

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 9: Transistores FET

Patricio Parada

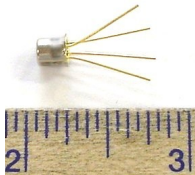
`pparada@ing.uchile.cl`

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

26 de agosto de 2008

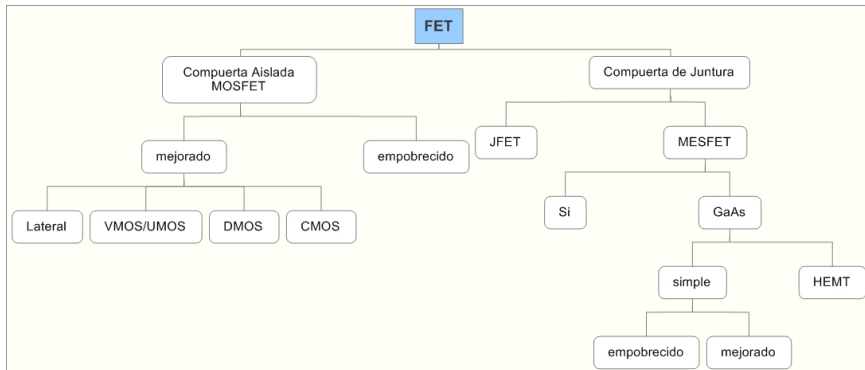
Transistores de Efecto de Campo

- FET: Field-Effect Transistor



- En 1945 Schockley estaba convencido que la aplicación de un campo eléctrico intenso podría inducir la aparición de una corriente. Esta idea fue puesta a prueba por Brattain y Bardeen, pero no funcionó. En su lugar desarrollaron el BJT.
- 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.

La familia FET



Principales tipos:

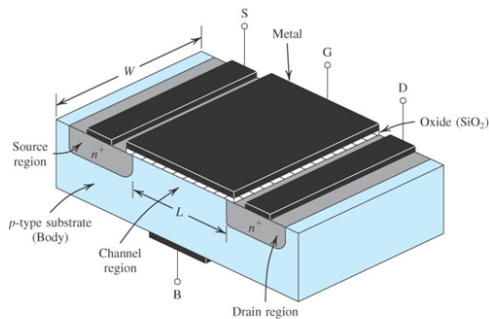
- JFET: Junction FET
- MESFET: Metal-Semiconductor FET
- MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor FET. También recibe el nombre de Insulated-Gate FET (IGFET)

y ahora los MOSFETs

Dependiendo de las características de fabricación tenemos:

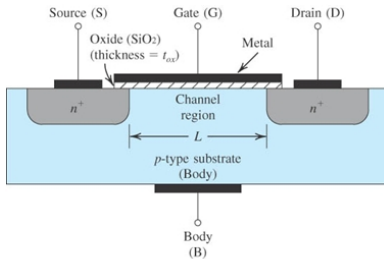
- PMOS: MOS de canal p
- NMOS: MOS de canal n
- CMOS: MOS complementario
- BiMOS o BiCMOS: BJT + (C)MOS
- HMOS: High-performance MOS
- DMOS/DIMOS: double-diffused MOS
- VMOS: Vertical MOS
- SOS/SOI: Silicon-on-sapphire/silicon-on-insulating substrate
- HEMT: High-electron-mobility transistor

Estructura Física del MOSFET (tipo n)

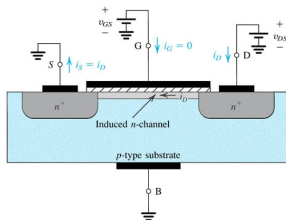


Cuatro terminales: Fuente (S: Source), Compuerta (G: Gate), Drenaje (D: Drain), y Sustrator (B:Body). En el esquema el sustrato es de tipo p , lo que da el nombre al dispositivo.

Estructura Física del MOSFET (tipo n)

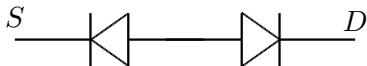


Operación del MOSFET



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

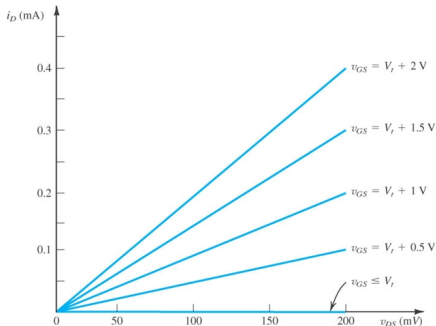
Por qué? Asumamos que $V_G = 0$. En ese caso tenemos el canal entre S y D puede modelarse como un par de diodos contrapuestos:



Independiente del valor de V_{DS} no habrá circulación de corriente entre los terminales S y D.

Región Ohmica

- Para V_{DS} pequeño (no mayor a 50 mV), y asumiendo $V_{GS} > V_t$ tenemos conducción proporcional al voltaje aplicado.
- Definimos $V_{OV} \equiv V_{GS} - V_t$: 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.

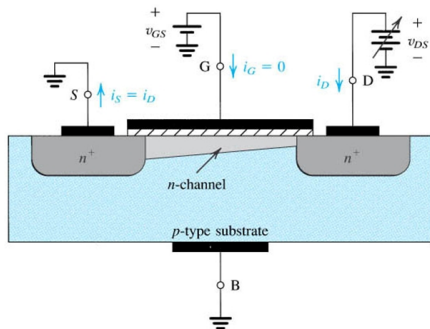


Modos de Operación

- 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 concava.
Finalmente, cuando v_{DS} alcanza el valor

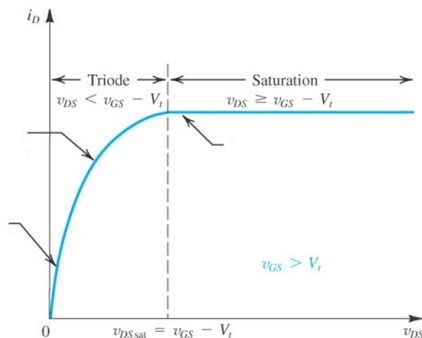
$$v_{DS} = v_{GS} - V_t$$

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



Característica i_D vs. v_{DS}

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



Impedancia equivalente para la Zona Ohmica

- En la región ohmica tenemos

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

donde k'_n es el parámetro de transconductancia del transistor.

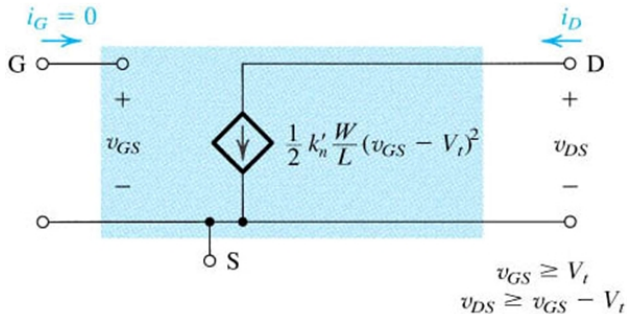
- Para v_{DS} pequeño, el término cuadrático puede ser despreciado. Por lo tanto

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

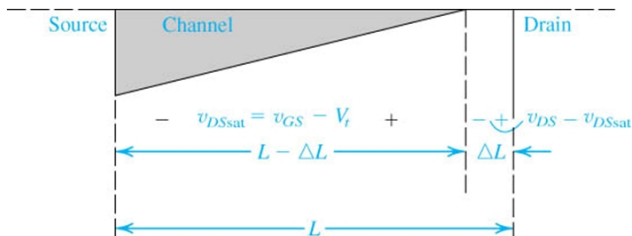
- Definimos

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

Modelo de Señal Grande para la Región de Saturación



Modulación de Canal (1)



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

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

Modulación de Canal (3)

- Cómo se manifiesta la modulación de canal? La longitud ΔL varía con el voltaje aplicado v_{DS} .
- Por simplicidad asumimos que la dependencia es lineal, es decir, que existe una constante de proporcionalidad λ' tal que

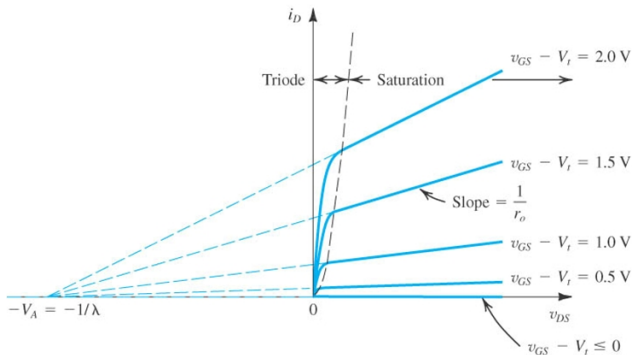
$$\Delta L = \lambda' v_{DS}$$

- 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 (2)

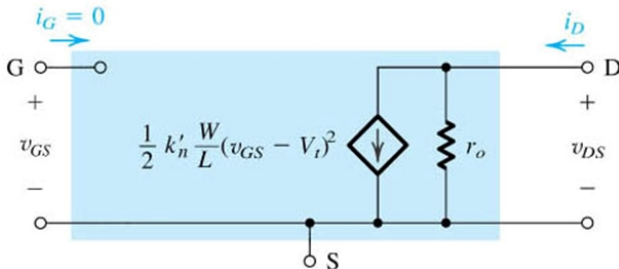


donde

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

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

Modulación de Canal (3)



$1/r_0$ es la pendiente de la curva en la región de saturación. Si definimos $I_D = \frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L}(v_{GS} - V_t)^2$, entonces

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

es decir,

$$r_0 = \frac{V_A}{I_D}.$$

Resumen

- Dos grandes familias:
JFETs: juntura en la compuerta.
MOSFETs: compuerta aislada.
- Tres modos de operación del MOSFET:
Corte $v_{GS} < V_t$
Tríodo $v_{GS} \geq V_t$ 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.