

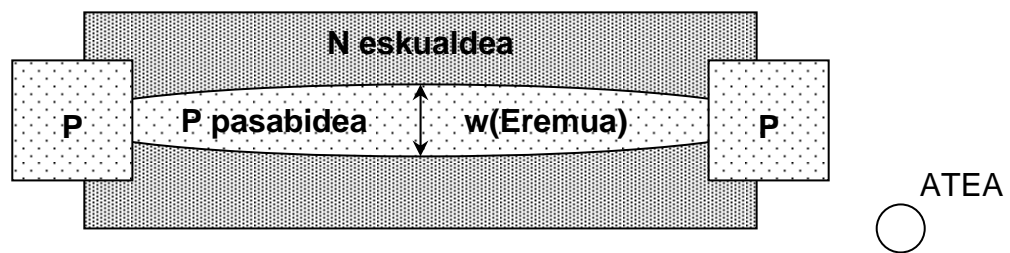
15. EREMU EFEKTUKO TRANSISTOREAK I: SAILKAPENA ETA MOSFETA

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* modulitzen da pasabidearen eroankortasuna.
 - Metal-Erdieroale FETak: MESFET (MEtal Semiconductor Field Effect Transistor). MOSFETak bezalakoak dira, baina isolamendurik gabekoak.

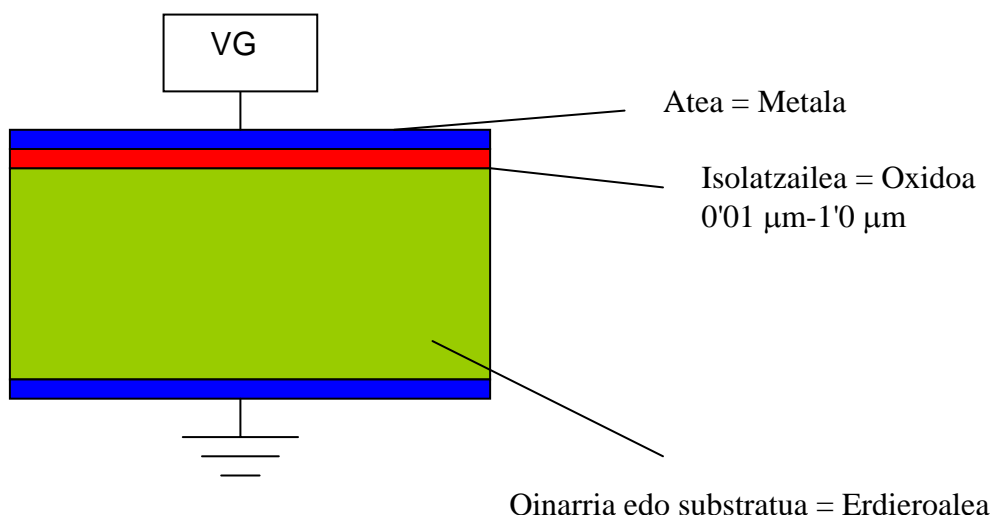
		Eragingailuaren izena	
		Orekan $w = 0$	Orekan $w > 0$
Atea	Isolatua (MOSFET/MISFET)	Ugaltze MOSFETa	Urritze MOSFETa
	Junturazkoa	-	JFET (pn)
		-	MESFET (p-metal)

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, erakarpen elektrostatikoaren 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.

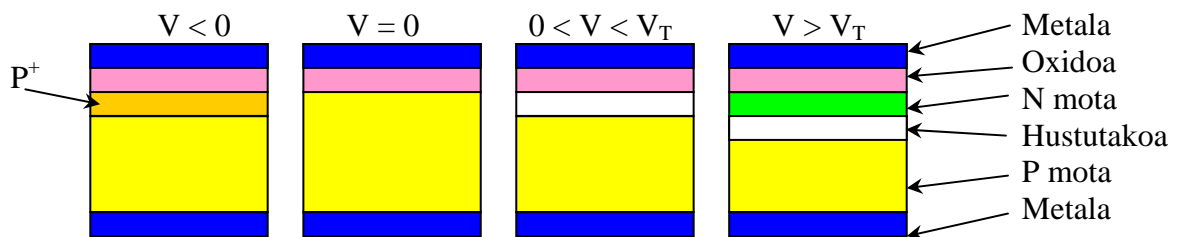
$V_G \uparrow \Rightarrow$ Deplexio gunearen zabalera \uparrow

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. Elektroiei askeak dituen n motako geruza bat sortzen da. Nolabait, erdieroale mota aldatu da.

Alderanzketako geruza deituriko geruza hori eroalea da, bertako elektroiek 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:

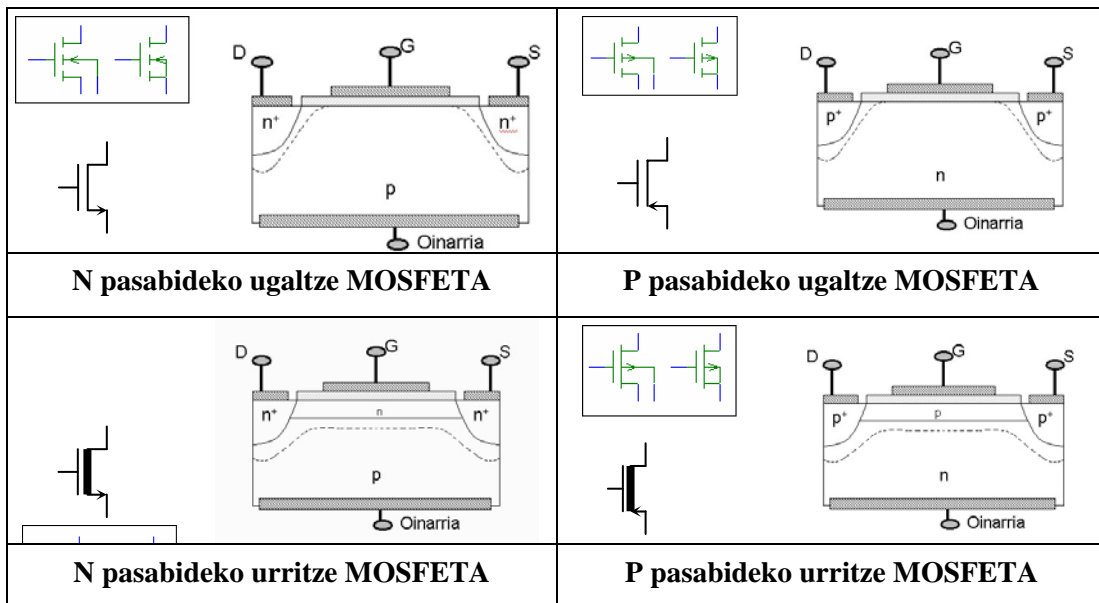
- Tentsio positiboak aplikatuz gero, n kanala zabalagoa (sakonagoa) izango da.
- Tentsio negatiboak aplikatzean, n pasabidea sortzen duten elektroiei askeak desagertzen hasiko dira.
- V_T ($-|V_T|$) tentsiotik aurrera ($V_G < -|V_T|$) pasabidea erabat desagertzen da (hustutako eskualde bat agertzen da 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.



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 elektroi 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.

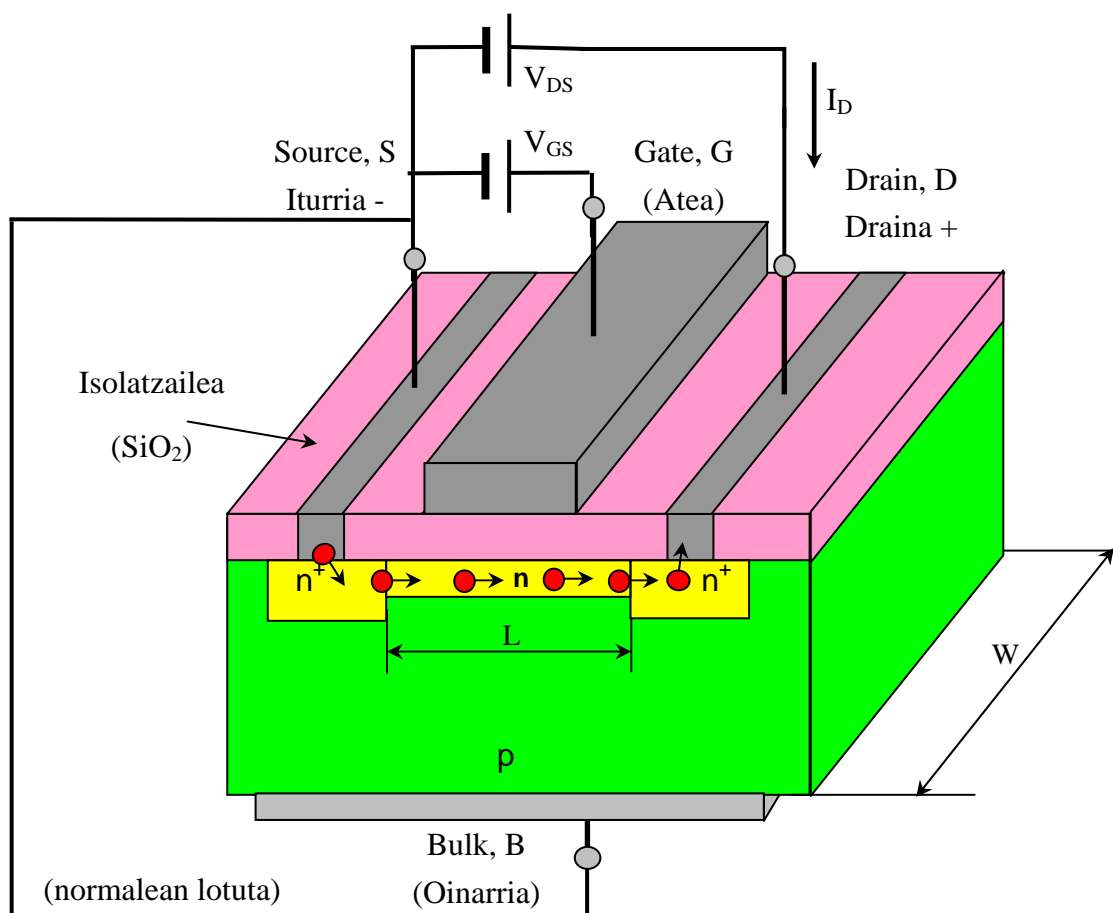
b) N pasabideko urritze MOSFET transistorea

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

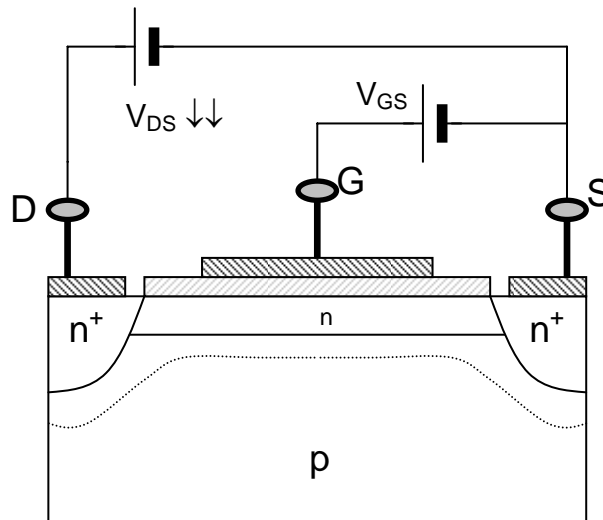
Abiapuntuak:

- 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 MOSetan; 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].

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{pasabidea}} = G_{pasabidea} \cdot V_{DS} = k_1 \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS}$$

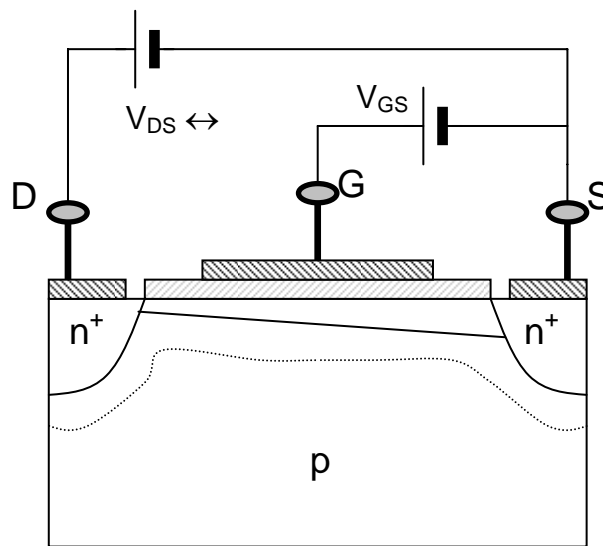
Portaera erresistiboa edo lineala du kasu horretan. (MOSa, V_{GS} tentsioak kontrolaturiko balioa duen erresistentzia da). **ESKUALDE LINEALEAN EDO ERRESISTIBOAN GAUDE.**



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.

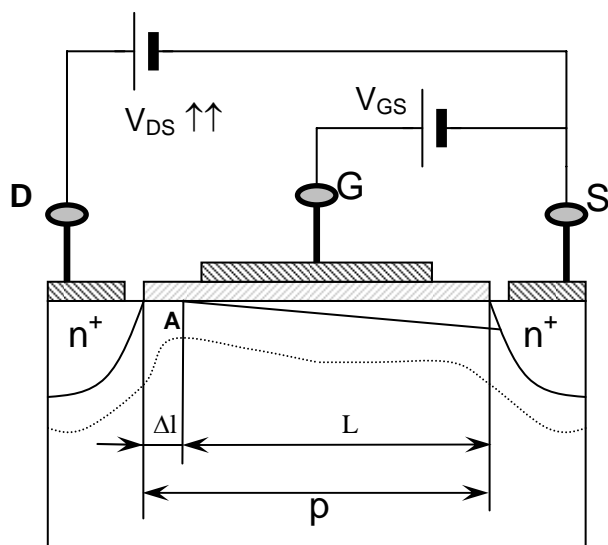
$$I_D = k_2 \cdot (2 \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2)$$

- 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 korranteak 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 korrantea:

$$I_D = V_{DS\ pinch\ off} / R_{zabalik\ dagoen\ pasabidea} \sim \text{konstantea } V_{DS\ rekin} = I_{D\ asetasuneko}$$

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 korrantea” izendapena (kontuz: korrante 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

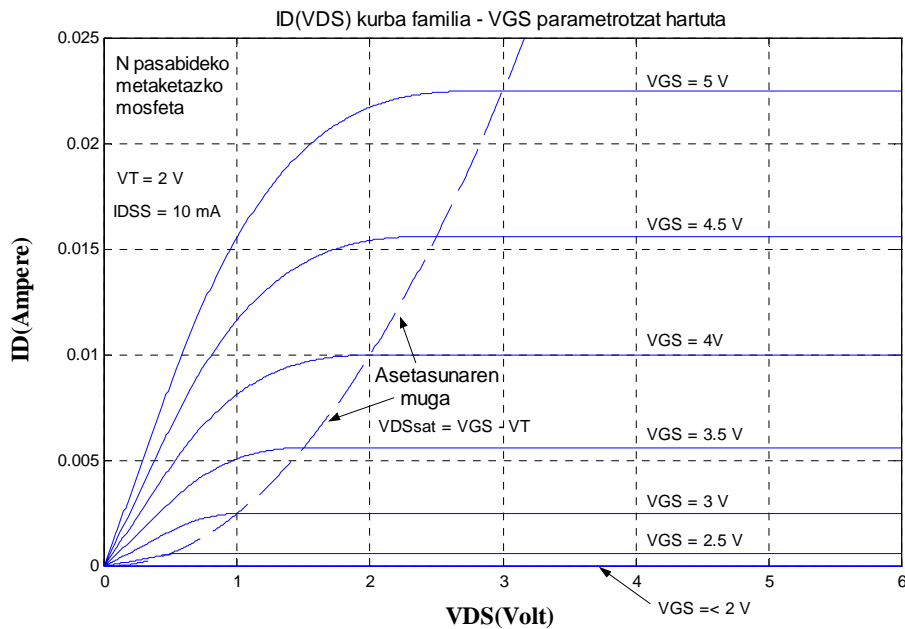
Zenbait kasutan (Spice programan, adibidez), I-V kurba λ eta β parametro lagungarriak erabiliz definitzen dira. Orduan:

$$I_D = \beta \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) (V_{GS} - V_T)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T} \right)^2 \Rightarrow I_{DSS} = \beta \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) \cdot V_T^2$$

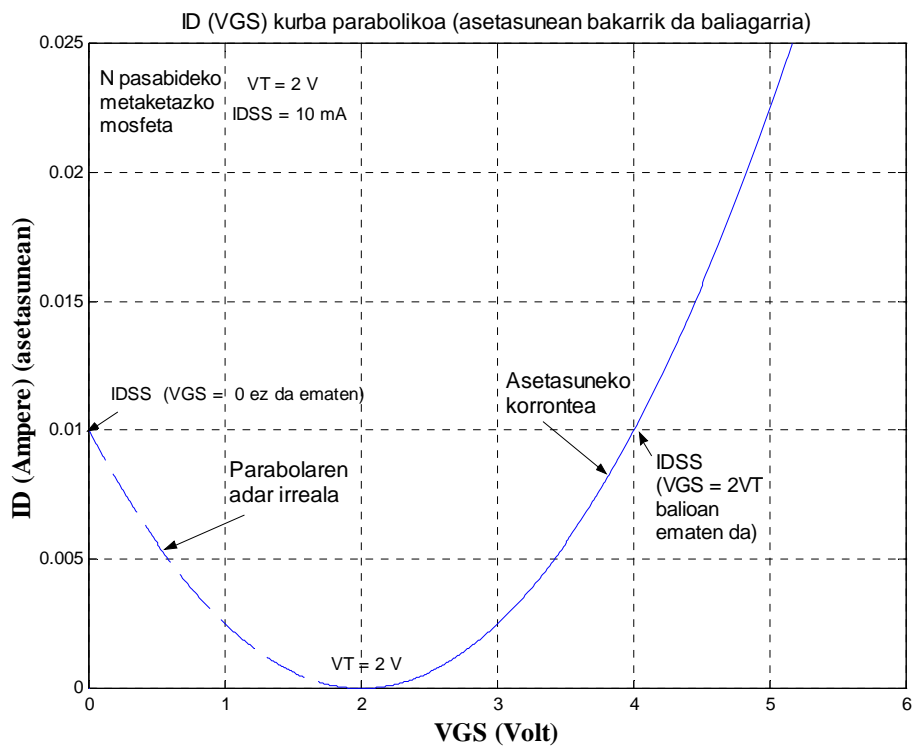
Askotan, $\lambda = 0$, eta $I_{DSS} = \beta \cdot V_T^2$

15.3 Ezaugarri-kurbak

15.3.1 N PASABIDEKO UGALTZE MOSFETA ($I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_T = 2 \text{ V}$)

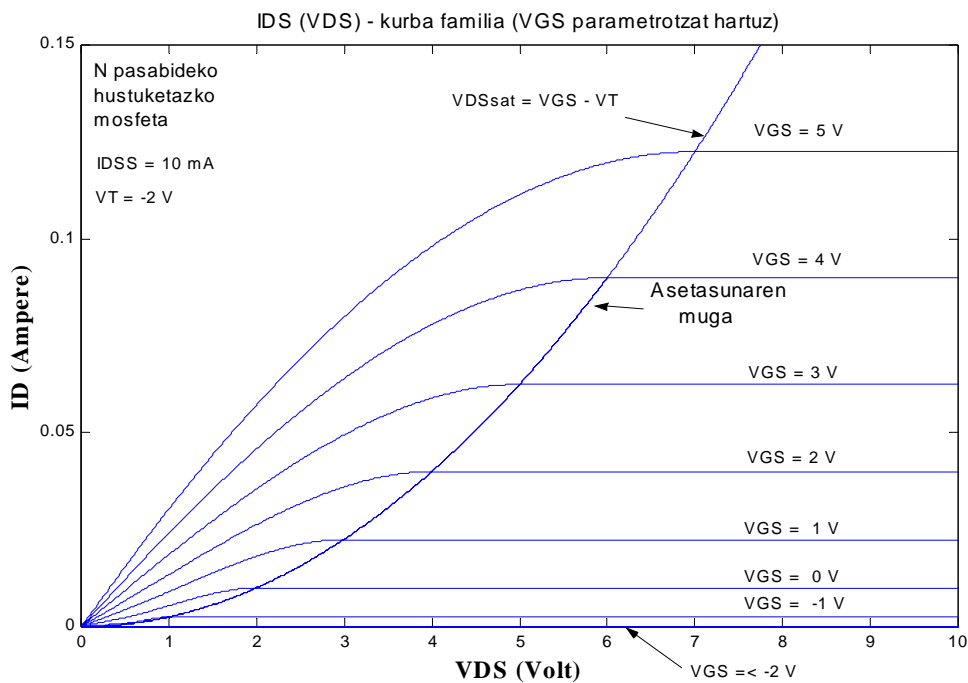


15.9 Irudia. N pasabideko ugaltze MOSFETaren I-V kurba orokorrak

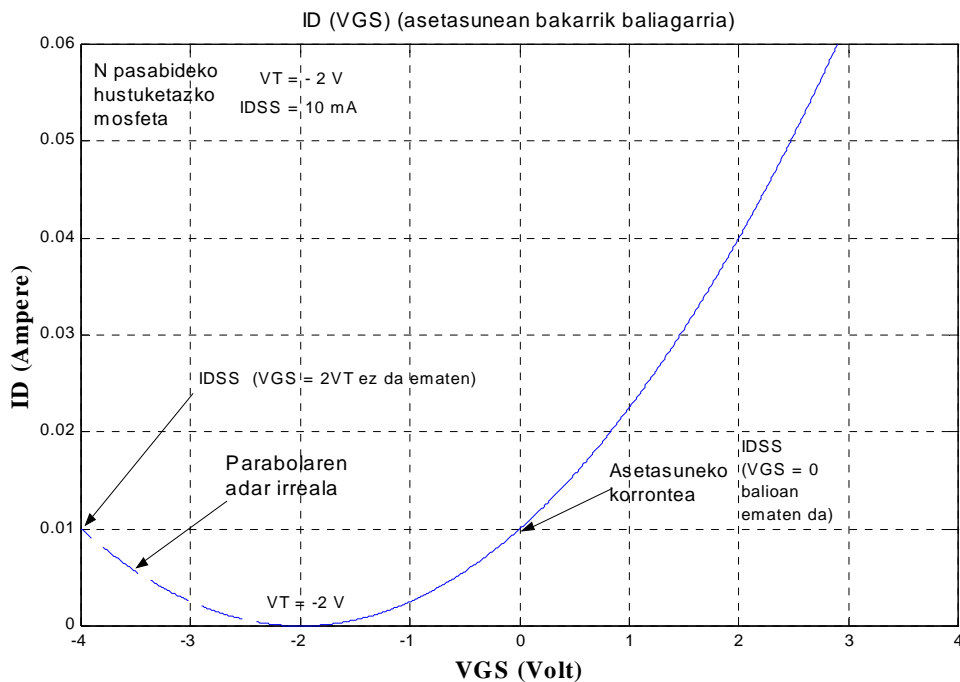


15.10 Irudia. N pasabideko ugaltze MOSFETaren I-V kurba asetasunean

15.3.2 N PASABIDEKO URRITZE MOSFETA ($I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_T = -2 \text{ V}$)

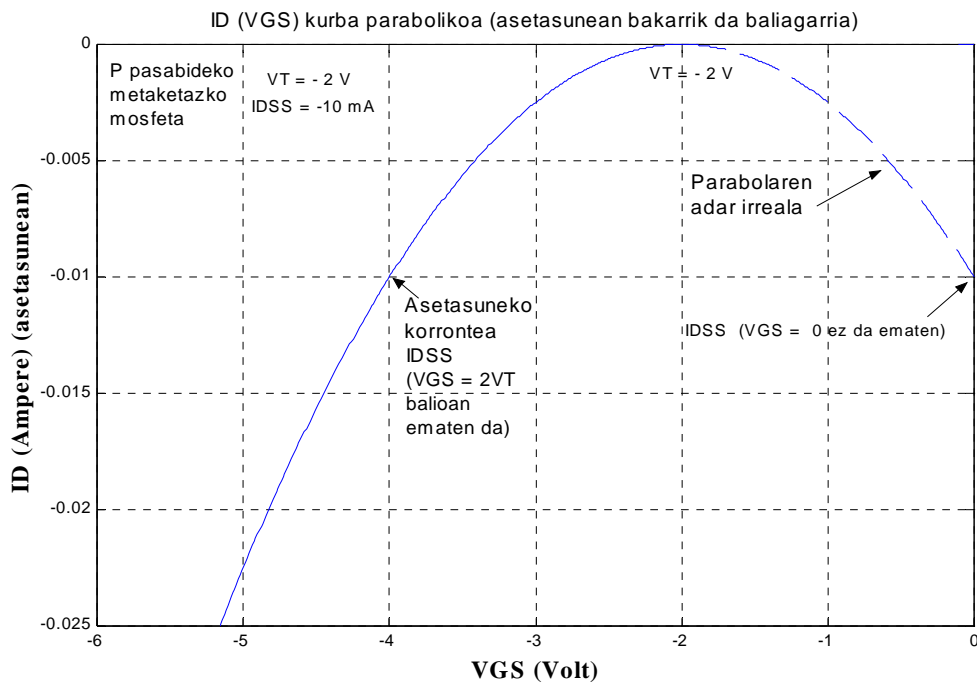


15.11 Irudia. N pasabideko urritze MOSFETaren I-V kurba orokorrak



15.12 Irudia. N pasabideko urritze MOSFETaren I-V kurba asetasunean

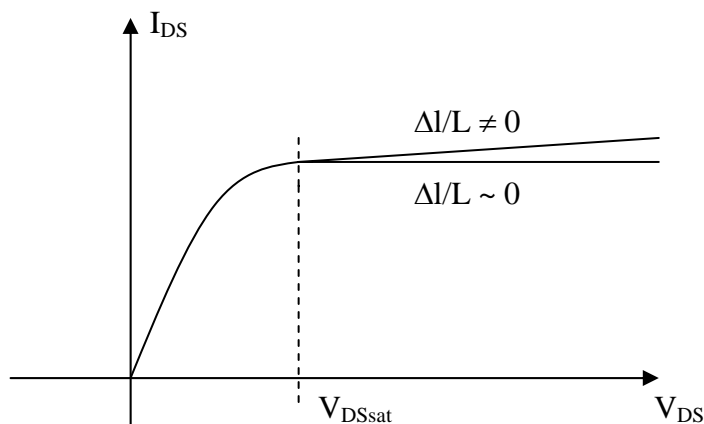
15.3.3 P PASABIDEKO UGALTZE MOSFETA ($I_{DSS} = -10 \text{ mA}$, $V_T = -2\text{V}$)



15.13 Irudia. P pasabideko ugaltze MOSFETaren I-V kurba asetasunean

15.3.4 KURBA IDEALAREKIKO DESBIDERATZEAK: I-V KURBA ERREALAK

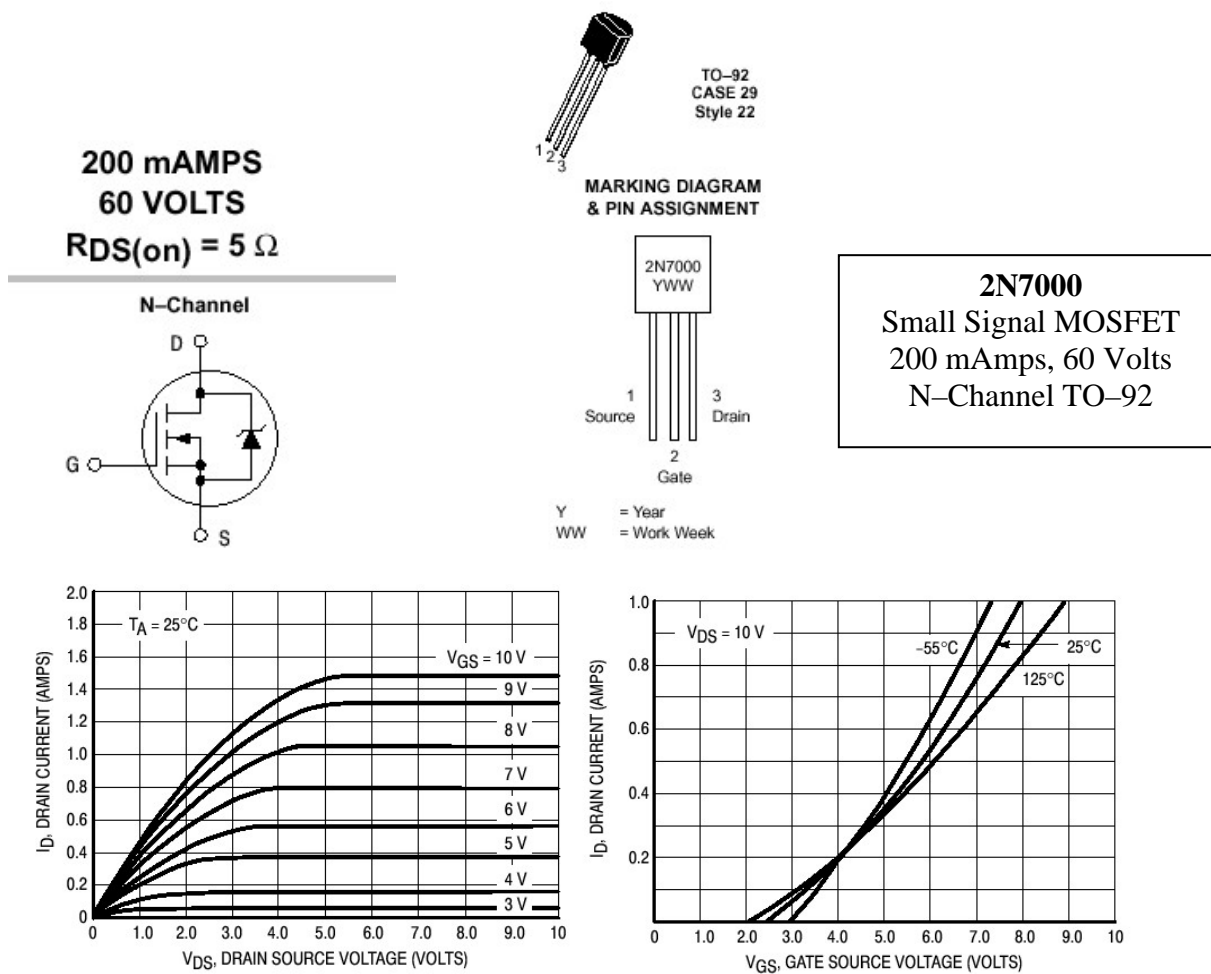
Egia esan, estugunearen eroankortasuna ez da zeharo nulua, eta *soberako* $V_{DS} - V_{D,sat}$ tentsioa erortzeko behar den ΔL luzera (kanal laburreko MOSFETetan) alderagarria gerta liteke L-rekin zenbait kasutan. Ondorioz, V_{DS} igoz gero, I_D korronteak pixka bat egiten du gora eta, ezaugarri-kurbetan, 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)

