

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 10: Transistores de Efecto de Campo (1)

Patricio Parada

pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

3 de Septiembre de 2009

Contenidos

Transistores FET

Características Generales

MOSFET

Estructura del MOSFET

Operación del MOSFET de tipo Enriquecido

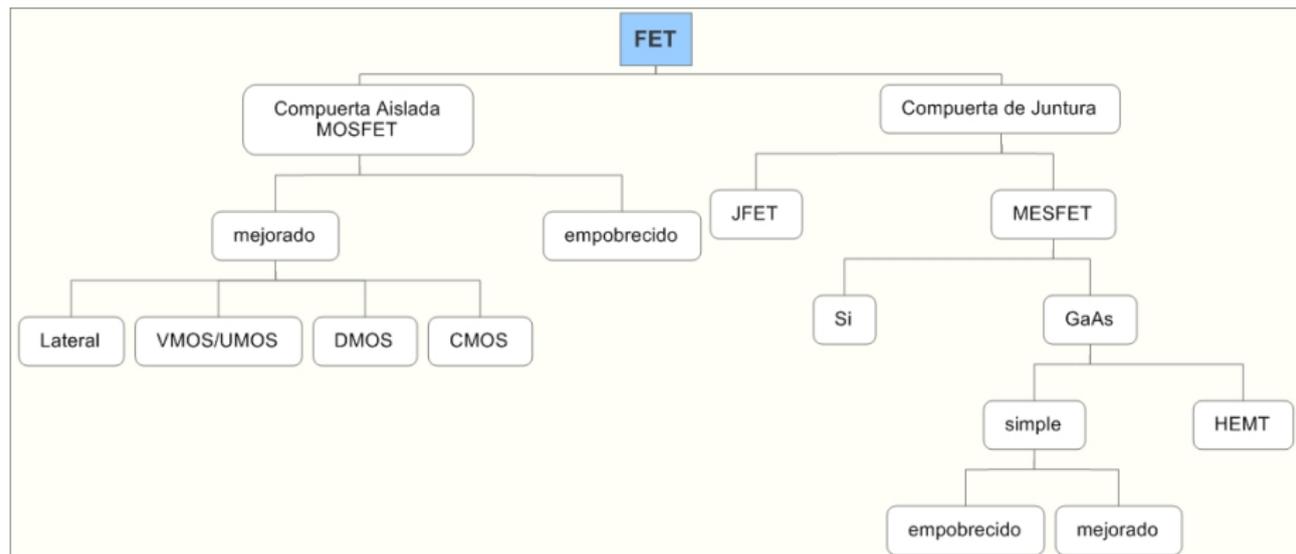
Curva Característica del MOSFET

Modelo Equivalente DC

- ▶ Los transistores de efecto de campo (FET) fueron inventados por Julius Edgar Lilienfeld en 1925 y Oskar Heil en 1934 en forma independiente.
- ▶ En 1960, John Atalla (también en Bell Labs) retomó las ideas de Schockley y desarrolló un dispositivo donde se lograba controlar la corriente entre dos terminales mediante el voltaje aplicado a un tercer terminal llamado **compuerta**.
- ▶ Desde fines de los 60 los FETs se volvieron el transistor preferido por la industria, debido a su bajo consumo de energía y a su fácil incorporación en circuitos integrados de alta densidad.

- ▶ Existen dos clases principales de FETs:
 - ▶ FET de juntura o JFET
 - ▶ FET semiconductor de óxido metálico o MOSFET
- ▶ El transistor JFET tiene usos en audio y circuitos que requieran buena respuesta en alta frecuencia.
- ▶ El transistor MOSFET se emplea principalmente en circuitos lógicos, memorias y microprocesadores.

Introducción III



Principales tipos de FETs:

- ▶ JFET: Junction FET
- ▶ MESFET: Metal-Semiconductor FET
- ▶ MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor FET. También recibe el nombre de *Insulated-Gate* FET (IGFET)

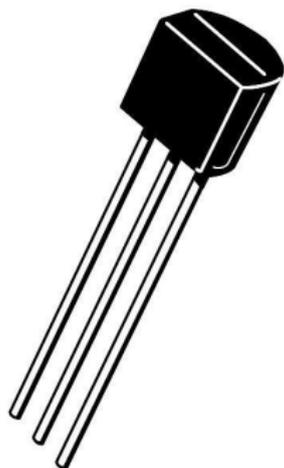
Dependiendo de las características de fabricación tenemos:

- ▶ PMOS: MOS de canal p
- ▶ NMOS: MOS de canal n
- ▶ CMOS: MOS complementario
- ▶ BiMOS o BiCMOS: BJT + (C)MOS

- ▶ HMOS: High-performance MOS
- ▶ DMOS/DIMOS: double-diffused MOS
- ▶ VMOS: Vertical MOS
- ▶ SOS/SOI: Silicon-on-sapphire/silicon-on-insulating substrate
- ▶ HEMT: High-electron-mobility transistor

Características Generales

- ▶ Los dispositivos FET son **unipolares**, en el sentido que funcionan sólo con un tipo de portador de carga (electrones o huecos).
- ▶ El FET es un dispositivo controlado por voltaje: la diferencia de tensión entre su terminal de compuerta (G) controla la corriente circulante por los otros dos terminales.
- ▶ El FET tiene una alta impedancia de entrada, que lo hace útil en aplicaciones de amplificación donde esto sea requerido, y en aplicaciones de conmutación de bajo consumo y alta velocidad.



Transistor de Efecto de Campo Semiconductor de Óxido Metálico

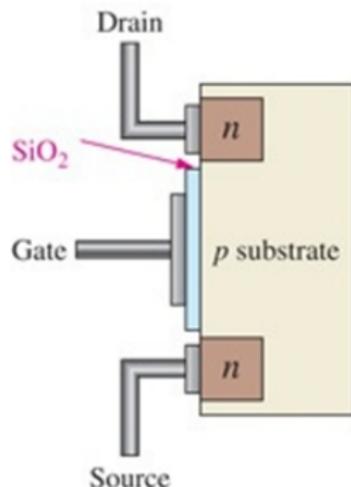
- ▶ El MOSFET es un dispositivo de tres terminales donde uno de los terminales (compuerta) se encuentra aislado del canal de conducción mediante una capa de dióxido de silicio (SiO_2).
- ▶ Existen dos tipos básicos:
 - ▶ Enriquecido o Mejorado: el canal de conducción aparece sólo si se aplica voltaje a la compuerta.
 - ▶ Empobrecido: tiene un canal de conducción estructural.
- ▶ Estos dispositivos a veces reciben el nombre de IGFET (*Isolated Gate FET*) por el hecho de tener el terminal de compuerta aislado.

MOSFET de tipo Enriquecido I

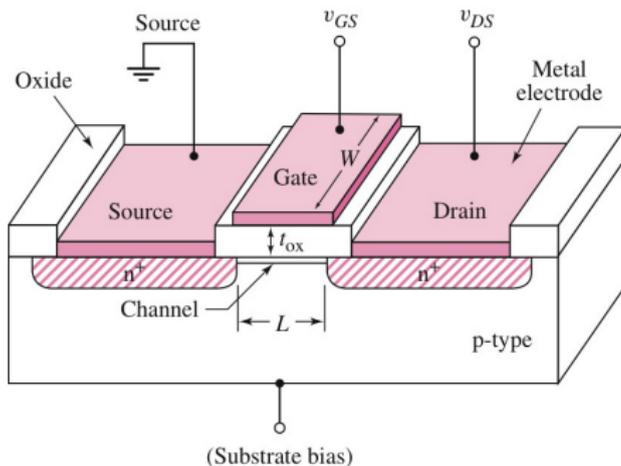
- ▶ El transistor de MOSFET de tipo enriquecido (MOSFET-E) tiene cuatro terminales:
 - ▶ Fuente (S: Source),
 - ▶ Compuerta (G: Gate),
 - ▶ Drenaje (D: Drain), y
 - ▶ Cuerpo (B:Body).

En el esquema el sustrato es de tipo p .

- ▶ Existen dos tipos de MOSFET-E
 - ▶ MOSFET-E canal n
 - ▶ MOSFET-E canal p



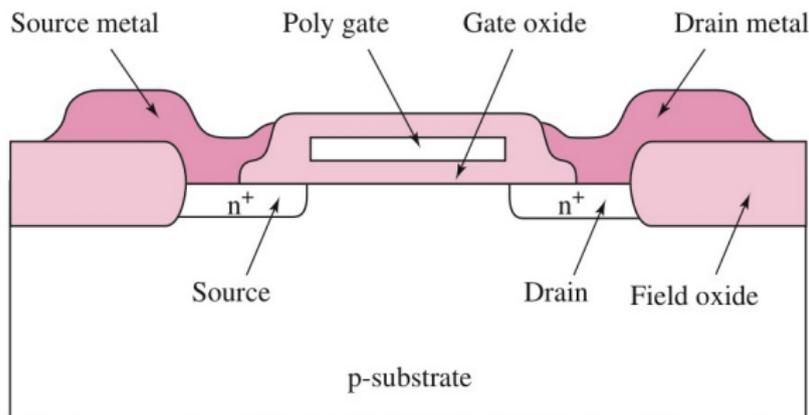
Estructura Física del MOSFET I



- ▶ El dispositivo esté formado por cinco regiones:
 - ▶ compuerta (gate),
 - ▶ óxido
 - ▶ sustrato tipo-*p* (o tipo-*n*)
 - ▶ terminal de fuente (source)
 - ▶ terminal de drenado (drain).

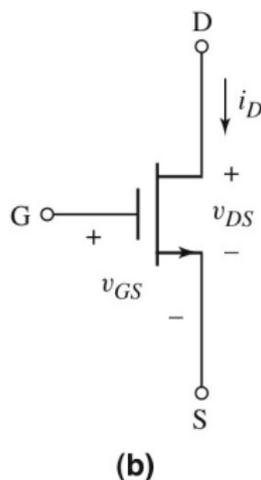
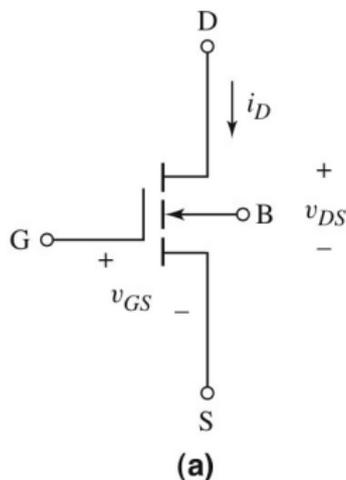
Estructura Física del MOSFET II

- ▶ Otros parámetros relevantes para el funcionamiento del transistor son
 - ▶ L : longitud del canal (10^{-6} m).
 - ▶ W : profundidad del canal.
 - ▶ t_{ox} : grosor de la capa de óxido (400 \AA).
- ▶ La figura muestra un corte de un MOSFET típico.



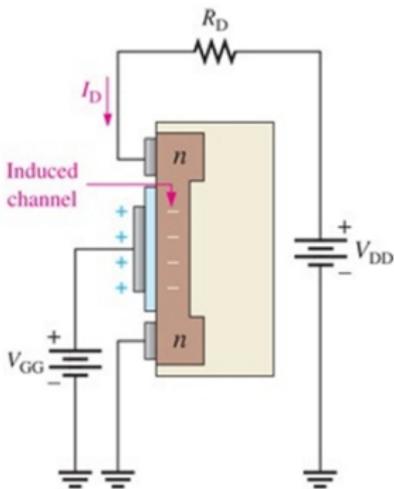
MOSFET-E tipo- n I

- ▶ A veces se denota por NMOSFET-E o simplemente NMOS.
- ▶ Se utilizan distintos símbolos para denotar este transistor



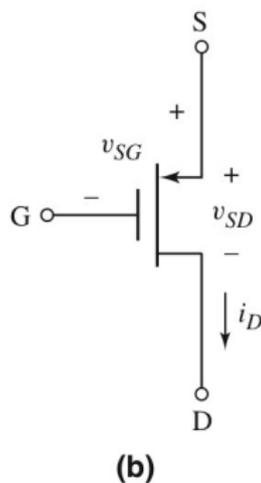
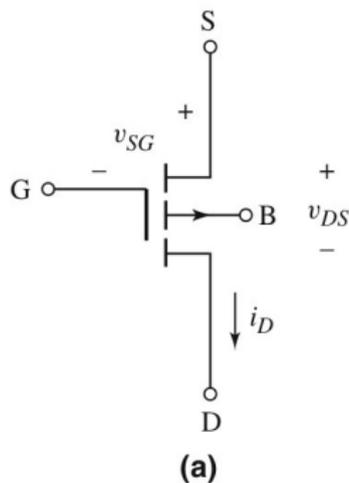
MOSFET-E tipo- n II

- ▶ Operación: requiere de un voltaje positivo en el terminal compuerta (G) para activar el transistor mediante la inducción de un canal de conducción.
- ▶ Con la incorporación de una fuente (S) y drenaje (D) aparece una corriente I_D que circula entre estos terminales, y aumenta hasta un alcanzar valor máximo.
- ▶ El aumento de V_{GS} puede provocar estrangulamiento del canal de conducción, y provocar un comportamiento resistivo.

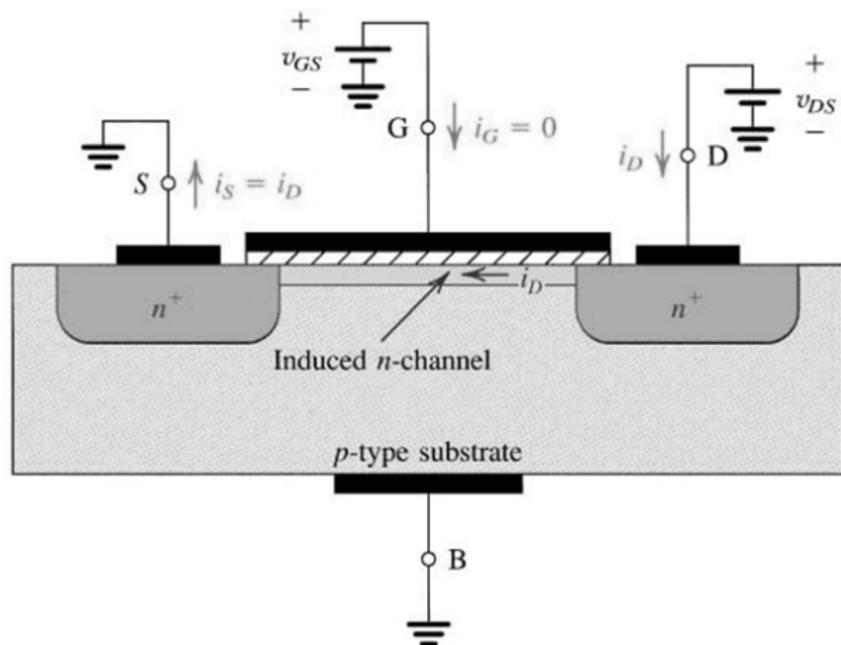


MOSFET-E tipo-*p*

- ▶ A veces se denota por PMOSFET-E o simplemente PMOS.
- ▶ Se utilizan distintos símbolos para denotar este transistor



Operación del MOSFET I



Operación del MOSFET II

- ▶ El canal de conducción aparece cuando $V_{GS} > V_t$. V_t recibe el nombre de voltaje umbral del MOS.
- ▶ Por qué?

Asumamos que $V_G = 0$. En ese caso las regiones de fuente y drenado están físicamente separadas el substrato de la transistor, y podemos modelar la situación como un par de diodos back-to-back:



- ▶ Independiente del valor de V_{DS} , la corriente entre los terminales S y D será esencialmente cero.

Operación del MOSFET III

- ▶ Si se aplica una tensión eléctrica suficientemente grande al terminal G , se produce una capa de inversión en la interfaz óxido-semiconductor que conecta temporalmente los terminales de fuente y drenado.
- ▶ Dado que se requiere la aplicación de un voltaje para la aparición de este “canal de conducción”, el dispositivo recibe el nombre de MOSFET enriquecido o mejorado.
- ▶ Cuando los portadores en la capa de inversión son electrones, se dice que MOSFET es de canal n o simplemente NMOS.
- ▶ Cuando los portadores en la capa de inversión son huecos, se dice que MOSFET es de canal p o simplemente PMOS.
- ▶ El terminal de fuente provee de portadores que fluyen a través del canal hacia la región de drenado.

Operación del MOSFET IV

- ▶ Para el transistor NMOS los electrones fluyen de fuente a drenado, lo que significa que la corriente fluye de drenado a fuente.
- ▶ Para el transistor PMOS los huecos fluyen de fuente a drenado, lo que significa que la corriente fluye de fuente a drenado.
- ▶ La magnitud de la corriente es función de la carga en la capa de inversión, la que a su vez es función del voltaje aplicado a la compuerta.
- ▶ Como la compuerta está aislada del canal por la capa de óxido, $I_G = 0$.
- ▶ Similarmente, dado que el canal y el substrato están separados por la región de carga, la corriente entre ambas es virtualmente nula. En efecto, se produce una juntura de tipo *pn* que queda polarizada en forma inversa y por ello no hay circulación.

Características Voltaje-Corriente de un MOSFET Ideal

- ▶ Estamos interesados en la curva i_D vs. v_{DS} para tres casos particulares:
 - ▶ Para valores pequeños de v_{DS} . Esto dará origen a la **Región Óhmica**.
 - ▶ Para valores menores a un umbral de saturación, para los cuales i_D es una función cóncava de v_{DS} . Esta región recibe el nombre de **Región de Tríodo**.
 - ▶ Para valores para los que i_D sea constante. Esta región se denomina **Región de Saturación**.
- ▶ Existe una cuarta región de operación llamada **corte** que se da cuando el voltaje entre compuerta y sustrato $v_{GS} < V_t$, el voltaje umbral necesario para crear la capa de inversión o canal de conducción.

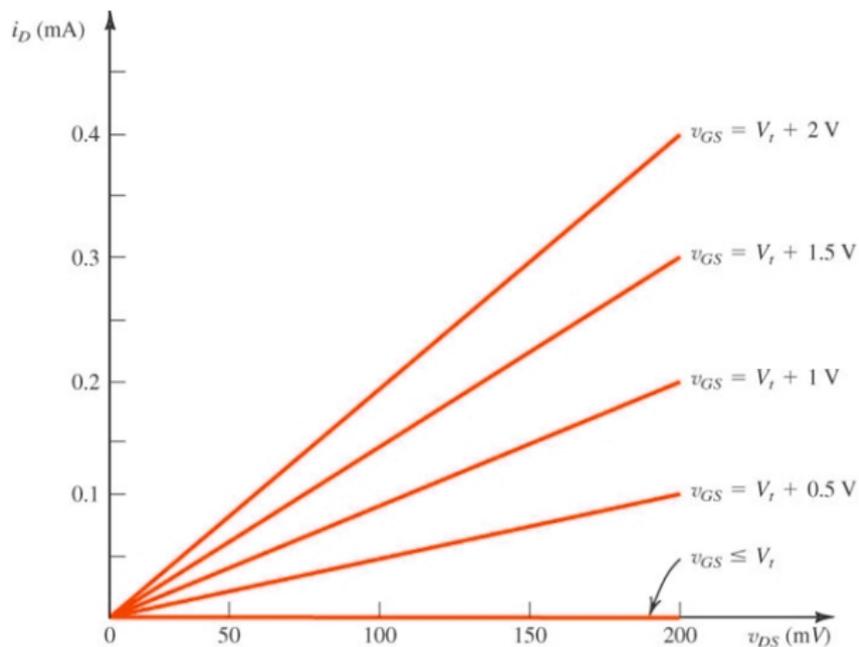
- ▶ Para V_{DS} pequeño (no mayor a 50mV), y asumiendo $v_{GS} > V_t$ tenemos conducción proporcional al voltaje aplicado.
- ▶ Definiremos

$$V_{OV} \equiv v_{GS} - V_t \quad (1)$$

y lo llamaremos **Voltaje Efectivo** o **Voltaje de Overdrive**.

- ▶ A medida que v_{GS} aumenta (o bien V_{OV} aumenta) mejora la conductividad del canal. Es por ello que este transistor recibe el nombre de tipo mejorado.

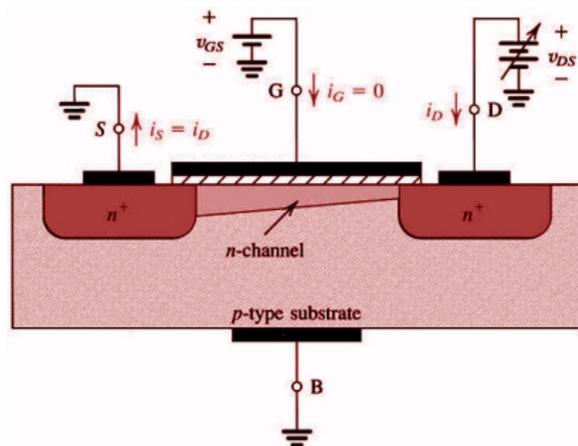
Región Óhmica II



Zona de Trío do

- ▶ A medida que v_{DS} aumenta, la altura del canal deja de ser constante.
- ▶ Llega un momento en que la corriente de drenaje i_D llega a un valor máximo, para luego permanecer constante.
- ▶ Por lo tanto, i_D vs. v_{DS} no es una línea recta sino una función cóncava.
- ▶ Finalmente, cuando v_{DS} alcanza el valor

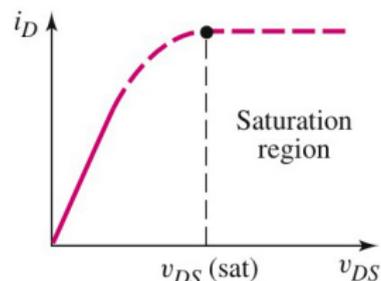
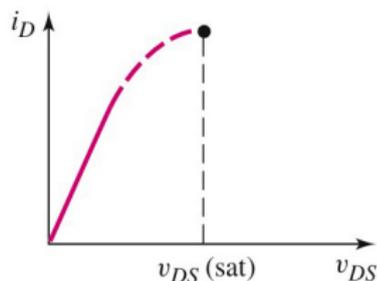
$$v_{DS}(\text{sat}) = v_{GS} - V_t$$



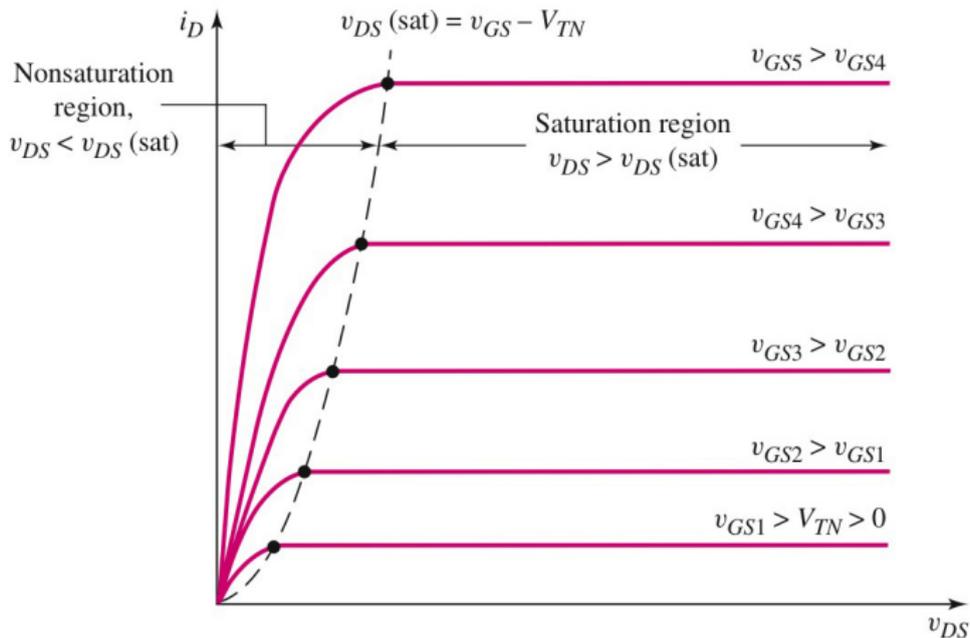
el canal deja de existir y la corriente i_D alcanza un valor constante.

Zona de Saturación

- ▶ El aumento de v_{DS} hasta el valor $v_{GS} - V_t$ satura la corriente de drenado i_D llevando el transistor a la región de saturación.
- ▶ El fenómeno se observa en la siguiente figura.



Característica i_D vs. v_{DS} I



Característica i_D vs. v_{DS} II

$$i_D = \begin{cases} k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right] & v_{DS} < v_{GS} - V_t \\ \frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 & v_{DS} \geq v_{GS} - V_t \end{cases}$$

- ▶ En la expresión k'_n es el parámetro de transconductancia del transistor y se define como

$$k_n = \mu_n C_{ox} \quad (2)$$

- ▶ μ_n representa la movilidad de los electrones en la capa de inversión.
- ▶ C_{ox} es la capacitancia del óxido por unidad de área, que a su vez se define por

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

- ▶ En el caso del silicio,

$$\epsilon_{ox} = 3,45 \times 10^{-13} \text{ F/cm.}$$

- ▶ A veces resulta conveniente concentrar todos los parámetros geométricos y conductivos del transistor en una sola constante. En este caso, definimos

$$K_n = \frac{W \mu_n C_{ox}}{2L} \quad (3)$$

y lo llamaremos el **parámetro de conducción del transistor**.

Impedancia Equivalente para la Zona Óhmica

- ▶ En la región óhmica tenemos

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right]$$

- ▶ Para v_{DS} pequeño, el término cuadrático puede ser despreciado. Por lo tanto

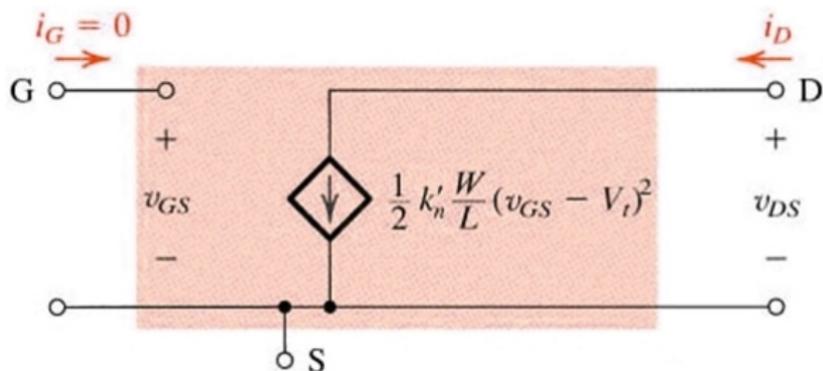
$$i_D \simeq k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)v_{DS}$$

- ▶ Definimos

$$r_{DS} = \left(k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) \right)^{-1}$$

y es la impedancia equivalente del transistor MOS para pequeños valores de V_{DS} .

Modelo de Señal Grande para la Región de Saturación



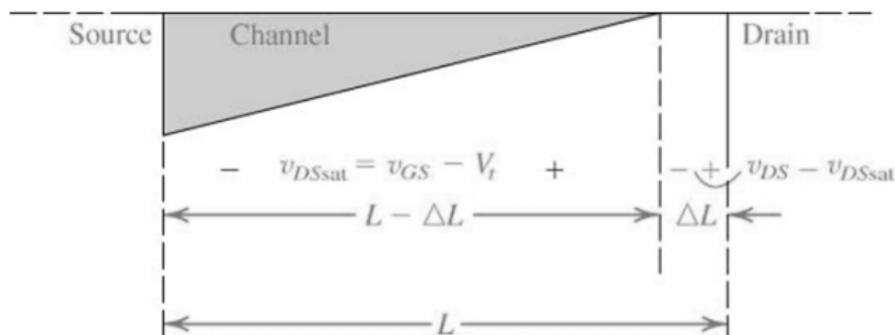
La condición de operación en la región de saturación es la siguiente:

$$v_{GS} \geq V_t$$

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_t.$$

Modulación de Canal I

- ▶ Aunque el modelo de señal grande recién mostrado asume que la corriente de drenado i_D es independiente del voltaje v_{DS} aplicado, lo que significa que la impedancia de salida es infinita, esto no es cierto en la realidad.
- ▶ Una vez que $v_{DS} = v_{DS}(\text{sat})$, se produce el estrangulamiento del canal hasta el punto en que la longitud del canal comienza a disminuir:



- ▶ Este fenómeno recibe el nombre de **modulación de canal**.

- Notemos que podemos utilizar la expresión de $i_D(v_{DS})$ para el modo de saturación para derivar una expresión corregida donde reemplazamos $L \rightarrow L - \Delta L$:

$$\begin{aligned}i_D &= \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}} (v_{GS} - V_t)^2 \\ &\simeq \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) (v_{GS} - V_t)^2\end{aligned}$$

cuando $\Delta L/L \approx 0$.

NOTA: Recordar que

$$\frac{1}{1 - \epsilon} \approx 1 + \epsilon,$$

para $\epsilon \approx 0$.

Modulación de Canal III

- ▶ P: Cómo se manifiesta la modulación de canal?

R: La longitud ΔL varía con el voltaje aplicado v_{DS} .

- ▶ Por simplicidad asumiremos que la dependencia es lineal, es decir, que existe una constante de proporcionalidad λ' tal que

$$\Delta L = \lambda' v_{DS}$$

- ▶ Por lo tanto,

$$i_D \approx \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \left(1 + \frac{\lambda'}{L} v_{DS} \right) (v_{GS} - V_t)^2$$

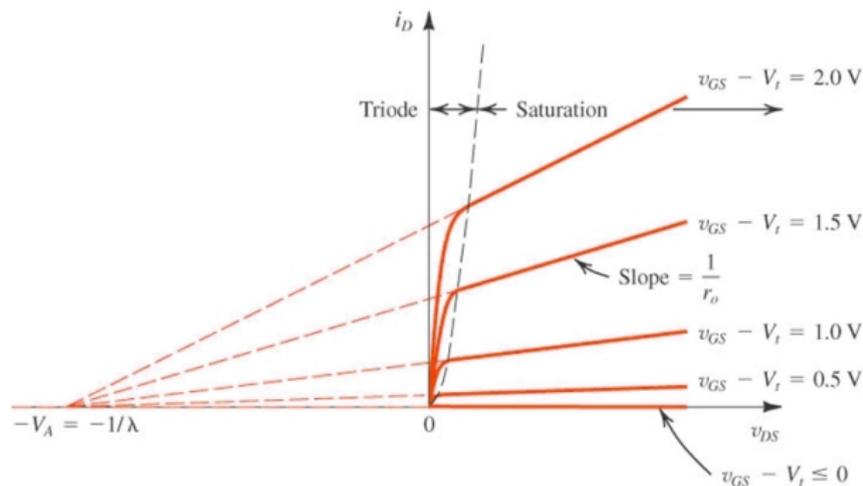
- ▶ Definimos $\lambda = \lambda'/L$, que tiene unidades de [1/V].

Modulación de Canal IV

Por lo tanto

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \left(1 + \lambda v_{DS} \right) (v_{GS} - V_t)^2$$

para $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$.



- ▶ La curva de saturación corta al eje horizontal en

$$v_{DS} = -V_A \quad (4)$$

y recibe el nombre de **voltaje Early**.

- ▶ Notemos que este efecto se manifiesta en forma directa en la aparición de una resistencia finita en la salida del transistor.
- ▶ Cómo lo calculamos?

$$\frac{1}{r_0} \equiv \left(\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right) \Big|_{v_{GS} \text{ constante}} .$$

- ▶ $1/r_0$ es la pendiente de la curva $i_D(v_{DS})$ en la región de saturación.
- ▶ Si definimos

$$I_D = \frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2,$$

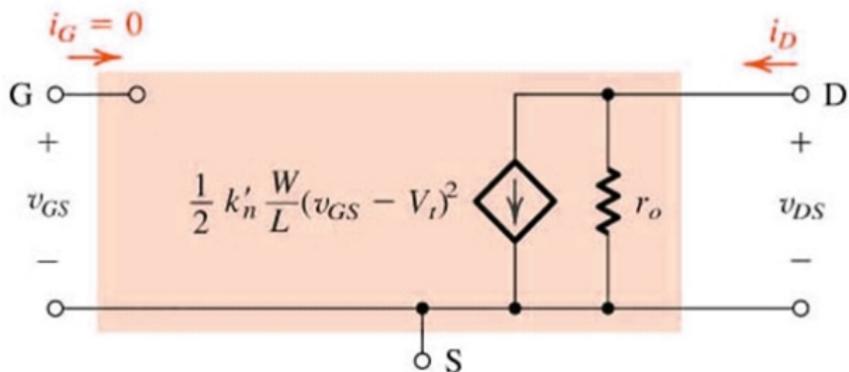
entonces

$$i_D = I_D + \frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \frac{1}{V_A} v_{DS} \quad (5)$$

- ▶ Luego,

$$r_0 = \frac{V_A}{I_D}. \quad (6)$$

- El modelo de señal grande se modifica para incorporar el efecto Early:



- ▶ Dos grandes familias:
JFETs: juntura en la compuerta.
MOSFETs: compuerta aislada.
- ▶ Tres modos de operación del MOSFET:

Corte $v_{GS} < V_t$

Triodo $v_{GS} \geq V_t$ y $v_{DS} < v_{GS} - V_t$

Saturación $v_{GS} \geq V_t$ y $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$

- ▶ Característica i_D vs. v_{DS}

$$i_D = \begin{cases} k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right] & v_{DS} < v_{GS} - V_t \\ \frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 & v_{DS} \geq v_{GS} - V_t \end{cases}$$

- ▶ Efecto Early: introduce corrección en la corriente i_D en la región de saturación.