

Clase 11¹ - MOSFET (I)

MOSFET: CARACTERISTICAS I-V

Contenido:

1. MOSFET: corte lateral, diseño físico (layout), símbolos
2. Introducción al funcionamiento del transistor
3. Características I-V

Lectura recomendada:

- Müller, Kamins, “Device Electronics for Integrated Circuits”, Ch. 9, §§9.1.
- Pedro Julian, “Introducción a la Microelectronica”, Ch. 5, §§5.1–5.3.
- Howe, Sodini, “Microelectronics: An Integrated Approach”, Ch. 4, §§4.1–4.3.

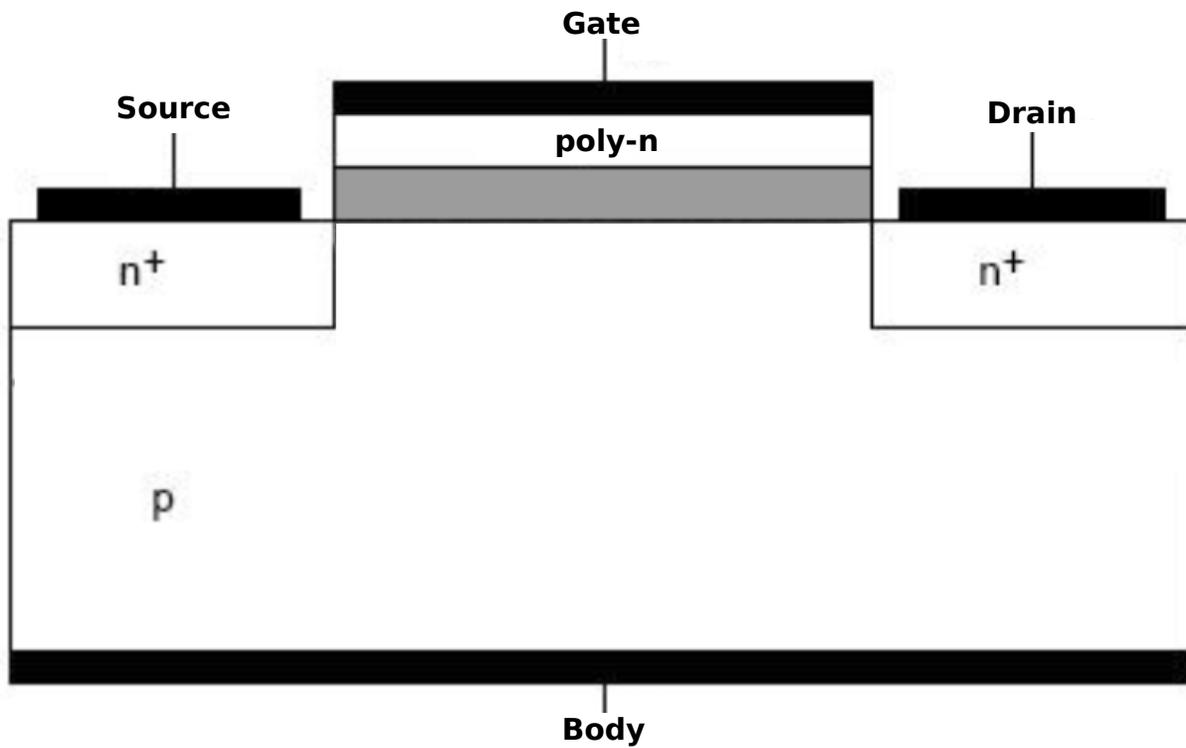
¹Esta clase es una traducción, realizada por los docentes del curso “Dispositivos Semiconductores” de la FIUBA, de la correspondiente hecha por el prof. Jesús A. de Alamo para el curso “6.012 - Microelectronic Devices and Circuits” del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la traducción.

Preguntas disparadoras

- ¿Cómo puede aprovecharse la inversión de portadores para obtener un transistor?
- ¿Cómo funciona un MOSFET?
- ¿Cómo se construye un modelo simple de las características I-V (corriente-tensión) del MOSFET?

1. EL MOSFET

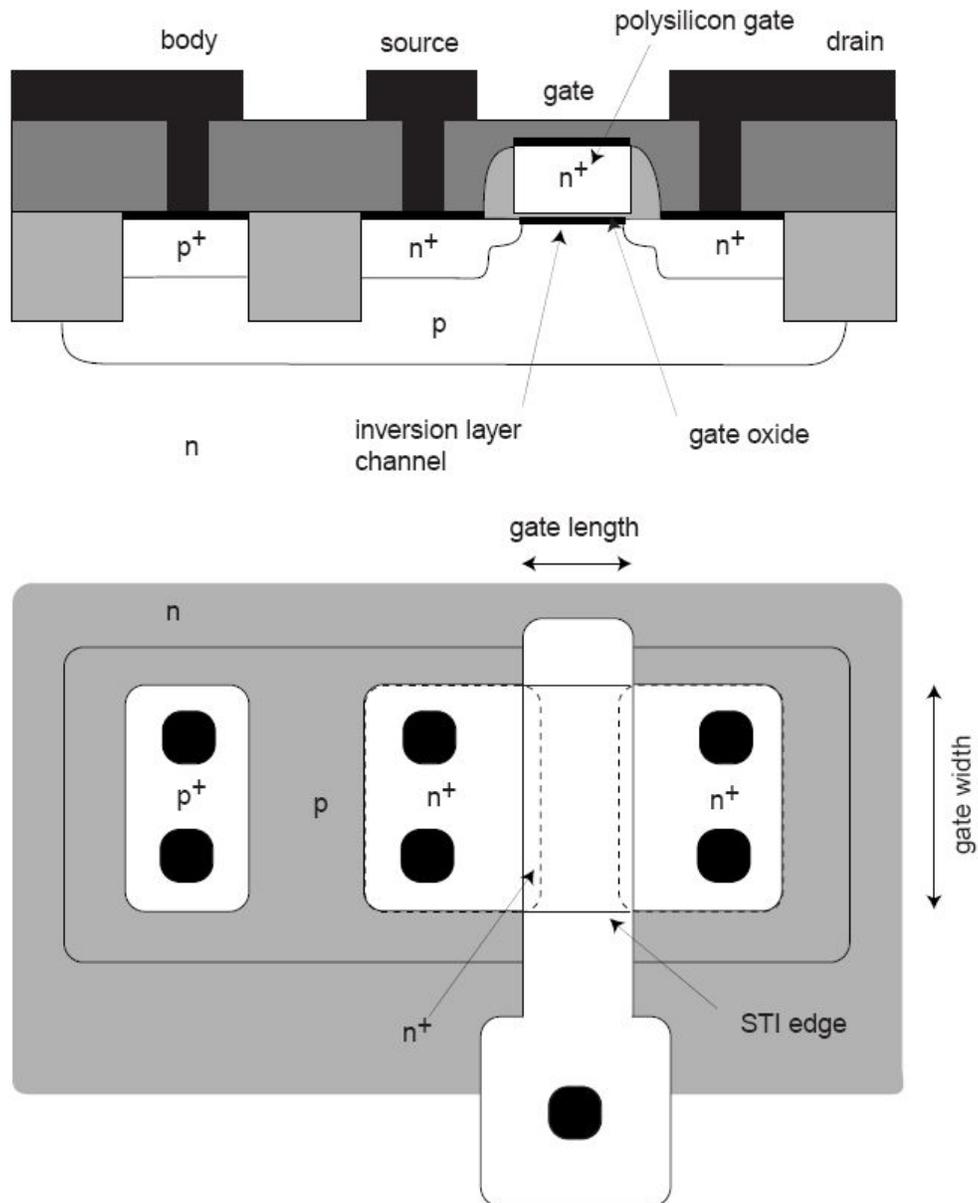
□ Corte lateral simplificado



Elementos claves:

- Debajo del *gate* se forma una capa de inversión controlada por la tensión V_G .
- Existen dos regiones dopadas a los lados del *gate* llamadas *drain* y *source* \Rightarrow la capa de inversión permite la circulación de carga entre ambas regiones.
- Es un dispositivo de cuatro terminales: la tensión del *body* es importante

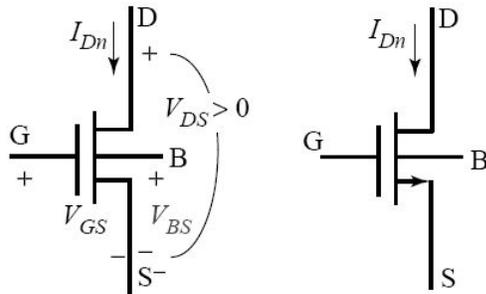
□ Corte lateral y diseño físico (layout)



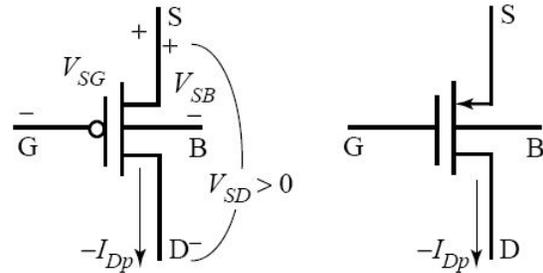
□ Símbolos circuitales

Existen dos dispositivos complementarios:

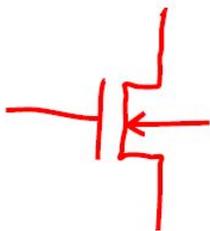
- Dispositivo de canal n (n-MOSFET) sobre un substrato tipo p (capa de inversión de electrones).
- Dispositivo de canal p (p-MOSFET) sobre un substrato tipo n (capa de inversión de huecos).



(a) n-channel MOSFET



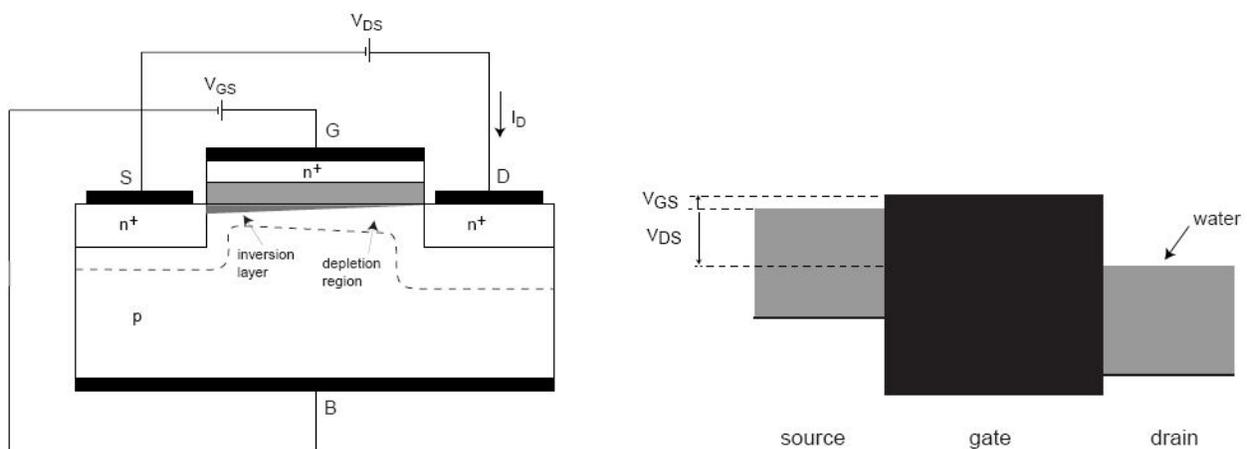
(b) p-channel MOSFET



2. Descripción básica del funcionamiento

Analogía del MOSFET con tanques de agua:

- *Source*: tanque de agua
- *Drain*: tanque de agua
- *Gate*: compuerta entre los tanques



Queremos analizar la operación del MOSFET como función de:

- tensión gate-source (altura del gate sobre el nivel de agua del source)
- tensión drain-source (diferencia de nivel de agua entre los tanques)

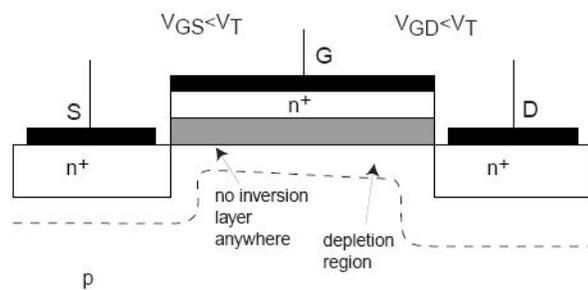
Inicialmente consideramos el source conectado al body (substrato o bulk).

Tres regímenes de operación:

□ *Corte:*

● MOSFET: $V_{GS} < V_T$, $V_{GD} < V_T$ con $V_{DS} > 0$.

● Analogía con agua: el gate cerrado; no puede fluir agua, independientemente de la diferencia de nivel entre source y drain.

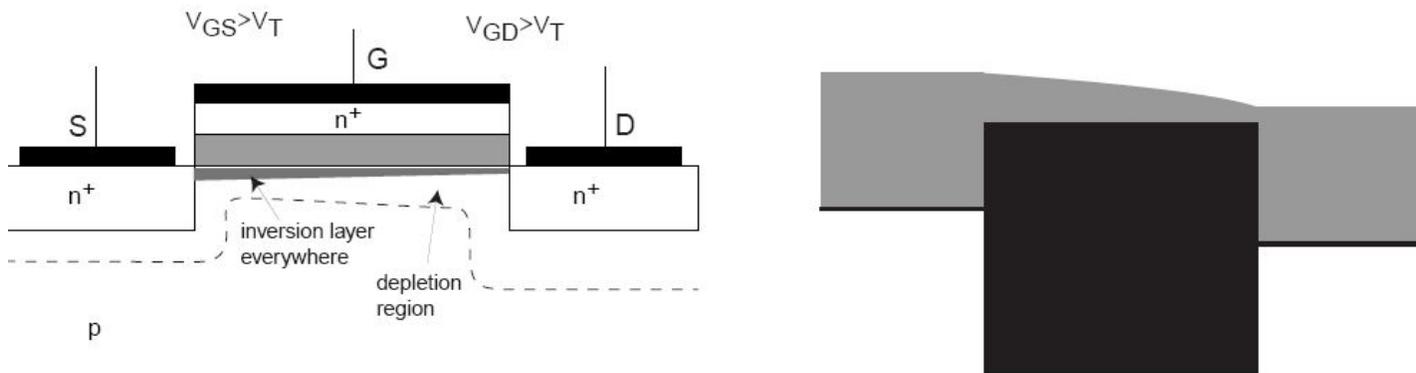


no water flow

$$I_D = 0$$

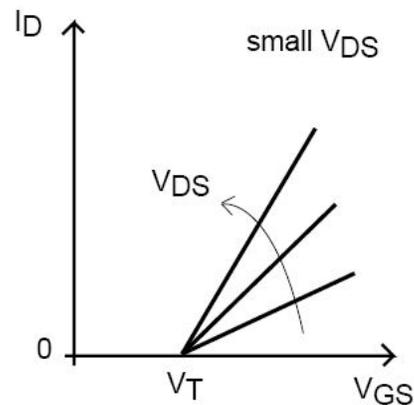
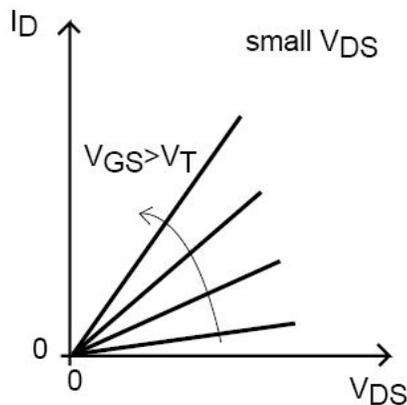
□ Régimen *Lineal* o *Triodo*:

- MOSFET: $V_{GS} > V_T$, $V_{GD} > V_T$, con $V_{DS} > 0$.
- Analogía con agua: el gate abierto, pero pequeña diferencia de nivel entre source y drain; el agua fluye.



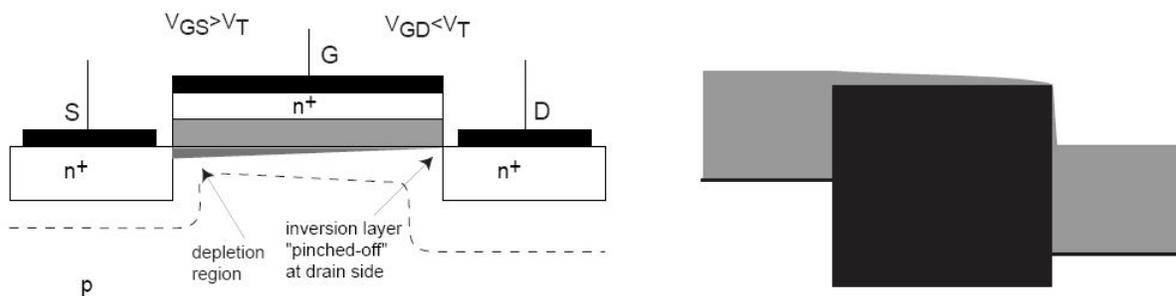
Los electrones fluyen del source al drain \Rightarrow hay corriente eléctrica

- $V_{GS} \uparrow \rightarrow |Q_n| \uparrow \rightarrow I_D \uparrow$
- $V_{DS} \uparrow \rightarrow |E_y| \uparrow \rightarrow I_D \uparrow$

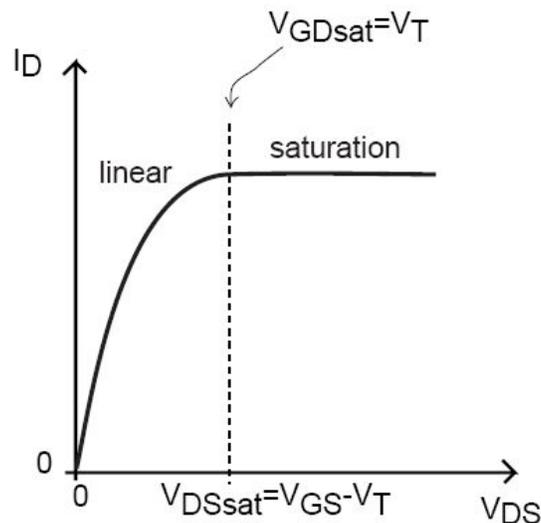


□ Régimen de *Saturación*:

- MOSFET: $V_{GS} > V_T$, $V_{GD} < V_T$ ($V_{DS} > 0$).
- Analogía con agua: compuerta abierta; el agua fluye del source al drain, pero cae libremente del lado del drain \Rightarrow el flujo es independiente del nivel relativo entre los tanques

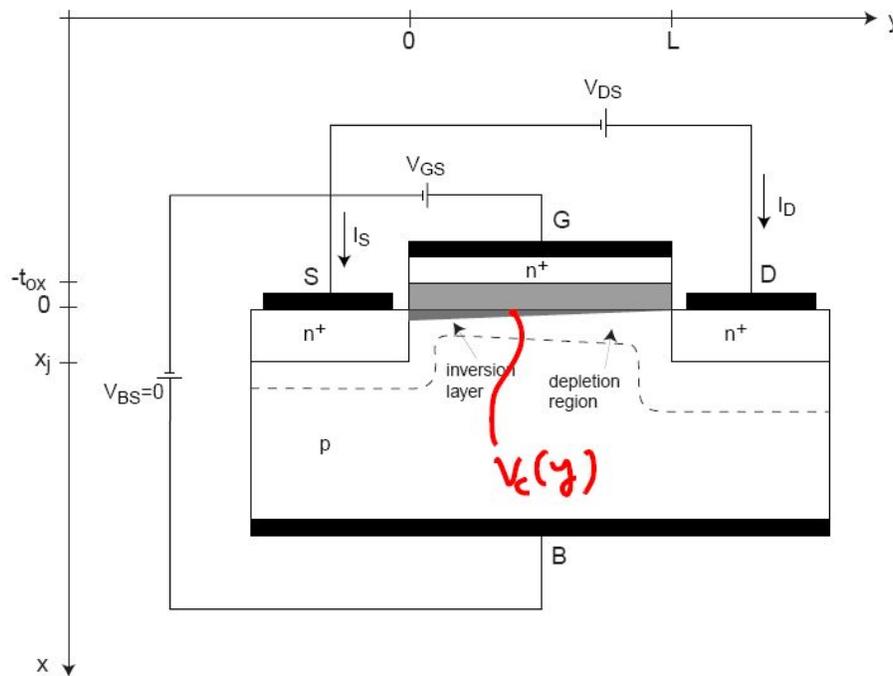


I_D es independiente de V_{DS} : $I_D = I_{Dsat}$



3. Características I-V

Geometría del problema:



□ Expresión general de la corriente del canal

La corriente es uniforme y fluye en la dirección y :

$$I_y = W Q'_n(y) v_y(y)$$

La corriente de Drain es inversa a la corriente del canal:

$$I_D = -W Q'_n(y) v_y(y)$$

$$I_D = -W Q'_n(y) v_y(y)$$

Reescribimos en términos de la tensión del canal $V_c(y)$:

- Si el campo eléctrico no es demasiado grande:

$$v_y(y) \simeq -\mu_n E_y(y) = \mu_n \frac{dV_c(y)}{dy}$$

- Para $Q'_n(y)$ usamos la relación de control de carga:

$$Q'_n(y) = -C'_{ox} (V_{GS} - V_c(y) - V_T)$$

para $V_{GS} - V_c(y) \geq V_T$.

Todo junto:

$$I_D = W \mu_n C'_{ox} (V_{GS} - V_c(y) - V_T) \frac{dV_c(y)}{dy}$$

Una simple ecuación diferencial de primer orden con una sola incógnita, $V_c(y)$.

Resolvemos mediante separación de variables:

$$I_D dy = W \mu_n C'_{ox} (V_{GS} - V_c - V_T) dV_c$$

Considerando régimen lineal integramos a lo largo del canal:

- para $y = 0$, $V_c(0) = 0$
- para $y = L$, $V_c(L) = V_{DS}$ (régimen lineal)

Entonces:

$$I_D \int_0^L dy = W \mu_n C'_{ox} \int_0^{V_{DS}} (V_{GS} - V_c - V_T) dV_c$$

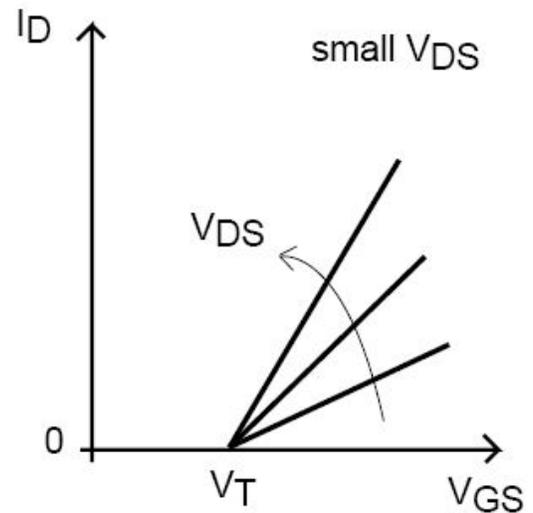
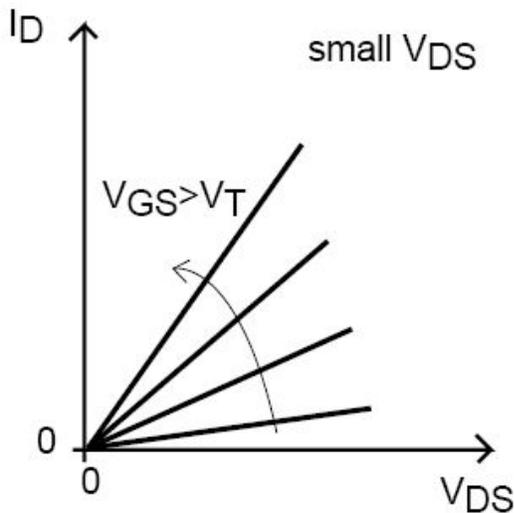
$$I_D = \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox} \left(V_{GS} - \frac{V_{DS}}{2} - V_T \right) V_{DS}$$

Para V_{DS} pequeña:

$$I_D \simeq \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox} (V_{GS} - V_T) V_{DS}$$

Principales dependencias:

- $V_{DS} \uparrow \rightarrow I_D \uparrow$ (elevado campo eléctrico transversal)
- $V_{GS} \uparrow \rightarrow I_D \uparrow$ (elevada concentración de electrones)
- $L \uparrow \rightarrow I_D \downarrow$ (menor campo eléctrico transversal)
- $W \uparrow \rightarrow I_D \uparrow$ (canal de conducción más ancho)



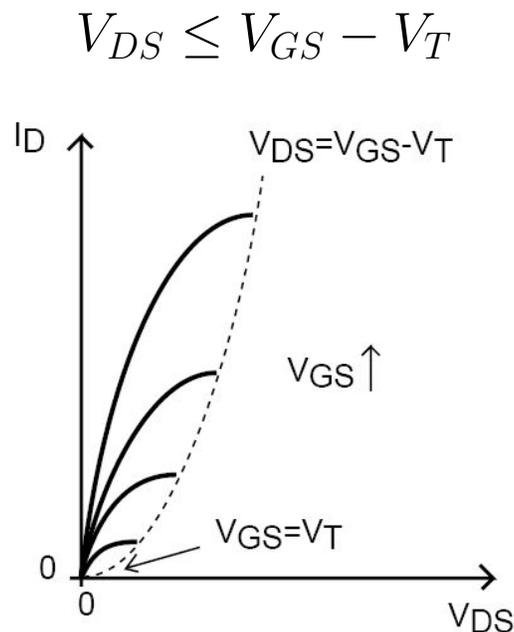
Este es el régimen *lineal* o de *triodo*.

En general,

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox} \left(V_{GS} - \frac{V_{DS}}{2} - V_T \right) V_{DS}$$

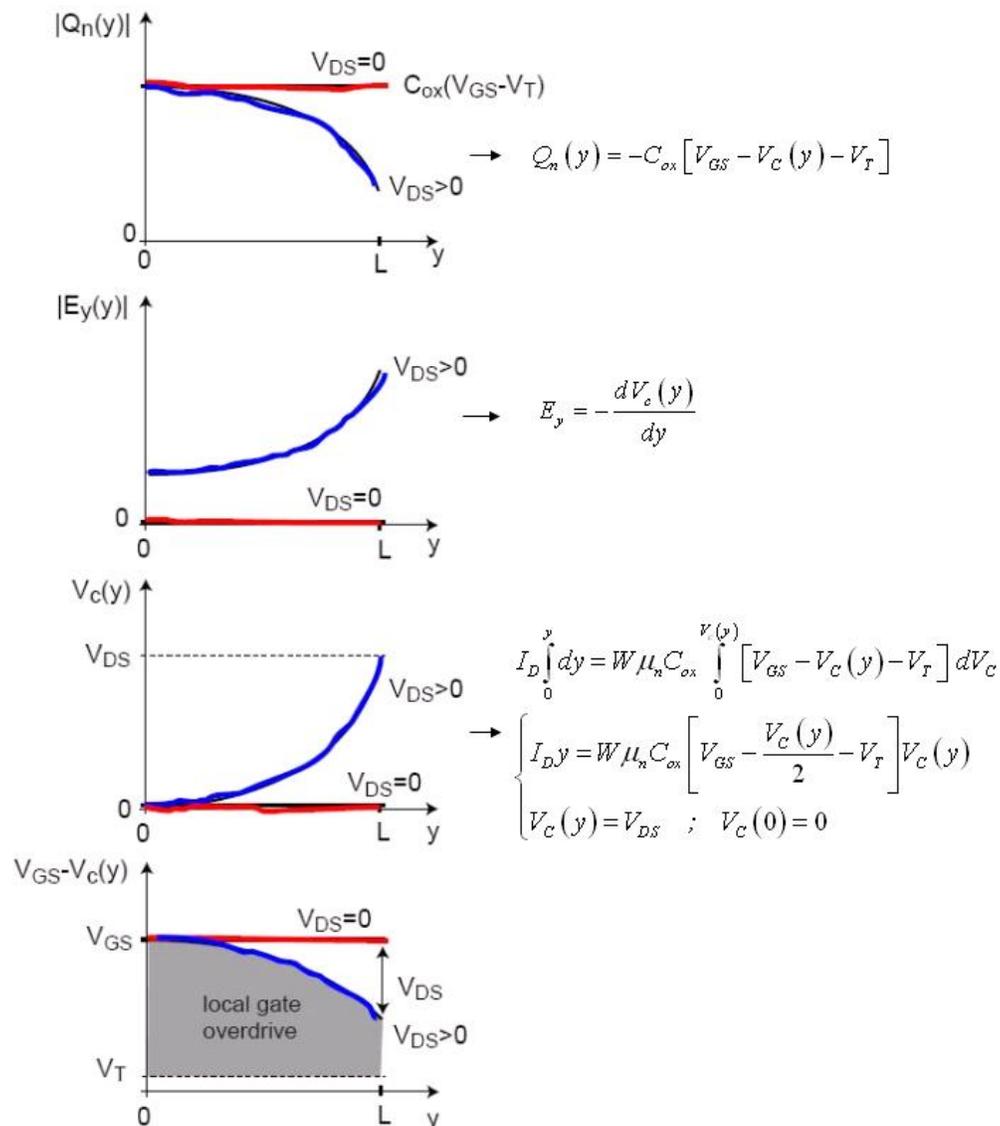
La ecuación es válida si $V_{GS} - V_c(y) \geq V_T$ para todo y .

El peor punto es $y = L$, donde $V_c(y) = V_{DS}$, luego, la ecuación es válida si $V_{GS} - V_{DS} \geq V_T$, o:



El término responsable por la concavidad de I_D es $-\frac{V_{DS}}{2}$

Para entender por qué I_D se curva debemos entender *la despolarización del canal*:

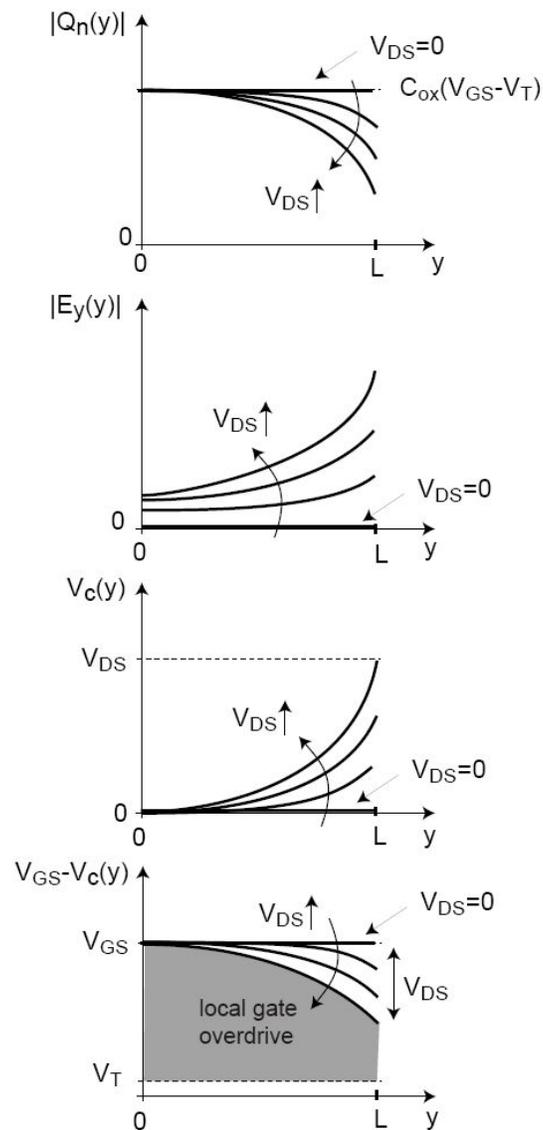


A lo largo del canal, desde source hasta drain:

$$y \uparrow \rightarrow V_c(y) \uparrow \rightarrow |Q_n(y)| \downarrow \rightarrow |E_y(y)| \uparrow$$

El "local channel overdrive" se reduce cerca del drain.

Impacto de V_{DS} :



Cuando $V_{DS} \uparrow$, la despolarización del canal se hace más prominente

$\Rightarrow I_D$ crece más lentamente con V_{DS}

Principales conclusiones

- El MOSFET es un *transistor de efecto de campo*:
 - la carga en la capa de inversión es controlada por la acción del campo eléctrico del gate
 - la carga en la capa de inversión puede moverse \Rightarrow posibilita la conducción entre drain y source
- En el *régimen lineal o triodo*:
 - $V_{GS} \uparrow \Rightarrow I_D \uparrow$: hay más electrones en el canal
 - $V_{DS} \uparrow \Rightarrow I_D \uparrow$: un campo eléctrico más intenso arrastra a los electrones
- *Despolarización del canal*: la capa de inversión decrece desde el source hasta el drain \Rightarrow la corriente satura a medida que V_{DS} se aproxima a:

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$