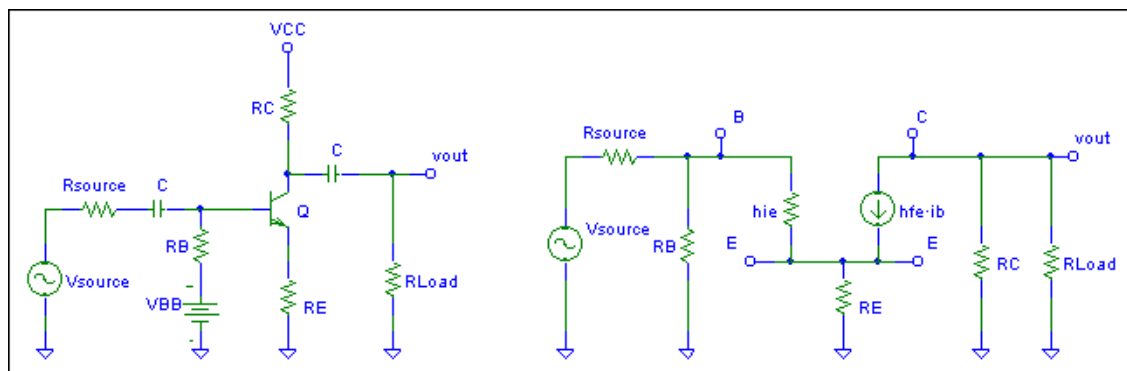
13.24 Irudia. H parametroak darabiltzan zirkuitu orokorra: lan-maiztasunean erabilgarria (osagaiak lan-puntuaren eta maiztasunaren arabera dira)

Eranskinak (II): h parametroen zirkuituaren sinplifikazioak



13.25 Irudia. H parametroak darabiltzaten zirkuituak

Eranskinak (III): π zirkuituaren eta h parametroen zirkuituen konparazioa (II)



13.26 Irudia. Konfigurazioak eta zirkuitu baliokideak

Eranskinak (IV): h parametroen arteko erlazioak eta ohiko balioak

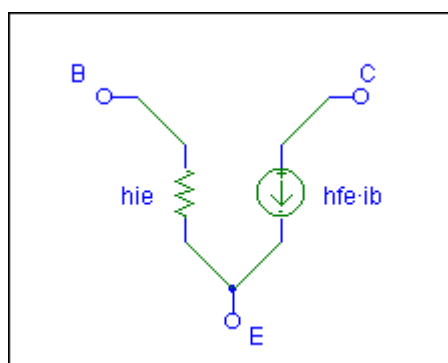
Base eta kolektore komuneko h parametroen balioak, igorleko balioen funtzioan

Parametroa	h_i	h_f	h_r	h_o
Base komunekoak	$\frac{h_{ie}}{h_{fe} + 1}$	$-\frac{h_{fe}}{h_{fe} + 1}$	$\frac{h_{ie} \cdot h_{oe}}{h_{fe} + 1} - h_{re}$	$\frac{h_{oe}}{h_{fe} + 1}$
Kolektore komunekoak	h_{ie}	$-(h_{fe} + 1)$	1	h_{oe}

Ohiko balioak

Parametroa	Terminal komuna		
	Igorlea	Basea	Kolektorea
$h_{11} = h_i$	1.1 k Ω	21.6 Ω	1.1 k Ω
$h_{12} = h_r$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	~ 1
$h_{21} = h_f$	50	-0.98	-51
$h_{22} = h_o$	24 $\mu\text{A/V}$	0.49 $\mu\text{A/V}$	25 $\mu\text{A/V}$
h_o^{-1}	40 k Ω	2.04 M Ω	40 k Ω

Zirkuiturik erabiliena



13.27 Irudia. Zirkuitu baliokiderik usuena

14. ZIRKUITU ANPLIFIKADOREEN ANALISIA

H parametroak darabiltzan zirkuitu baliokidean argi ikusten denez, i_b txiki bat behartuz gero, i_c proportzionala eta nahiko altua lor dezakegu. Menpeko korrante-sorgailu hori anplifikazioaren oinarria den transistore-efektuaren adierazlea da.

Beraz, basea sarreratzat eta kolektorea irteeratzat joz gero -hau da, igorle komuneko egituran-, korrante-irabazi bat agertzen zaigu. Zer esan dezakegu tentsioei buruz? Zer gertatzen da egitura ezberdinekin? Zer nolako tentsioa aplikatu behar dugu sarreran korrante jakin bat lortzeko?; hau da, zenbat da sarrerako inpedantzia? Irteerako tentsioak eskatzen duen korrantea, zer nolako kargei eman dakioke irabazirik galdu gabe?; hau da, zenbat da zirkuituaren irteerako inpedantzia? Galdera horien erantzunak bilatzea da ikasgai honen helburua.

Hasteko, anplifikazioaren kontzeptua ikusiko da, igorle komuneko zirkuitu bat analizatuz. Gero, seinale alferno nagusiak erlazionatzen dituen karga-zuzen dinamikoa aurkeztuko da eta, hori erabiliz, tarte dinamikoaren kontzeptua eta optimizazioa landuko dira. Azkenean, konfigurazio batzuk analizatuko dira, beren ezaugarriak aterez.

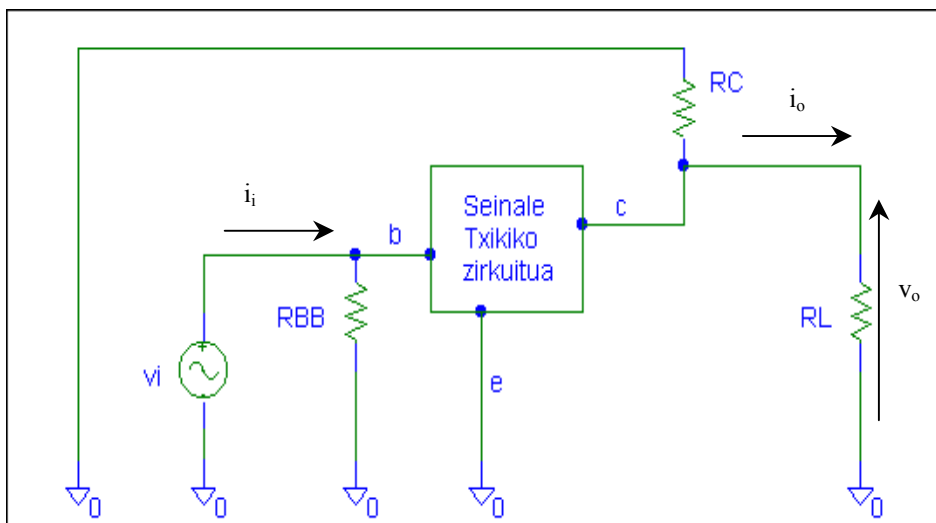
14.1 Anplifikazioa, karga-zuzen dinamikoa eta distortsioa

14.1.1 ANPLIFIKAZIOA

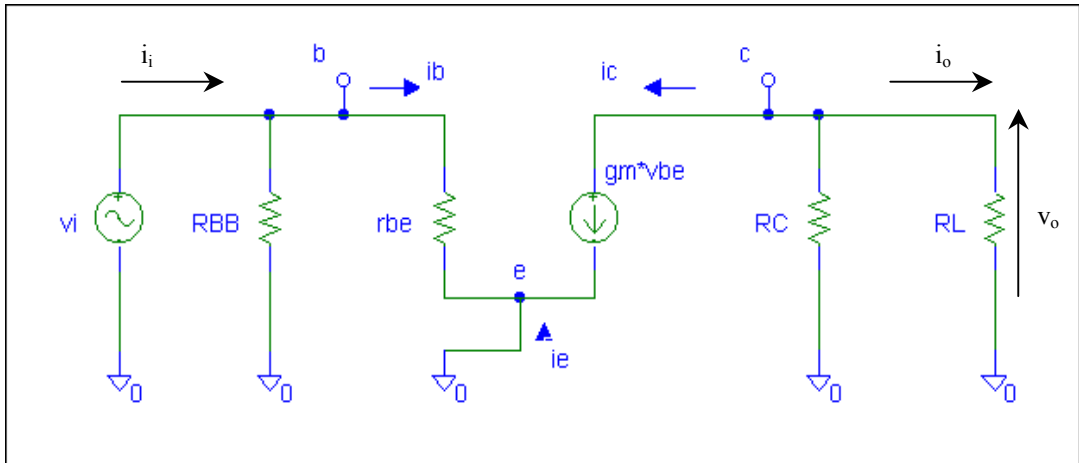
Hasi baino lehen. Anplifikazioa ebatzi baino lehen, polarizazioa analizatu behar da. Urrats horretan, seinale txikiko zirkuituan erabiltzen diren osagaiak *fin*katzen ditugu transistorea aktiboan dagoela ziurtatu ondoren. Orain, osagai jarraituei gainjarrita agertuko diren seinale alteenoen analisiaren txanda da.

Alternoko seinaleak kalkulatzeko, lan-maiztasun horri dagokion zirkuitua planteatu behar dugu. Transistorea beraren zirkuitu baliokideaz aldatzeaz gain, seinale jarraituko sorgailuak ezabatzen ditugu (tentsio-sorgailuak zirkuitulaburtuz eta korrante-sorgailuak zirkuitu irekian utziz), eta kondentsadoreak dagokien inpedantziak aldatzen ditugu. Normalean, erraztearren, kondentsadorean inpedantziak infinitutzat edo nulutzat jotzen ditugu. Maiztasun baxuetan lan egiten dugunez, transistorearen zirkuitu baliokidean agertzen diren kondentsadoreak (oso txikiak) zirkuitu irekian uzten ditugu eta kanpoko zirkuitukoak (balio oso handikoak, *infinituak*) zirkuitulaburtzen ditugu.

Hala, 13.6 Irudiko zirkuitutik abiatuta, 14.1 eta 14.2 Irudietako zirkuituak lortzen ditugu. Irteerako magnitude nagusiak R_L kargan lortzen ditugun korrantea eta tentsioa dira. Kontuan hartu karga kanpoko zirkuitu orokor bat edo beste etapa bat dela.



14.1 Irudia. Seinale txikia ebazteko zirkuitu orokorra



14.2 Irudia. Seinale txikia ebazteko π -zirkuitu erraztua

Tentsio-irabazia

Zirkuituko osagai guztiak jakinez gero, analitikoki kalkula ditzakegu korronteak eta tentsioak.

Adibidez: $r_{be} = 1\text{k}$; ($R_c = 50\Omega$), $g_m = \beta / r_{be} = 0.1 \text{ A/V}$ eta $R_L = 50 \Omega$ hartuz:

$$i_b = v_i / r_{be}$$

$$i_c = g_m \cdot v_i = \beta / r_{be} \cdot v_i = \beta \cdot i_b$$

$$v_o = -i_c \cdot (R_C // R_L) = -g_m \cdot (R_C // R_L) \cdot v_i = -0.1 \cdot (50 // 50)\Omega \cdot v_i = -2.5 \cdot v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\beta \cdot g_{be} \cdot (R_C // R_L) = -2.5$$

Ikusten denez, sarrerako seinalearen forma duen **tentsioa** lortzen dugu irteeran, baina handiagoa, **anplifikatuta**. Gainera, kasu horretan, alderantziz agertzen da.

Korronte-irabazia

Analisiarekin jarraituz,

$$i_o = \frac{v_o}{R_L} = \frac{-\beta \cdot g_{be} \cdot (R_C // R_L) \cdot v_i}{R_L}$$

$$i_i = \frac{v_i}{R_{BB} // r_{be}}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = -\beta \cdot \frac{g_{be} \cdot (R_C // R_L) \cdot (R_{BB} // r_{be})}{R_L}$$

Sarrerako inpedantzia: sarreran dagoen sorgailuak (eskuinerantz) ikusten duen inpedantzia:

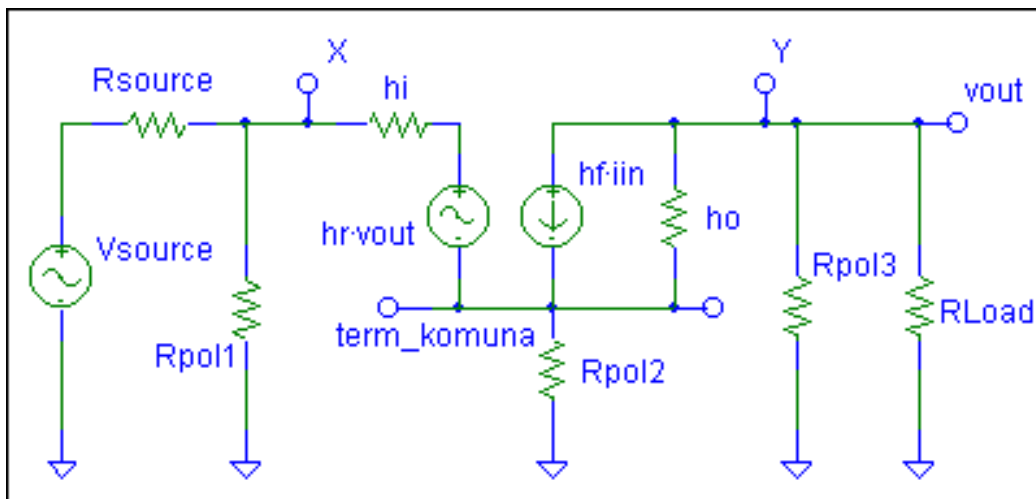
$$Z_{in} = \frac{v_i}{i_i} = R_{BB} // r_{be}$$

Irteerako inpedantzia: kargak (ezkerrerantz) ikusten duen inpedantzia

$$Z_{out} = \langle \text{Thevenin baliokidea kalkulatu} \rangle = R_C$$

Lehen esan bezala, amplifikazioaren oinarria, transistore-efektuak dakarren korronte-amplifikazioa da.

Analisi horiek h parametroak erabiliz ere egin daitezke, hurrengo irudian aurkezten den zirkuitu orokorra erabiliz.



14.3 Irudia. Amplifikazioa analizatzea h parametroak erabiliz: zirkuitu orokorra

Kasu bakoitzaren zirkuitua analizatuz gero, tentsio- eta korronte-irabaziak eta sarrerako eta irteerako inpedantziak kalkulatu genituzke.

14.1.2 KARGA-ZUZEN DINAMIKOIA

Seinaleen osagai alternoen arteko erlazioak linealak direnez, $i_c(t)$ eta $v_{ce}(t)$ aldagaiak zuzen batean irudika daitezke.

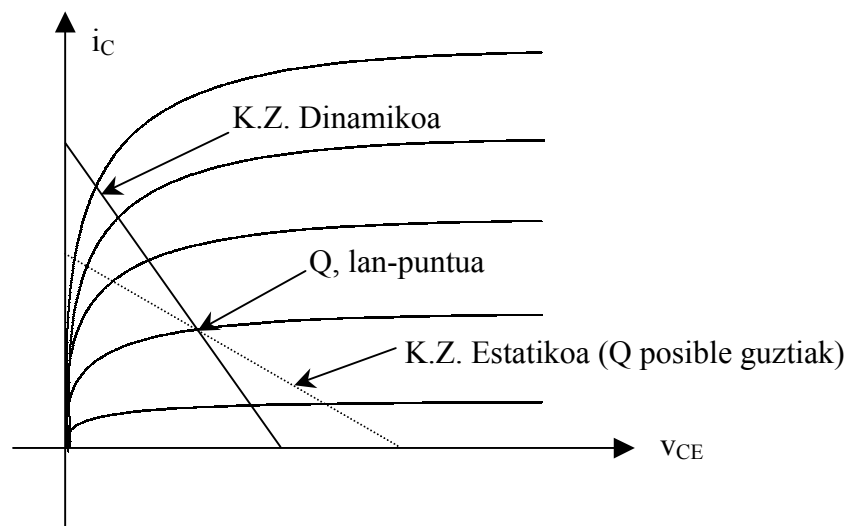
$$v_{ce} = -i_c \cdot (R_C // R_L), \quad \text{eta } x_X(t) = X_X + x_x(t) \text{ denez,}$$

$$(v_{CE} - V_{CE}) = (i_c - I_C) \cdot (R_C // R_L)$$

Hau da, $i_c = i_c(v_{CE})$ funtzioa, V_{CE} , I_C puntutik (Q puntutik) pasatzen den zuzena da:

$$(i_c - I_C) = -(v_{CE} - V_{CE}) / (R_C // R_L)$$

Zuzen hori kanpoko zirkuituak ematen digun **karga-zuzen dinamikoa** da.



14.4 Irudia. Karga-zuzen dinamikoa (npn batean)

Zuzena Q puntutik pasatzen da eta , kasu honetan, $-1/(R_C // R_L)$ da haren malda.

14.1.3 DISTORTSIOA ETA TARTE DINAMIKOIA

Sarrerako seinalearen anplitudea *handia* bada, v_{CE} eta i_c magnitudeen (aurrikusitako) balioak negatiboak izatera irits daitezke. Orduan, transistorea lan-gune aktibotik irtengo da eta asetasunean edo etenduran sartu. Orain arte erabilitako erlazio linealak ez dira beteko eta, horrenbestez, agertzen diren korronteez eta tentsioez ez dute sarrerako seinalearen forma: *distortsio* izeneko fenomeno agertzen da (soinu-anplifikadoreetan, distortsioak (linealtasun ezak) zarata-itxura hartzen du).

Etendurara, $i_c = 0$ denean sartuko gara (eta ez da $i_c < 0$ agertuko $-npn$ kasuan-):

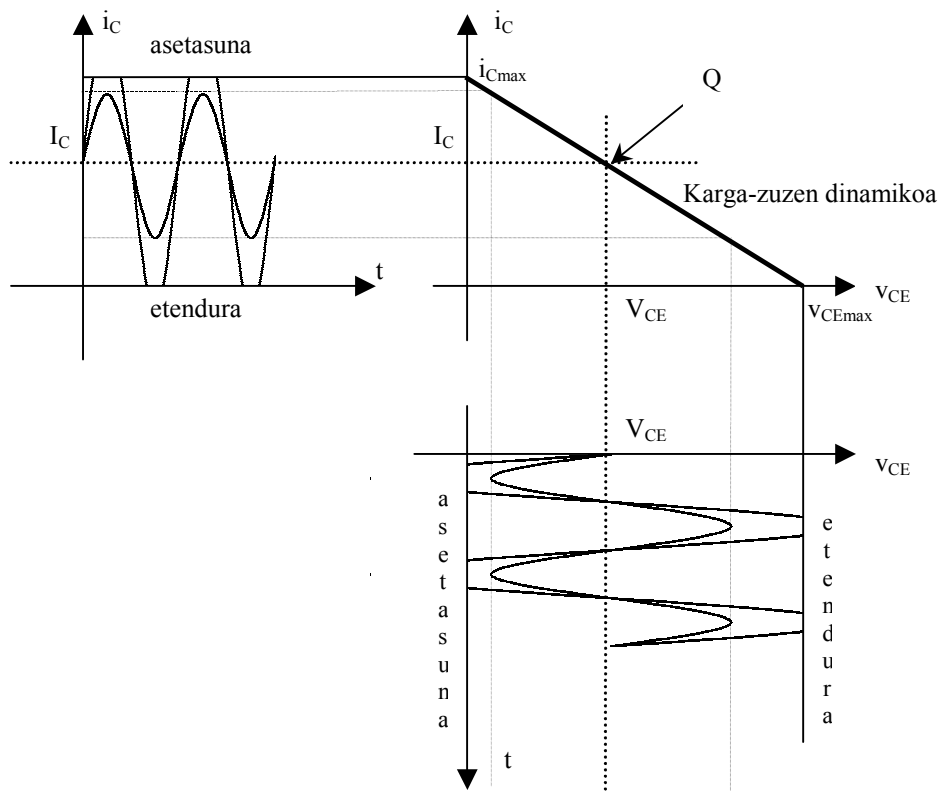
$$v_{CE} = V_{CE} + I_C \cdot (R_C // R_L) \rightarrow v_{ce} = I_C \cdot (R_C // R_L).$$

Beraz, bada lor daitekeen v_{CEmax} jakin bat.

Asetasunean, $v_{CE} \sim 0$ izango da (zirkuituan $-npn$ transistoreekin- ezin izango da v_{CE} negatiborik agertu):

$$i_c = I_C + v_{CE} / (R_C // R_L) \rightarrow i_c = -v_{CE} / (R_C // R_L)$$

Eta horrek i_{Cmax} jakin batera garamatza.



14.5 Irudia. Distortsioa eta tarte dinamikoa

Beraz, badago anplifikatzeko muga bat eta distortsiorik gabeko irteerako anplitude maximo bat. **Distortsiorik gabe lor daitekeen irteerako anplitude maximoa tarte dinamikoa da.**

Kasu horretan, $\min(v_{cemax}-V_{CE}; V_{CE}-v_{cemin})$ adierazpenak ematen digu tarte dinamikoa (irteerako seinale alternoak distortsiorik gabe har dezakeen anplituderik handiena).

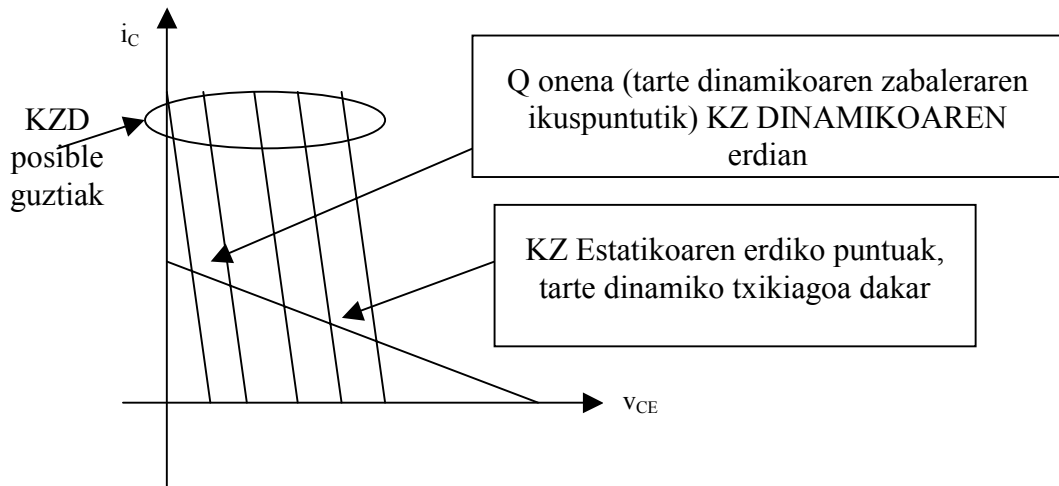
Oharra: $v_{CEmax} < V_{CC}$ beti betetzen da, zeren eta:

$$v_{CEmax} = V_{CE} + I_C \cdot (R_C // R_L)$$

eta $V_{CC} = V_{CE} + I_C \cdot R_C$; eta $(R_C // R_L) < R_C$ baitira.

14.1.3 TARTE DINAMIKOA OPTIMIZATZEN

Tarte dinamikorik handiena izateko, Q karga-zuzen dinamikoaren erdian egotea komeni zaigu geometria dela eta. Egoera horretatik Q asetaserantz edo etendurarantz mugitzen badugu, tartea murrizten dugu, argi eta garbi ikusten denez.



14.6 Irudia. Tarte dinamikorik handiena lortzen

Beraz, Q puntua, ahal izanez gero, karga-zuzen dinamikoaren erdian kokatu beharko genuke (tarte dinamikorik zabalean lortzearren).

Hala beteko bada, $V_{CEmax} = 2 \cdot V_{CE}$

eta $i_{Cmax} = 2 \cdot I_C$

Eta, beraz, $\frac{i_{Cmax}}{V_{CEmax}} = m_{KZD} = \frac{I_C}{V_{CE}}$

Hau da, Q karga-zuzen dinamikoaren erdian kokatzeko, $m_{KZD} = I_C / V_{CE}$.

Horretaz gain, zuzen dinamikoaren malda ahalik eta txikiena izatea komeniko litzateke (luzera maximoa izatearren). Karga-zuzen estatikoa eta dinamikoa bat datozenean lortzen da hori. Beraz, lan-puntuak ez du zuzen estatikoaren erdian egon behar, baina, bi karga-zuzenak berdinak badira Q karga-zuzen estatikoaren erdian kokatzen badugu, **tarte dinamiko handienetako handiena** lortzen dugu egoera horretarako tarte dinamikorik handiena lortzeaz gain.

Beraz, tarte dinamikorik handiena lortzeko:

- a) KZDaren malda minimoa lortu.

R_L kalkulatzeko beste baldintzarik ez badigute ematen, geuk finka dezakegu (kontuz: problemaren baldintzak ondo aztertu behar dira). **Gure ohiko zirkuituetan**, posible bada, $R_L = \infty$ egin behar dugu eta horrela KZD eta KZE bat datoz.

Orduan, karga-zuzena marraztu ondoren, Q erdian kokatuko dugu (posible bada: batzuetan beste baldintza batzuek behartuko dute Q).

- b) Normalean, R_L ez da infinitua.

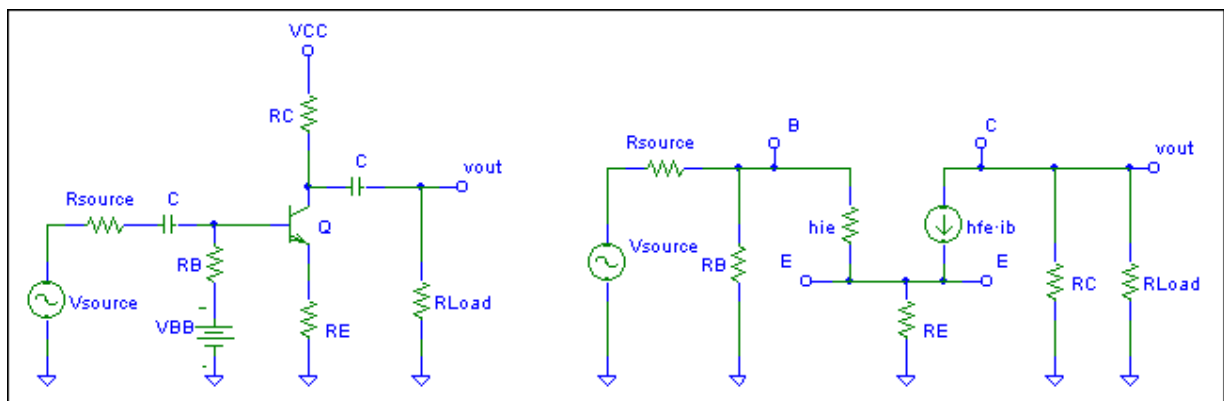
Orduan, karga-zuzen estatikoa marraztu ondoren (eta Q puntua finkatzeko beste baldintzarik ez badago), karga-zuzen dinamikoaren malda duen zuzen bat marraztu. Eskuinerantz edo ezkererantz mugitu, bi aldeetatik distantzia bera izan arte (orduan $v_{Cemax} \sim 2 \cdot V_{CE}$ eta $I_{Cmax} \sim 2 \cdot I_C$).

Horrekin batera, ez dugu aurreko ikasgaietan ikusitakoa ahaztu behar: Q aukeratzekoan, egonkortasuna ziurtatzen dituzten baldintzak jarri beharko ditugu (posible bada).

14.2 Egituren analisia

14.2.1 IGORLE KOMUNNEKO ANPLIFIKADOREA

Egitura horren analisia, 14.1.1 puntuan oinarritzko analisia egiteko erabiltzeaz gain, 6, 7, 11, 13 eta 14 ($R_E = 0$ hartuz) eta 2, 3 eta 9 ariketetan egiten da. Hemen, h parametroen bidezko zirkuitua eta ondorioak aurkezten dira.



14.7 Irudia. Igorle komuneko zirkuitu baliokidea (h parametroen bidez)

Igorle komuneko egituran,

$$A_v = -h_{fe} \cdot \frac{R_B // (h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E)}{[R_S + R_B // (h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E)]} \cdot \frac{R_C // R_L}{h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E}$$

$$A_i = -h_{fe} \cdot [R_B // (h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E)] \cdot \frac{R_C // R_L}{h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E} \cdot \frac{1}{R_L}$$

$$Z_{in} = R_B // (h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E)$$

$$Z_{out} = R_C$$

Askotan, $R_E = 0$ behartzen da, eta orduan:

$$A_v = -h_{fe} \cdot \frac{R_B // h_{ie}}{R_S + R_B // h_{ie}} \cdot \frac{R_C // R_L}{h_{ie}}$$

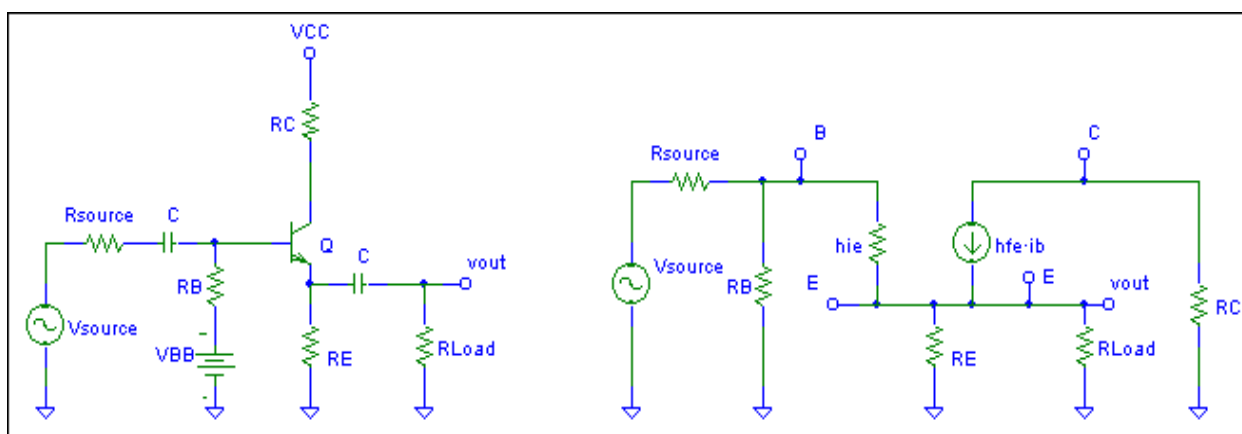
$$A_i = -h_{fe} \cdot \frac{R_B // h_{ie}}{h_{ie}} \cdot \frac{R_C // R_L}{R_L}$$

$$Z_{in} = R_B // h_{ie} \text{ eta } Z_{out} = R_C$$

Ikusten denez, tentsio eta korrante-irabaziak altuak eta negatiboak izaten dira (handiagoak $R_E \sim 0$ bada) eta sarrerako eta irteerako inpedantziak ertainak dira.

14.2.2 KOLEKTORE KOMUNEKO ANPLIFIKADOREA

Hamargarren ariketan lantzen den egitura horri dagokion zirkuitua 14.8 Irudikoa da.



14.8 Irudia. Kolektore komuneko zirkuitu baliokidea (h parametroen bidez)

$$A_v = \frac{R_B // [h_{ie} + h_{fe} \cdot (R_E // R_L)]}{R_S + R_B // [h_{ie} + h_{fe} \cdot (R_E // R_L)]} \cdot \frac{(h_{fe} + 1) \cdot (R_E // R_L)}{h_{ie} + h_{fe} \cdot (R_E // R_L)} \leq 1$$

$$A_i = (h_{fe} + 1) \cdot \frac{R_B // [h_{ie} + h_{fe} \cdot (R_E // R_L)]}{h_{ie} + h_{fe} \cdot (R_E // R_L)} \cdot \frac{R_E // R_L}{R_L}$$

$$Z_{in} = R_B // [h_{ie} + h_{fe} \cdot (R_E // R_L)]$$

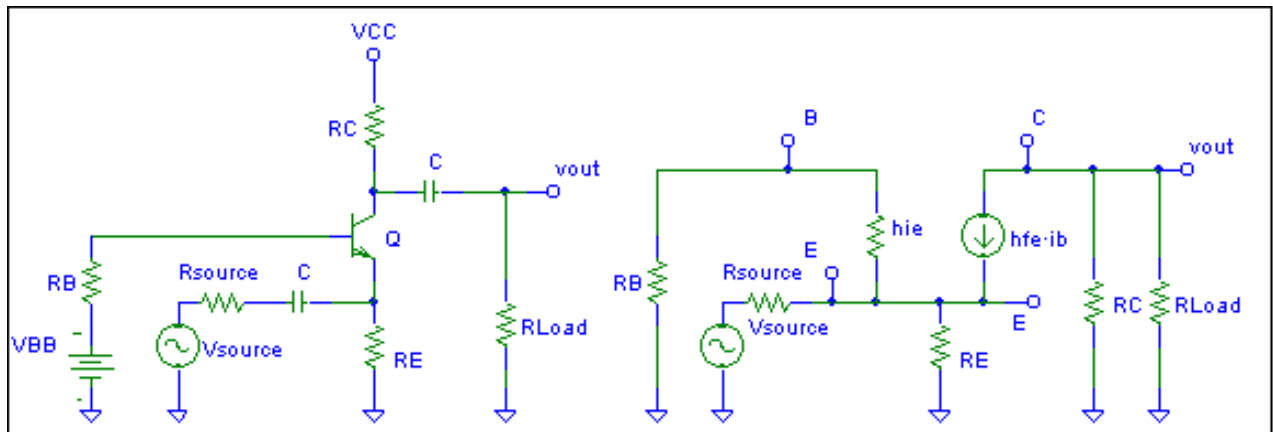
$$Z_{out} = R_E // \frac{h_{ie} + R_B // R_S}{h_{fe}}$$

Kasu horretan, ez dago tentsio-irabazirik baina korrante-irabazia nahiko handia da (eta positiboa). Bestalde, sarrerako inpedantzia oso altua izaten da eta irteerakoa nahiko txikia.

Tentsio-irabazia, $A_v \sim 1$ izaten da eta $v_{out} = v_e \sim v_b = v_{in}$. Nolabait, irteerako tentsioak sarrerakoari jarraitzen dio eta *igorleko jarraitzailea* deitzen diogu egiturari.

14.2.3 BASE KOMUNENKO ANPLIFIKADOREA

Egitura horren zirkuitu orokorra 14.9 Irudikoa da (laugarren eta hamaikagarren ariketetan lantzen da).



14.9 Irudia. Base komuneko zirkuitu baliokidea (h parametroen bidez)

$$A_v = h_{fe} \cdot \frac{R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe} + 1}}{R_S + R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe} + 1}} \cdot \frac{R_C // R_L}{h_{ie} + R_B}$$

$$A_i = \frac{R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe} + 1}}{\frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe}}} \cdot \frac{R_C // R_L}{R_L} \leq 1$$

$$Z_{in} = R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe} + 1} \text{ eta } Z_{out} = R_C$$

Formula horien arabera, tentsio-irabazia handia (eta positiboa) bada ere, korronte-irabazia txikia da. Inpedantziei dagokienez, sarrerakoa txikia da; irteerakoa, berriz, ertaina (handia ere izan daiteke).

14.2.4 EGITUREN ARTEKO KONPARAZIOA

PARAMETROA	EGITURA		
	IGORLE KOMUNA	KOLEKTORE KOMUNA	BASE KOMUNA
A_v (tentsio-irabazia)	Handia eta negatiboa	< 1	Handia eta positiboa
A_i (korronte-irabazia)	$\sim -\beta$	$\sim \beta + 1$	$\sim \beta / (\beta + 1)$
Z_{in}	Ertaina	Handia	Baxua
Z_{out}	Handia / Ertaina	Nahiko txikia	Handia / Ertaina

Gogoan hartu $R_{out} R_L$ kargak ikusten duen inpedantzia baliokidea dela. Irteerako inpedantziak, etapa bat baino gehiago dituen zirkuituen analisia errazteaz gain, lortuko diren loturen (zirkuituen egokipenen) berri ematen digu.

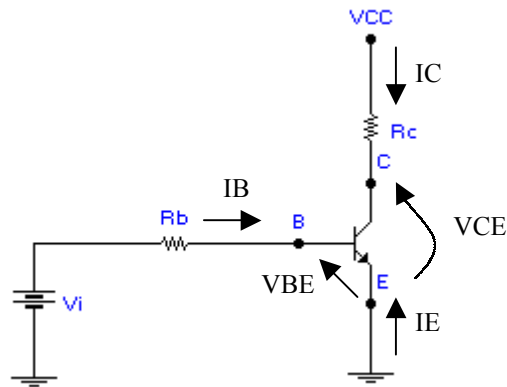
EMAITZEN ANALISIA ETA EGITUREN APLIKAZIOAK:

- Tentsio- eta korronte-irabazi handiak ematen dizkigun egitura bakarra, igorle komunekoa da. Gainera, haren sarrerako eta irteerako inpedantziak egokiak izaten dira gehienetan. Hori dela eta, gehien erabiltzen dena da.
- Kolektore komuneko egiturak erresistentzia oso bestelakoak dituzten etapak egokitzeko (konektatzeko) erabili ohi da.
- Base komuneko egiturak tentsio-irabazi handia lortzen du, seinalea inbertitu edo alderantzatu gabe. Horretaz gain, oso aproposa da bi etapetako inpedantziak korronteari begira egokitu nahi ditugunean (hau da, R_i txikia eta R_{out} handia bilatzen ditugunean).

TRANSISTORE BIPOLARRARI
BURUZKO ARIKETAK

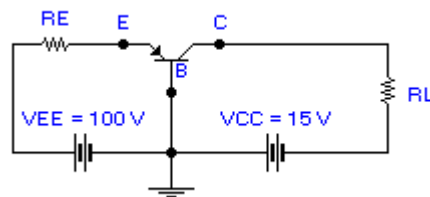
Transistore bipolarrari buruzko ariketak I – Erregimen estatikoa

1.- Irudian agertzen den zirkuituan, analizatu siliziozko transistorearen lan-guneak v_i tentsioaren arabera. Haren igorle/base juntura zuzenean dagoenean, $V_{BE} \sim 0.7 \text{ V}$ da.



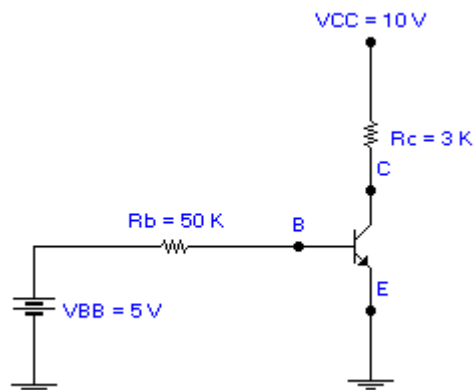
2.- Beheko zirkuituan, kalkulatu Q puntua (lan-puntua):

DATUAK: $\alpha = 0.998$; $|I_{C0}| = 1 \mu\text{A}$; $R_E = 10 \text{ k}\Omega$; $R_L = 1 \text{ k}\Omega$.



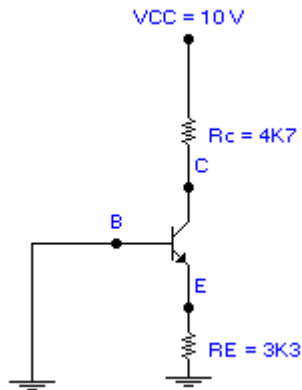
3.- Kalkulatu transistorearen lan-puntua.

DATUAK: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$; $|I_{C0}| = 20 \text{ nA}$; $\beta = 100$.



Transistore bipolarrari buruzko ariketak I – Erregimen estatikoa

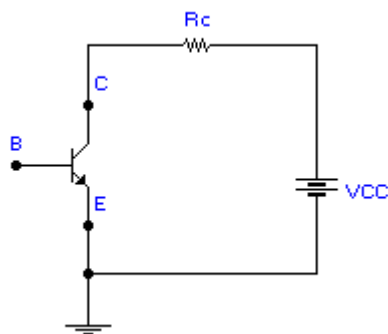
4.- Analizatu beheko zirkuitua.



5.- Irudian agertzen den zirkuituan, $I_B = 0$. Kalkulatu I_C eta V_{BE} Ebers-Mollen eredu erabiliz.

DATUAK: $|J_{ES}| = 2 \text{ pA/cm}^2$; $\alpha_F = 0.98$; $|J_{CS}| = 7 \text{ pA/cm}^2$; $\alpha_R = 0.28$.

$kT/q = 0.025 \text{ V}$; Azalerak: $A_E = A_C = 10^{-4} \text{ cm}^2$.



6.- Siliziozko pnp transistore baten oinarrizko datuak honako hauek dira:

Igorlea: $N_E = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $L_{nE} = 0.3 \text{ }\mu\text{m}$; $w_E = 3 \text{ }\mu\text{m}$; $D_{nE} = 5 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Basea: $N_B = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $L_{pB} = 50 \text{ }\mu\text{m}$; $w_B = 2 \text{ }\mu\text{m}$; $D_{pB} = 7 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Kolektorea: $N_C = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $L_{nC} = 20 \text{ }\mu\text{m}$; $w_C = 200 \text{ }\mu\text{m}$; $D_{nC} = 6 \text{ cm}^2/\text{s}$.

$n_i = 1.5 \cdot 10^{10}$; $V_T = 25 \text{ mV}$.

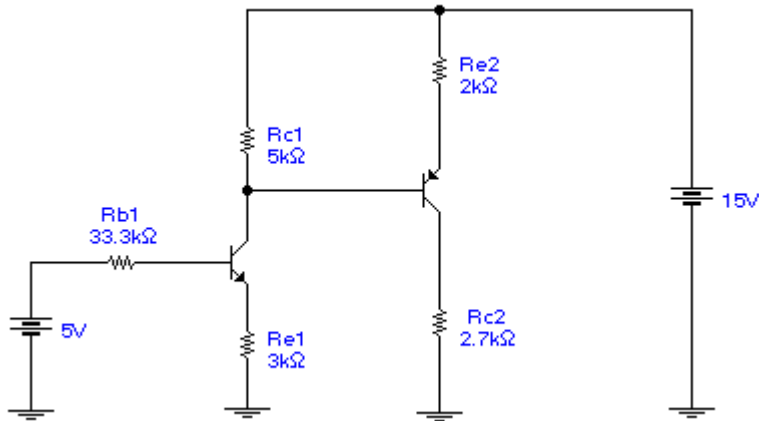
Aktiboan lan egiten duela onartuz, kalkulatu:

- Eramaile-fluxuekin erlazionaturiko korronteen barneko osagaiak.
- Injekzio-eraginkortasuna (γ)
- Garraioko faktorea α_T
- α , β eta I_{C0} .
- Igorleko, kolektoreko eta baseko korronte osoak (I_E , I_B , I_C)

Transistore bipolarrari buruzko ariketak I – Erregimen estatikoa

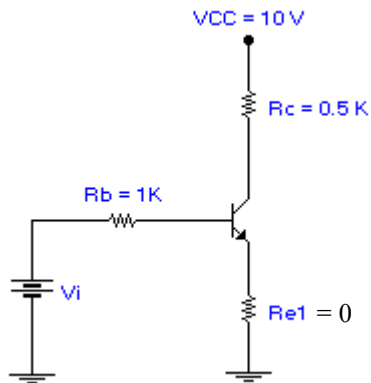
7.- Kalkulatu beheko zirkuituan agertzen diren bi transistoreen korroneak:

DATUAK: $\beta = 100$; $V_{BE1} = 0.7 \text{ V}$; $V_{BE2} = -0.7 \text{ V}$.



8.- Irudiko germaniozko transistorearen parametroak honako hauek dira:

$\beta = 100$; $|I_{C0}| = 5 \mu\text{A}$; $|I_{E0}| = 2 \mu\text{A}$.



Kalkulatu:

- α_R parametroa
- Kolektoretik pasa daitekeen korronterik altuena ($I_{C_{\max}}$) pasa dadin aplikatu behar den gutxieneko baseko korronea (gutxi gorabehera)
- $I_C = 10.5 \text{ mA}$ izateko behar den v_I .
- $I_B = 300 \mu\text{A}$ bada, zenbat da $V_{CE, \text{sat}}$?

Transistore bipolarrari buruzko ariketak I – Erregimen estatikoa

9.- Beheko zirkuituan, eragiketa eta neurketa batzuk egin dira:

1.- SW_1 etengailua itxi, SW_2 eta SW_3 ireki eta honako korrante hauek neurtu dira:

$$I_E = 10 \mu A \text{ eta } I_C = -9.1 \mu A.$$

2.- SW_2 eta SW_3 itxiz eta SW_1 irekiz, $I_C = 13 \mu A$ neurtu da.

Kalkulatu:

a) Transistorearen α_F eta α_R parametroak

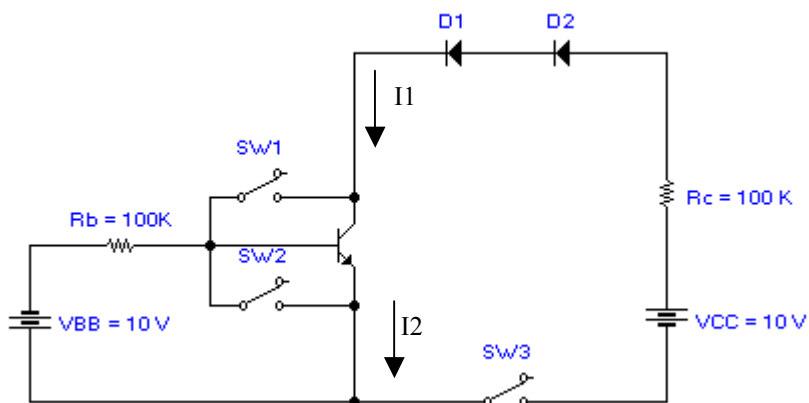
b) I_{C0} eta I_{E0} korronteak

c) SW_1 eta SW_2 irekita eta SW_3 itxita:

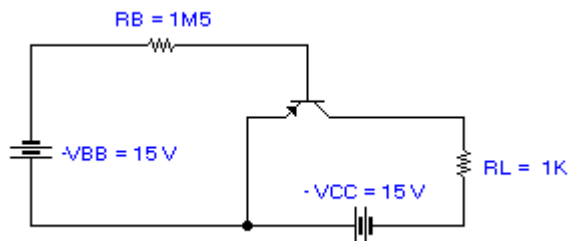
c1) Kalkulatu I_1 eta I_2 (zirkuituan adierazi diren noranzkoetan)

c2) Kalkulatu V_{D1} , V_{D2} , V_{CE} eta V_{BE} .

DIODOEN DATUAK: D_1 eta D_2 berdinak dira eta $I_{sat} = 3.9 \mu A$.

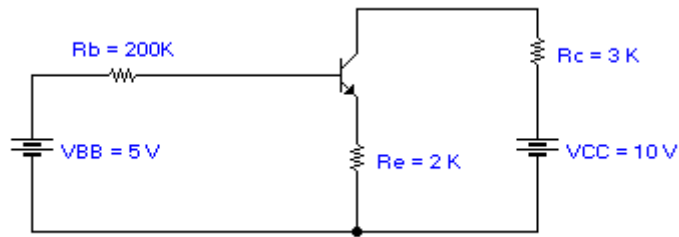


10.- $\alpha = 0.998$ eta $|I_{C0}| = 1 \mu A$ direla jakinez, kalkulatu Q lan-puntua.

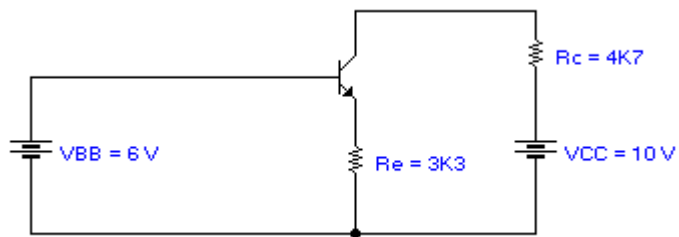


Transistore bipolarrari buruzko ariketak I – Erregimen estatikoa

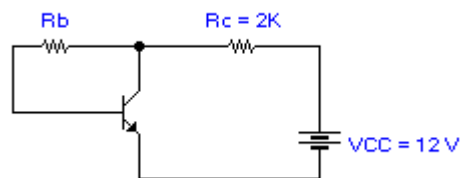
11.- Kalkulatu lan-puntua, $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$; $\beta = 100$ eta $|I_{C0}| = 20 \text{ nA}$ badira.



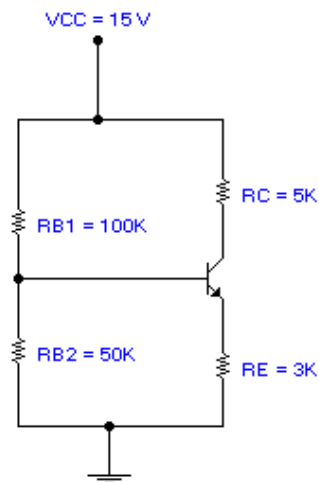
12.- $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$; $\beta = 100$ hartuz, kalkulatu Q.



13.- Kalkulatu $I_C = 2.5 \text{ mA}$ izateko behar den R_B erresistentzia ($\beta = 50$).



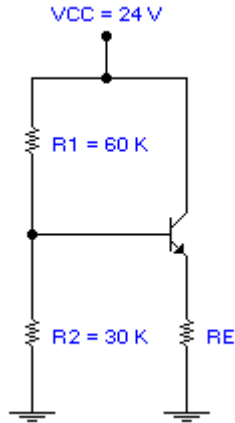
14.- Kalkulatu Q ($\beta = 100$; $I_{C0} \sim 0$).



Transistore bipolarri buruzko ariketak I – Erregimen estatikoa

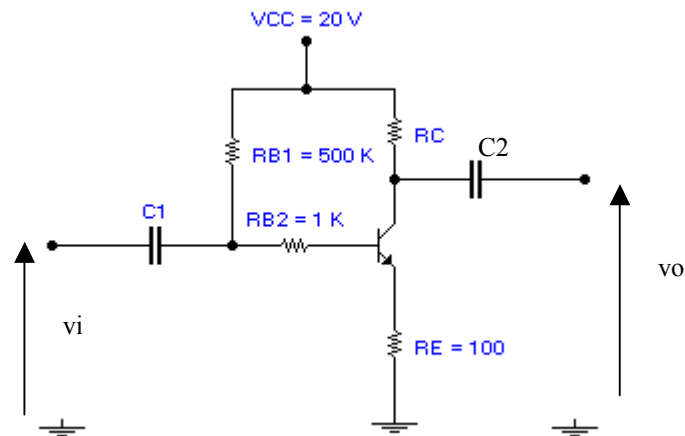
Transistore bipolarren buruzko ariketak I – Erregimen dinamikoa

- 1.- Irudian agertzen den zirkuituan, kalkulatu R_E erresistentzia erregimen dinamikoan g_m (eroankortasuna edo transkonduktantzia) $140 \text{ m}\Omega^{-1}$ izan dadin.



DATUAK: $kT/q = 25 \text{ mV}$; $V_{BE} = 0 \text{ V}$; $\beta = 80$; $I_{CB0} = 0 \text{ A}$.

- 2.- Irudian agertzen den zirkuituaren portaera analizatu nahi dugu sarrerako v_i sinusoidala (eta txikia) denean.



Horretarako:

- Irudikatu polarizaziorako eta seinale txikirako zirkuitu baliokideak.
- Kalkulatu (R_c erresistentziaren balioaren arabera) I_B , I_C , V_{CE} eta V_C (hau da, lan-puntua).
- Kalkulatu, R_c parametroaren arabera, $A_V = v_o/v_i$ (tentsio-irabazia) eta $v_{ce}(v_i)$ (hau da, kolektore-igorle tentsioa sarrerako tentsioaren arabera). Hartu $R_c \gg R_e$.
- Kalkulatu (R_c erresistentziaren funtzioan) transistorea eteten eta asetzen duten sarrerako seinalearen (bi) anplitudeak.

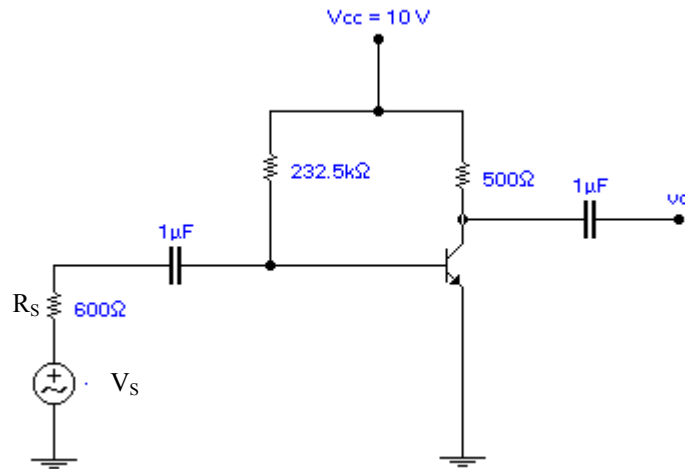
Transistore bipolarrari buruzko ariketak I – Erregimen dinamikoa

- e) Kalkulatu zenbat izan behar duten R_c erresistentziak eta sarrerako seinalearen anplitudeak etendurara eta asetasunera anplitude berdinarekin heltzeko.
- f) $R_c = 2k5$ eta v_i -ren anplitudea $= |v_i| = 100$ mV hartuz, kalkulatu v_c eta v_o seinale osoak (osagai jarraitua eta alternoa).

DATUAK: $C_1 = C_2 = \infty$; $\beta = 100$.

3.- Irudian agertzen den zirkuituan, $I_C = 8$ mA dela dakigu. Kalkulatu:

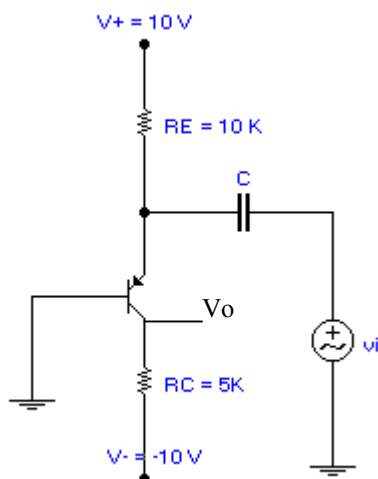
- a) Irteerako seinalearen puntako balioa $V_0 = 2$ V izan dadin behar dugun $v_{sorgailu}$ sarrerako seinalearen puntako balioa: V_s .
- b) Sarrerako seinalearen puntako balioa $V_s = 2$ mV denean lortzen den V_0 (irteerako seinalearen puntako balioa).
- c) Errepikatu aurreko atala, $V_s = 265$ mV denean.
- d) Azaldu emaitzak.



Transistore bipolarren buruzko ariketak I – Erregimen dinamikoa

- 4.- Irudian agertzen den zirkuituaren tentsio-irabazia eta puntu batzuetan ditugun seinaleen forma analizatu nahi ditugu. Kalkulatu v_E eta v_C (osoak) sarrerako seinale sinusoidalaren puntako balioa $V_i = 10 \text{ mV}$ denean ($\beta = 100$).

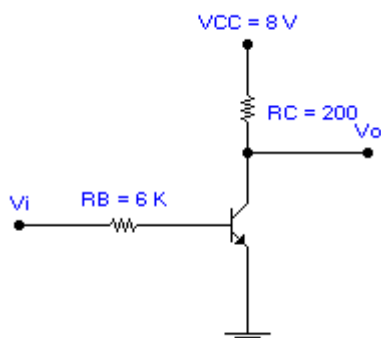
Irteeran distortsiorik agertzea saihestu nahi badugu, zenbat da v_i seinalearen gehieneko balioa?



OHARRA: C kondensadorearen helburua v_i seinalearen eransketa erraztea da, eta, horretarako, bi baldintza betetzea komeni da: polarizazio-puntuan efekturik ez izatea (hau da: v_i sartzerakoan, Q ez aldatzea) eta osagai jarraitua alternoko iturrirantz joatea eragozteko (dc osagaia geldiarazi edo blokeatu egiten da). Horretarako, paseko kondensadorea (erdaraz, coupling capacitor) nahiko handia izaten da (kasu idealean, $C = \infty$ hartzen da). Haa, seinale jarraitua analizatzerakoan inpedantzia infinitua hartzen badu ere, zirkuitulaburtzat har dezakegu lan-maiztasunean ($Z_C(f=0) = \infty$ eta $Z_C(f \neq 0) = \infty$).

- 5.- Zirkuituko transistorearen ezaugarriak 1, 2 eta 3 irudietakoak dira. Irudikatu $0 < V_i < 3.6$ volt tartean eta baliorik interesgarrienak adieraziz honako funtzio hauek:

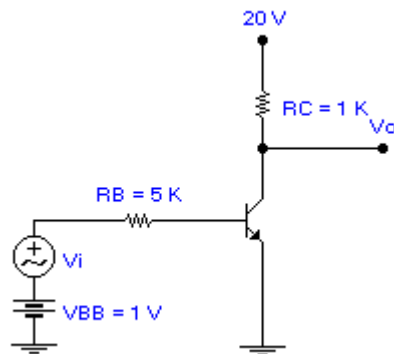
- $I_B = I_B(V_i)$
- $I_C = I_C(V_i)$
- $V_0 = V_0(V_i)$



Transistore bipolarren buruzko ariketak I – Erregimen dinamikoa

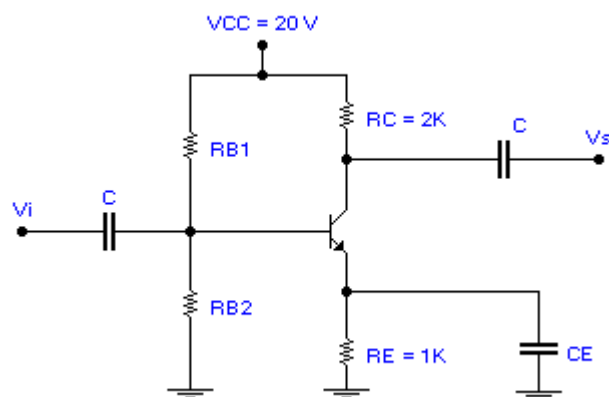
6.- Zirkuituko transistorearen ezaugarriak 4 eta 5 irudietan agertzen dira.

- Kalkulatu Q eta β .
- Lortu V_{CE} - V_{BE} transferentzia-kurba.
- Irudikatu irteerako seinalea honako kasu hauetan:
 - $V_i = 0.05 \sin(\omega t)$ volt denean
 - $V_i = 0.7 \sin(\omega t)$ volt denean



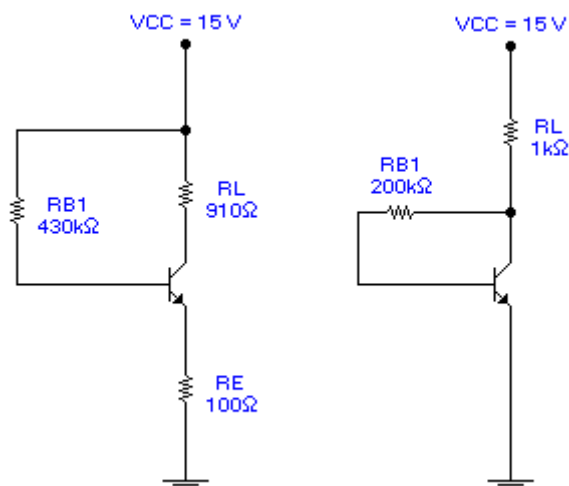
7.- i_C korrantean gehienezko ibilbide simetrikoa lortzeko, zenbat izan behar dute R_{B1} eta R_{B2} erresistentziak?

DATUAK: $\beta = 100$; $I_{C0} = 0$.

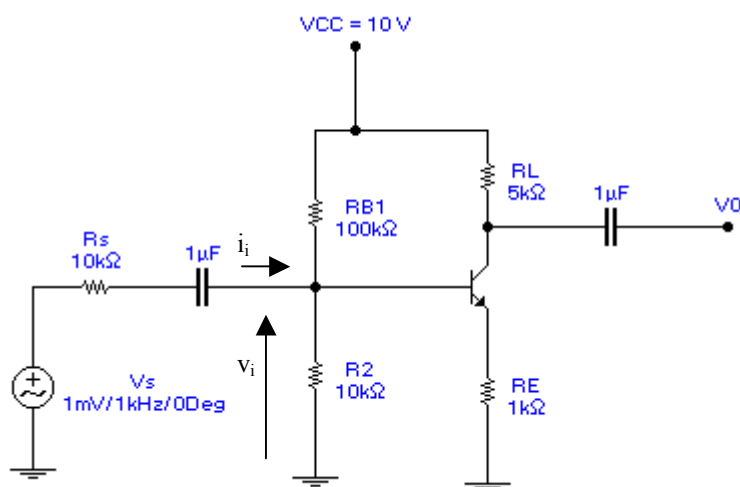


Transistore bipolarri buruzko ariketak I – Erregimen dinamikoa

- 8.- Irudietako transistorea era egonkorrean polarizatu nahi dugu, β parametroan egon daitezkeen gorabeheren aurrean. Beheko egiturak hartzen ari gara kontuan. $100 < \beta < 300$ bada, zein da polarizazio-zirkuiturik egokiena? ($V_{BE} = 0.7 \text{ V}$).



- 9.- Irudian agertzen den zirkuituan, $h_{fe} = 50$ eta $h_{ie} = 1.1 \text{ k}\Omega$ dira ($h_{oe} = 1/40 \text{ k}\Omega$ eta $h_{re} = 2.5 \cdot 10^{-9}$ aintzat ez hartzeko modukoak). Kalkulatu:

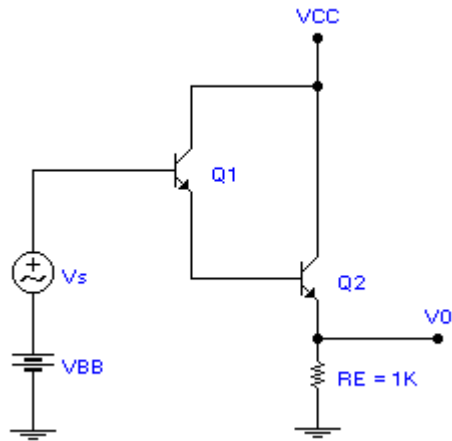


- R_1 (sarrerako inpedantzia: sarrerako terminaletatik ikusten den inpedantzia — altxanoan — v_i/i_i).
- $A_I \equiv i_0/i_i$ (korrante-irabazia) eta $A_V \equiv v_0/v_i$ (tentsio-irabazi lagungarria).
- $A_{VS} \equiv v_0/v_s$ (tentsio-irabazi *erreal*a, tentsio-sorgailuaren barneko inpedantzia kontuan hartuz kalkulatzen dena: $R_S = 0$ denean, $A_{VS} = A_V$).
- R_0 (irteerako inpedantzia: kargak ikusten duen inpedantzia —irteerako terminaletatik ikusten den inpedantzia— altxanoan. Kontuz: ez da v_0/i_0).

10.- Beheko zirkuituko transistore-konbinaketak DARLINGTON izena du.

Kalkulatu R_i , A_v eta A_i . Honako hauek dira transistoreen datuak :

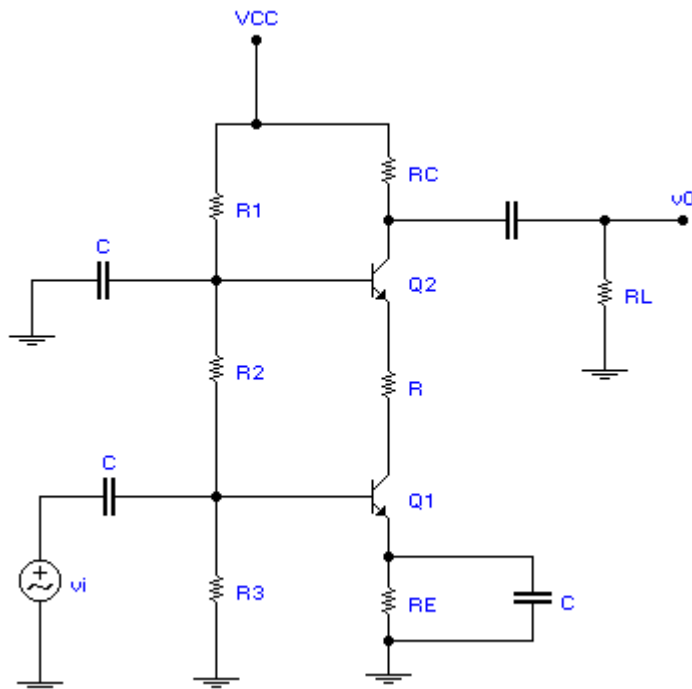
$$h_{11} = h_{ie} = 1.1 \text{ k}\Omega; h_{12} = h_{re} = 1; h_{21} = h_{fe} = -51; h_{22} = h_{oe} = 1/(40 \text{ k}\Omega).$$



11.- Irudian agertzen diren bi transistoreak berdinak dira.

DATUAK: $h_{ie} = 2\text{K}5$; $h_{fe} = \beta = 100$; $h_{oe} = 0 \Omega^{-1}$; $I_{C0} = 0 \text{ pA}$; $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$; $C = \infty \text{ F}$.

$V_{CC} = 20 \text{ V}$; $R_1 = 134 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 16 \text{ k}\Omega$; $R_C = 10 \text{ k}\Omega$; $R_L = 10 \text{ k}\Omega$; $R_E = 1\text{k}\Omega$



Transistore bipolarren buruzko ariketak I – Erregimen dinamikoa

Kalkulatu:

- Kolektoreko korranteak (ebazpena erraztearren, baseko korranteak aintzat ez hartakotzat jo daitezke, R_1 , R_2 eta R_3 erresistentziak zeharkatzen ditu(zt)en korrante(ar)ekin alderatuz gero).
- R erresistentziaren balioa, $V_{CE1} = V_{CE2}$ izan daitezen.
- Tentsio-irabazia.

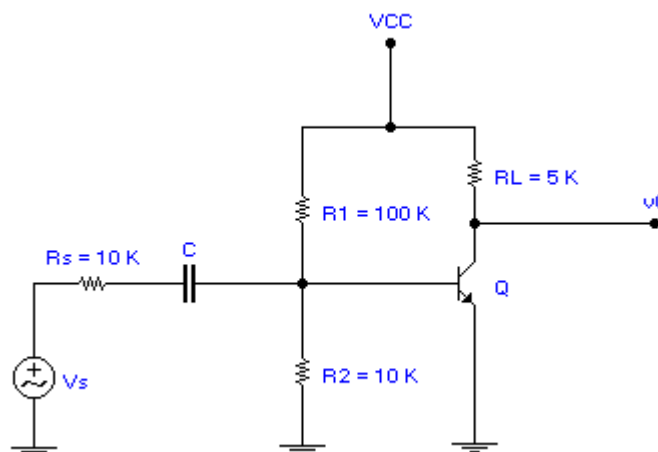
OHARRA: $h_{fb} = -h_{fe}/(1+h_{fe})$

12.- $V_{CC} = 20$ V elikadura-tentsioa duen autopolarizazio-zirkuitu batean, $\beta = 50$, $V_{BE} = 0.8$ V dituen transistore bat erabilitalan-puntu egokia genuen ($I_C = 2$ mA eta $V_{CE} = 14$ V), baina transistorea erre da eta beste bat jarri behar izan dugu. Oraingo transistorearen parametroak $\beta = 200$ eta $V_{BE} = 0.6$ V dira (I_{C0} ez da ia aldatzen).

β berriak dakarren I_C korrantearen hazkundera (ΔI_{C1}) 0.1 mA baino txikiagoa izatea nahi dugu; eta beste hainbeste V_{BE} tentsioari dagokionez ($\Delta I_{C2} = 0.1$ mA). Hau da, transistore berria sartzean, $I_C \leq 2.2$ mA. Kalkulatu lau erresistentzien balioak.

13.- Irudian agertzen den zirkuituan, kalkulatu A_V , A_{VS} , A_I eta R_I :

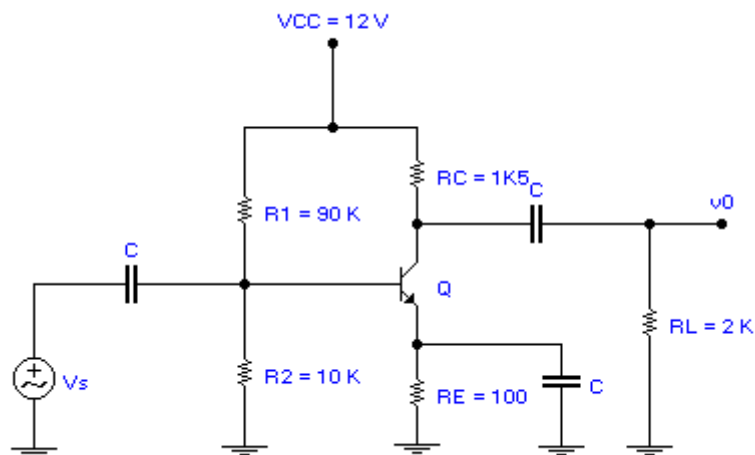
DATUAK: $h_{ie} = 1.1$ k Ω , $h_{re} = 2.5 \cdot 10^{-4}$, $h_{fe} = 50$, $1/h_{oe} = 40$ k Ω .



14.- Irudian agertzen den zirkuitu amplifikadorean:

- Kalkulatu karga-zuzen estatikoa (KZE) eta karga-zuzen dinamiko (KZD), eta Q puntua argi eta garbi adierazi.
- Irudikatu seinale txikiko zirkuitu baliokide osoa.
- Zirkuitu baliokide sinplifikatua erabiliz, kalkulatu A_V , A_I , R_I eta R_O .
- Zenbat da distortsiorik sartu gabe aplika dezakegun V_s tentsioaren gehieneko balioa.

DATUAK: $h_{oe} = h_{re} = 0$; $h_{ie} = 2 \text{ k}\Omega$; $h_{fe} = 100$; $\beta = 100$; $C = \infty$.



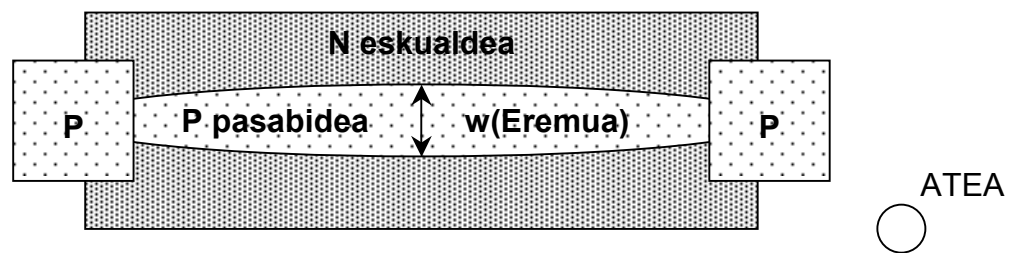
15. EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREAK I: SAILKAPENA ETA MOSFETA

KONTZEPTUA

Eremu-efektuko transistorea (Field Effect Transistor, FET) zirkuitu analogiko eta digitaletan maiz erabiltzen den transistore mota da. Material erdieroalez osatzen den eragingailu honetan, eremu batek kontrolatzen du korronea (eramaile-jarioa) eta hortik datorkio *FET* izena. FETetan, eramaile mota bakar batek hartzen du parte eta, horren ondorioz, dispositibo *polobakarra* da (*Bipolar Junction Transistorea* ez bezala).

FETetan, korronteak pasabide estu eta luze batetik pasatu behar du (ikus 15.1 Irudia). Eremuak bide horren zabalera modulatu du eta, horren bidez, transistore mota horren funtzionamendua kontrolatzen du. Pasabidea n edo p motakoa izan daitekeenez, bi transistore (azpi)mota izango ditugu beti: n pasabidekoak eta p pasabidekoak.

Ikusiko dugunez, FETek (BJTek bezala) tentsioz kontrolatutako korronte-sorgailu modura edo kontrolatutako etengailu gisa lan egin dezakete. Erabilera horietaz gain, tentsioaren bidez kontrolatutako erresistentziak eraikitzeke ere erabiltzen dira.



15.1 Irudia. P pasabideko FETen funtzionamenduaren oinarria

SAILKAPENA

Bi mota nagusi daude (gero, bakoitza p eta n azpi-motetan berizten da):

- Isolaturiko Atekoak edo Metal - Oxido - Erdieroale FETak; MOSFET edo MOST (Metal Oxide Semiconductor FET edo MOS Transistor) dute izena.

Horietan, *metalaren eta erdieroalearen artean aplikatzen den tentsio batek (V_G) kontrolatzen du pasabidearen eroankortasuna*. Oxidoak bi material horiek isolatzen ditu. Bi azpimota daude:

- Jatorrian (orekan, $V_G = 0$ V denean) pasabiderik ez badago, aplikatutako tentsioaz, normalean korronea ahalbidetzeko pasabidea sortzea bilatzen dugu. Pasabidea eraikitzeke eramaileak metatu nahi ditugu eta Metatzezko / Aberastezko FETa dugu orduan.
 - Jatorrian ($V_G = 0$) pasabiderik badugu, aplikatutako tentsioak, normalean, pasabidea estutzea/murriztea bilatzen dualdaketak eragiteko (korronea etetea kasu). Murrizketazko / Urritze FETa dugu orduan.
- Junturako atekoak.
 - Junturako FETa: JFET (Junction Field Effect Transistor). Horietan, *alderantziz polarizaturiko bi junturen zabalaren bidez* modulatu da pasabidearen eroankortasuna.
 - Metal-Erdieroale FETak: MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). MOSFETak bezalakoak dira, baina isolamendurik gabekoak.

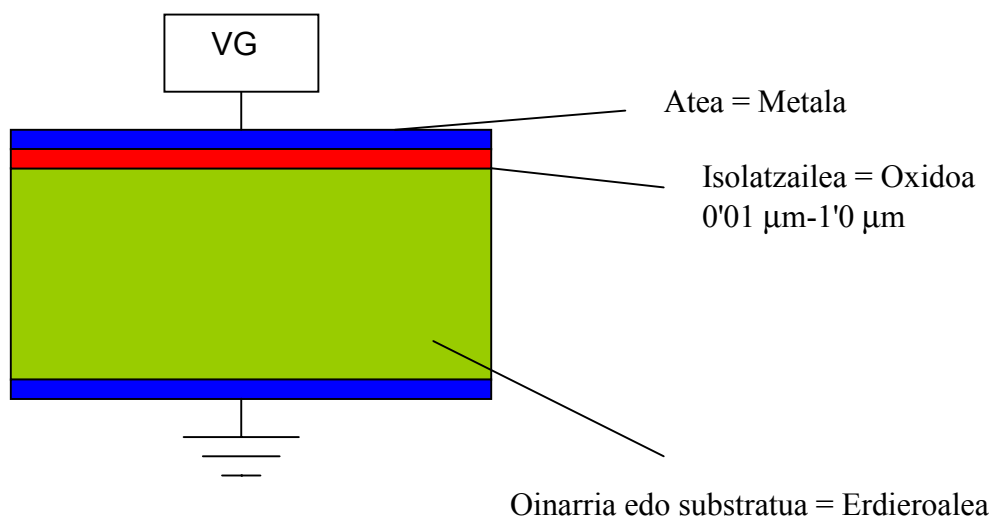
		Eragingailuaren izena	
		Orekan $w = 0$	Orekan $w > 0$
Atea	Isolatua (MOSFET/MISFET)	Ugaltze MOSFETa	Urritze MOSFETa
	Junturazkoa	-	JFET (pn)
		-	MESFET (p-metal)

Eragingailu horiek guztiek askotariko egiturak izan arren beren funtzionamenduaren funtsa berbera denez, antzeko ezaugarriak dituzte eta, horrenbestez, ekuazio eta ezaugarri-kurba berdintsuak izaten dituzte.

15.1 MOSFET transistorearen oinarria: MOS egitura

15.1.1 METAL-OXIDO-ERDIEROALE EGITURA OREKAN (MOS)

MOS egitura kondentsadore berezia da, MOS-C eta dispositibo askoren oinarria da, pn junturarekin gertatzen zen bezala.



15.2 Irudia Atearen eta substratuaren arteko tentsioa: V_G

MOSa egiteko, silizioaren gainazala oxidatu (SiO_2 oxidozko geruza isolatzaila sortu) eta, gainean, metalezko geruza eroalea ezartzen da (Al). Eroalea, metalaren ordez, silizio polikristalino oso dopatua izaten da. Isolatzaila ere ezberdina izan liteke; beraz, MIS, Metal Insulator Semiconductor, da izen egokiagoa, eta, egitura horretan oinarritutako

transistoreetarako, IGFET (Insulated Gate FET, ate isolaturiko FET) izena aproposagoa litzateke, baina MOS eta MOSFET izenak erabili ohi ditugu.

MOS egitura idealaren ezaugarriak:

- Erdieroalearen gainazaleko ezaugarriak eta bolumenekoak guztiz berdinak dira.
- Oxidoa isolatzaile perfektua eta karga elektrikorik gabekoa da.
- V_G edozein izanda ere, atearen eta substratuaren artean ez dago korrante jarraiturik, oxido batez perfektuki isolaturik baitaude.

15.1.2 MOS EGITURAREN PORTAERA TENTSIOPEAN

Hiru egoera bereizten dira ezarritako V_G ateko tentsioaren arabera.

Oharra: hurrengo azalpena **p motako erdieroaledun** MOSarentzako da (n motakodunetan polarizazioaren, kargaren eta eramaileen zeinua alderantzizkoa da).

1. Metaketa: $V_G < 0$

Kondentsadoreetan gertatzen den bezala, erakarren elektrostatiakoaren eraginez, metala karga negatiboarekin eta erdieroalea karga positiboarekin gelditzen dira oxidoarekin muga duten gainazaletan. Erdieroaleko karga positiboak, elektroiei falta duten Si atomoak dira; hau da, hutsuneen baliokideak dira. Tentsioak hutsuneak metatu ditu, eta, ondorioz, eroankortasuna handitu.

2. Deplexioa edo hustuketa: $V_G > 0$

Metalean, karga positiboak agertzen dira eta, erdieroalean, berriz, negatiboak. Erdieroaleko elektroiei berri horiek hutsuneak betez, eramailerik gabeko gunea sortzen dute, deplexio gunea, hain zuen. Elektroiak ez dira gainazalean pilatzen, hutsuneen tokiak "erosoagoak" direlako.

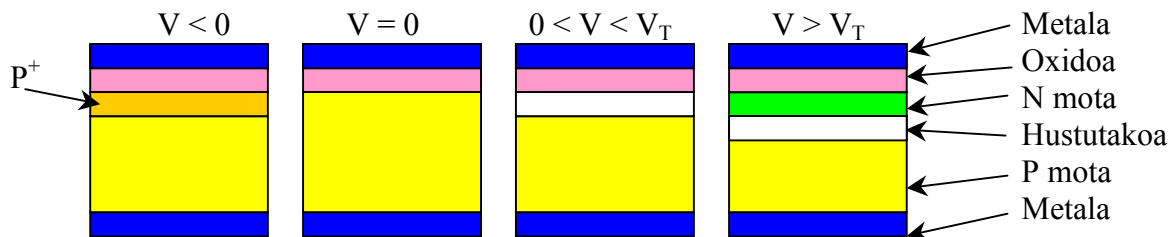
$V_G \uparrow \Rightarrow$ Deplexio gunearen zabalera \uparrow

Deplexio- edo hustuketa-gunean ez dago eramailerik eta, beraz, eroankortasunik ere ez. Hustuketak p motako eskualde hori bete dezake, N_A ezpurutasun hartzaileen kontzentrazioa V_G tentsioak eragindako karga-kopuruak berdintzen duenean. Tentsio berezi hori atariko tentsioa da, V_T , Threshold Voltage.

3. Alderanzketa edo inbertsioa: $V_G > V_T$

Tentsio horrek erdieroalera bidalitako elektroietako batzuek, eskualde bateko hutsune guztiak betez, hustutako eskualde bat sortzen dute eta beste batzuek, berriz, oxidoaren ondoko gainazalean pilatzen dira, oso geruza mehean. Elektroietako askeak dituen n motako geruza bat sortzen da. Nolabait, erdieroale mota aldatu da.

Alderanzketako geruza deituriko geruza hori eroalea da, bertako elektroietak mugikorrek baitira.



15.3 Irudia Metaketa – Oreka – Hustuketa - Alderanzketa

p motako oinarria berez n motako pasabidearekin

Fabrikazio-prozesuan, oinarriaren kontrako motako geruza bat eraikitzen bada oxidoaren azpian. Lehenago esandakoek baliagarri izaten jarraitzen dute, baina V_T balioa aldatuta (orain negatiboa izango da).

Orduan:

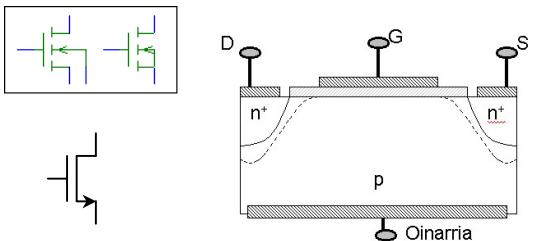
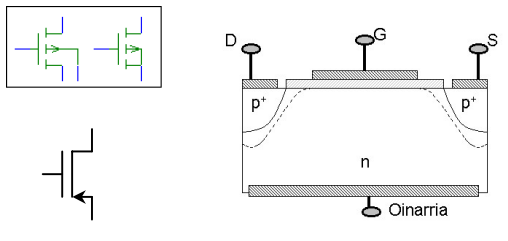
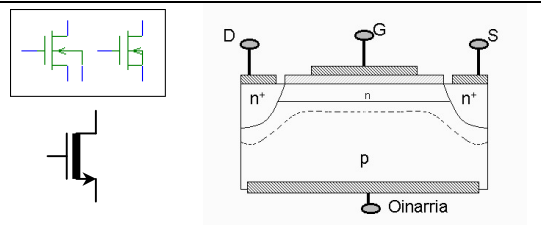
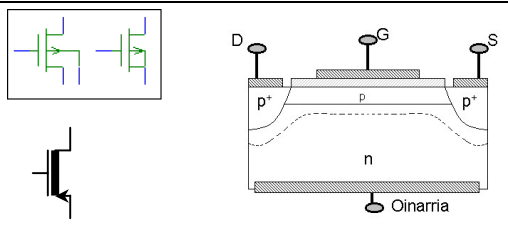
- Tentsio positiboak aplikatuz gero, n kanala zabalagoa (sakonagoa) izango da.
- Tentsio negatiboak aplikatzean, n pasabidea sortzen duten elektroietako askeak desagertzen hasiko dira.
- V_T ($-|V_T|$) tentsiotik aurrera ($V_G < -|V_T|$) pasabidea erabat desagertzen da (hustutako eskualde bat agertzen da eta).
- Tentsio oso negatiboek, lehenago n zen eskualdea p bihurtzen dute.

N motako oinarriak: Argi dagoenez, tentsio oso positiboetan ez da kanalik izango oinarria eta pasabidea kontrako motakoak direnean (p motako kanala) eta, oso negatiboa denean, pasabidea izango dugu. V_T tentsio batek markatuko digu bi kasuen arteko muga: (V_T positiboa bada, kanala berez izango dugu eta urritze (p kanaleko) MOSFETa izango dugu; V_T negatiboa bada, orekan ez dago pasabiderik: ugaltze (p kanaleko) MOSFETa izango dugu).

15.2 MOSFET transistorearen egitura, motak eta funtzionamendua

15.2.1 MOSFETAREN EGITURA ETA MOTAK

MOSari, oinarriaren kontrako motako bi eskualde gehituz (sakoneran modulatu edo sor daitekeen eskualdearen bi muturretan) MOSFETaren egitura lortzen dugu. Guztira, lau aukera daude: p oinarrian, berezko n kanala duena / p oinarrian, n kanala berez ez duena / n oinarria eta berezko p kanalekoa / n oinarrian, p kanala berez ez duena.

	
N pasabideko ugaltze MOSFETA	P pasabideko ugaltze MOSFETA
	
N pasabideko urritze MOSFETA	P pasabideko urritze MOSFETA

15.4 Irudia. Ugaltze (enhancement) (goian) eta Urritze (depletion) (behean) MOSFETak

a) N pasabideko ugaltze MOSFET transistorea

Berez (tentsiorik aplikatzen ez dugunean), ez dago pasabiderik eta etenik dago.

$V_G = 0$ denean, korronteak ezin du npn bidea zeharkatu.

$V_G > V_T$ aplikatuz, oxidoaren azpian elektroien geruza bat, *alderanzketako geruza*, agertzen da. Geruza horren portaera elektrikoa n motakoa da, nahiz eta erdieroalea jatorrian p motakoa izan. Geruzan elektroiak dira eramaile nagusiak eta "nnn" egitura eroalea dugu, *kanala*, alegia.

b) N pasabideko urritze MOSFET transistorea

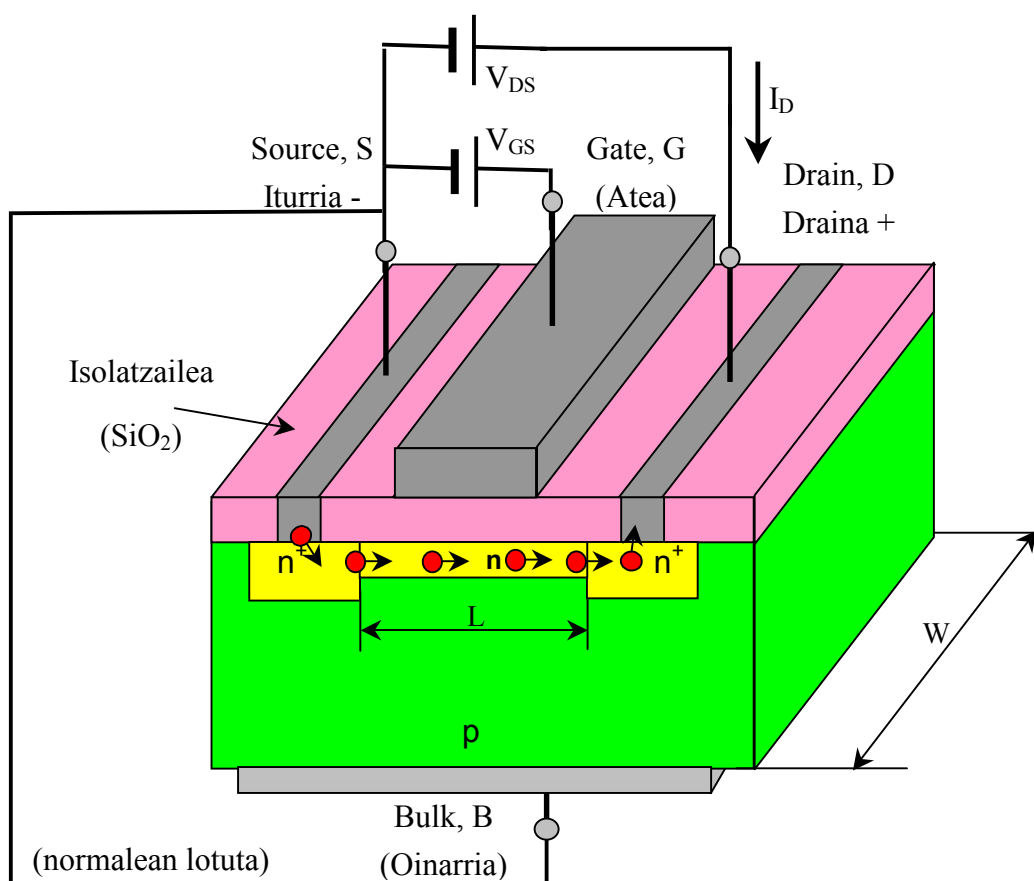
Berez (fabrikazio prozesuan), badago pasabidea eta irekita dago.

$V_G = 0$ denean drainaren (D) eta iturriaren (S) artean, badago eramaileentzako bide erraza edo igarobidea.

$V_G \uparrow$ eroankortasun handiagoa; $V_G \downarrow$ eroankortasun txikiagoa

Mikroelektronikan, transistore asko sartzen dira siliziozko lagin bakarrean, eta p erdieroalea euskarri fisikoa izaten da.

15.2.2 UGALTZE N KANALEKO MOSFETAREN FUNTZIONAMENDUA



15.5 Irudia. MOSFETaren egitura, tentsioak, korrontea eta eramaile-fluxua

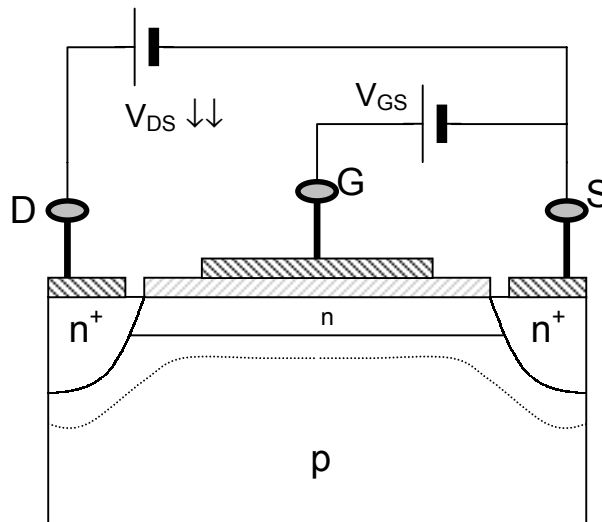
Abiapuntuak:

- Iturria (S) eta oinarria zirkuitulaburtu ohi dira eta, Atearen eta Iturriaren/oinarriaren artean, V_{GS} tentsioa aplikatzen dugu. Tentsio horren arabera sortu ($V_{GS} > V_T$) edo desagertuko da ($V_{GS} < V_T$) pasabidea.
- Drainaren (D) eta iturriaren artean, V_{DS} tentsioa (definizioz positiboa, n pasabideko MOSFETan; negatiboa p kanalekoetan) aplikatzen da, pasabideko eramaileen fluxua eragiteko asmoz (**iturritik drainerako jarria, definizioz**). Korrontea ager liteke drainaren eta iturriaren artean (I_{DS}):

- Pasabiderik ez badago, ez dago korronterik $\rightarrow I_D = 0$. **ETENIK DAGO (ETENDURA)**.
- Pasabidea sortuz gero, $I_D = V_{DS}/R_{pasabidea} > 0$ da Ohmen legea aplikatuz gero [Erresistentzia, materialaren, geometriaren eta kontzentrazioaren menpe dago, beraz, besteak beste, V_{GS} -tentsioaren menpe].

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{pasabidea}} = G_{pasabidea} \cdot V_{DS} = k_1 \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS}$$

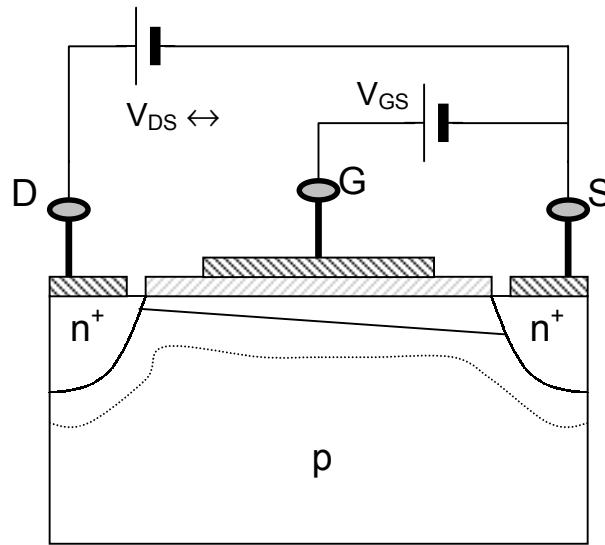
Portaera erresistiboa edo lineala du kasu horretan. (MOSa, V_{GS} tentsioak kontrolaturiko balioa duen erresistentzia da). **ESKUALDE LINEALEAN EDO ERRESISTIBOAN GAUDE.**



15.6 Irudia. Pasabidea V_{DS} txikia denean

Arrazoiketa horrek $V_{DS} \ll V_{GS}$ denean bakarrik balio digu.

- V_{DS} hain txikia ez denean, ($\sim V_{GS}$ denean), $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} < V_{GS}$ eta, horrenbestez, pasabidearen sakonera ezberdina izango da iturriaren eta drainaren inguruetan. Izan ere, V_{DS} haztean (V_{DG} haztean), pasabidea estutzen hasten da drainaren aldetik. Kanalaren erresistentzia hasierako balioa baino handiagoa gertatzen da. **ESKUALDE GRADUALEAN GAUDE.**



15.7 Irudia. Pasabidea V_{DS} hazten hasten denean

V_{DS} igotzean, korronteak gora egin du, baina aurreko joera erresistiboa ikusita pentsa genezakeena baino gutxiago.

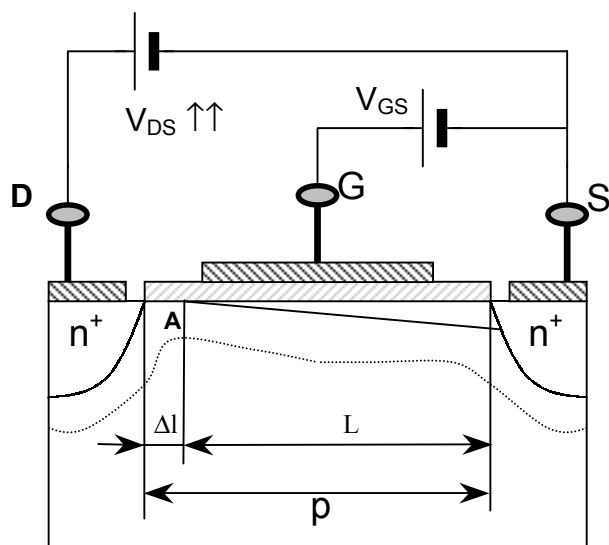
$$I_D = k_2 \cdot (2 \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2)$$

- V_{DS} altua denean, $V_{GD} \leq V_T$ ($V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} \leq V_T \rightarrow V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$) gerta liteke eta, ondorioz, drainaren aldean, pasabidea ito daiteke. Hori betetzen duen V_{DS} minimoa pinch-offeko tentsioa edo itotze tentsioa da ($V_{DS \text{ p. off}} = V_{GS} - V_T$). Pasabidean jauzten da tentsio hori.

Une horretan, $I_D \cdot R_{\text{zabalik}} \text{ geratzen den pasabidea} = V_{DS \text{ pinch off}}$

Eskualde gradualaren amaieran eta **ASETASUNAREN HASIERAN GAUDE.**

Demagun $V_{DS} > V_{DS \text{ pinch off}}$ eta, beraz $V_{GD} < V_T < V_{GS}$. Drainaren eta iturriaren artean, A izeneko puntuan, $V_{GA} = V_T$, pasabidea ixten da; itotzen da.



15.8 Irudia. Pasabidea $V_{DS} > V_{DS\ pinch\ off}$ denean ($V_{AS} = V_{DS\ pinch\ off}$)

A puntutik iturriraino, kanala zabalik egongo da, baina drainean itota.

V_{DS} tentsioa bitan banatzen da:

- $V_{AS} = (V_{DS\ pinch\ off}) = I_D \cdot R_{zabalik\ geratzen\ den\ pasabidea}$ erresistiboa da
- $V_{DA} = V_{DS} - V_{AS} = V_{DS} - (V_{GS} - V_{GA}) = V_{DS} - (V_{GS} - V_T)$, hustutako (beraz, oso erresistiboa den) eskualde bat zeharkatzean I_D korroneak eragiten duen tentsioa da $\rightarrow V_{DA} = I_D \cdot R_{hust}$.

$V_{DA} = V_{DS} - V_{DS\ pinch\ off}$, oso distantzia laburrean jauzten da ($\Delta L \ll L$).

Zabalik geratzen den pasabidearen luzera: $L - \Delta L \sim L$ eta, beraz, haren erresistentzia ia konstante mantentzen da nahiz eta V_{DS} handitu. $V_{DS\ pinch-off}$ agertzeko behar den korronea:

$$I_D = V_{DS\ pinch\ off} / R_{zabalik\ dagoen\ pasabidea} \sim \text{konstantea } V_{DS\ rekin} = I_{D\ asetasuneko}$$

Ezin dugu I_D gehiago igoarazi: kanala *ase* da.

$$I_{D\ aset} = I_{D\ aset}(V_G) \quad I_D = k_3 \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 = I_{DSS} \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 = I_{DSS} \left(\frac{V_{GS} - V_T}{V_T} \right)^2$$

$I_{DSS} = I_D|_{V_G=0}$ I_{DSS} , $V_{GS} = 0$ denean, dugun asetasunezko $I_{D\ aset}$ da: horretarako gordetzen da “asetasunezko I_D korronea” izendapena (kontuz: korrone erreal izateko, urritze MOSFETa izan behar du).

N PASABIDEKO MOSFETEN LAN GUNEA: LABURPENA

	V_{DS}	Lan-gunea	I_D	R_{kanala}
$V_{GS} < V_T$	Berdin dio	Etendura	0	∞
$V_{GS} > V_T$	$V_{DS} \sim 0$	Erresistiboa	V_{DS}/R_{kanala}	$R_{kanala}(V_{GS}) = R_0$
	$V_{DS} < V_{Dssat}$	Graduala	V_{DS}/R_{kanala}	$R_{kanala}(V_{GS}, V_{DS})$
	$V_{DS} > V_{Dssat}$	Asetasuna	$I_{DSS} \left(\frac{V_{GS} - V_T}{V_T} \right)^2$	$R_{kanala}(V_{GS}) > R_0$

Oharrak (n pasabidekoentzat):

- V_{DS} beti positiboa da
- $V_T > 0 \rightarrow$ urritzea; $V_T < 0 \rightarrow$ ugaltzea
- $V_{Dssat} = V_{GS} - V_T$

BESTE AZPI-MOTAK

Formula horiek guztiak MOSFET azpi-mota guztietarako dira baliagarriak (motaren arabera, V_{GS} eta V_T positiboak edo negatiboak izango dira).

BESTE EREDU BATZUK

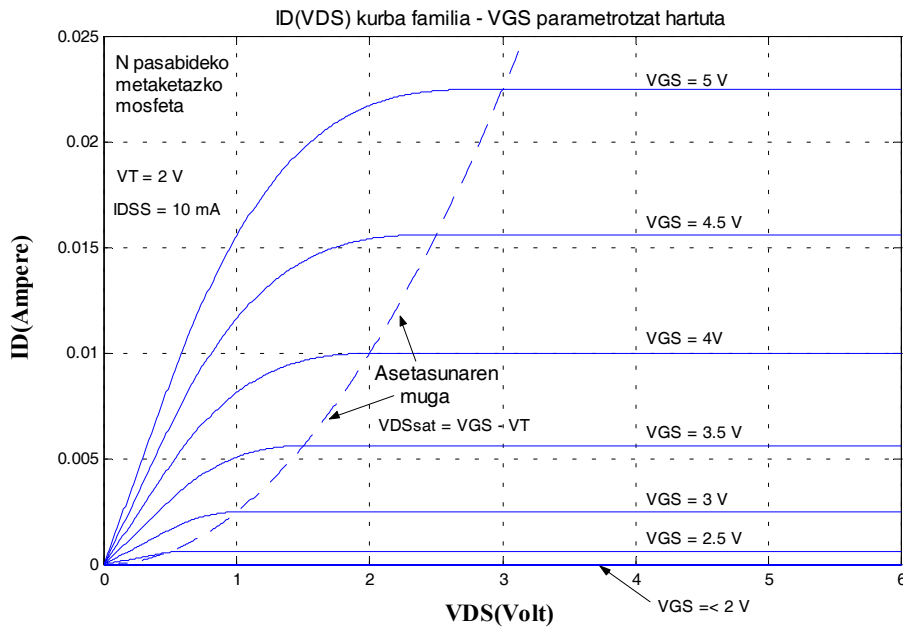
Zenbait kasutan (Spice programan, adibidez), I-V kurba λ eta β parametro lagungarriak erabiliz definitzen dira. Orduan:

$$I_D = \beta \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) (V_{GS} - V_T)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T} \right)^2 \Rightarrow I_{DSS} = \beta \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) \cdot V_T^2$$

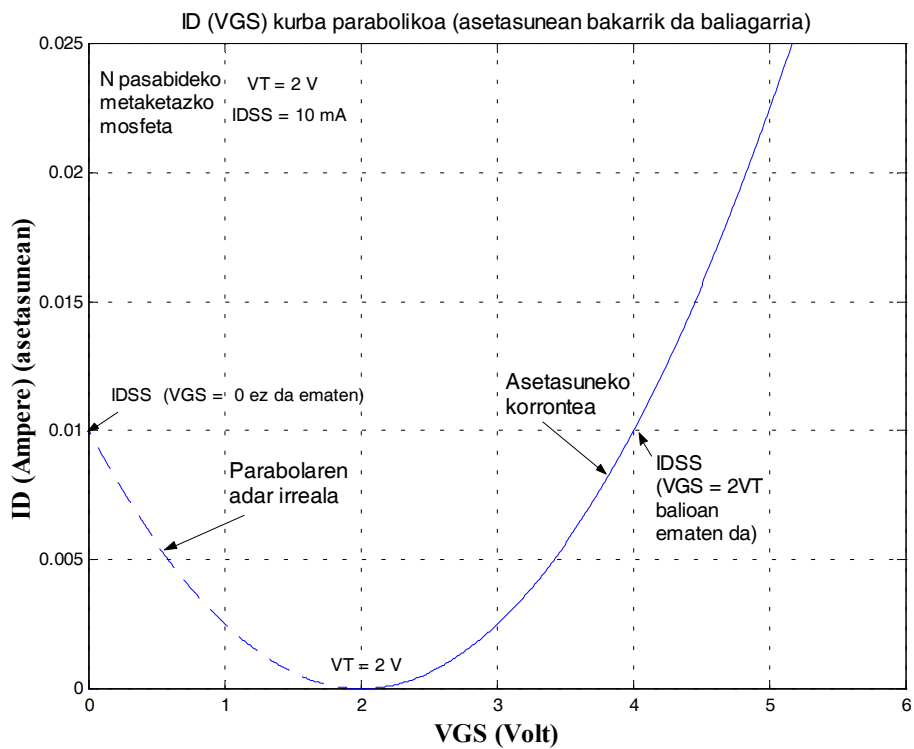
Askotan, $\lambda = 0$, eta $I_{DSS} = \beta \cdot V_T^2$

15.3 Ezaugarri-kurbak

15.3.1 N PASABIDEKO UGALTZE MOSFETA ($I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_T = 2 \text{ V}$)

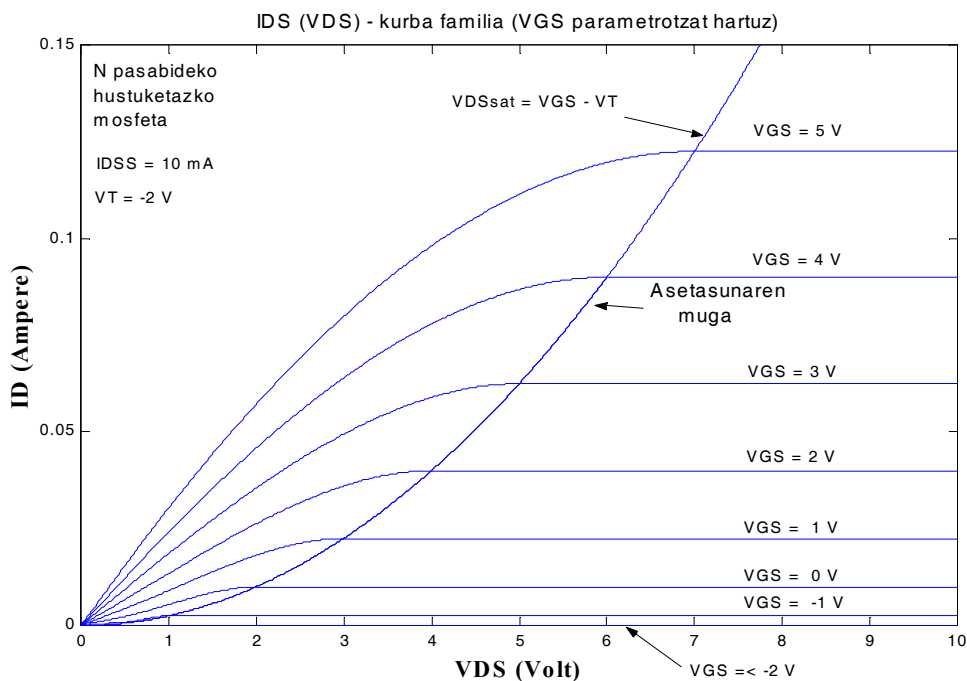


15.9 Irudia. N pasabideko ugaltze MOSFETaren I-V kurba orokorrak

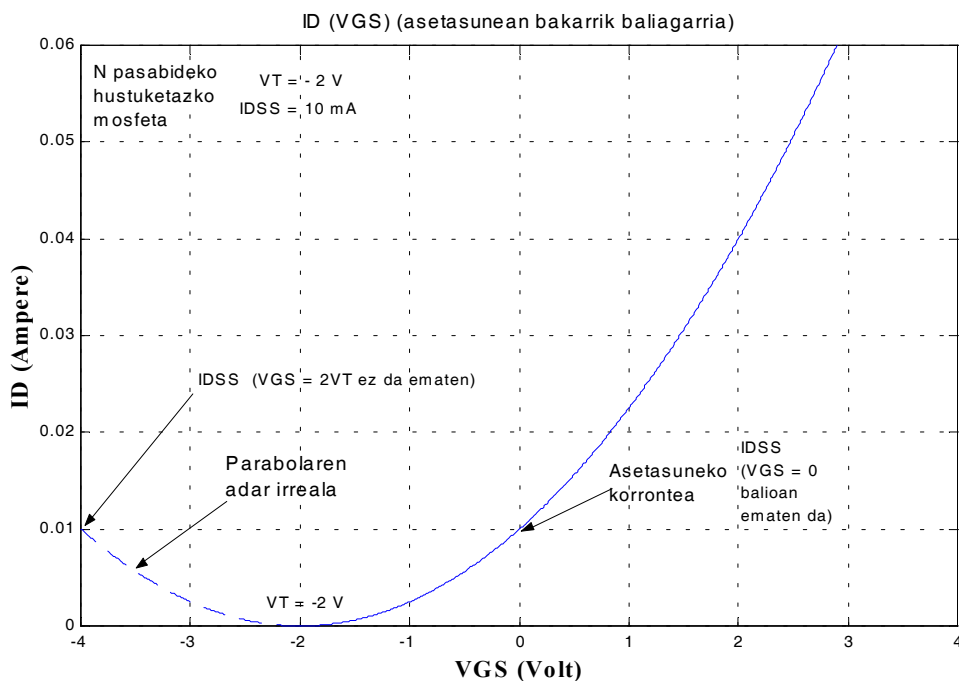


15.10 Irudia. N pasabideko ugaltze MOSFETaren I-V kurba asetasunean

15.3.2 N PASABIDEKO URRITZE MOSFETA ($I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_T = -2 \text{ V}$)

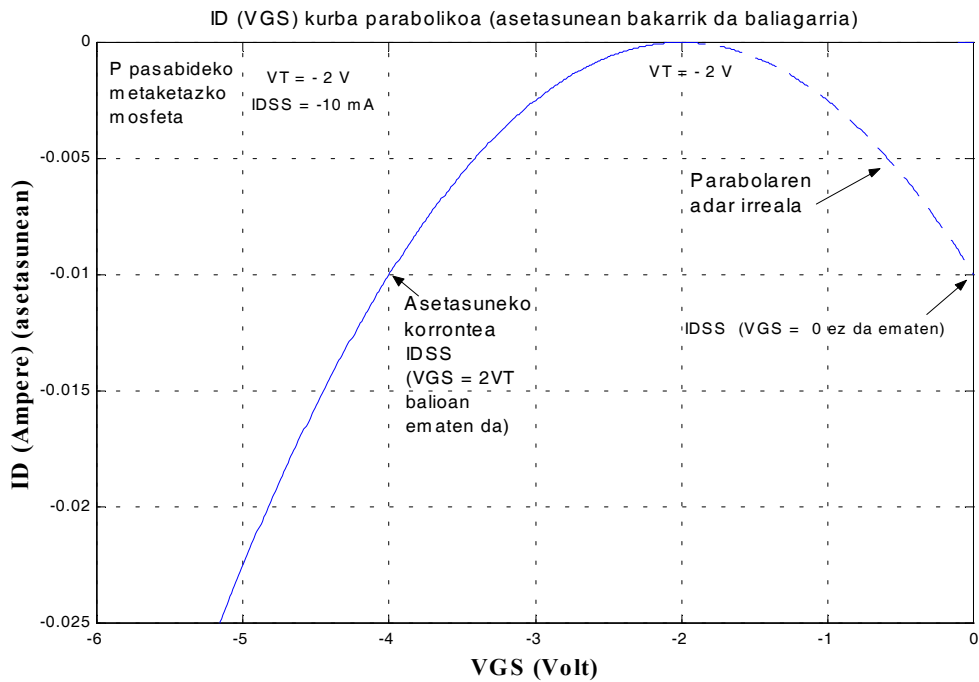


15.11 Irudia. N pasabideko urritze MOSFETaren I-V kurba orokorrak



15.12 Irudia. N pasabideko ugaltze MOSFETaren I-V kurba asetasunean

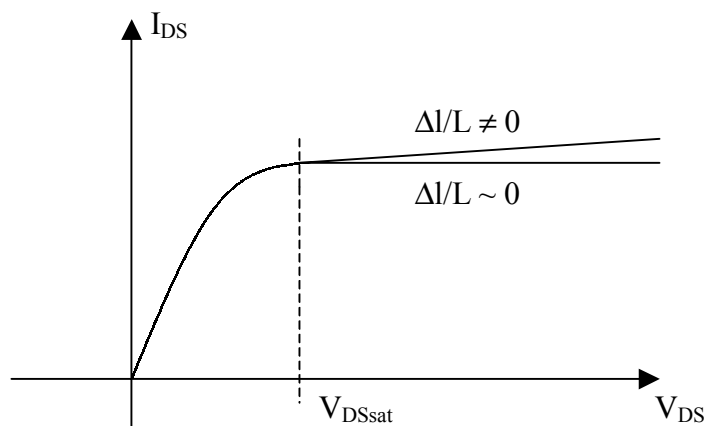
15.3.3 P PASABIDEKO URRITZE MOSFETA ($I_{DSS} = -10 \text{ mA}$, $V_T = -2 \text{ V}$)



15.13 Irudia. P pasabideko ugaltze MOSFETaren I - V kurba asetasunean

15.3.4 KURBA IDEALAREKIKO DESBIDERATZEAK: I - V KURBA ERREALAK

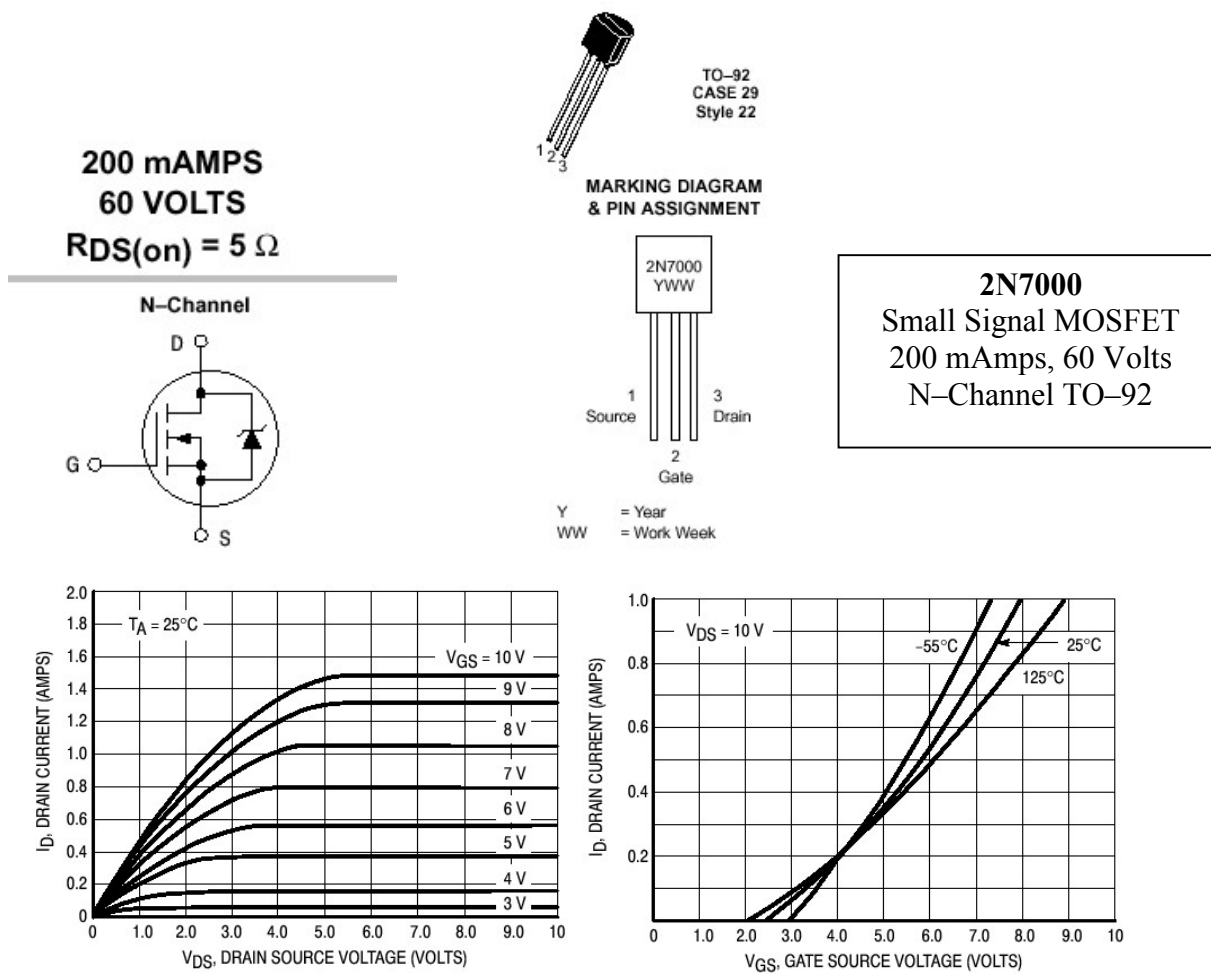
Egia esan, estugunearen eroankortasuna ez da zeharo nulua, eta *soberako* $V_{DS} - V_{D,sat}$ tentsioa erortzeko behar den ΔL luzera (kanal laburreko MOSFETetan) alderagarria gerta liteke L -rekin zenbait kasutan. Ondorioz, V_{DS} igoz gero, I_D korroneak pixka bat egiten du gora eta, ezaugarri-kurbetan, atal horizontalek malda txiki bat izaten dute.



15.14 Irudia. $I_D = I_D(V_{DS})$ ezaugarria V_{GS} jakin bat mantenduz

Horixe da λ parametroaren eragina: $\lambda = 0$ kasuan, kasu idealean gaude.

Hurrengo irudian, anplifikatzeko erabil daitekeen MOSFET bat aurkezten da.



15.15 Irudia. MOSFET erreal baten ezaugarriak (www.onsemi.com)

16. EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREAK II: JFETAK

Ikasgai honetan, JFETen egitura eta funtzionamendua analizatuko ditugu.

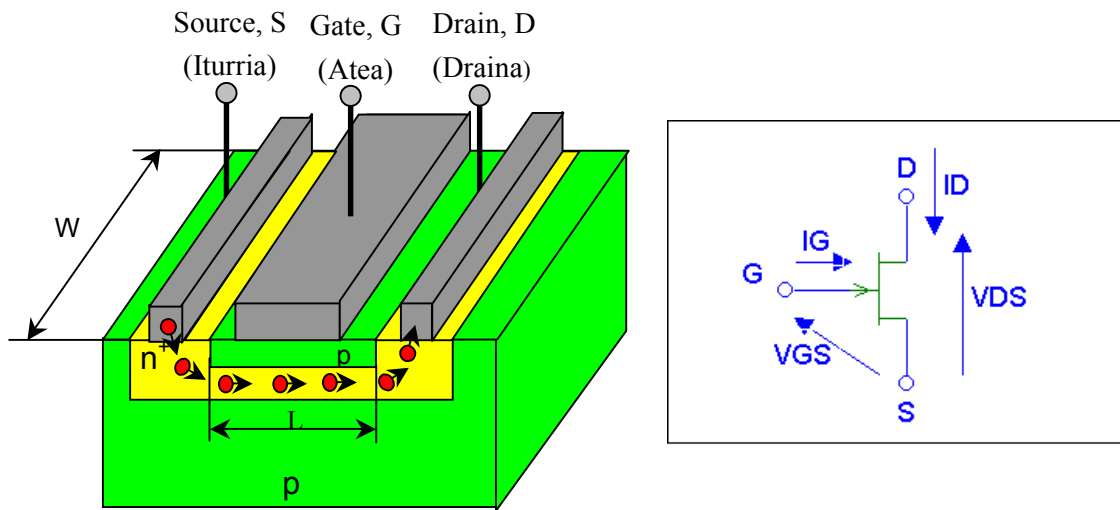
MOSFETaren kasuan egindako urratsak hemen ere errepikatuko ditugu. Hasteko, egitura aurkeztuko dugu, eta korrontearantzako pasabidea fabrikazio-prozesuan sortzen dela ikusi. Gero, pasabidea desagertarazteko aplikatu behar dugun tentsioa analizatuko dugu. Azkenean, I-V ezaugarriak arrazoitu, aurkeztu eta marraztuko ditugu.

16.1 JFETaren egitura

16.1 Irudian, n pasabideko JFET transistoreen ohiko egitura eta ikurra azaltzen dira.

N motako oinarri batetik abiatuz, bi kontaktu ohmiko eransten zaizkio: draina (D, drain) eta iturri (S, source). Horrela, erresistentzia sinple bat lortzen da ($R = \rho \times l / A = l / (\sigma A)$); non $\sigma = q \times \mu_n \times N_D$). Egitura horretan V_{DS} tentsioa aplikatzen dugunean, $I_D = V_{DS} / R$.

Horren inguruan, dopaketa altuko p motako bi eskualde gauzatzen dira (fabrikazio-prozesuan, barreiapenez, adibidez): atea (G, gate).

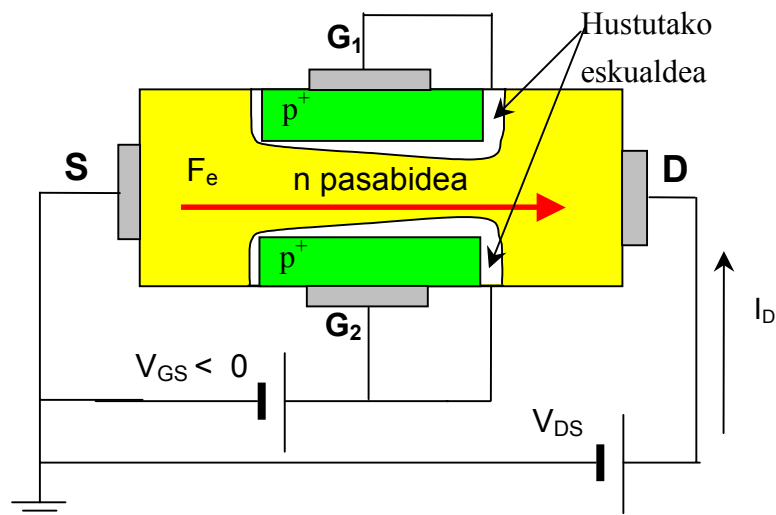


16.1 Irudia. N pasabideko JFETen egitura eta ikurra

(Urritze) MOSFETetan bezala:

Definizioz, eramaileak iturritik irten eta drainera iristen dira. Ateetan aplikatutako tentsioak berez dagoen pasabidearen eroankortasuna kontrolatzen du.

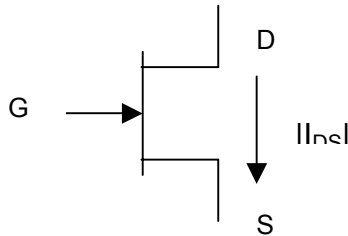
Atearen eta iturriaren artean, V_{GS} tentsioa aplikatzen da, **pn junturak beti alderantziz polarizatuz**. Atetik sartuko den korrrontea, beraz, ez da aintzat hartzen (junturen I_{sat} korrrontea ~ 1 pA).



16.2 Irudia. N pasabideko JFETen polarizazioa: tentsioak eta korrronteak

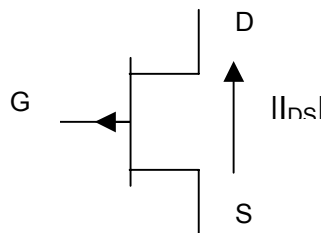
MOSFETetan bezala, hemen ere:

- N pasabideko JFETetan, V_{GS} negatiboa izango da eta V_{DS} eta I_D , positiboak (I_D sartzen, I_S irteten, ugarienak (elektroiak) iturritik drainerantz doaz)



16.3 Irudia. N pasabideko JFETaren ikurra eta korrontearen noranzkoa

- P pasabideko JFETetan, V_{GS} positiboa izango da eta V_{DS} eta I_D negatiboak ($|I_D|$ irteten da, I_S sartzen da, ugarienak (hutsuneak) iturritik drainerantz doaz, definizioz)



16.4 Irudia. P pasabideko JFETaren ikurra eta korrontearen noranzkoa

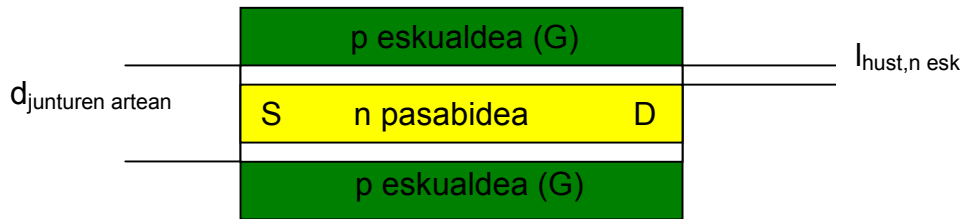
[Ateko korrontea aintzat ez harzeko modukoa denez, $I_D = -I_S$]

OHARRA: (ateko) geziak pn junturako korronteak (zuzenean) hartuko lukeen noranzkoa adierazten digu (n eskualderantz begira dago, beraz).

16.2 Iturri aldeko zabalera kalkulatzeko: atariko tentsioa

Eragingailu horretan, egitura fisikoa dela-eta, drainaren eta iturriaren arteko kanalaren zabalera erraz kontrola daiteke baldin eta pasabidearen inguruan agertzen den hustutako eskualdearen hedapena modulatzeko badugu (ikus 16.5 Irudia). Eta, hori lortzeko, pn junturak alderantziz polarizatu besterik ez dugu egin behar.

$$l_{\text{hustuta n eskualdean}} \approx l_{\text{hustuta}} = l_{\text{orekan}} \cdot \sqrt{\frac{\Phi_T - V_{GS}}{\Phi_T}} = l_{\text{orekan}} \cdot \sqrt{\frac{\Phi_T + |V_{GS}|}{\Phi_T}}$$



16.5 Irudia. Pasabidearen zabalera zehazki

Estutzea azken mugaraino eramanez, hustutako eskualdeek kanal osoa jan dezakete. Horretarako aplikatu beharreko tentsioa atariko tentsioa da.

$$2 \cdot l_{\text{hustuta}} = \text{junturen arteko distantzia} = d \rightarrow V_{GS_{\text{Sitotze}}} = V_T;$$

$$2 \cdot l_{\text{orekan}} \cdot \sqrt{\frac{\Phi_T - V_{GS_{\text{Sitotze}}}}{\Phi_T}} = d \Rightarrow \Phi_T - V_{GS_{\text{Sitotze}}} = \Phi_T \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot l_{\text{orekan}}} \right)^2$$

$$V_{GS_{\text{Sitotze}}} = V_T = \Phi_T \left[1 - \left(\frac{d}{2 \cdot l_{\text{orekan}}} \right)^2 \right]$$

$$V_{GS_{\text{Sitotze}}} \approx -\Phi_T \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot l_{\text{orekan}}} \right)^2 = \frac{-\Phi_T \cdot d^2}{4 \cdot l_{\text{orekan}}^2} = \frac{-\Phi_T \cdot d^2}{4 \cdot \left(\frac{2\epsilon}{qN_D} \Phi_T \right)} = \frac{-qN_D \cdot d^2}{8\epsilon}$$

Beraz, tentsio hori nahiko erraz kontrola daiteke .

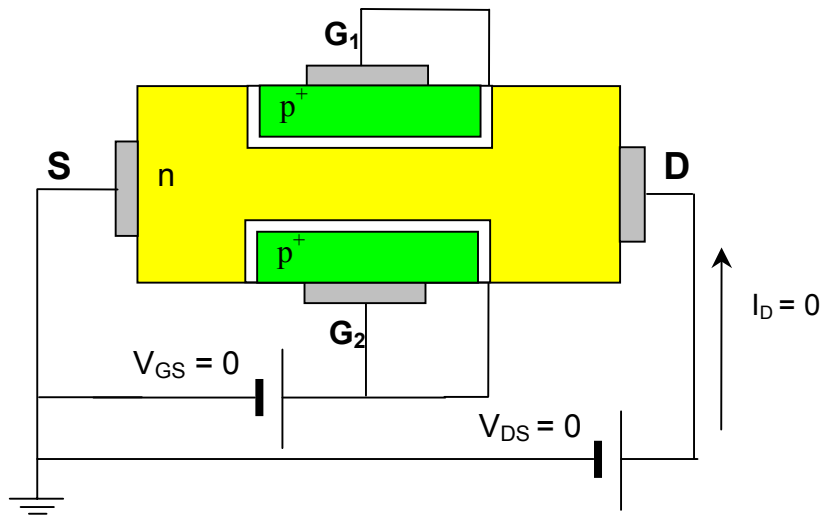
16.3 Funtzionamenduaren oinarriak (n pasabideko JFET transistoretarako)

$V_{GS} > 0$ KASUAN

Kasu horretan, junturak zuzenean polarizatzen ari gara eta nahiko korrante altuak sar daitezke atetik. Hori ez da guk bilatzen dugun funtzionamendua eta, beraz, ez da inoiz erabiltzen. Izan ere, zirkuituaren diseinuak junturak alderantziz polarizatzea ziurtatu behar du.

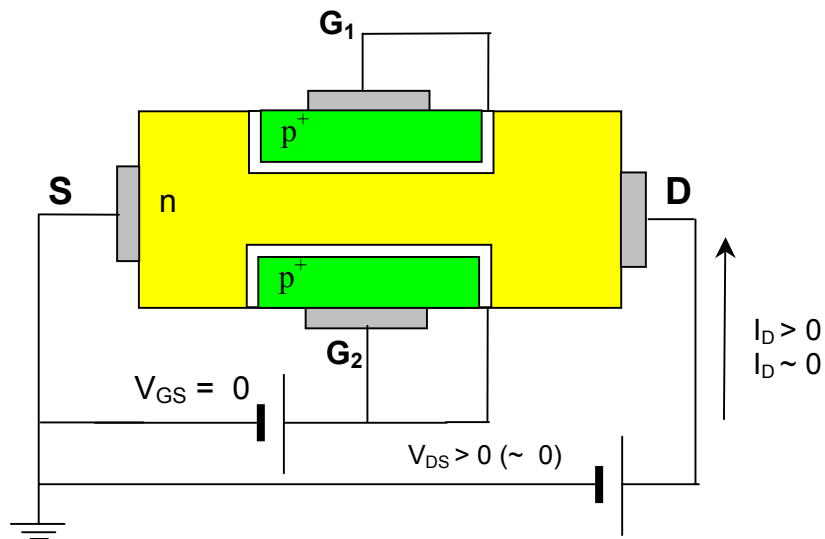
$V_{GS} = 0$ KASUAN

- $V_{DS} = 0$ V: Berez (atean tentsiorik aplikatzen ez dugunean), badago pasabidea (bai eta pn junturako orekako hustutako eskualdea). OREKAN GAUDE.



16.6 Irudia. Pasabidea orekan

- $V_{DS} \downarrow \downarrow$ (hau da, $V_{DS} > 0$, baina txikia denean): aplikatzen den V_{DS} tentsioarekiko proportzionala den korronea lortzen dugu: $I_{DS} = V_{DS} / R_{pasabidea}$ orekan. (ESKUALDE OHMIKO EDO LINEALEAN GAUDE).



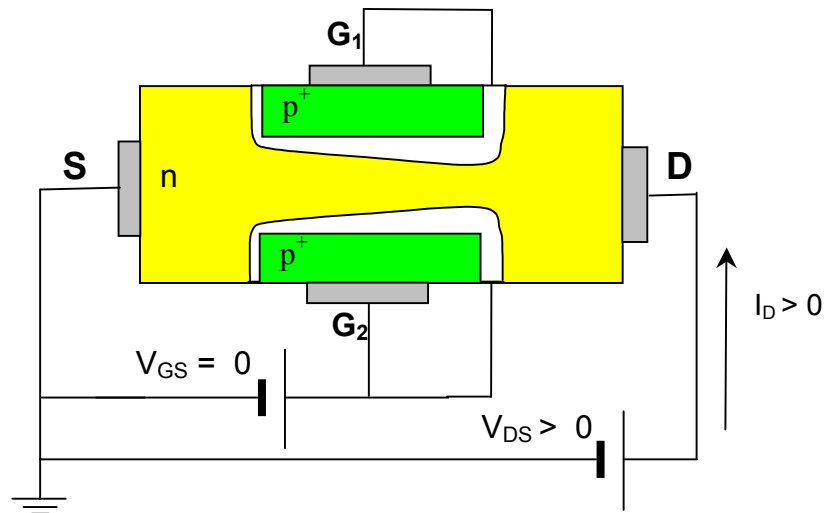
16.7 Irudia. Pasabidea orekaren inguruan

[pasabidearen erresistentzia orekan = erresistibitatea x luzera / orekako sekzioa]

- $V_{DS} \uparrow \downarrow$ (hau da, $V_{DS} > 0$ eta, *ertaina* denean, junturako Φ_T potentzial termodinamikoarekin alderagarria): Drainaren aldean dagoen tentsioa nabarmena denez, junturako polarizazioa nahiko negatiboa (alderantzizkoa) da inguru horretan eta, beraz, hustutako eskualdea zabalagoa da.

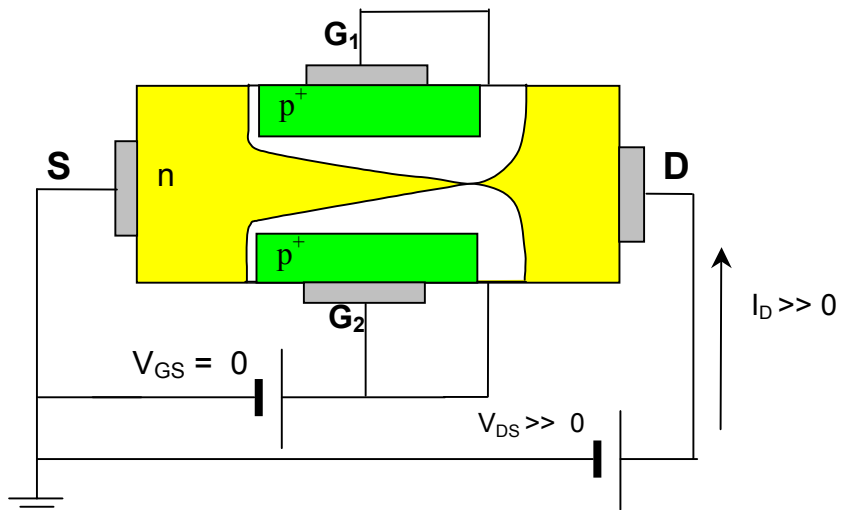
Kanala estutzen denez, erresistentziak gora egiten du eta, beraz, korrontearen igotzeko joera moteltzen da. I-V erlazioa ez da lineala (ESKUALDE GRADUALA).

[pasabidearen erresistentzia > orekako pasabidearen erresistentzia]



16.8 Irudia. Pasabidea estutzen (hustutako eskualdeak zabaltzen)

- $V_{DS} \uparrow \uparrow$ (hau da, $V_{DS} > 0$ eta handia denean): kanala desagertu egiten da (ito edo ziztatu egiten da) V_{DSsat} denean ($V_S = 0$ izaten denez, V_{DSat} bakarrik izendatzen da askotan). Eramailerik gabeko eskualde bat agertu da: oso erresistentzia handikoa, beraz.



16.9 Irudia. Pasabidea itotzen den unea

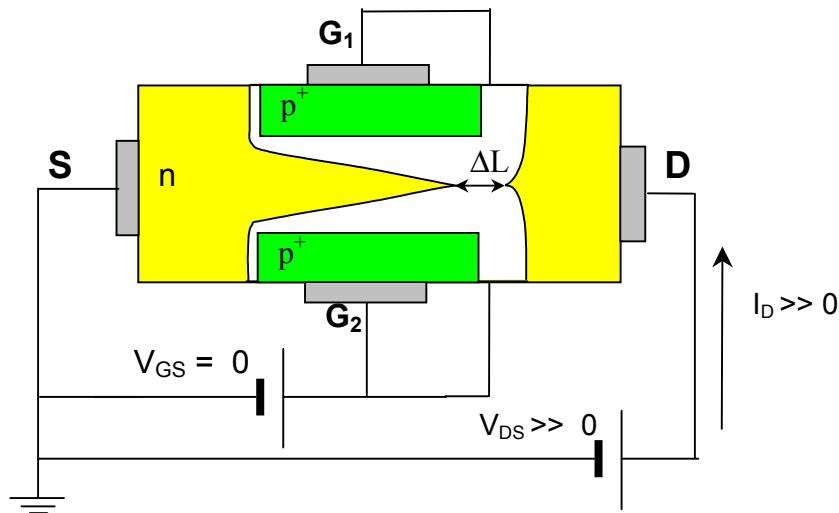
Tentsio horretatik aurrera, V_{DS} tentsioaren igoera (guretzat *soberakina* izango dena) kanalaren hustutako zatian agertuko da MOSFETetan gertatzen zen bezala (zati horren luzera $V_{DS}-V_{DSsat}$ soberakina erortzeko behar dena izango da). Nola?

1. Korronteak hustutako eskualdeko eremuak bultzaturik zeharkatzen du eskualde hori. Eskualde oso erresistiboa baina laburra da, tentsio nahiko altuak ager daitezke distantzia laburrean, hau da, eremu elektriko nahiko altuak.
2. Gainontzeko kanalaren luzera (zabalik mantentzen den kanalaren luzera) nahiko luzea izaten da itotako/hustutako zatiarekin konparatuz, eta, beraz, itotzea gertatu den momentuan zuen geometria gordetzen du: erresistentzia bera $R_{pasabidea}$ ito berria zenean.
3. Argi dagoenez, zabalik geratzen den pasabidearen zatian, V_{DSsat} erortzen da beti. Erresistentzia, gutxi gorabehera $R_{pasabidea}$ ito berria zenean = kte

V_{DS} zabalik dagoen pasabidean = V_{DSsat} bada, korrontea konstante mantentzen da:

$$I_{Dsat} = \text{asetasuneko korrontea} = V_{DSsat} / R_{pasabidea} \text{ ito berria zenean}$$

$$I_{Dsat} (V_{GS}=0 \text{ denez}) = I_{DSS}$$



16.10 Irudia. Pasabidea ΔL distantzian itota

ASETASUNEAN gaude: kanalak onar dezakeen korronterik altuena pasatzen ari da.

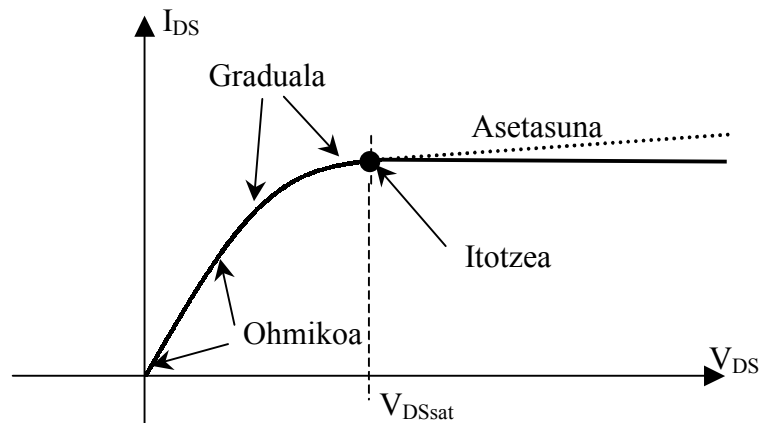
$$\text{Esan bezala, } \Delta L \ll L \rightarrow L - \Delta L \sim L \rightarrow R_{asetasunean} \sim R_{asetasunera} \text{ sartu berria}$$

Egia esan, badakigu $R_{asetasunean} < R_{asetasunera} \text{ sartu berria}$, baina hori izango da nabaria pasabide laburreko JFETetan bakarrik ($\Delta L \ll L$ betetzen ez denean).

Ondorioz, $I_D \sim I_{DSS}$, baina, zehatzak izateko, $I_D > I_{DSS}$ eta I-V ezaugarria ez da guztiz horizontala.

(kasu horretan, $V_{GS} = 0$ V denez, $I_{Dasetasun}$ = I_{DSS})

Guztira lortzen den I-V ezaugarria ($V_{GS} = 0$ tentsioa aplikatuz):



16.11 Irudia. I_{DS} - V_{DS} ezaugarri osoa ($V_{GS} = 0$ denean)

$V_{GS} < 0$ KASUAN

Kualitatiboki, FETak berdin funtzionatzen du $V_{GS} < 0$ aplikatzen denean. Hasierako pasabidearen sekzioan datza desberdintasun bakarra: pn junturen hustutako eskualdeen zabalera txikiagoa izango da. Litekeena da erabat itxita egotea:

[Gogoratu: $V_{GS} = -|V|$ aplikatzean \rightarrow hustutako eskualdea zabaltzen da

$$l_{hustuta \text{ n eskualdean}} \approx l_{hustuta} = l_{orekan} \cdot \sqrt{\frac{\Phi_T - V_{GS}}{\Phi_T}} = l_{orekan} \cdot \sqrt{\frac{\Phi_T + |V_{GS}|}{\Phi_T}}$$

$$V_{GSitotze} = V_T = \Phi_T \left[1 - \left(\frac{d}{2 \cdot l_{orekan}} \right)^2 \right] < 0$$

V_T atariko tentsioa aplikatuz, pasabidea erabat itotzen da].

Aplikatutako V_{GS} tentsioarekin, baldin eta oraindik pasabidea badago:

- $V_{DS} = 0$ V \rightarrow $R_{pasabidea}$, baina $I_D = 0$ A
- $V_{DS} \downarrow \downarrow \rightarrow$ eskualde ohmikoa, $I_D = V_{DS}/R_{pasabidea}$
- $V_{DS} \uparrow \downarrow \rightarrow$ eskualde graduala \rightarrow itotzea lehenago gertatuko da
- $V_{DS} \uparrow \uparrow \rightarrow$ asetasuna

FUNTZIONAMENDUA $V_{GS} < V_T = -|V_T|$ DENEAN

Kanala erabat itota dago → FETa etenik dago, korronterik gabe.

Oharrak:

Itotzea gertatzen den puntuan dagoen tentsioa

Edozein kasutan ($V_{GS} = 0$ zenean ere), itotzea gertatzen den A puntuan (atearekiko) dagoen tentsioa $V_{GA} = V_T$ izango da.

$$V_A = V_{AS} = V_{AG} + V_{GS} = -V_T + V_{GS}$$

Eta puntu horretako junturan dagoen potentziala:

$$\Phi_{A \text{ junturan}} = \Phi_{\text{Torekan}} - |V_{pnA}| = \Phi_{\text{Torekan}} - (-V_T) = \Phi_{\text{Torekan}} + V_T$$

A puntu hori draina izango da hasiera batean:

$$V_{DS} = V_{DSsat} = -V_T + V_{GS}$$

Atearen eta itotzea gertatzen den (lehenengo) puntuaren artean $-|V_T|$ tentsioa izango dugu.

Puntu horretan, junturaren potentziala $\phi = \phi_T - (-|V_T|) = \phi_T + |V_T|$ izango da.

Edo, beste ere batera esanda, $V_{DS} = V_{GS} - V_{GD} > V_{GS} - V_T = V_{Dssat}$

Asetasunaren baldintzak

Asetasunean egoteko, honako hauek beteko dira (n pasabideko JFET batean):

- Kanala iturri aldean irekita edukitzea

$$\rightarrow V_{GS} > -|V_T|$$

- Kanala drainaren inguruetan itota edukitzea

$$\rightarrow V_{GD} < -|V_T|; (V_{DG} > |V_T|), \text{ edo } V_{DS} > V_{Dssat} = V_{GS} - V_T$$

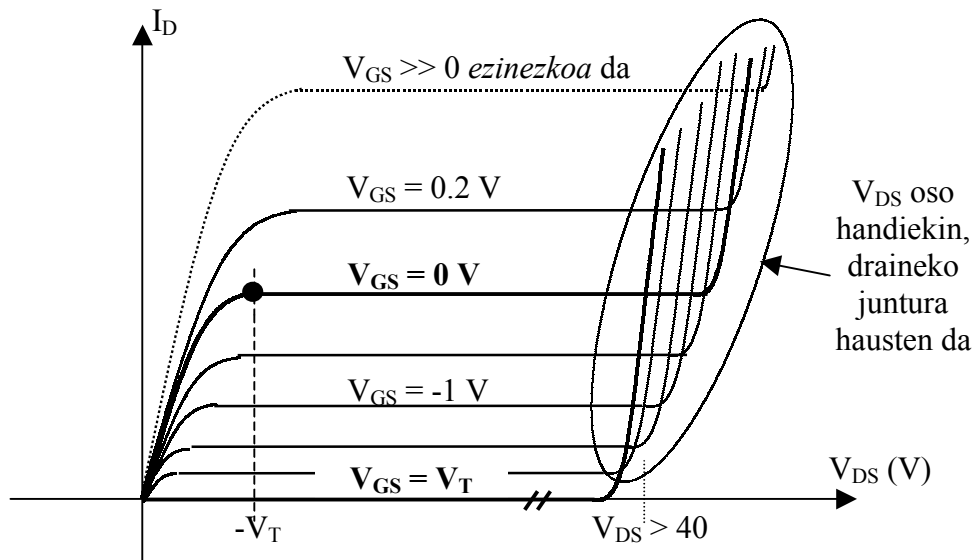
pn junturaren korronteari buruzko bi ohar:

- Gogoratu $V_{GS} > 0$ V denean GS juntura zuzenean jartzen dela.
- Gogoratu V_{GS} (edo V_{GD}) $< -|\text{Breakdown Voltage}|$ tentsioan juntura hausten dela.

Bi kasu horietan, $I_G \neq 0$. Gainontzeko guztietan, atetik ez da korronterik sartzen (gutxi gorabehera).

16.4 I-V ezaugarriak

Efektu hauek guztiak bilduz, 16.12 Irudiko ezaugarria lortzen da.

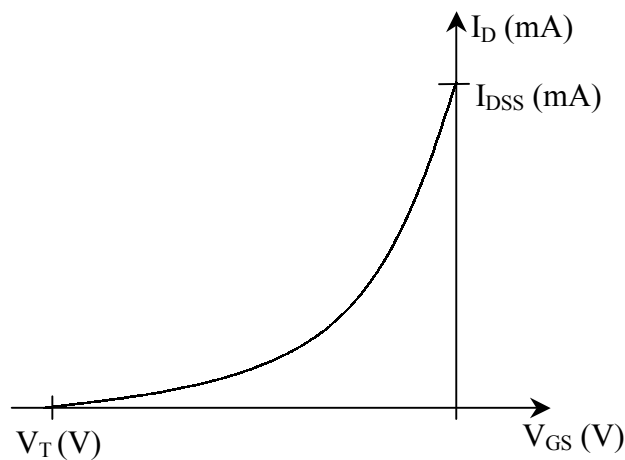


16.12 Irudia. N JFET baten I_D - V_{DS} ezaugarriak zenbait V_{GS} -entzat ($V_T \sim -3$ V)

ASETASUNEAN lortzen den korronea ez dago V_{DS} tentsioaren menpe. Izan ere, **mosfetetan erabiltzen zen formula bera erabiliko da hemen ere:**

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T} \right)^2 \quad \text{non} \quad I_{DSS} = I_{DS sat} |_{V_{GS}=0}$$

[I-V erlazioetatik jakin behar dugun adierazpen analitiko bakarra].



16.13 Irudia. N JFET baten I_D - V_{GS} ezaugarria asetasunean ($V_{DS} > V_{DSsat} = V_{GS} - V_T = V_{GS} + |V_T|$)

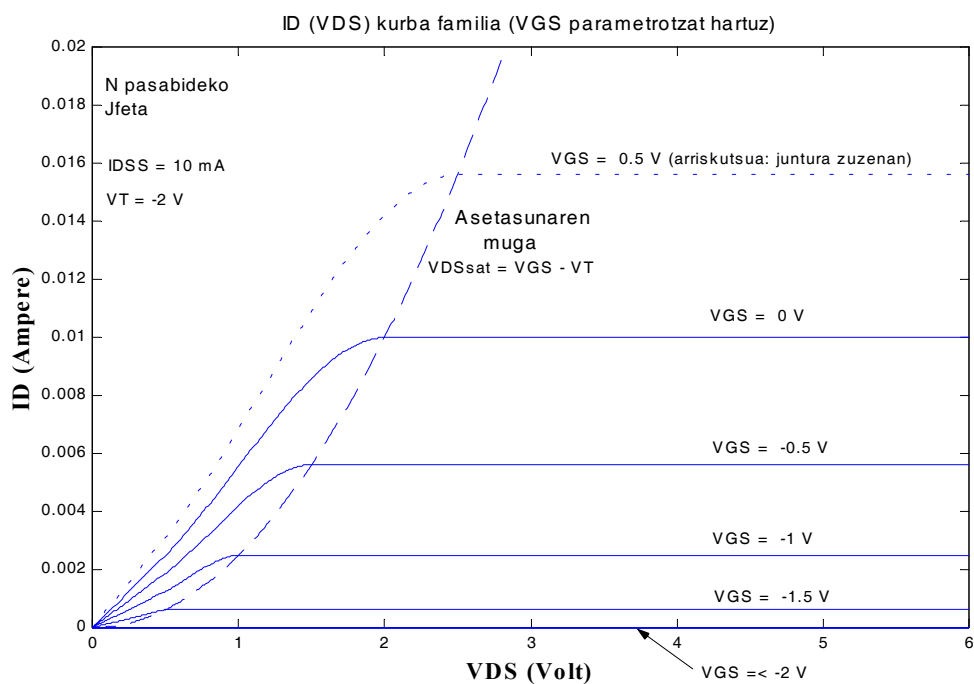
Ikusi dugunez, JFETa eta urritze MOSFETa baliokideak dira. Salbuespen bakarra: JFETetan ezin da orekako pasabidea baino zabalagoa lortu ($V_{GS} < 0$, n pasabidekoetan; $V_{GS} > 0$, p pasabidekoetan).

Aurreko ikasgaien aurkezten genuen beste eredu (SPICE programakoa) hemen ere erabilgarria da:

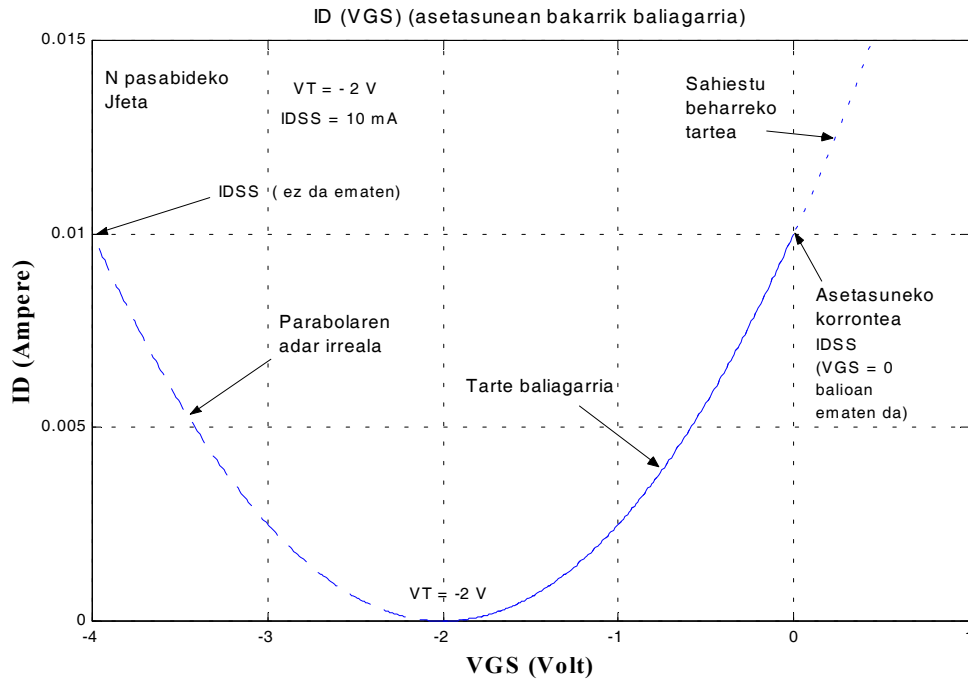
$$I_D = \beta \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) (V_{GS} - V_T)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right)^2 \Rightarrow I_{DSS} = \beta \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) \cdot V_T^2$$

Askotan, $\lambda = 0$, eta $I_{DSS} = \beta \cdot V_T^2$

Hurrengo irudietan, n kanaleko JFET baten ezaugarri idealak aurkezten dira. Haren oinarrizko parametroak honako hauek dira: $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_T = -2 \text{ V}$.



16.14 Irudia. N JFET kurba orokorrak



16.15 Irudia. N JFET baten I_D - V_{GS} ezaugarria (asetasunean)

17. FETAK ERREGIMEN DINAMIKOAN: SEINALE TXIKIA

FET transistorea (MOSFET ala JFET izateak berdin dio) asetasunean polarizaturik badago, I_D korronea V_{GS} tentsioaren menpe dago bakarrik. Erregimen dinamikoan, aldiz, ez, zeren eta kargen mugimenduak eskatzen duen denbora kontuan hartu behar baita. BJTan gertatzen zenaren antzera, konmutazioa alde batera utziko dugu hemen ere (nahiz eta elektronika digitalean garrantzi handikoa izan), eta seinale txikian jarriko dugu arreta.

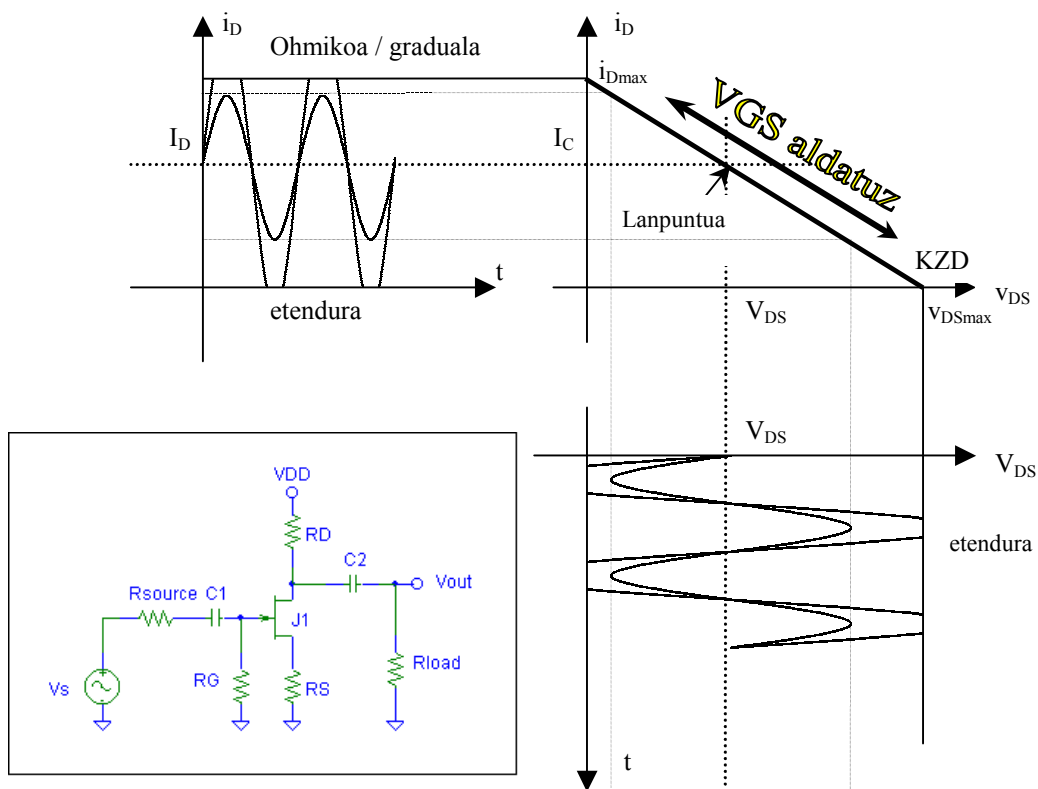
Seinale txikian, v_{GS} tentsioaren aldaketen aurrean, i_D korrontearen aldaketa proportzionalak agertzen dira lan-puntu jakin baten inguruan. i_D korrontearen aldaketek v_{DS} tentsioaren aldaketak eragiten dituzte eta, baldintza egokiak bermatuz gero (polarizazio egokiaz), amplifikatzea lortzen da. Askotan, $\Delta v_{DS}/\Delta v_{GS} > 1$ lortzen da (ikus 17.1 Irudia).

Gehienetan, komeni da problema bitan banatzea (BJTekin egin genuen bezala), elikadura / polarizazioa eta seinale txikia / informazioa bereiziz.

Orduan, $v_{GS}(t) = V_{GS} + v_{gs}(t)$ eta $i_D(t) = I_D + i_d(t)$ gisa adierazteak bi abantaila ditu:

- Azkenean, informazioa $v_{gs}(t)$ seinalean etorri ohi da.
- Problema erraztu egiten da.

17.1 Seinale txikiko planteamendua eta garapen matematikoa

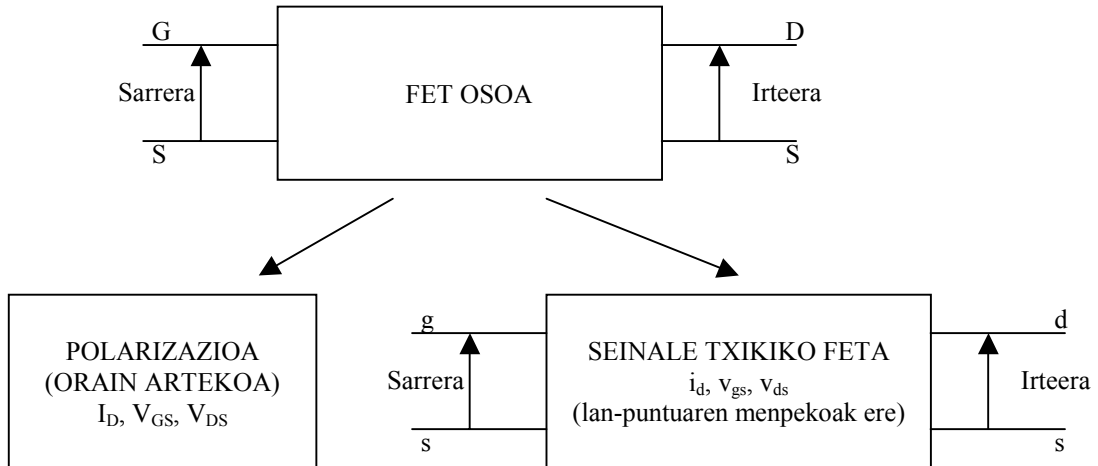


17.1 Irudia. Iturri komuneko zirkuitu anplifikadorea eta uhin-formak

Ikasgai honen helburua $i_d(t) = i_d(v_{gs}(t))$ erlazioa lortzea da, horretarako zenbait hurbilketa eginez:

- I-V ezaugarriak linealdu egingo ditugu (horretarako, seinale txikian egon behar: zein seinale da, FETetan, txikia?).
- Egingo dugun analisia bakarrik maiztasun baxuetarako izango da baliagarria.
- Zehaztasunez, asetasunaren kasua bakarrik aztertuko dugu, baina garapen orokorra planteatuko dugu.

v_{GS} sarreratzat hartzen badugu eta v_{DS} , irteeratzat:



17.2 Irudia. Zirkuitu-anplifikadoreak analizatzeko prozedura

$$i_D = i_D(V_{DS} + v_{ds}(t), V_{GS} + v_{gs}(t))$$

$$i_D(t) = I_D(V_{DS}, V_{GS}) + i_d(V_{DS}, V_{GS}, v_{ds}, v_{gs})$$

$$i_D(t) = I_D(V_{DS}, V_{GS}) + \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} dv_{DS} + \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} dv_{GS}$$

$$i_D(t) = I_D(V_{DS}, V_{GS}) + \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} dv_{ds} + \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} dv_{gs}$$

$$i_D(t) = I_D(V_{DS}, V_{GS}) + \left. \frac{di_D}{dv_{DS}} \right|_{V_{GS}=kte1} \cdot dv_{ds} + \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{V_{DS}=kte2} \cdot dv_{gs}$$

$$i_D(t) = I_D(V_{DS}, V_{GS}) + g_d \cdot dv_{ds} + g_m \cdot dv_{gs}$$

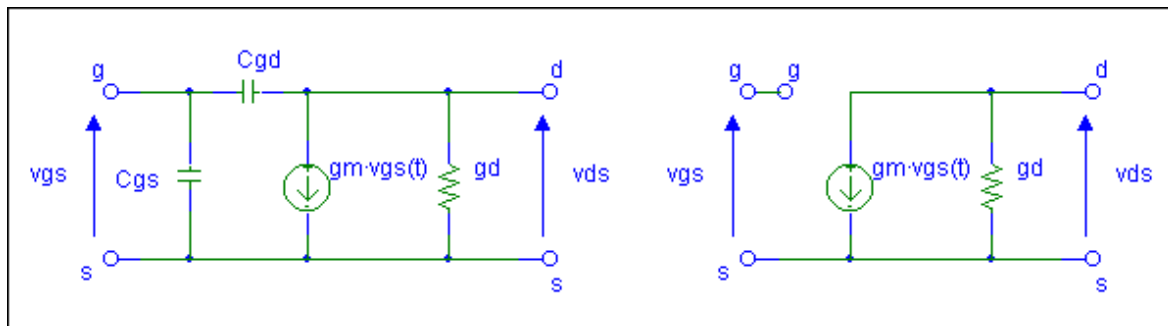
$$i_D(t) = I_D + i_d(t) = \begin{cases} I_D = I_D(V_{DS}, V_{GS}) \\ i_d(t) = g_d \cdot dv_{ds}(t) + g_m \cdot dv_{gs}(t) \end{cases}$$

17.2 Seinale txikiko zirkuitu baliokidea

POLARIZAZIOA: aurreko ikasgaietan ikusi dugun prozeduraren bitartez ebatzen da.

SEINALE TXIKIA: 1.- Atea isolaturik mantentzen da: gehienetan, oso kondentsadore txikia dugu eta Z altua izaten da gure ohiko maiztasunetan (ez, ordea, maiztasun oso altuetan). Kondentsadore hori JFETetan junturari dagokiona bada ere (C_{Juntura}), oxidoak dakarren dielektrikoak sortzen du MOSFETetan (C_{Oxido}).

2.- Gainontzeko zirkuitua: ebatzi berri duguna.



17.3 Irudia. Seinale txikiko zirkuitu baliokidea

$$\text{non } g_d = \left. \frac{di_D}{dv_{DS}} \right|_{V_{GS}=kte1}$$

$$g_m = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{V_{DS}=kte2}$$

- Irteerako edo pasabidearen eroankortasuna (channel conductance) (g_d) eta
 - Transeroankortasuna (g_m)
- baitira.

Aplikazioa

a) Asetasunean bagaude:

$$i_D(t) = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_T}\right)^2 \Rightarrow$$

$$g_d = \left. \frac{di_D}{dv_{DS}} \right|_{V_{GS}=kte1} \Rightarrow g_d = 0$$

$$g_m = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{V_{DS}=kte2} = -2 \cdot I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_T}\right) \cdot \frac{1}{V_T} \approx \frac{2}{|V_T|} \cdot |I_{DSS}| \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right)$$

$$g_m = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{V_{DS}=kte2} = \frac{2 \cdot \sqrt{I_{DSS}}}{|V_T|} \cdot \sqrt{I_{DSS}} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right) = \frac{2 \cdot \sqrt{I_{DSS}}}{|V_T|} \cdot \sqrt{I_D}$$

$$g_m = \frac{2 \cdot \sqrt{I_{DSS} \cdot I_D}}{|V_T|}$$

OHARRA: Zehatzak izateko, $g_d \neq 0$. g_d , $I_D = I_D(V_{DS})$ ezaugarriaren malda da, definizioz. Horrenbestez, asetasunean lehen hurbilketan zuzenak horizontalak izan arren (eta, beraz, $g_d = 0$), malda txiki bat izaten dute (ikus 15.14 eta 16.11 Irudiak) eta g_d txikia (baina ez nulua) agertzen dute. Kasu gehienetan ez dugu aintzat hartuko; hau da, ontzat emango dugu $g_d \sim 0$ hurbilketa.

b) Eskualde ohmiko edo linealean (hemen ez dugu inoiz lan egingo) bagaude:

Aurkeztu genituen ekuazio analitikoetatik eratorriko litzateke:

$$g_m = 0$$

$$g_d = \text{asetasuneko } g_m = 2 \cdot |V_T| \cdot \sqrt{I_{DSS} \cdot I_D}$$

Eranskina:

Asetasunean bagaude (ohi den bezala), g_m parametroaren garapena bide errazago batetik egin daiteke:

$$i_D(t) = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_T}\right)^2 = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{v_{gs} + V_{GS}}{V_T}\right)^2$$

$$i_D(t) = I_{DSS} \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right) - \frac{v_{gs}(t)}{V_T}\right]^2 = I_{DSS} \cdot \left[\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right)^2 + \left(\frac{v_{gs}(t)}{V_T}\right)^2 - 2 \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right) \cdot \frac{v_{gs}(t)}{V_T}\right]$$

$$i_D(t) \approx \langle v_{gs}(t) \ll V_T \rangle \approx I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right)^2 - 2 \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right) \cdot I_{DSS} \cdot \frac{v_{gs}(t)}{V_T}$$

$$i_D(t) = I_D + i_d(t) \Rightarrow \begin{cases} I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right)^2 \\ i_d(t) = -2 \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right) \cdot I_{DSS} \cdot \frac{v_{gs}(t)}{V_T} = g_m \cdot v_{gs}(t) \end{cases}$$

$$\text{non } g_m = -2 \cdot \frac{I_{DSS}}{V_T} \cdot \left(1 - \frac{V_G}{V_T}\right) = -2 \cdot \frac{\sqrt{I_{DSS}}}{V_T} \cdot \sqrt{I_{DSS}} \cdot \left(1 - \frac{V_G}{V_T}\right) = 2 \cdot \frac{\sqrt{I_{DSS}}}{|V_T|} \cdot \sqrt{I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_G}{V_T}\right)^2}$$

$$g_m = \frac{2 \cdot \sqrt{I_{DSS} \cdot I_D}}{|V_T|}$$

18. FETEN POLARIZAZIOA

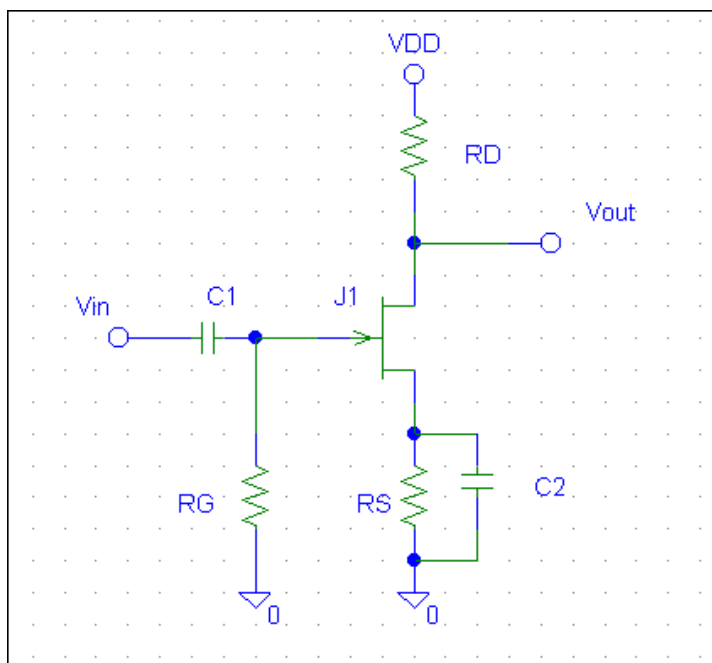
BJTetan bezala, FET transistoreen lan-puntu egokia polarizazio-zirkuituaren bidez ziurtatzen da. Kontuan hartzeko irizpideak BJTan erabilitakoak dira: Q puntuaren egonkortasuna, tentsio-irabazia, distortsioa, xahutu behar den potentzia ...

Azkenean, BJTak modu aktiboan polarizatzen bagenituen (eta, askotan, kargazuzen dinamikoaren erdian), FETak aktiboa zenaren baliokidea den asetasunean polarizatuko ditugu. Ikasgai honetan, horretarako erabiltzen diren hiru zirkuitu nagusiak analizatu ditugu (n pasabidekoentzat):

- Iturri autopolarizatuko zirkuitua
- Ugaltze MOSFETarentzako zirkuitua
- Polarizazio-zirkuitu orokorra

18.1 Iturri autopolarizatuko zirkuitua

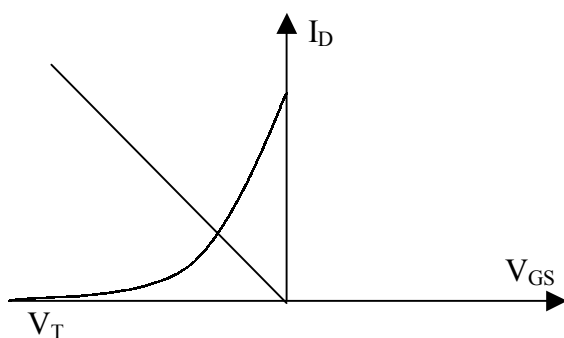
Urritze MOSFETetarako eta JFETetarako da baliagarria.



18.1 Irudia. Iturri autopolarizatutako zirkuitua

Lan-puntua bilatzeko bi ekuazio/kurba hartzen dira abiapuntutzat:

- 1.- I_D - V_{GS} ezaugarri bakarra (asetasunean lan egiten dugunaren hipotesia onartuz)
- 2.- $V_{GS} = V_G - V_S = 0 - I_D \times R_S \rightarrow$ Karga-zuzen estatikoa: $I_D = -V_{GS}/R_S$



18.2 Irudia. Lan-puntuaren ebazpen grafikoa

$V_T < 0$ denean bakarrik balio digu, esan bezala.

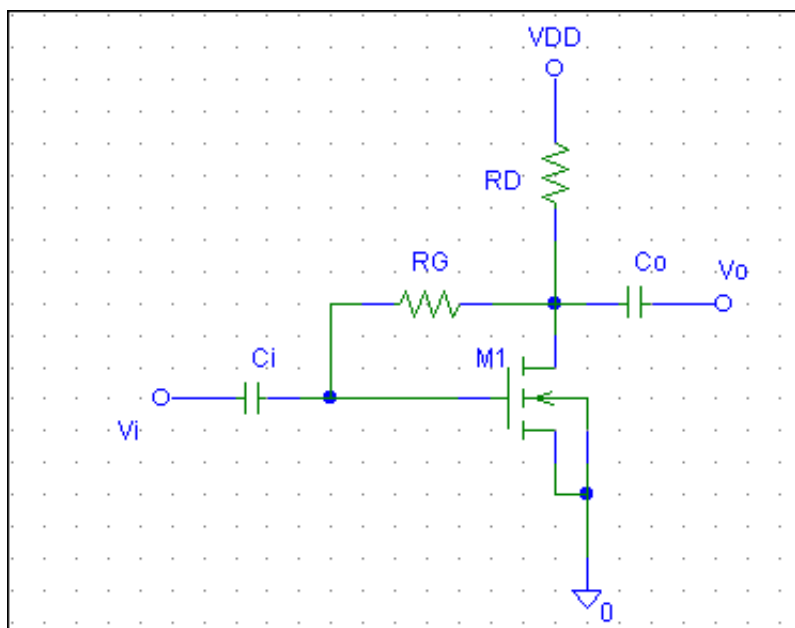
Zirkuitu horrek ez du asetatsunean lan egitea ziurtatzen \rightarrow egiaztatu beharko dugu

$$(V_{DS} > V_{DSsat} = V_{GS} - V_T \text{ egiaztatu beharko dugu})$$

18.2 Ugaltze MOSFETarentzako zirkuitua

Ugaltze MOSFETetarako da baliagarria.

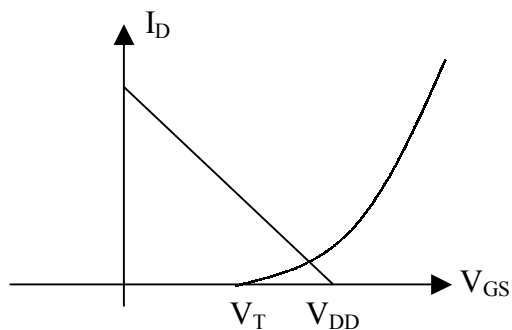
Aurreko zirkuituan, $V_T < 0$ behar genuen, baina, honetan, $V_{GS} > 0$ betetzen da beti eta, beraz, ez da JFETentzat baliagarria; eta urritze MOSFETetarako ere ez ($V_{GD} = 0$).



18.3 Irudia. Metakeztazko MosFetarentzako polarizazio-zirkuitua

Lan-puntua bilatzeko bi ekuazio/kurba hartzen dira abiapuntutzat:

- 1.- I_D - V_{GS} ezaugarri bakarra (asetasunean lan egiten dugunaren hipotesia)
- 2.- $V_{GS} = V_G - 0 = V_{DD} - I_D \times R_D - 0 \rightarrow$ Karga-zuzen estatikoa: $I_D = (V_{DD} - V_{GS})/R_S$



18.4 Irudia. Lan-puntuaren ebazpen grafikoa

Zirkuitu horrek asetasunean lan egitea ziurtatzen digu \rightarrow

$$V_{DS} = V_{GS} - 0 > V_{DSsat} = V_{GS} - V_T = V_{GS} - |V_T|$$

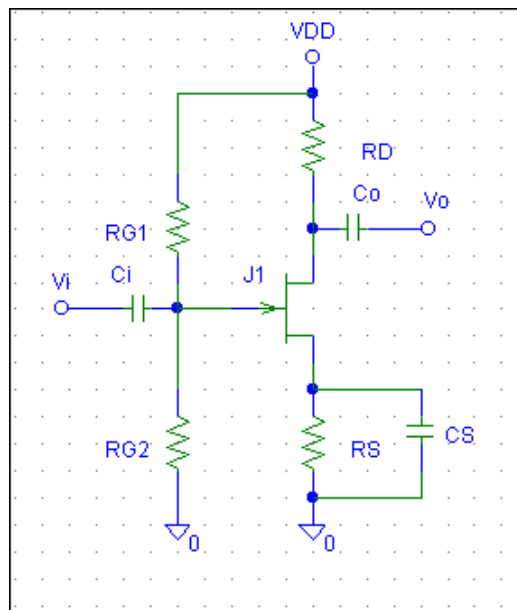
(Beste era batera: $V_{GD} = 0 < V_T \rightarrow$ draina beti itota dago $-JFET$ etan eta Urritze MOSFetetan beti zabalik)

Baldintza bakarra: $V_{DD} > V_T$ izatea (eta $V_T > 0$, noski).

18.3 Polarizazio-zirkuitu orokorra

FET mota guztietarako balio digu baina ez digu berez bermatzen:

- Ez asetasunean egotea
- Ez eta iturri aldean pasabiderik egotea ere.



18.5 Irudia. Polarizazio-zirkuitu orokorra

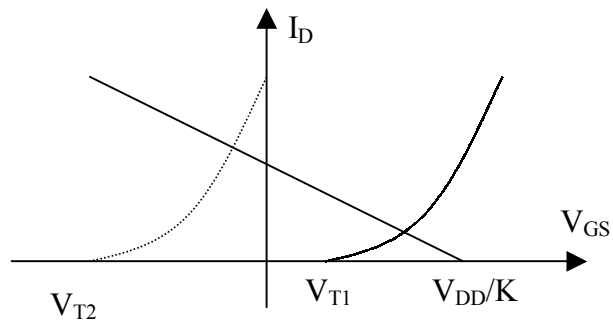
Hortaz, bi baldintza horiek egiaztatu beharko ditugu asetasunean egoteko.

Kurbak:

1.- $I_D - V_{GS}$ ezaugarri bakarra (asetasunean lan egiten dugula onartuta)

2.- $V_{GS} = V_G - V_S = V_{DD} \times R_{G2} / (R_{G1} + R_{G2}) - I_D \times R_S$

$$\rightarrow \text{K Z E: } I_D = [(V_{DD} \times R_{G2} / (R_{G1} + R_{G2})) - V_{GS}] / R_S$$



18.6 Irudia. Lan-puntuaren ebazpen grafikoa V_{T1} ugaltze MOSFETean, V_{T2} JFETean edo urritze MOSFETean (urritze MOSFETetan, $V_{T2} V_{GS}$ positiboetarantz pasa daiteke, JFETetan ez)

Egiaztatu behar:

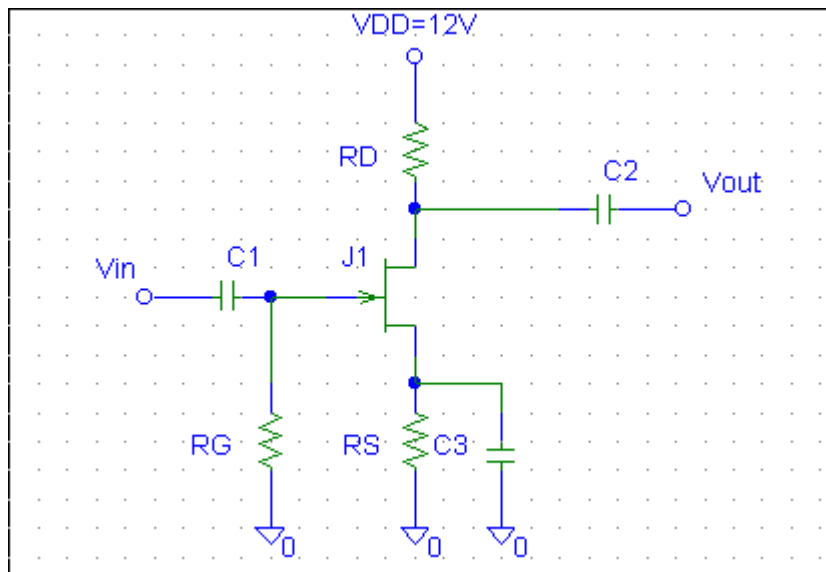
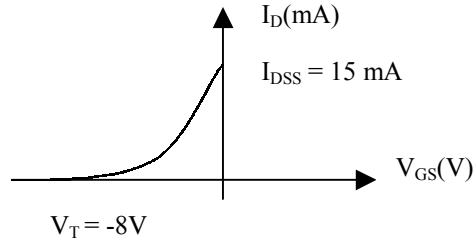
- 1.- $V_{GS} > V_T$, (eta $I_D > 0$) (grafikoki egitean ez dago problemarik)
- 2.- $V_{DS} > V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$

FET TRANSISTOREEI

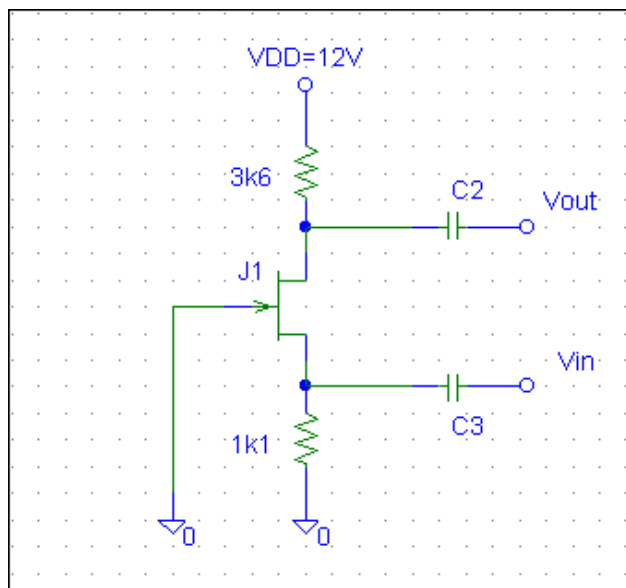
BURUZKO ARIKETAK

Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak

1. Irudian agertzen den iturriko terminaletik autopolarizatzen den zirkuituan $I_D = I_{DSS}/2$ eta $V_D = 9\text{ V}$ izatea nahi dugu. Kalkulatu horretarako behar diren R_D , R_S eta R_G .
DATUA: $I_{Dsat} = I_{Dsat}(V_{GS})$ ezaugarria.



2. Beheko ate komuneko eskeman, kalkulatu tentsio-irabazia eta sarrera eta irteerako inpedantziak (Δ_v , Z_{in} , Z_{out}).

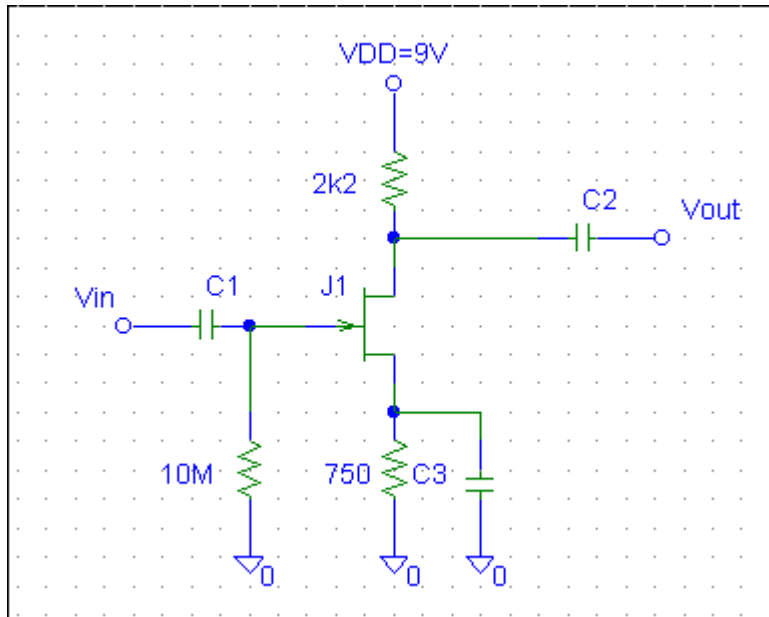


DATUAK: $I_{DSS} = 10\text{ mA}$; $V_T = -4\text{ V}$; ($y_{os} = 0\text{ }\mu\text{S} = 0\text{ }1/\Omega$)

Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak

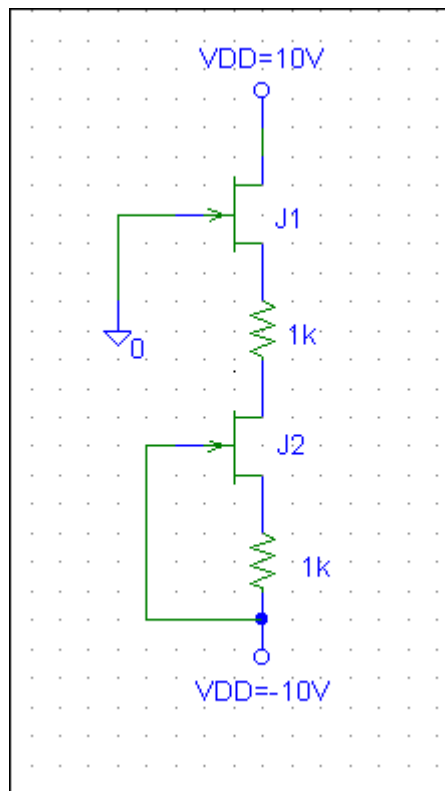
3. Kalkulatu zirkuituko polarizazio-puntua eta tentsio-irabazia.

DATUAK: $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$; $V_T = -4 \text{ V}$; ($y_{os} = 40 \mu\text{S}$). Eta $V_{DD} = 20 \text{ V}$ bada?



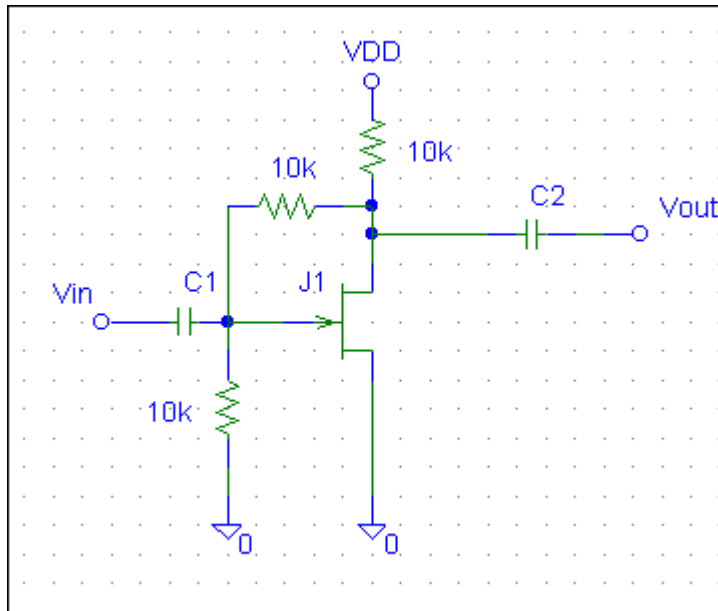
4. Irudiko zirkuituan, kalkulatu V_{DS2} eta I_{D2} balioak.

JFETAREN DATUAK: $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$; $V_{PO} = 2 \text{ V}$.



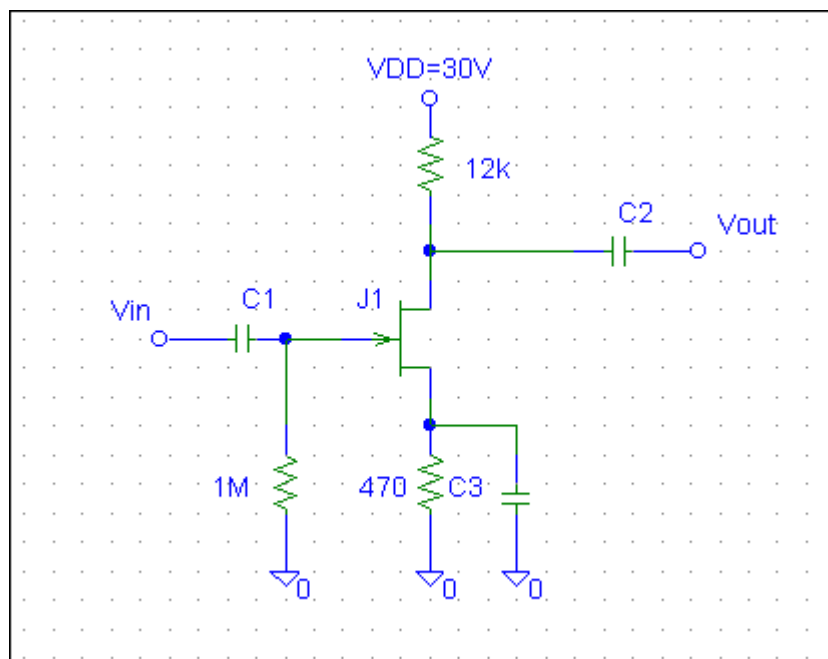
Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak

5. Irudiko zirkuituan, kalkulatu tentsio-irabazia eta sarrerako inpedantzia (A_v , Z_{in}). ($g_m = 2 \text{ m}\Omega^{-1} = 2 (\text{k}\Omega)^{-1}$).



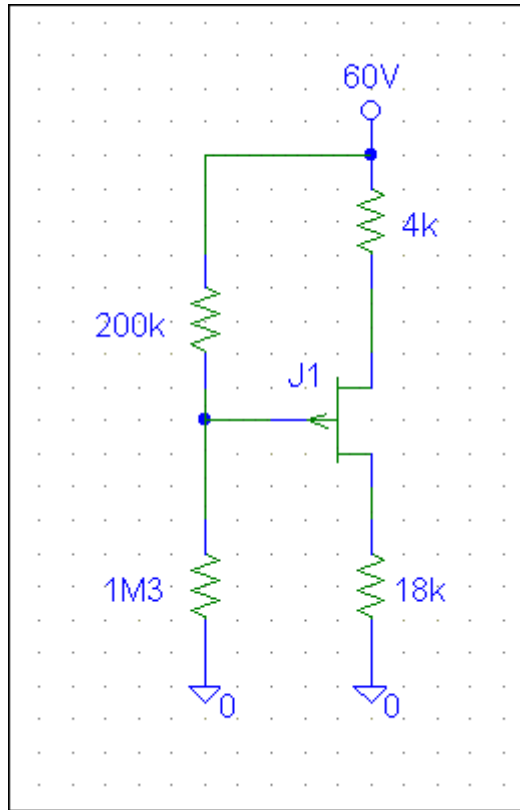
6. Irudiko anplifikadoreak ondorengo parametroak ditu: $R_D = 12 \text{ k}\Omega$; $R_G = 1 \text{ M}\Omega$; $R_S = 470 \Omega$; $V_{DD} = 30 \text{ V}$; $I_{DSS} = 3 \text{ mA}$; $|V_p| = 2.4 \text{ V}$; $r_d \gg R_d$. Kalkulatu:

- Lan-puntua.
- Seinale txikiko tentsio-irabazia.

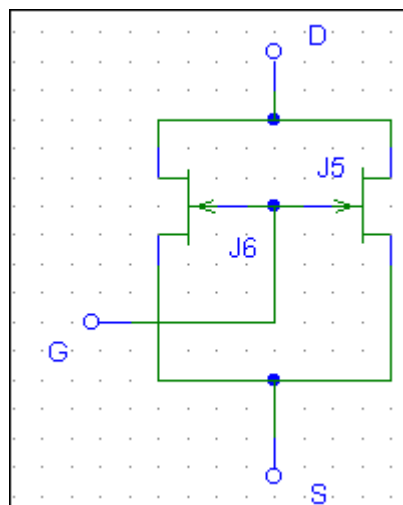


Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak

7. Irudiko p pasabideko JFETaren parametroak, honako hauek dira:
 $|I_{DSS}| = 4 \text{ mA}$; $V_T = 4 \text{ V}$;
Kalkulatu haren polarizazio puntua.



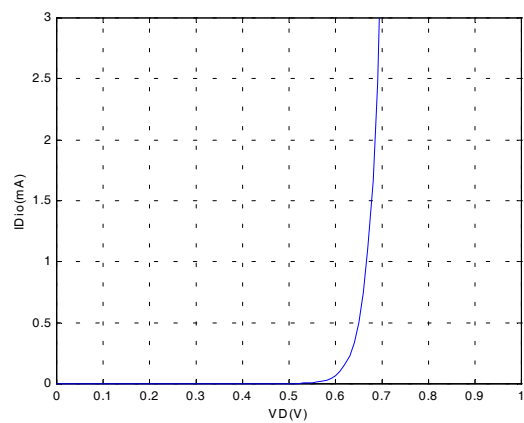
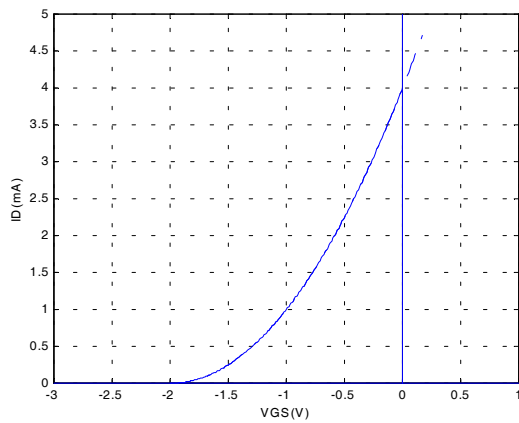
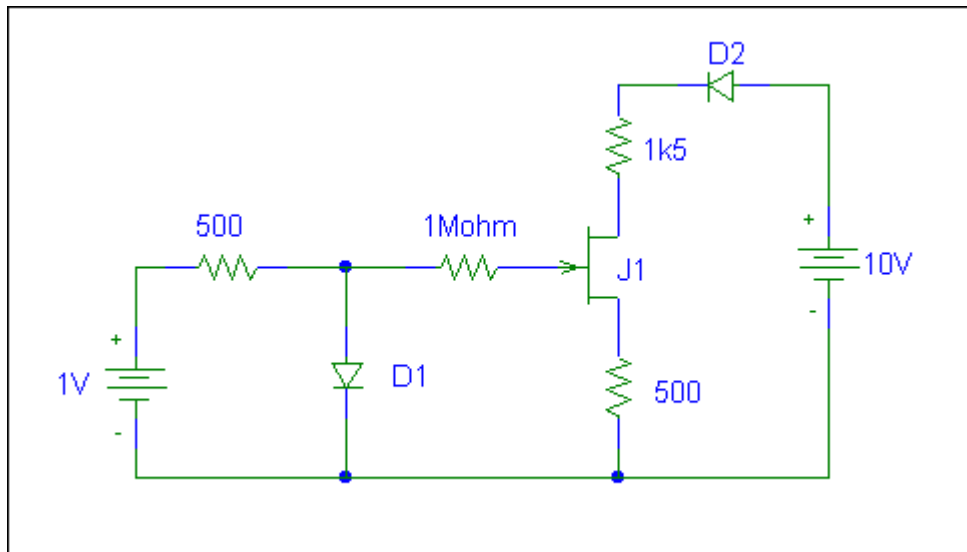
8. Irudiko bi FETen baliokidea den FET bakarraren parametroak kalkulatu. (Irudiko Fetak berdin-berdinak dira: I_{DSS} , V_p)



Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak

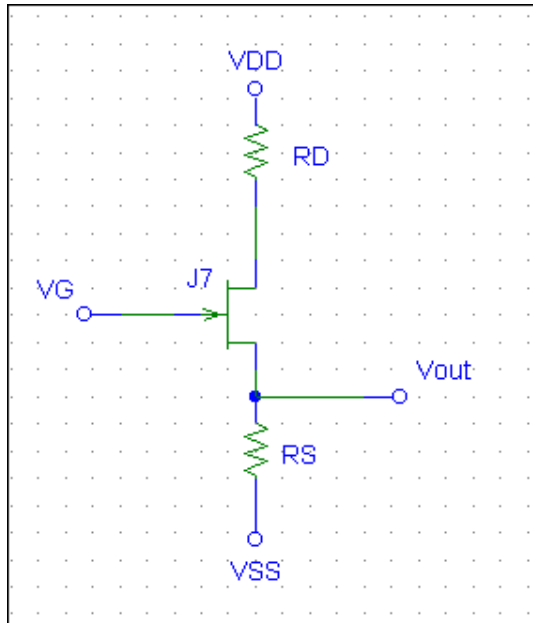
9. Zirkuituan, bi diodoak berdin berdinak dira eta beren ezaugarriak eta FETarenak beheko irudikoak dira. Kalkulatu:

- a) I_{DSS} korronea
- b) Itotze tentsioa
- c) D_1 diodoaren bornetako tentsioa
- d) I_D
- e) V_{DS}



Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak

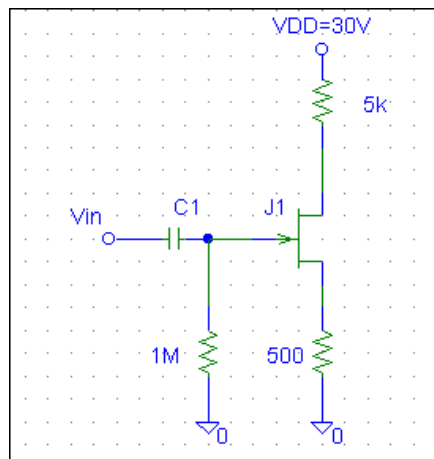
10. Irudiko FETaren ezaugarriak: $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$ eta $V_{PO} = 3 \text{ V}$. $R_D = 3 \text{ k}\Omega$, $R_S = 8 \text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 15 \text{ V}$, $V_{SS} = -8 \text{ V}$. Kalkulatu V_{GS} eta V_0 , beheko egoeretan:
- $V_G = 0 \text{ V}$
 - $V_G = 10 \text{ V}$
 - Zein kasutan dira handiagoak JFETaren eskualde lineal eta graduala?



11. Irudiko FETaren korrontekak honako ekuazio honi jarraitzen dio:

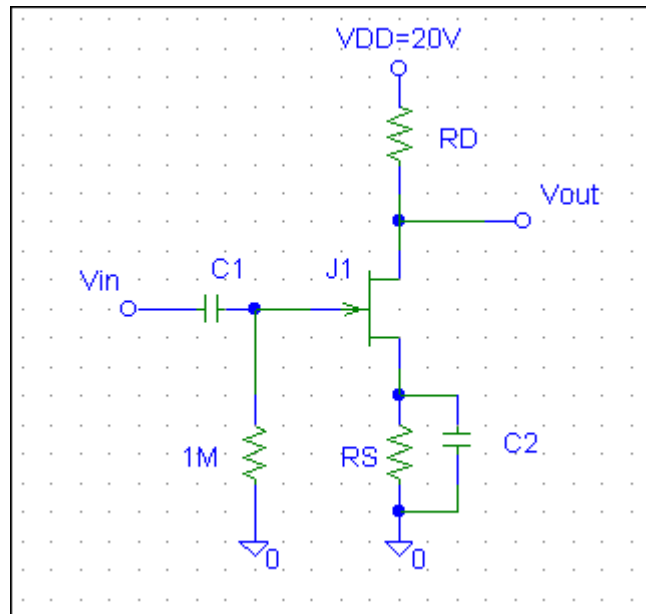
$$I_D = 16 \cdot \left(1 + \frac{V_{GS}}{4 \text{ volt}} \right)^2 \text{ mA}$$

- Kalkulatu lan-puntua
- Frogatu $g_m = \frac{2}{V_p} \sqrt{I_D \cdot I_{DSS}}$ betetzen dela, eta kalkulatu haren balioa



Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak

12. $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$, $V_{PO} = 5 \text{ V}$. Lan-puntua: Q ($I_D = 2 \text{ mA}$, $V_{DS} = 8 \text{ V}$). Kalkulatu:
- R_D eta R_S .
 - Tentsio-irabazia.
 - Beste FET bat ($I_{DSS} = 9 \text{ mA}$ eta $V_{PO} = 4 \text{ V}$) jartzean lortzen den lan-puntu berria.



Eremu efektuko transistoreei buruzko ariketak