



eman la zabal zazu

Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Bilbao

# electrónica general

## FETs

## tema 4

- 1.- Introducción.
- 2.- Transistores de unión de efecto de campo (JFET).
  - 2.1.- Estructura Básica.
  - 2.2.- Símbolos.
  - 2.3.- Principio de funcionamiento.
    - 2.3.1.- Influencia de  $V_{DS}$ .
    - 2.3.2.- Influencia de  $V_{GS}$ .
  - 2.4.- Curvas características.
  - 2.5.- Zonas de trabajo.
- 3.- Transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET).
  - 3.1.- MOSFET de Acumulación.
  - 3.2.- MOSFET de Deplexión.
- 4.- CMOS

# 1.- Introducción

## Comparativa.

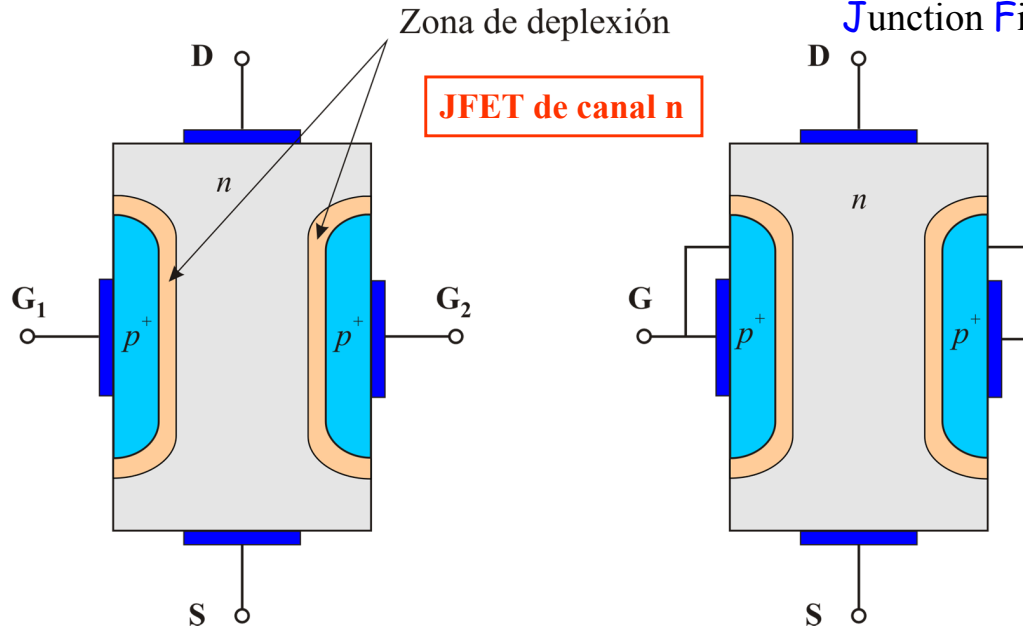
<i>FET</i>	<i>BJT</i>
Controlado por tensión	Controlado por corriente
Canal n y canal p	nnp y pnp
Unipolar	Bipolar
Mayor estabilidad frente a T <sup>a</sup>	
MOSFET más pequeños	Similar tamaño a JFET
Se pueden conectar como R y C	

## 2.- Transistores de Unión de Efecto de Campo JFET

### 2.1.- Estructura básica.

JFET

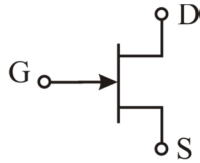
Junction Field Effect Transistor



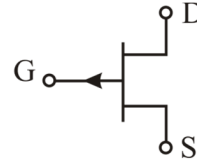
<b>D = Drenador:</b>	Terminal por el que salen los portadores
<b>S = Fuente:</b>	Terminal por el que entran los portadores
<b>G = Puerta:</b>	Controla la corriente de portadores

## 2.- Transistores de Unión de Efecto de Campo JFET

### 2.1.- Símbolos.

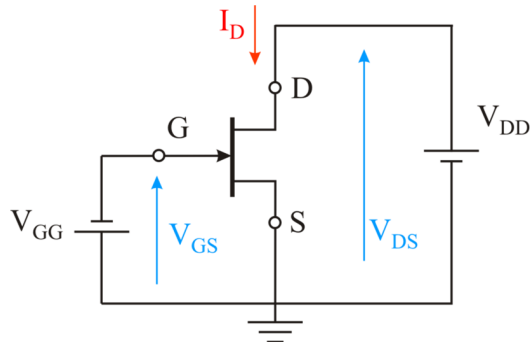


Canal n



Canal p

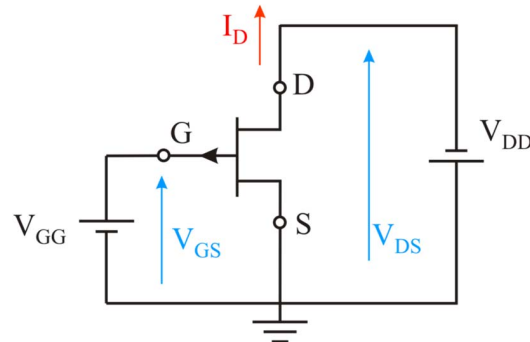
### Polarización.



$V_{DS}$  positiva

$V_{GS}$  negativa

$I_D$  positiva (entrante)



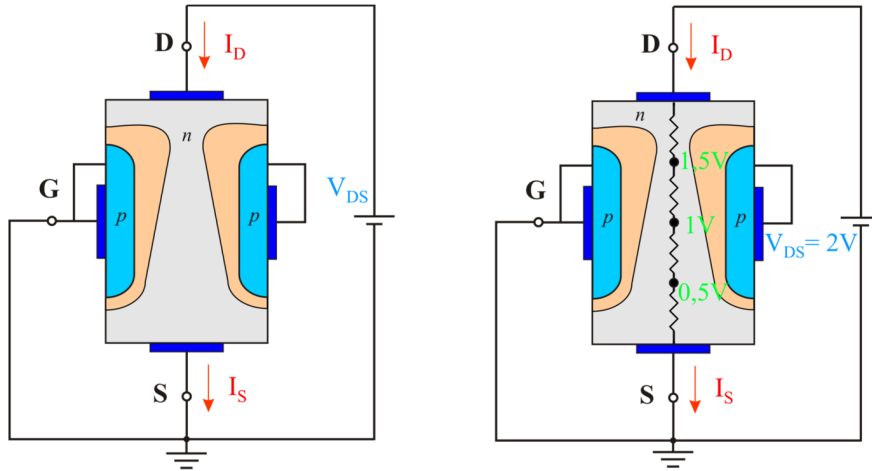
$V_{DS}$  negativa

$V_{GS}$  positiva

$I_D$  negativa (saliente)

## 2.3.- Principio de funcionamiento.

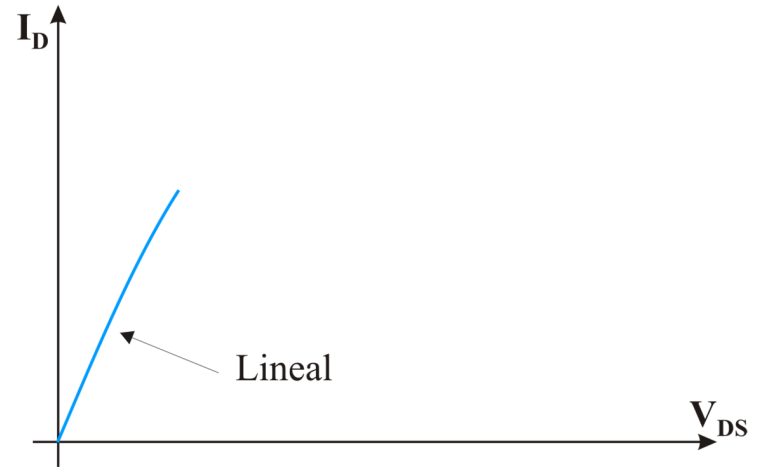
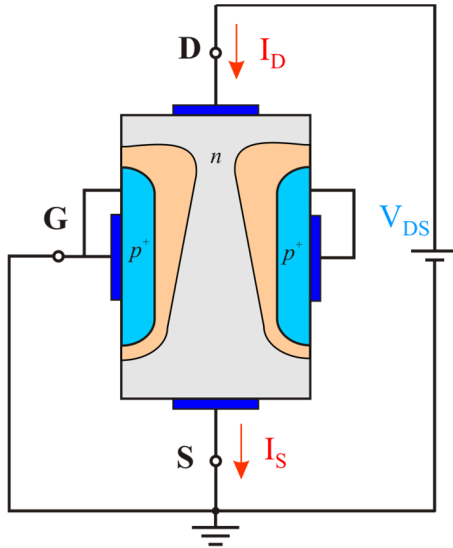
### 2.3.1.- Influencia de $V_{DS}$ .



El canal se estrecha más del lado del *Drenador*

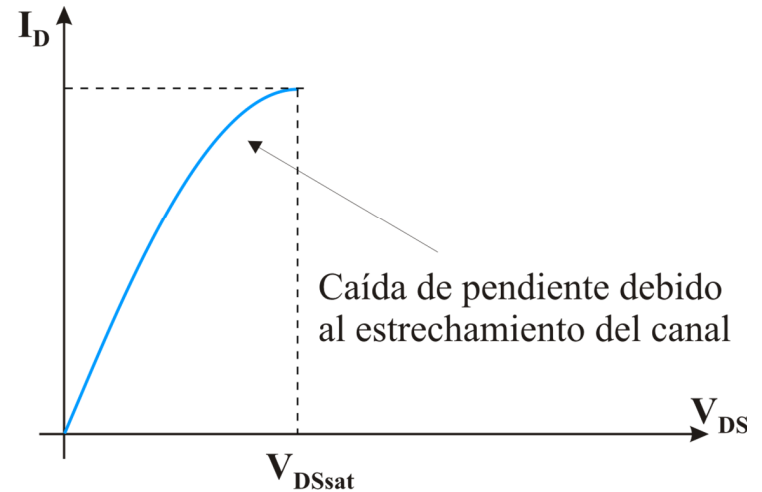
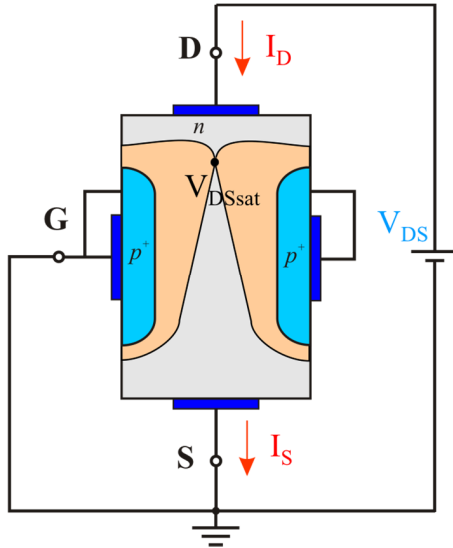
## 2.3.- Principio de funcionamiento.

### 2.3.1.- Influencia de $V_{DS}$ .



## 2.3.- Principio de funcionamiento.

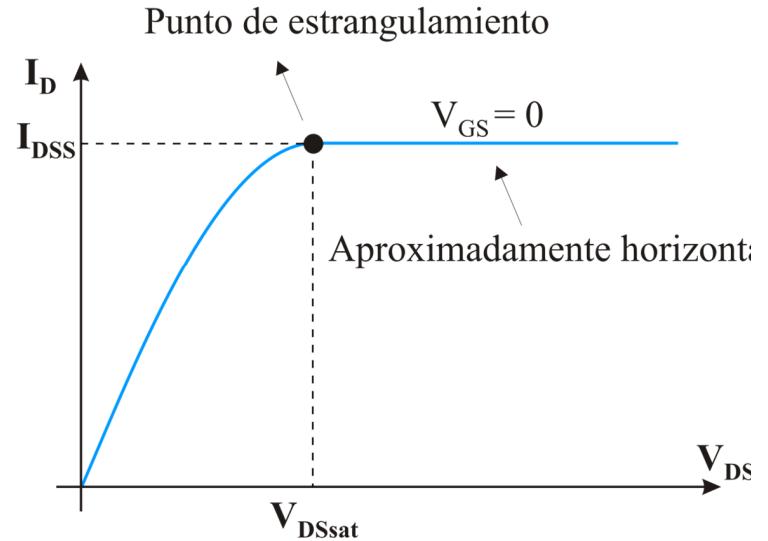
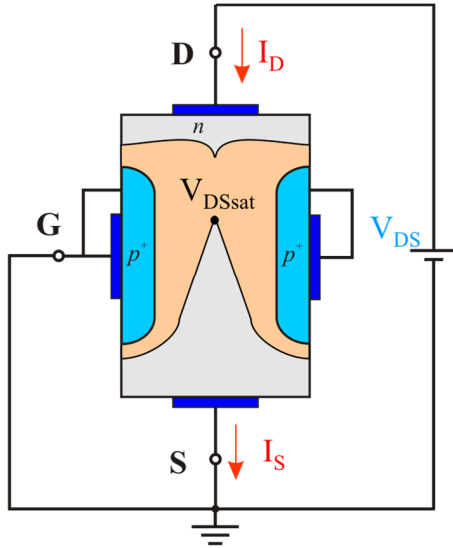
### 2.3.1.- Influencia de $V_{DS}$ .





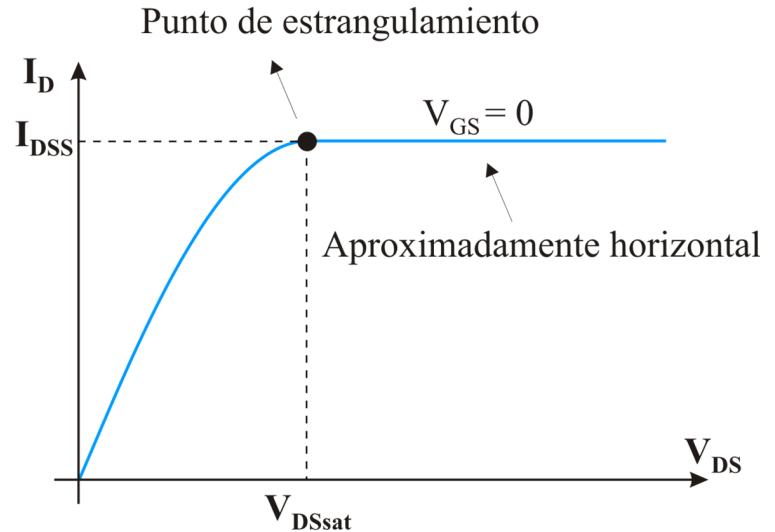
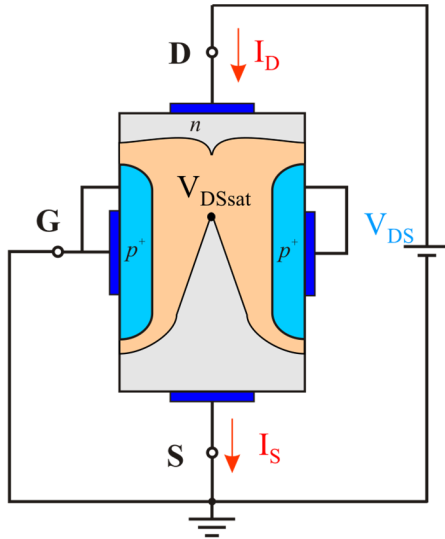
## 2.3.- Principio de funcionamiento.

### 2.3.1.- Influencia de $V_{DS}$ .



## 2.3.- Principio de funcionamiento.

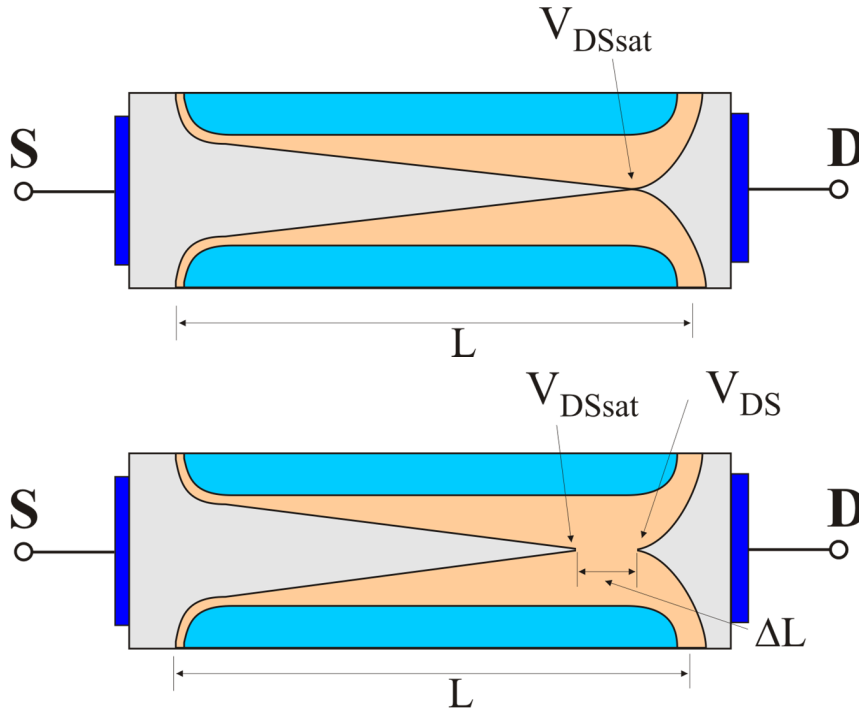
### 2.3.1.- Influencia de $V_{DS}$ .



## 2.3.- Principio de funcionamiento.

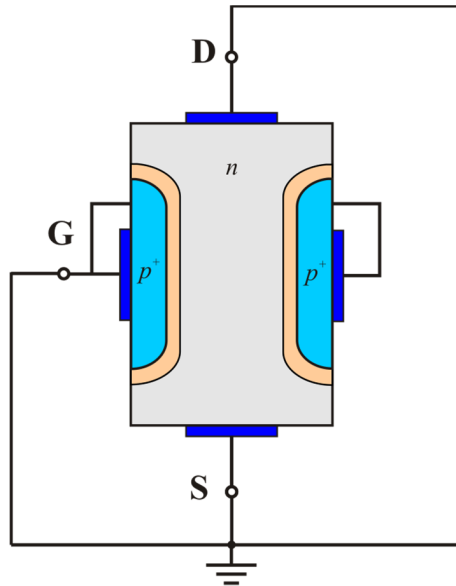
### 2.3.1.- Influencia de $V_{DS}$ .

*Hipótesis de canal largo  $L \gg \Delta L$*



## 2.3.- Principio de funcionamiento.

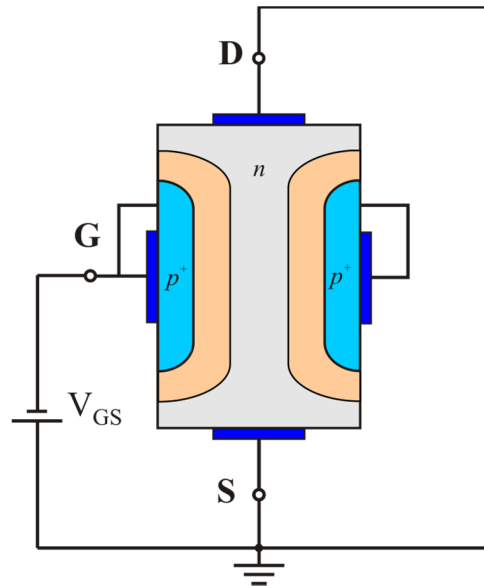
### 2.3.2.- Influencia de $V_{GS}$ .



## 2.3.- Principio de funcionamiento.

### 2.3.2.- Influencia de $V_{GS}$ .

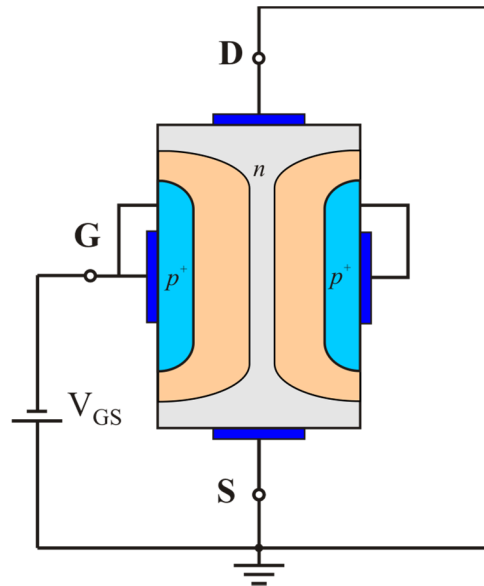
En un JFET de canal  $n$   
 $V_{GS}$  es negativa



## 2.3.- Principio de funcionamiento.

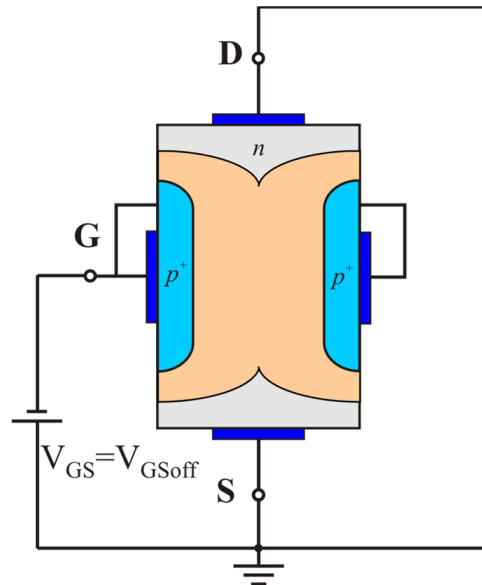
### 2.3.2.- Influencia de $V_{GS}$ .

Con  $V_{GS}$  se modula la anchura del canal



## 2.3.- Principio de funcionamiento.

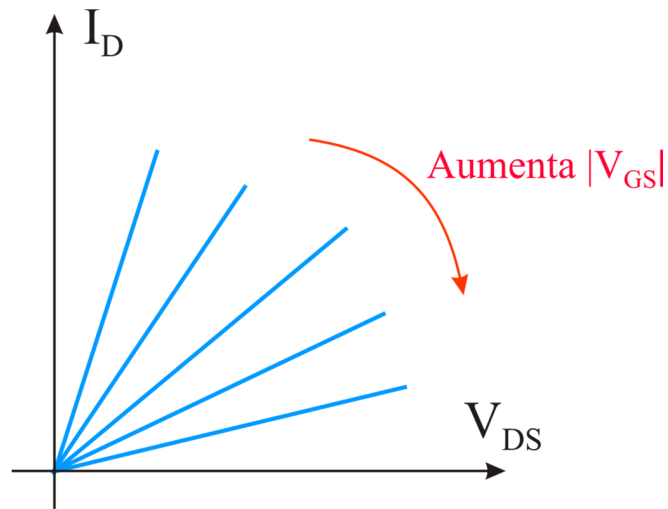
### 2.3.2.- Influencia de $V_{GS}$ .



*Cuando  $V_{GS} = V_{GSoff}$  se produce la estrangulación total del canal con independencia de la tensión  $V_{DS}$  aplicada.*

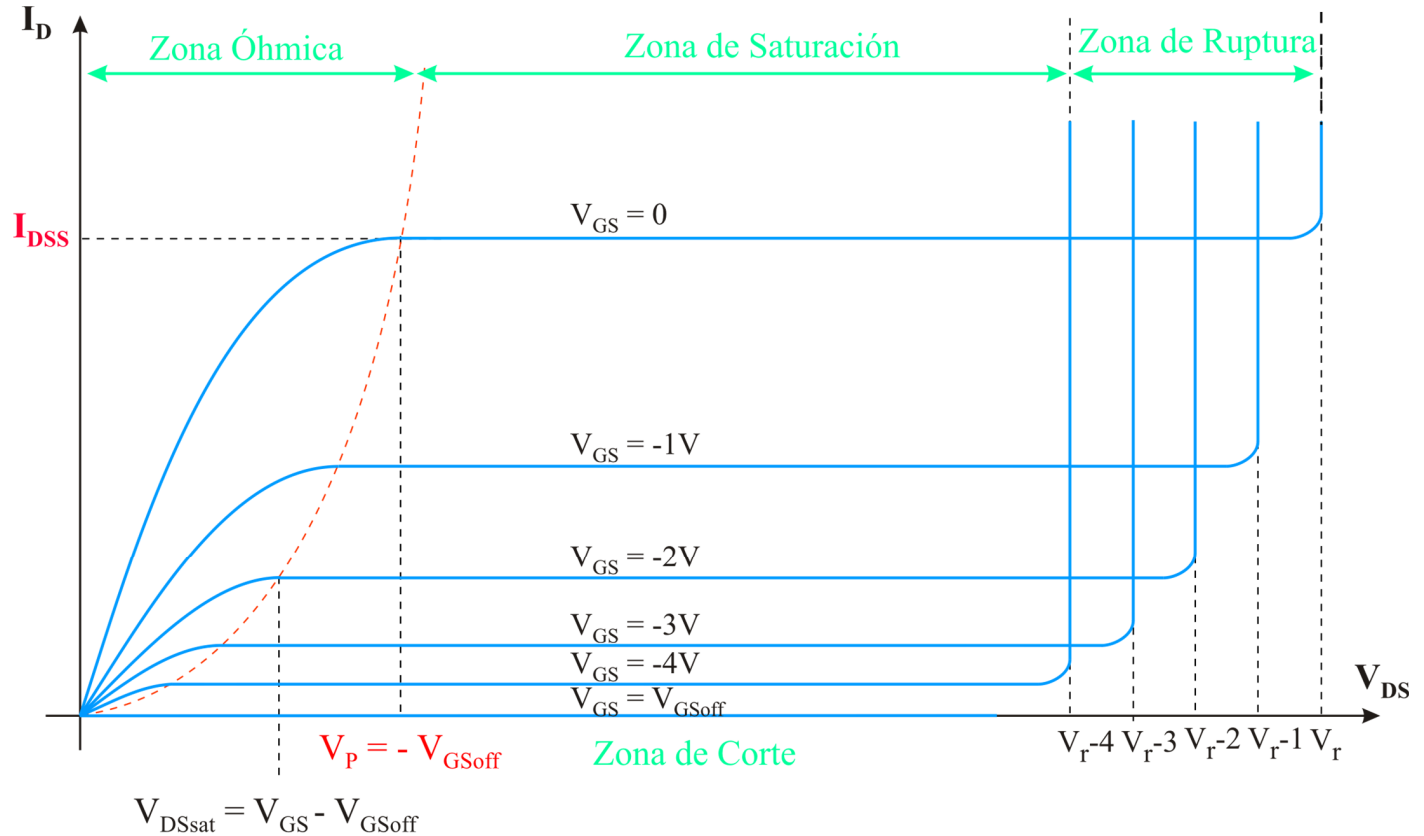
## 2.3.- Principio de funcionamiento.

### 2.3.2.- Influencia de $V_{GS}$ .





## 2.4.- Curvas características.



## 2.5.- Zonas de trabajo.

### Zona de corte o de no conducción

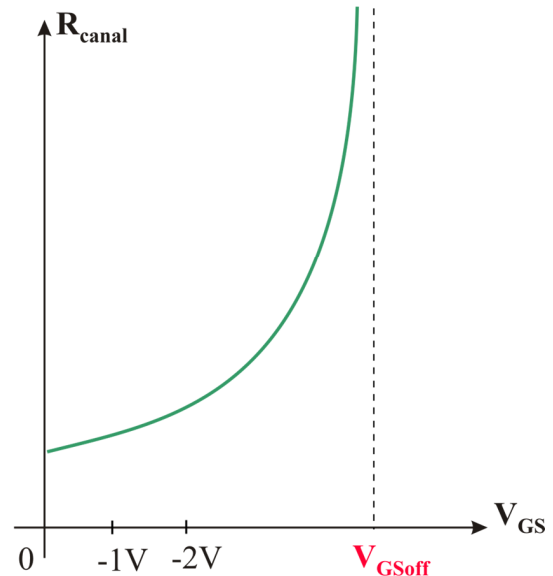
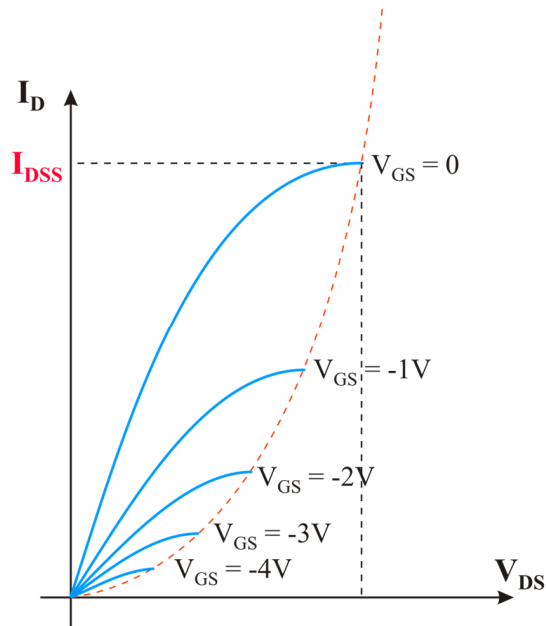
Para valores de  $V_{GS} \leq V_{GSoff}$

*El canal está completamente cerrado,  
por lo que no hay ninguna corriente por el dispositivo*

## 2.5.- Zonas de trabajo.

### Zona de óhmica o de no saturación

Para valores de  $V_{DS} \leq V_{DSsat} = V_{GS} - V_{GSoff}$

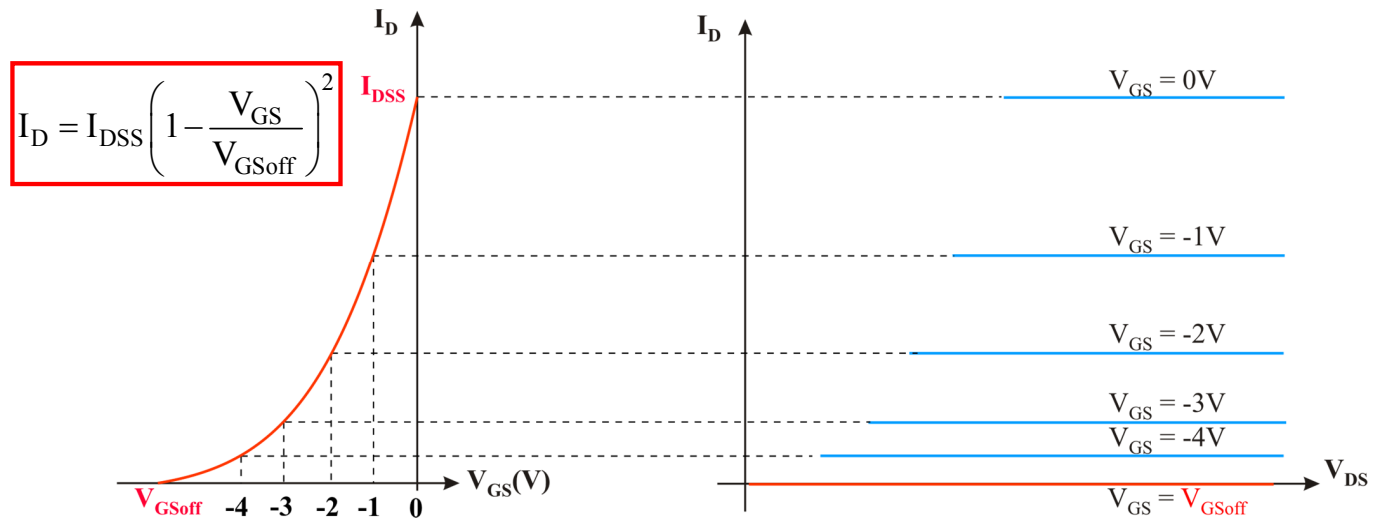


## 2.5.- Zonas de trabajo.

### Zona de saturación o de corriente constante.

Para valores de  $V_{DS} \geq V_{DSsat} = V_{GS} - V_{GSoff}$

$I_D$  es independiente de la tensión  $V_{DS}$  sólo depende de la tensión  $V_{GS}$



*El JFET se comporta como una fuente de corriente controlada por  $V_{GS}$*

## 2.5.- Zonas de trabajo.

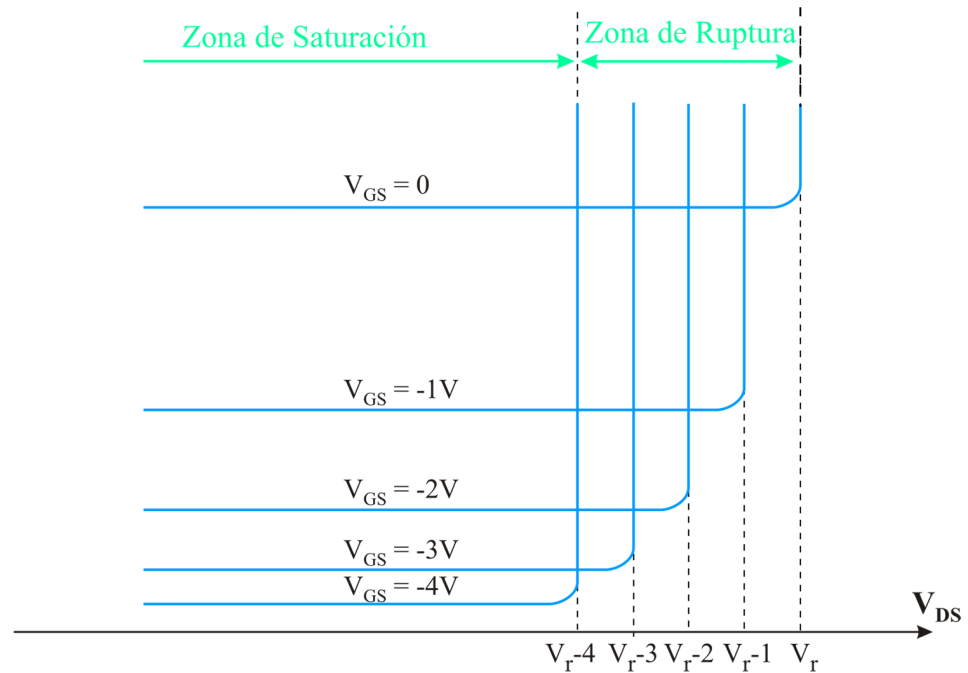
### Zona de ruptura.

*El JFET rompe cuando en la unión pn hacia la zona del drenador se supera el valor de la tensión inversa máxima ( $V_r$ )*

Rompe cuando  $V_{DG} \geq V_r$

$$V_{DS} = V_{DG} + V_{GS}$$

$$V_{DS \text{ ruptura}} = V_r + V_{GS}$$



**MOSFET**

MOS

**M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor

↑  
Oxido de Silicio → aislante  
MIS → Insulator (aislante)

Hay dos grandes tipos de MOSFET:

- MOSFET de acumulación o de enriquecimiento
- MOSFET de depleción o de empobrecimiento

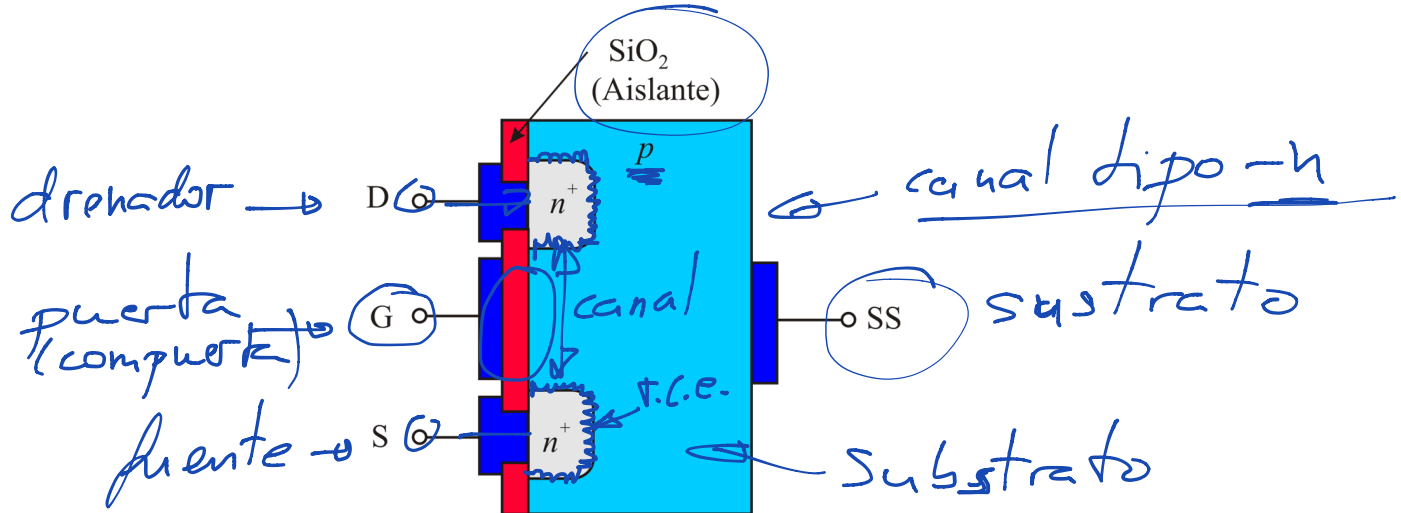
} canal-n  
  canal-p  
  
} canal-n  
  canal-p

↳ mismas ecuaciones que  
el JFET

## 3.1.- MOSFET de Acumulación

### 3.1.1.- Estructura básica.

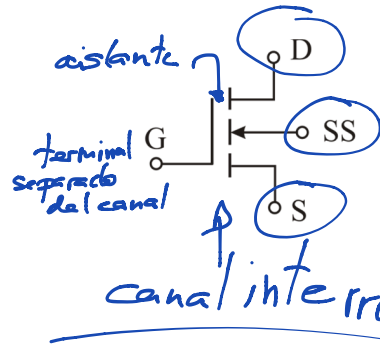
#### MOSFET acumulación canal n



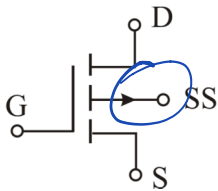
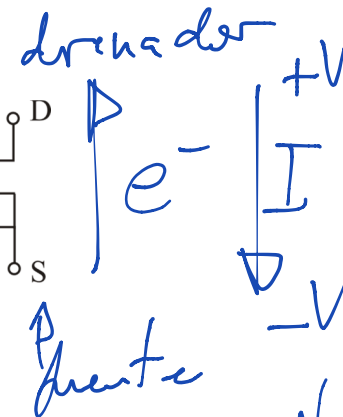
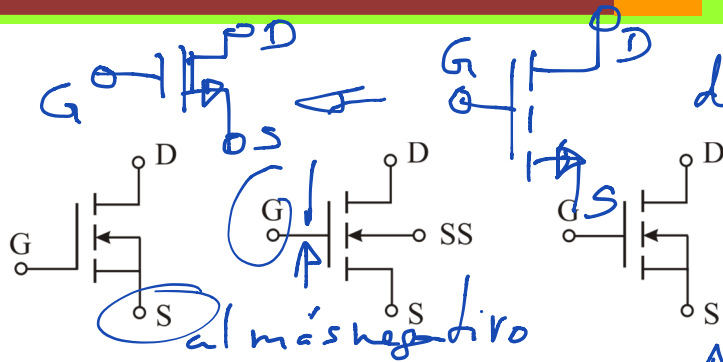
- La puerta está aislada eléctricamente del dispositivo.
- No hay conexión eléctrica entre la puerta y el sustrato

# 3.1.- MOSFET de Acumulación

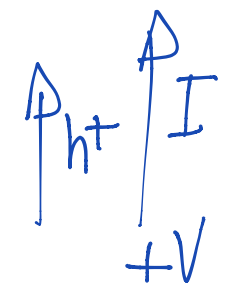
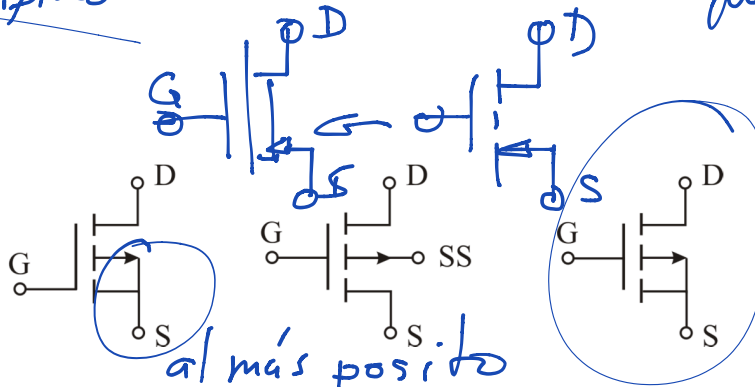
## 3.1.2.- Símbolos.



MOSFET de acumulación canal n



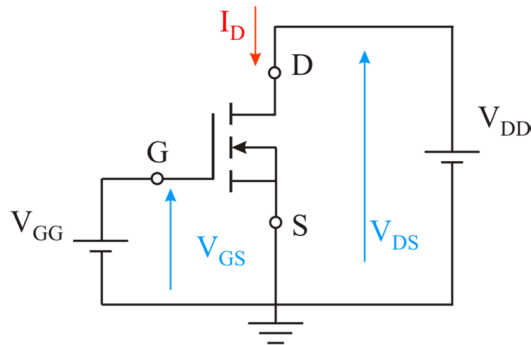
MOSFET de acumulación canal p





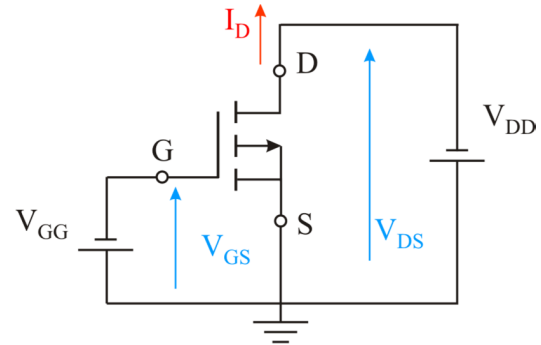
## 3.1.- MOSFET de Acumulación

### Polarización.



Canal n

$V_{DS}$  positivo  
 $V_{GS}$  positivo  
 $I_D$  positiva (entrante)

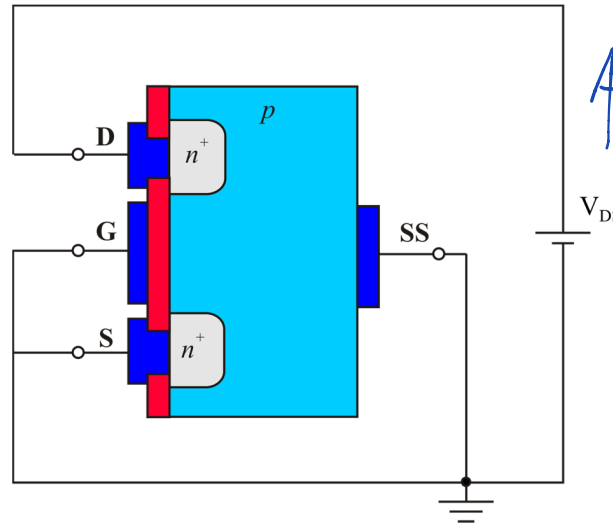


Canal p

$V_{DS}$  negativo  
 $V_{GS}$  negativo  
 $I_D$  negativa (saliente)

## 3.1.- MOSFET de Acumulación

### 3.1.3.1.- Influencia de $V_{GS}$ .

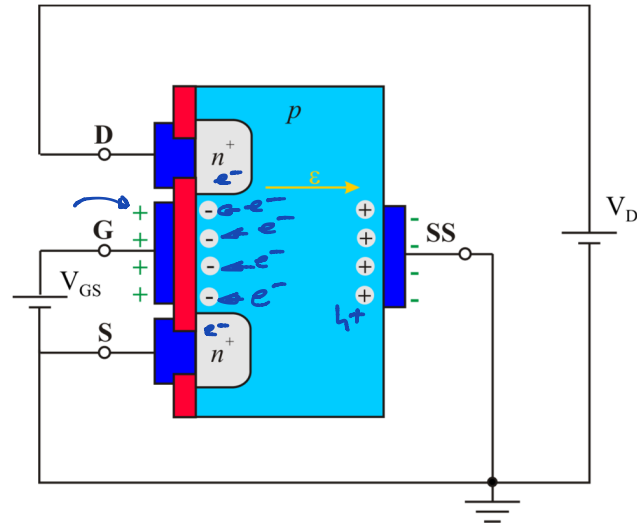


$I_D = 0$   
No existe  
corriente

Si  $V_{GS} = 0$  al aplicar una tensión  $V_{DS}$  no circula "ninguna" corriente

## 3.1.- MOSFET de Acumulación

### 3.1.3.1.- Influencia de $V_{GS}$ .



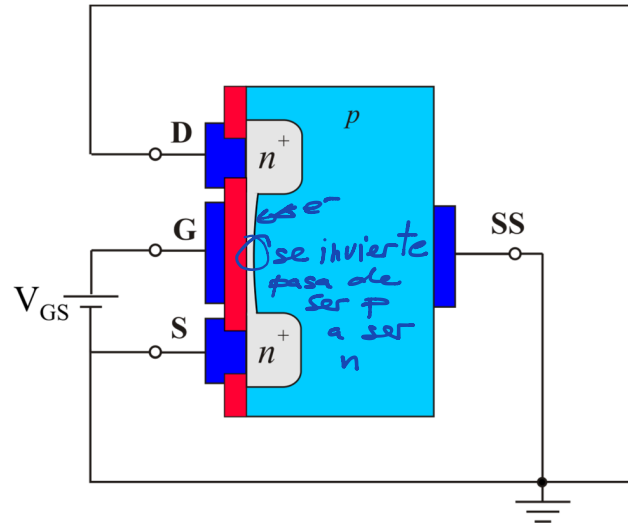
acumulan  
 $e^-$   
en la zona  
debajo de  
la puerta

Si  $V_{GS} > 0$ , aparece un campo eléctrico que lleva a los  $e^-$  hacia la zona de la puerta y aleja a los  $h^+$  de dicha zona

## 3.1.- MOSFET de Acumulación

### 3.1.3.1.- Influencia de $V_{GS}$ .

En la zona de la puerta se **acumulan**  $e^-$  formándose un canal entre el drenador y la fuente

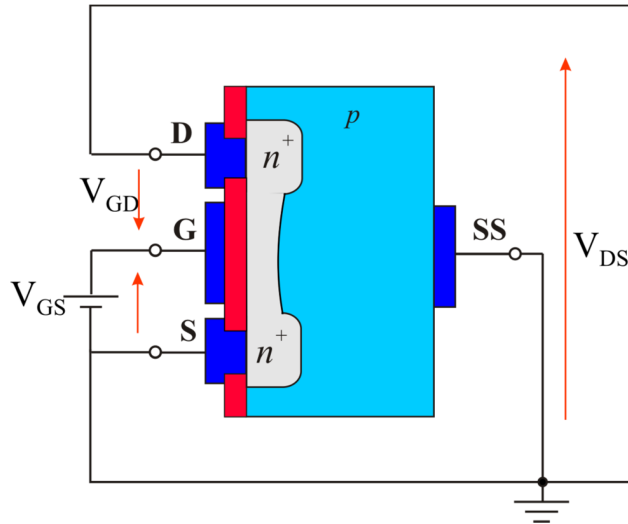


$V_{DS} = 0$   
el canal  
que se forma  
es "uniforme"  
entre D y S

## 3.1.- MOSFET de Acumulación

### 3.1.3.1.- Influencia de $V_{GS}$ .

Este canal será más ancho cuanto mayor sea  $V_{GS}$



Cuando

$$V_{DS} = 0 \Rightarrow V_{GS} = V_{GD}$$

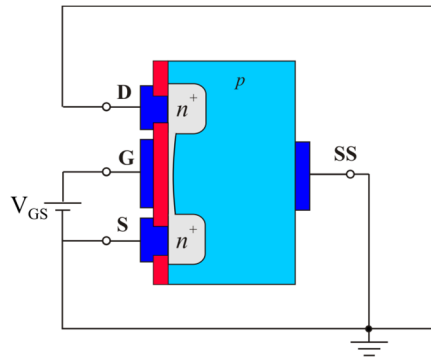
El canal es simétrico

Con la tensión  $V_{GS}$  se modula la anchura del canal

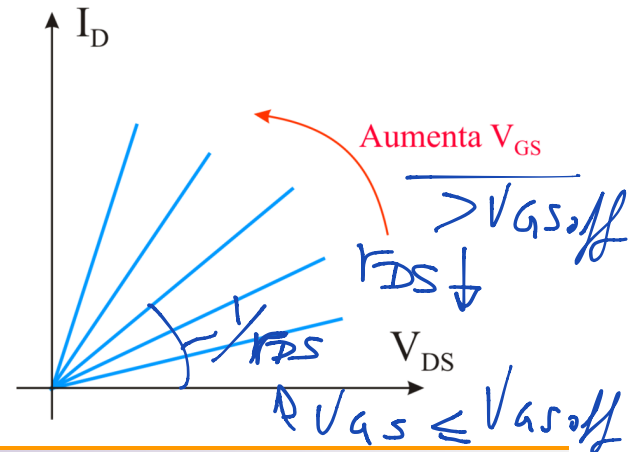
# 3.1.- MOSFET de Acumulación

## 3.1.3.1.- Influencia de $V_{GS}$ .

No basta con que  $V_{GS} > 0$ .  
Debe superar una tensión umbral  $V_T = V_{GSoff}$



Una vez formado el canal si aplicamos una tensión  $V_{DS}$  aparecerá una corriente  $I_D$



Para valores de  $V_{DS}$  pequeños el dispositivo se comporta como una resistencia variable con  $V_{GS}$

## 3.1.- MOSFET de Acumulación

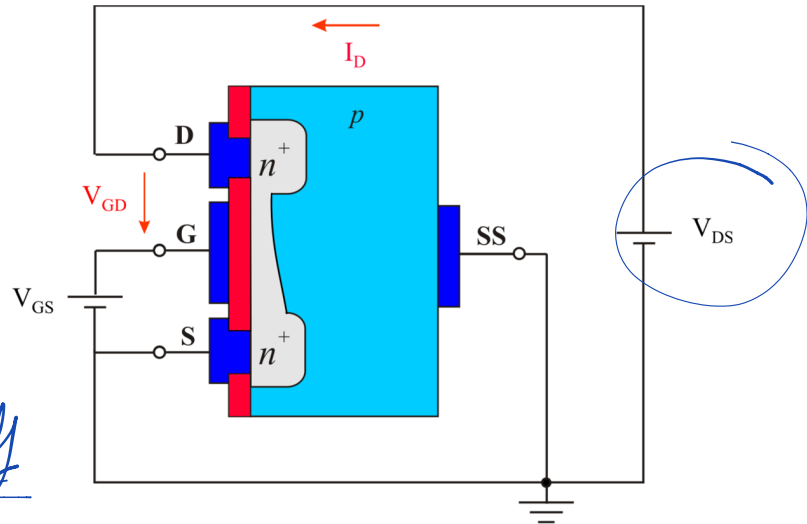
### 3.1.3.2.- Influencia de $V_{DS}$ .

$$\underline{V_{DS} = V_{GS} - V_{GD}}$$

$$\text{Si } V_{DS} > 0 \Rightarrow V_{GD} < V_{GS}$$

$$\underline{V_{GD} = (V_{GS} - V_{DS})}$$

$S_D < \underline{\underline{V_{GSoff}}}$

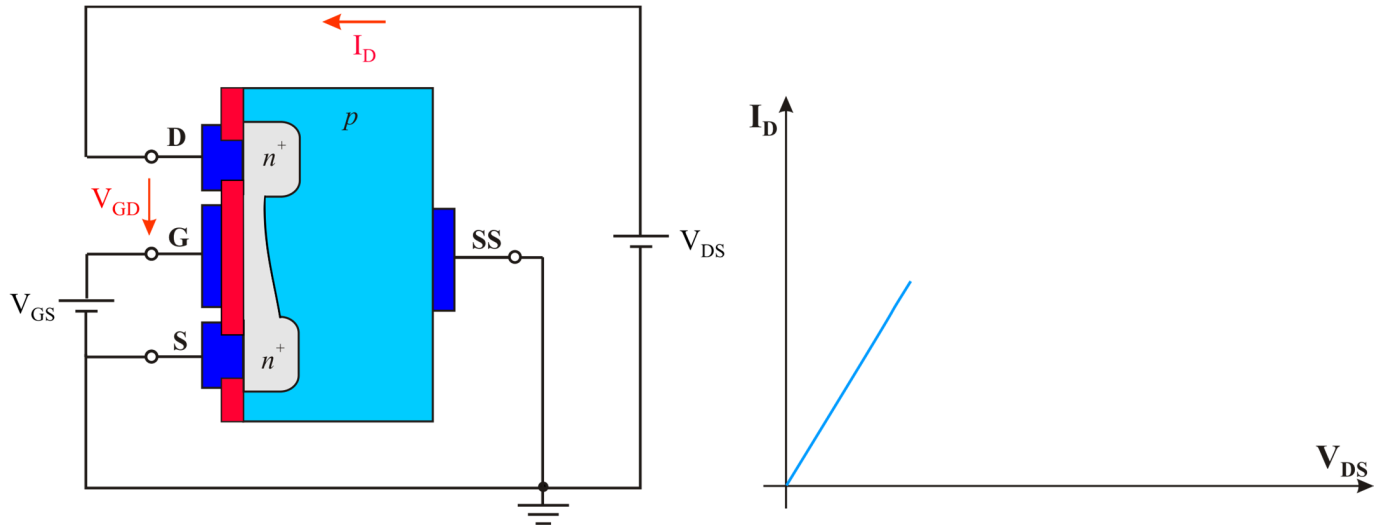


**El canal se estrecha más del lado del Drenador**

**Cuanto mayor sea  $V_{DS}$ ,  $V_{GD}$  será menor y, por lo tanto, el canal más estrecho**

## 3.1.- MOSFET de Acumulación

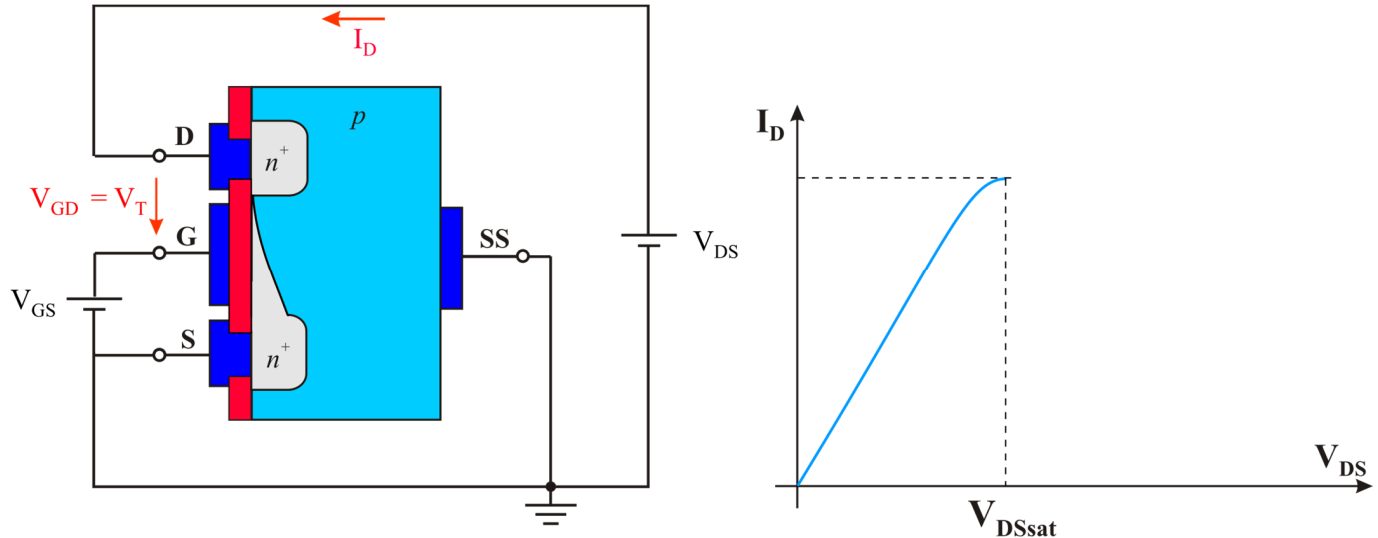
### 3.1.3.2.- Influencia de $V_{DS}$ .





# 3.1.- MOSFET de Acumulación

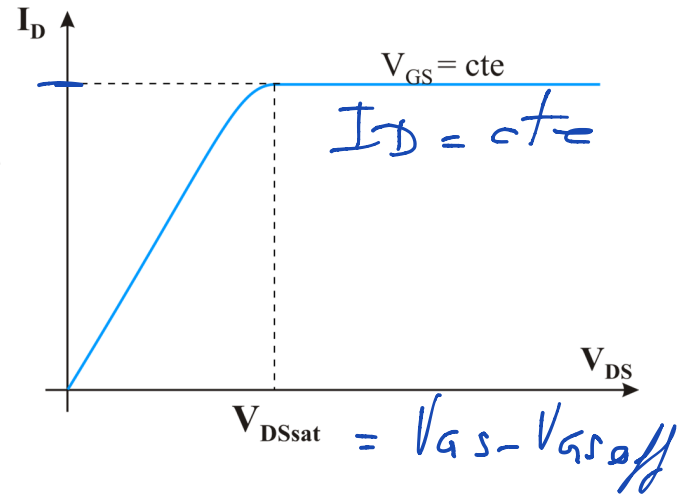
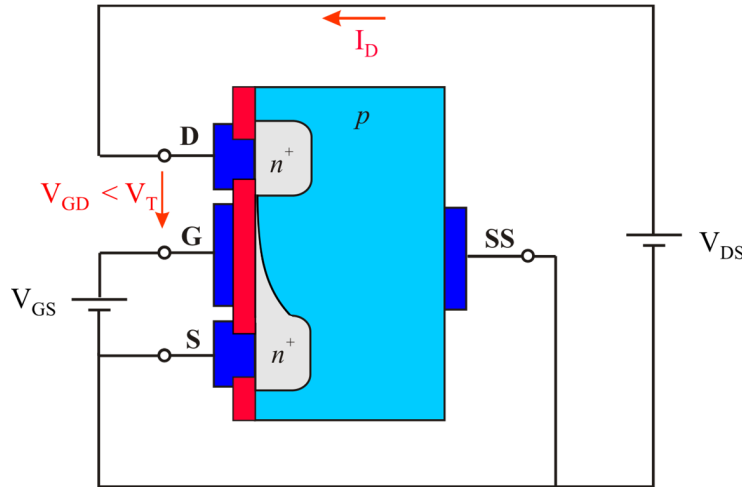
## 3.1.3.2.- Influencia de $V_{DS}$ .



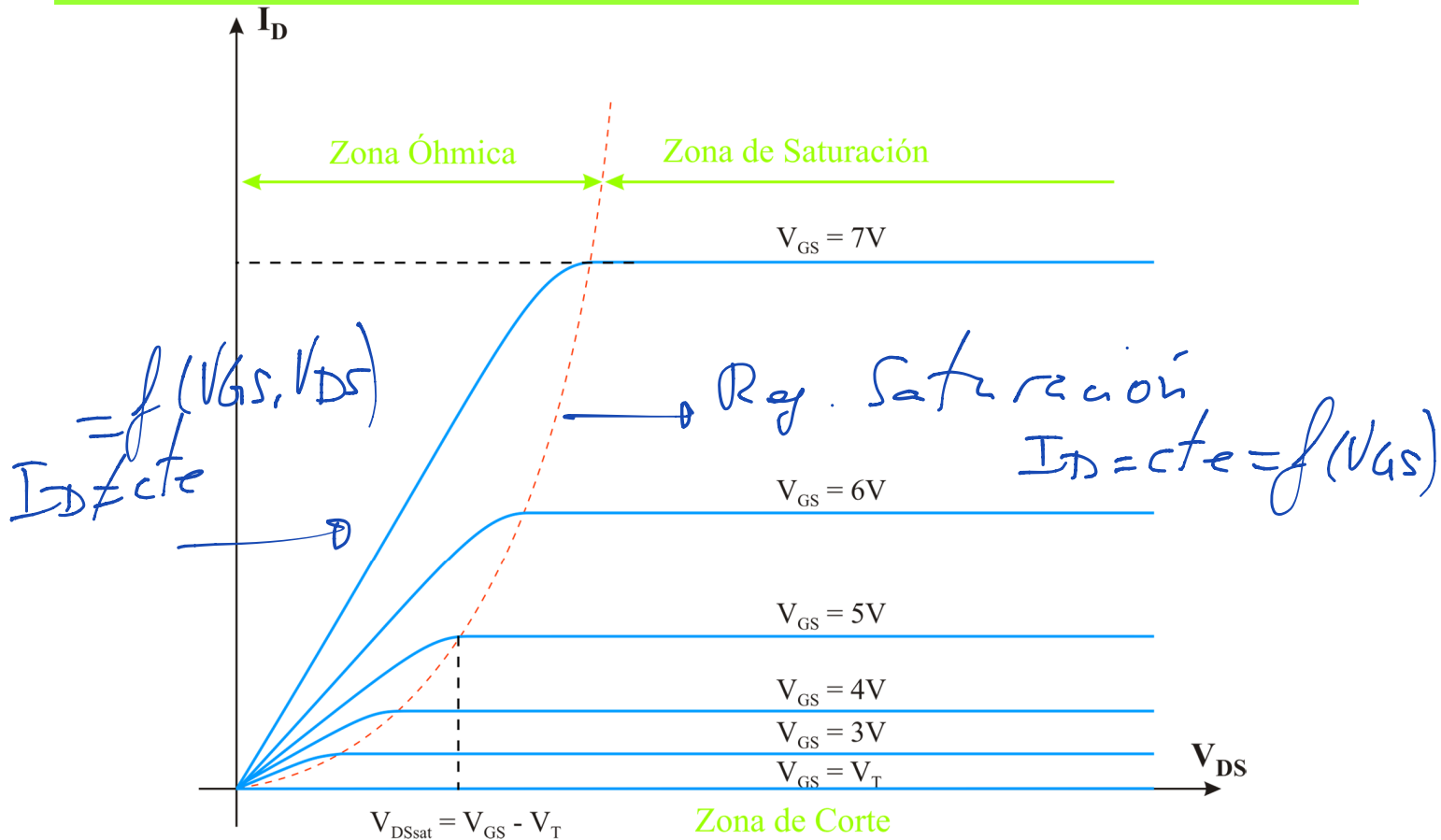
$\hat{P}$   $V_{GD} = V_{GSoff}$   
desaparece el canal  
en el lado del drenador

# 3.1.- MOSFET de Acumulación

## 3.1.3.2.- Influencia de $V_{DS}$ .



### 3.1.4.- Curva Característica MOSFET de Acumulación



### 3.1.4.- Curva Característica MOSFET de Acumulación

#### Zona de corte o de no conducción

Para valores de  $V_{GS} \leq V_T$   *$V_{GS} = 0$*

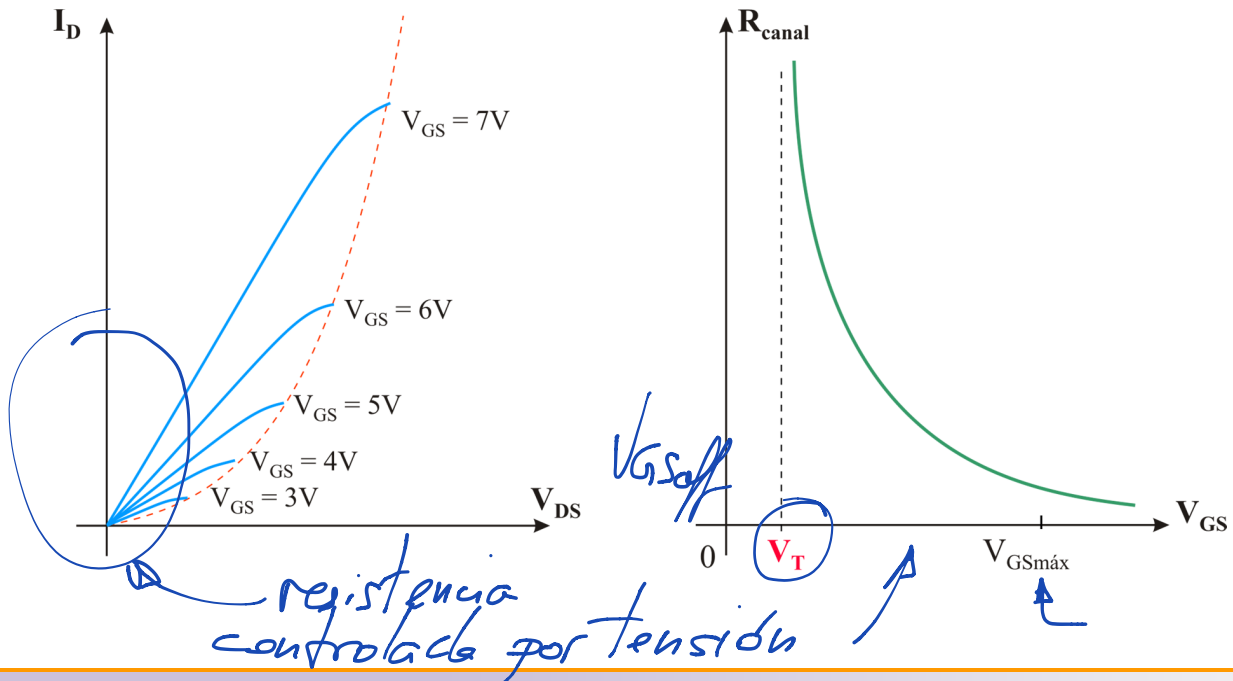
*El canal no está formado,  
por lo que no hay ninguna corriente por el dispositivo*

### 3.1.4.- Curva Característica MOSFET de Acumulación

#### Zona de óhmica o de no saturación

Para valores de  $V_{DS} \leq V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$

$V_{GSoff}$



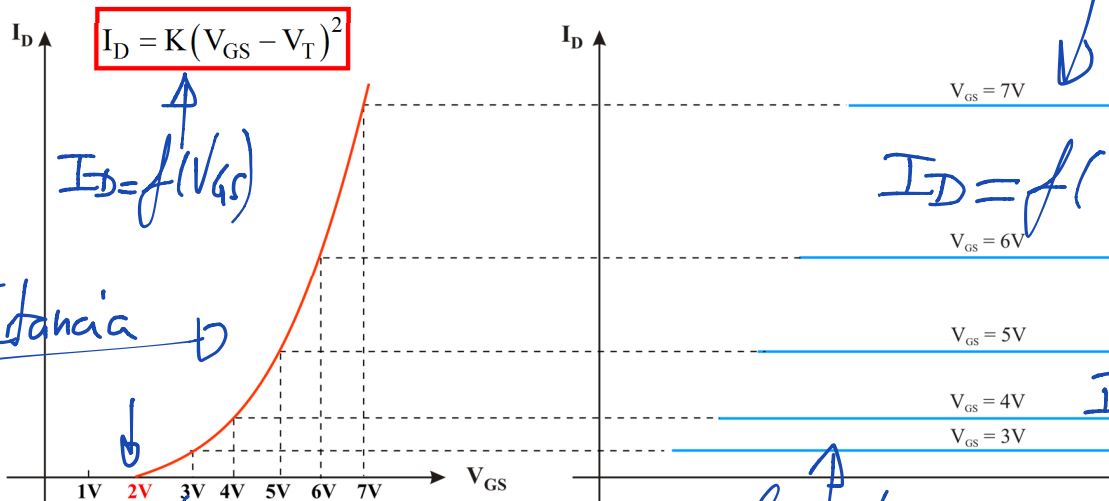
### 3.1.4.- Curva Característica MOSFET de Acumulación

#### Zona de saturación o de corriente constante.

Para valores de  $V_{DS} \geq V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$

$I_D$  es independiente de la tensión  $V_{DS}$  sólo depende de la tensión  $V_{GS}$

$I_D = f(V_{GS})$



El MOSFET se comporta como una fuente de corriente controlada por  $V_{GS}$

### 3.1.4.- Curva Característica MOSFET de Acumulación

#### Zona de ruptura.

Los transistores MOSFET pueden romper por dos motivos:

- Porque se perfora el dieléctrico ( $V_{GS} > \text{Dato}$ )

$$\underline{V_{GS} > V_{GSmax}}$$

- Porque en la unión  $pn$  del lado del Drenador (polarizada en inversa) se supera el valor de la tensión de ruptura para dicha unión.

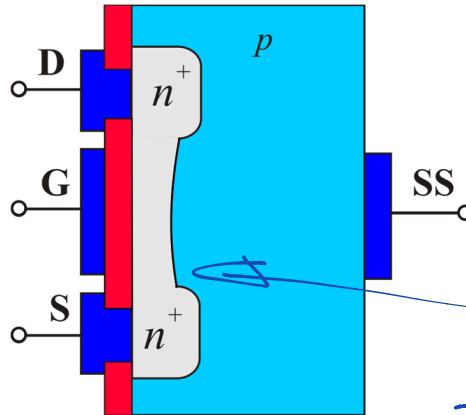
La ruptura se da cuando  $V_{DS} > V_r$  (independientemente del valor de  $V_{GS}$ )

$$\underline{V_{DS} > V_r}$$

## 3.2.- MOSFET de Deplexión.

### 3.2.1.- Estructura básica.

#### MOSFET deplexión canal n



*∃ canal formado  
Hay posibilidad de  
circulación de  
corriente  
con  $V_{GS} = 0V$*

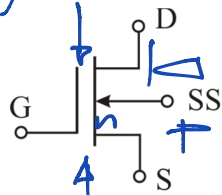
*Existe un canal realizado en el proceso de fabricación*



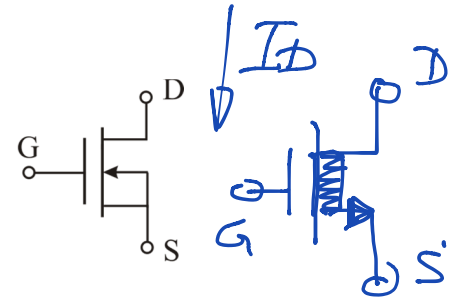
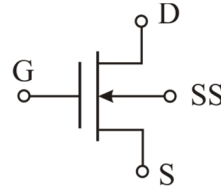
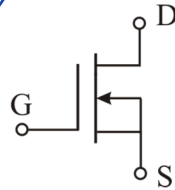
## 3.2.- MOSFET de Deplexión.

### 3.2.2.- Símbolos.

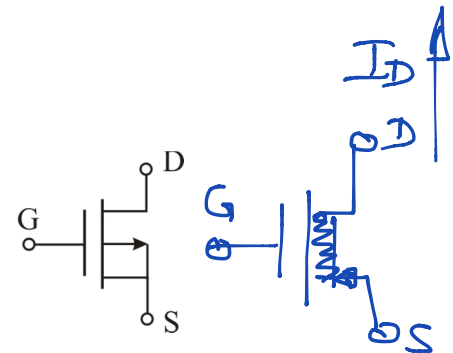
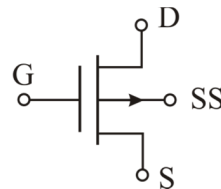
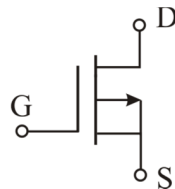
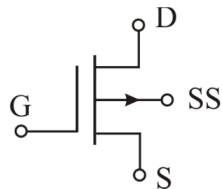
*separación G y canal*



canal formado



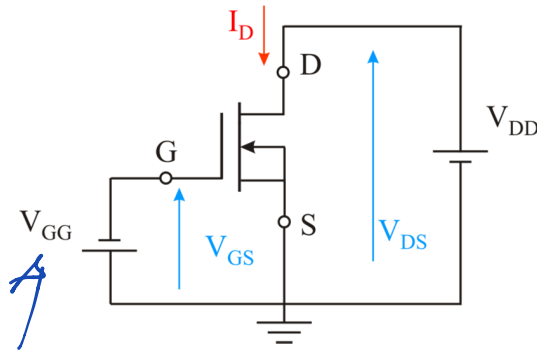
MOSFET de deplexión canal n



MOSFET de deplexión canal p

## 3.2.- MOSFET de Deplexión.

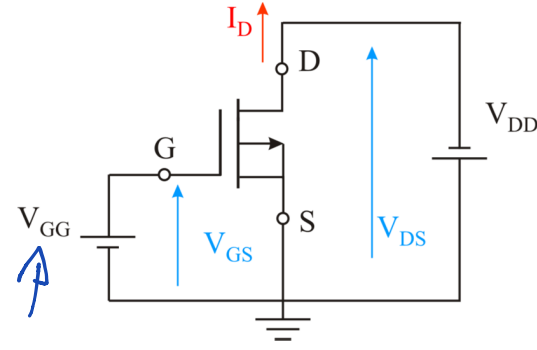
### Polarización.



Canal n

$V_{DS}$  positivo  
 $V_{GS}$  negativo o positivo  
 $I_D$  positiva (entrante)

*JFE  $V_{GS}$  negativo siempre*



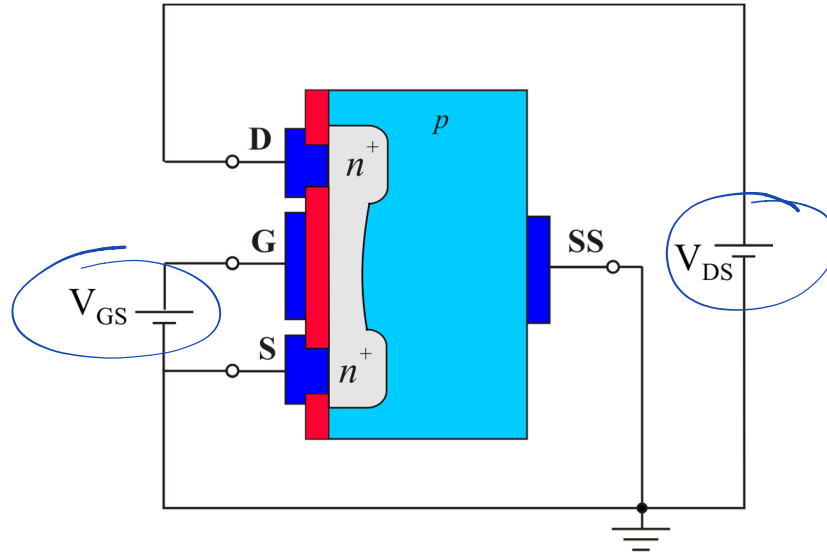
Canal p

$V_{DS}$  negativo  
 $V_{GS}$  positivo o negativo  
 $I_D$  negativa (saliente)

*$V_{GS}$  positivo siempre*

## 3.2.- MOSFET de Deplexión.

### Principio de funcionamiento.



Si  $V_{GS} > 0$

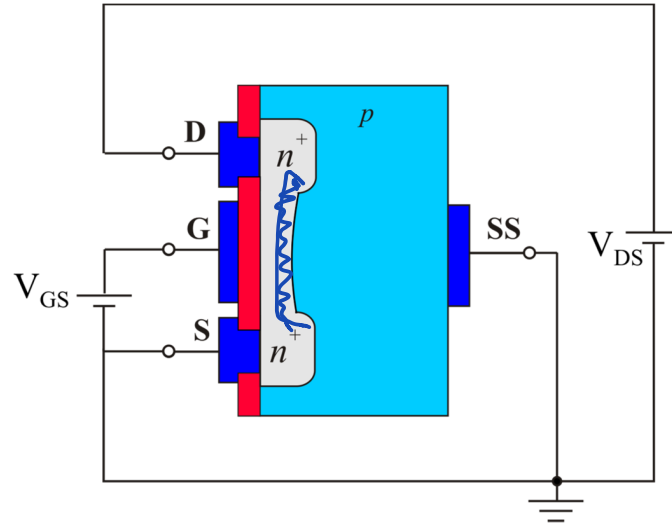
Se atraen más e- y se repelen más h+.

Es el mismo comportamiento que el MOSFET de acumulación

Cuanto mayor sea  $V_{GS}$  mayor será la anchura del canal

## 3.2.- MOSFET de Deplexión.

### Principio de funcionamiento.



Si  $V_{GS} < 0$

Se repelen los e<sup>-</sup> de la zona de la puerta y se atraen h<sup>+</sup> → El canal se estrecha

*Si seguimos disminuyendo  $V_{GS}$  podemos hacer que el canal desaparezca por completo. Esto ocurre cuando se alcanza el valor  $V_{GS} = V_{GSoff}$*

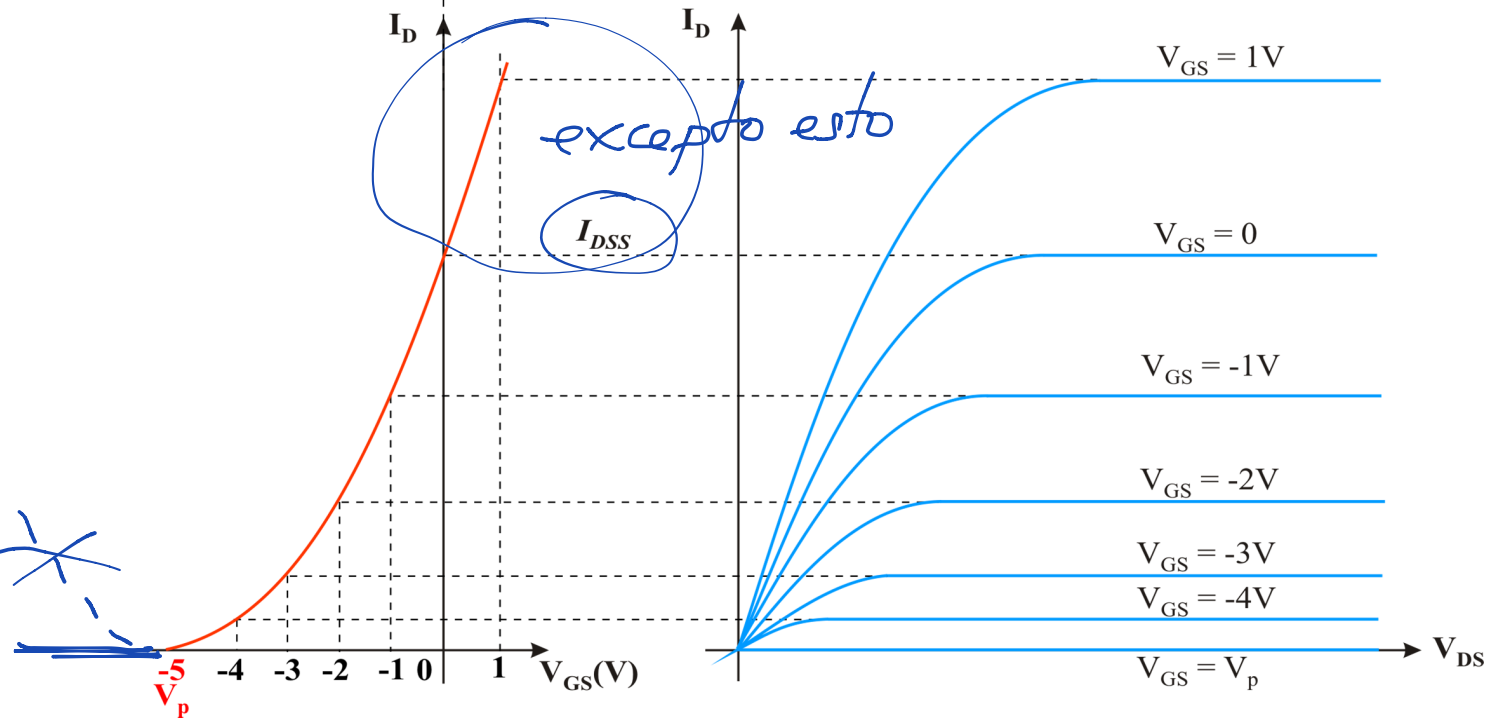
*Con la tensión  $V_{GS}$  se modula la anchura del canal*

### 3.2.- MOSFET de Deplexión.

Mismas JFET

Deplexión

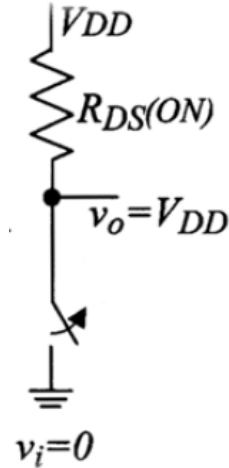
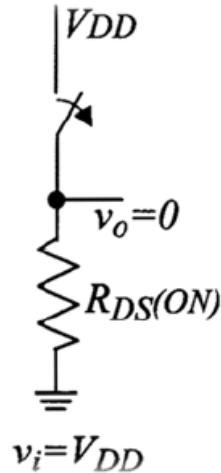
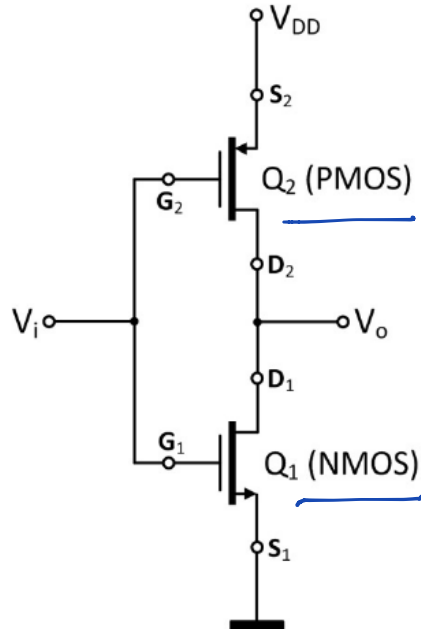
Acumulación



# 4.- cMOS.

## Inversor cMOS

## Complementary Metal Oxide Semiconductor

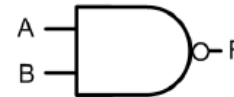
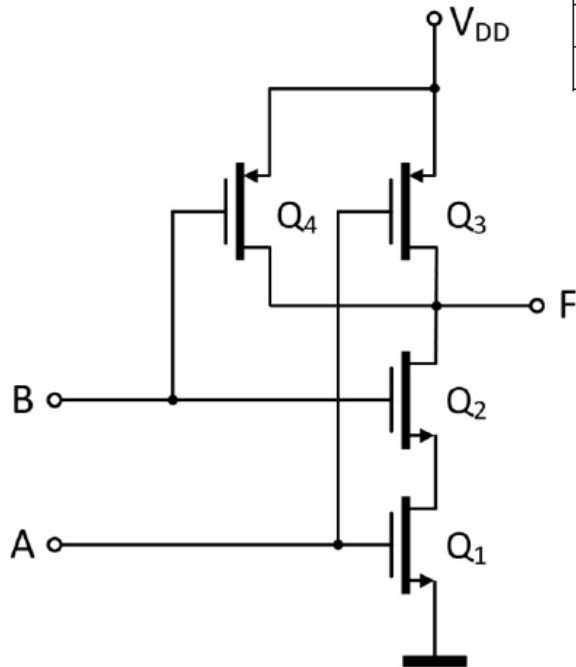


$V_i$	$V_{GS1}$	$V_{SG2}$	$Q1$	$Q2$	$V_o$
0 (L)	0	$V_{DD}$	OFF	ON	$V_{DD}$ (H)
$V_{DD}$ (H)	$V_{DD}$	0	ON	OFF	0 (L)

# 4.- cMOS.

## Puerta NAND

B	A	Q1	Q2	Q3	Q4	F
L	L	OFF	OFF	ON	ON	H
L	H	ON	OFF	OFF	ON	H
H	L	OFF	ON	ON	OFF	H
H	H	ON	ON	OFF	OFF	L



## 4.- cMOS.

### Puerta NOR

B	A	Q1	Q2	Q3	Q4	F
L	L	OFF	OFF	ON	ON	H
L	H	ON	OFF	OFF	ON	L
H	L	OFF	ON	ON	OFF	L
H	H	ON	ON	OFF	OFF	L

