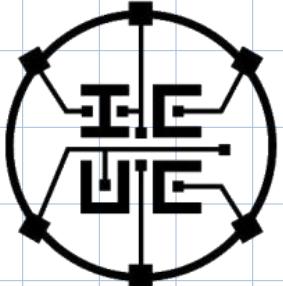




4.01



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El transistor de efecto de campo: otra válvula de corriente

Dependencias:

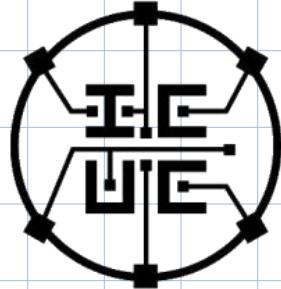
- 1.14 Curva (recta) de carga
- 1.16 Rieles de alimentación de un circuito

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

## Electrónica en cápsulas

# El MOSFET\*: nuestro primer elemento circuital activo

- MOSFET significa transistor de efecto de campo (FET) formado por una unión metal-óxido-semiconductor (MOS)
  - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
  - Existen otros FETs que no son MOS
- Es, de hecho, un tipo de **transistor**
  - Elemento circuital capaz de controlar la corriente entre dos terminales
- El MOSFET puede operar como **fuente dependiente**, por lo que corresponde a un **elemento circuital activo**
- El MOSFET también puede operar como **interruptor** controlado por voltaje
  - O incluso como una resistencia controlada por voltaje
  - O como una capacitancia controlada por voltaje
- Es posible fabricar hasta **miles de millones de MOSFETs** en un solo chip



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

\* En este curso hablaremos del MOSFET de enriquecimiento. También existe el MOSFET de agotamiento, que actualmente no tiene mucho uso.

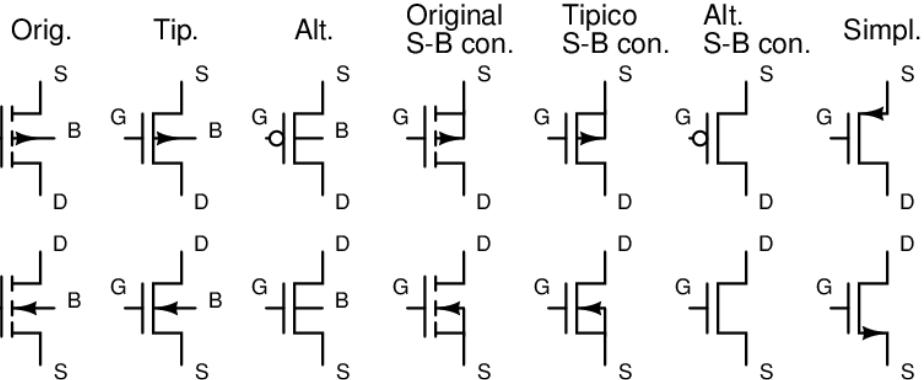
# Conociendo el MOSFET

Símbolo  
circuitual

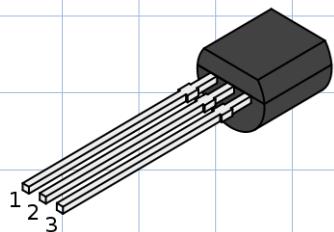
Dos "sabores"

PMOS

NMOS



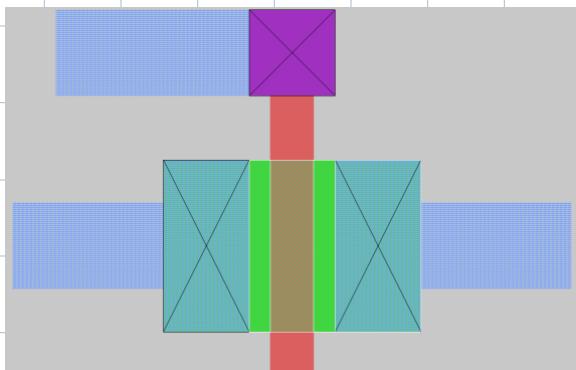
MOSFET discreto



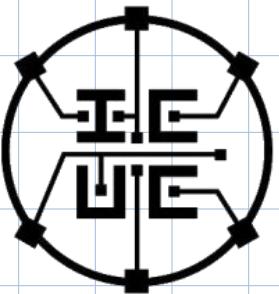
[Foto: Dominio público]

1=S  
2=G  
3=D

MOSFET integrado



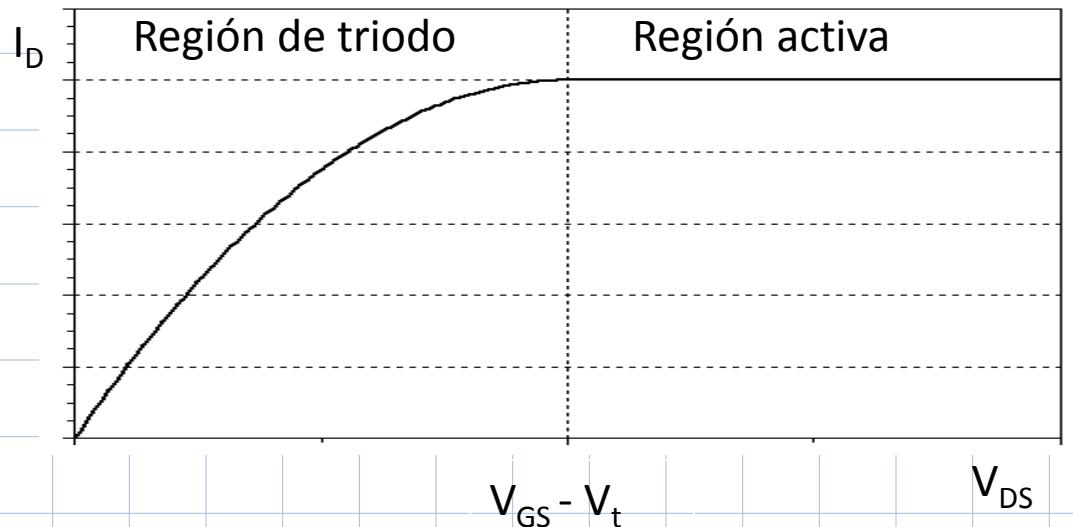
La característica que mejor identifica a un MOSFET es su tecnología de fabricación, nodo tecnológico o **longitud de canal** (4.02)



# ¿Qué función cumple un MOSFET?

## Tres regiones de operación

Región de Operación	Característica
Corte	Transistor apagado, <b>switch abierto</b> , alta resistencia, no deja pasar corriente
Activa o saturación	Transistor conduce y su corriente es sensible al voltaje entre terminales (VCCS), puede ser usado como <b>amplificador</b>
Triodo	Transistor encendido, <b>switch cerrado</b> , presenta baja resistencia, también puede funcionar como capacitor



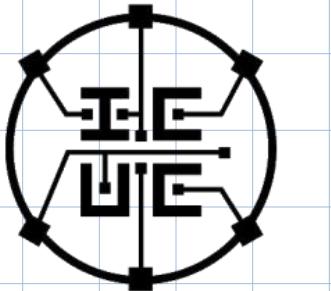
En región de triodo

$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

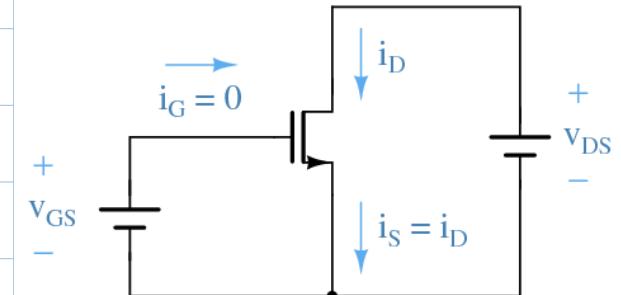
En región activa:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

¿Para qué sirve? Veamos aplicaciones

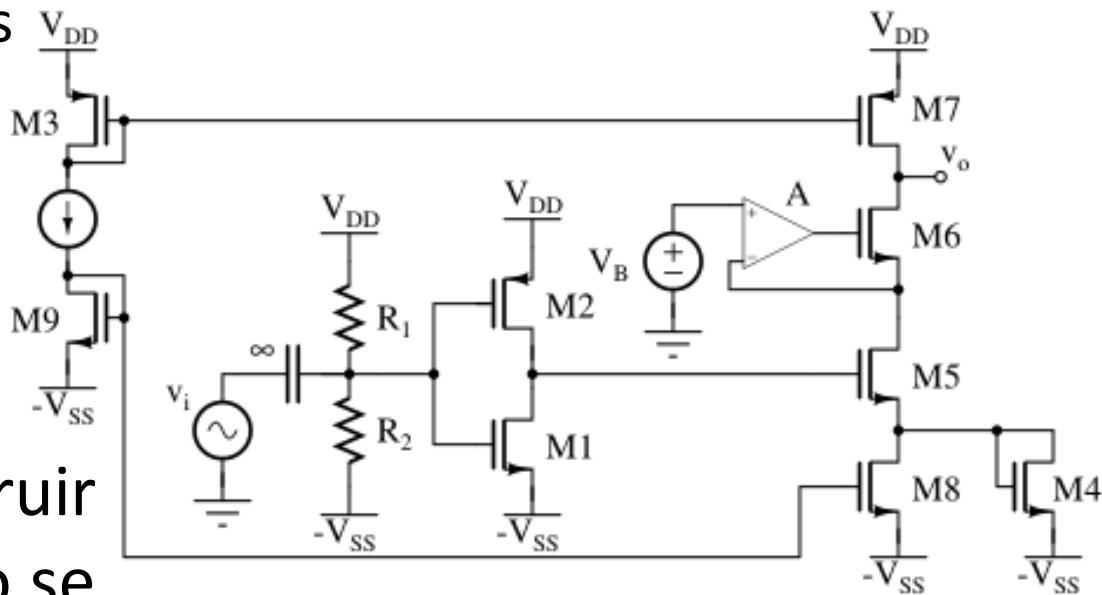


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



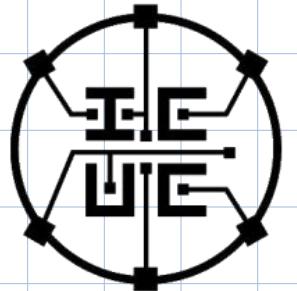
# Amplificación

- Mediante MOSFETs, es posible construir amplificadores de diversos tipos:
  - De voltaje, incluyendo buffers y opamps
  - De corriente, incluyendo buffers
  - De transconductancia, incluyendo OTAs
  - De transrresistencia
  - De carga
- Con amplificadores, es posible construir todos los bloques circuitales que uno se pueda imaginar

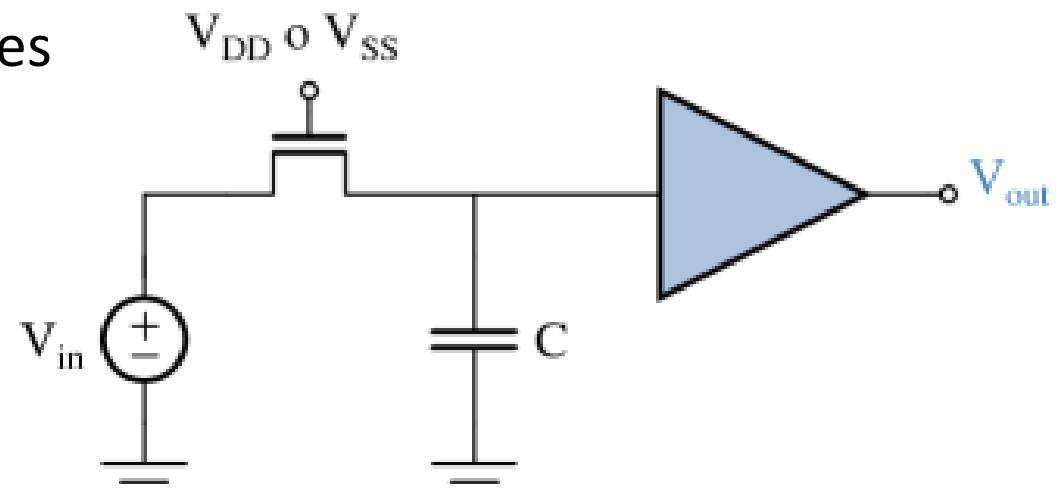


# Interruptores

- Un MOSFET puede variar su conductancia en varios órdenes de magnitud según el estímulo aplicado
- El MOSFET como interruptor puede servirnos para implementar diferentes aplicaciones:
  - Compuertas lógicas
  - Encendido y apagado de cargas circuitales
  - Amplificador clase D
  - Muestreo (2.16)
  - Etc.

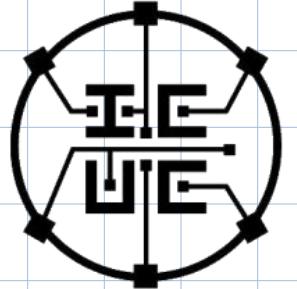


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



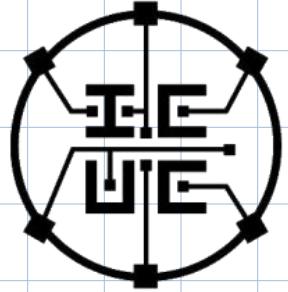
# ¿Qué veremos en este capítulo?

- Estructura del MOSFET y curvas características
- Funcionamiento del MOSFET en diferentes regiones de operación
- Modelos matemáticos para el MOSFET
  - Modelo incremental del MOSFET
- Polarización de un MOSFET
- Espejos de corriente
- Amplificadores elementales y variantes
- El MOSFET como interruptor
- Compuertas lógicas
- Capacitancias de los MOSFETs
- Otros FETs





4.02



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# CMOS y circuitos integrados

Dependencias:

- 4.01 El transistor de efecto de campo: otra válvula de corriente

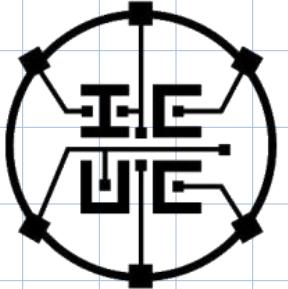
[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

## Electrónica en cápsulas

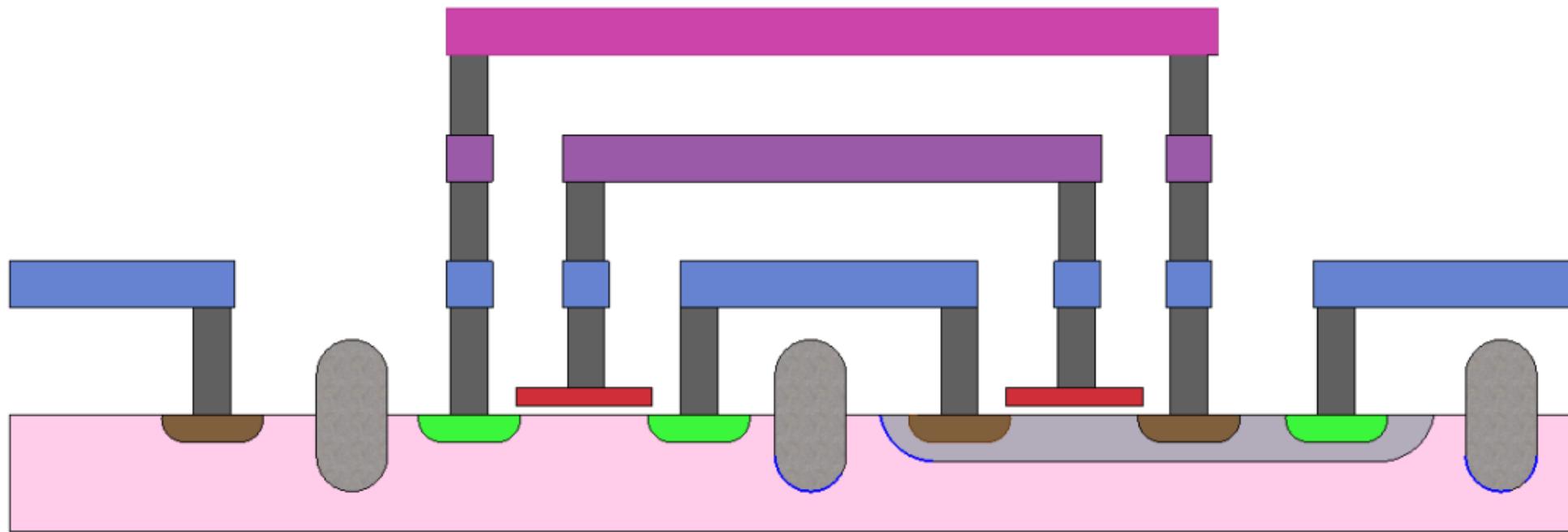
# ¿Cómo son los circuitos integrados?

Los circuitos integrados (ICs) incluyen millones de transistores, elementos pasivos e interconexiones.

Los transistores van fabricados en el sustrato de silicio, y conectados mediante capas de metal depositadas encima.



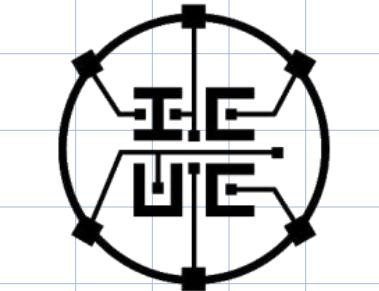
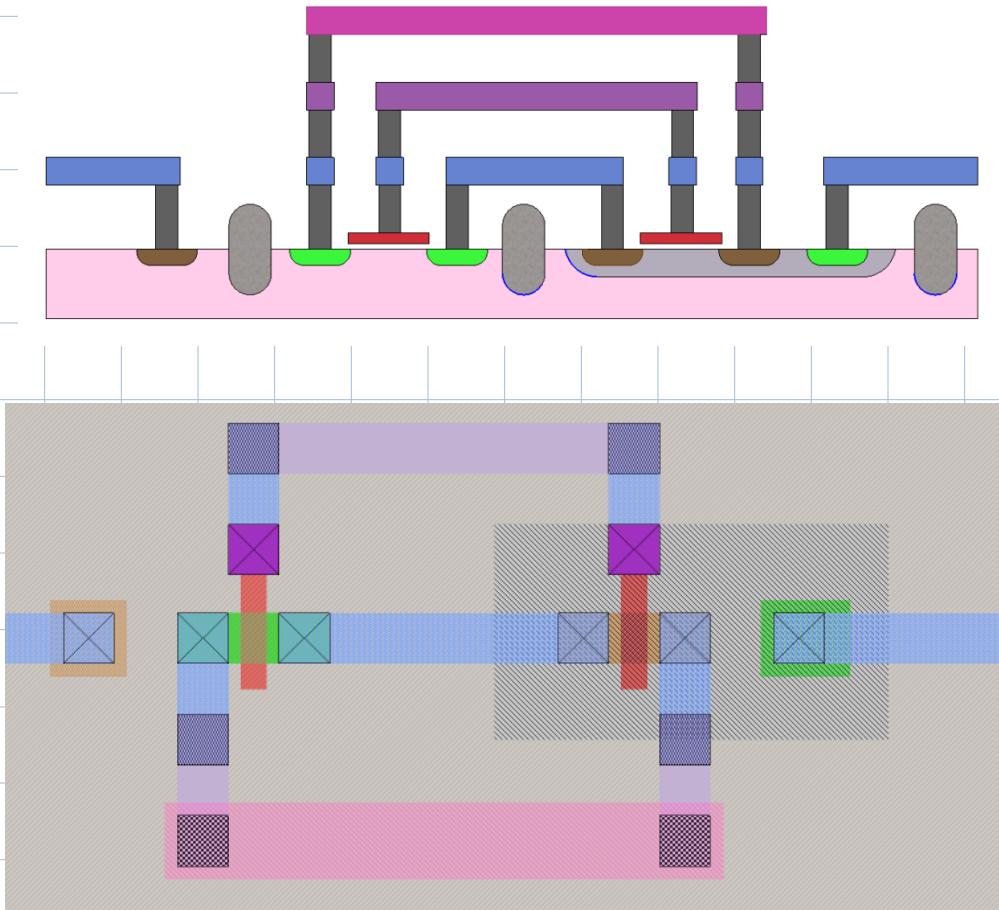
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Sección transversal de una pequeña parte de un circuito integrado. No está a escala.

# Un circuito monolítico o impreso en un trozo de silicio

- El chip tiene:
  - Transistores
  - Alambres (wires), que conectan los transistores
  - Resistores (diferentes sabores)
  - Capacitores (diferentes sabores)
- La mayor parte de la superficie suele estar ocupada por interconexiones y por elementos pasivos
- La “magia” de un IC está en los transistores, que se encuentran en su superficie
- Los ICs más comunes son de tecnología **CMOS** (MOSFETs)
  - De canal N y de canal P



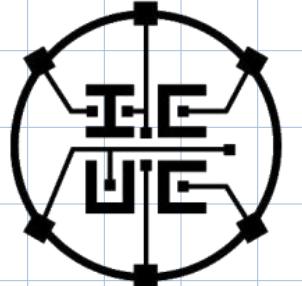
**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Hay dos sabores de MOSFETs: **NMOS** y **PMOS**, que actúan en forma **complementaria**. De ahí el nombre **Complementary MOS** o **CMOS**

Esto se llama “Layout de un chip” y es similar al layout de una PCB

# ¿Entonces qué es CMOS?

- CMOS es una tecnología de fabricación de chips que predomina en circuitos digitales, pero que también sirve para una infinidad de circuitos analógicos
- Los circuitos CMOS son fabricados en diferentes **procesos o nodos tecnológicos**
- Además de la tecnología CMOS, existen otras tecnologías de fabricación: JFET, BJT de silicio, BJT de heteroestructuras, tecnología Bi-CMOS, y otras muy prometedoras y aún incipientes
- En este curso aprenderemos CMOS (cap. 4) y BJT (cap. 5)

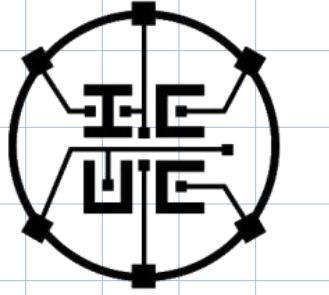


# Nodo tecnológico CMOS

Año	Nodo
1971	10 mm
1974	6 mm
1977	3 mm
1982	1.5 mm
1985	1 mm
1989	800 nm
1994	600 nm
1995	350 nm
1997	250 nm
1999	180 nm
2001	130 nm
2004	90 nm
2006	65 nm
2008	45 nm
2010	32 nm
2012	22 nm
2014	14 nm
2017	10 nm
~2018	7 nm
~2020	5 nm

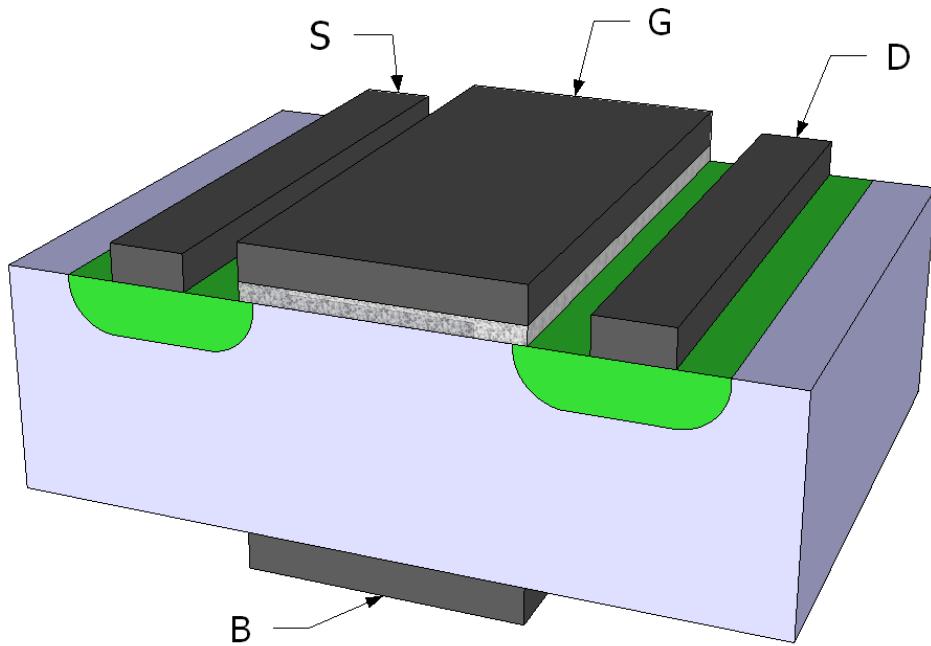
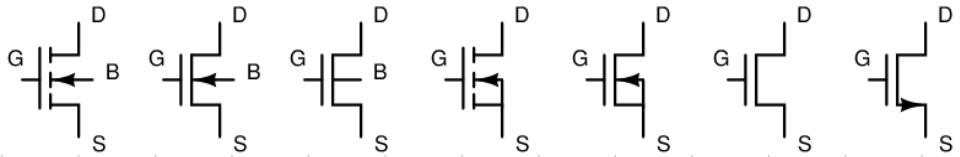
- A medida que la tecnología de fabricación mejora, es posible fabricar transistores más pequeños, más rápidos y más eficientes
- La longitud de canal mínima de un proceso define el **nodo tecnológico**
  - Ley de Moore
  - En 1971 teníamos transistores de  $10\mu\text{m}$
  - En 2017 llegamos a los 10nm
- **¿A qué nodo tecnológico pertenece el procesador del dispositivo que estás usando ahora para ver este video?**

[https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor\\_device\\_fabrication](https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_fabrication)



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

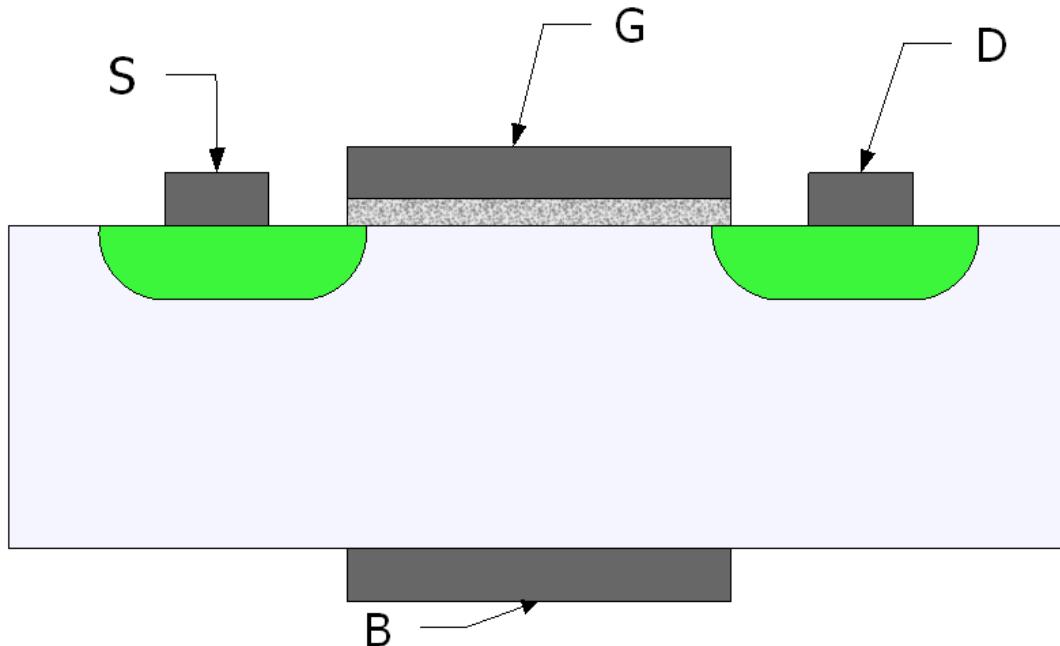
# Estructura del MOSFET canal N



El MOSFET de canal P es igual en estructura, pero tiene los dopajes invertidos

**Terminales principales:**

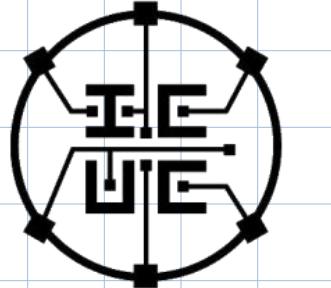
- + **compuerta**, cuyo voltaje aplicado controla la corriente, y
- + **dren y fuente**, a través de los cuales circula la corriente



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Referencias muy interesantes y recomendables

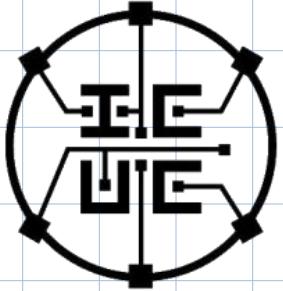
- Lee, T. *The (pre-) history of the integrated circuit: a random walk*, Solid-state circuits newsletter, Vol. 12, No. 2, 2007
- Moore, G. *Cramming more components onto integrated circuits*, Electronics Vol. 38, No. 8, 1965
- Edición completa de IEEE Electron Devices, Julio de 1976
- Lojec, B. *History of semiconductor engineering*, Springer 2007



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



4.03



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MOSFET como capacitor

Dependencias:

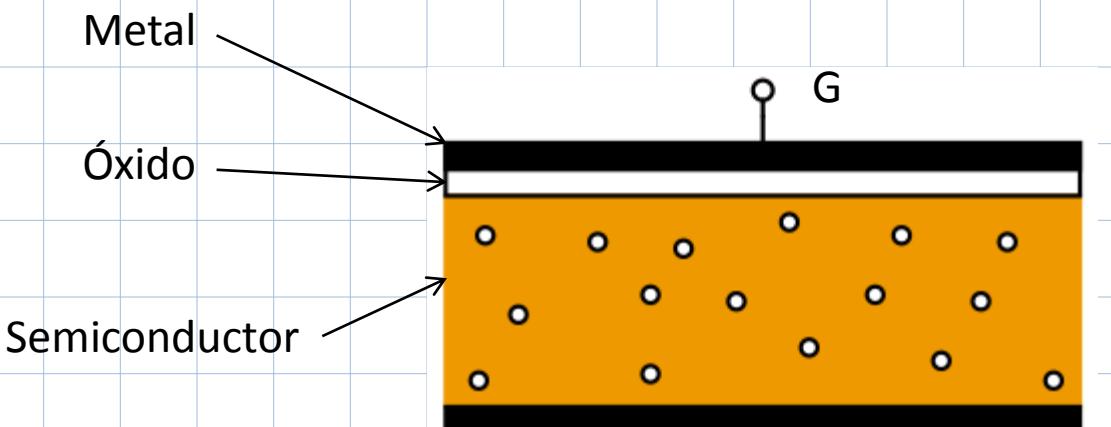
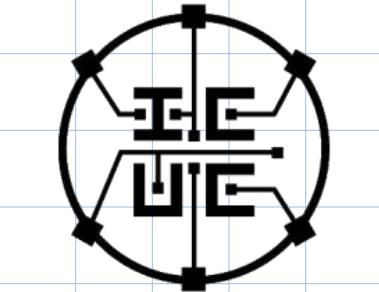
- 4.01 El transistor de efecto de campo: otra válvula de corriente

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

# El MOSFET es un capacitor de placas paralelas

- Tres regímenes de operación:
  - Acumulación
  - Agotamiento
  - Inversión
    - Baja frecuencia
    - Alta frecuencia
- Un MOSFET puede operar como capacitor en cualquiera de ellos
- A continuación los estudiaremos en forma cualitativa para un MOSCap con sustrato tipo P



Capacitor MOS en sustrato tipo P, sin voltaje en compuerta

# Acumulación: $V_{GB} < V_{FB}$

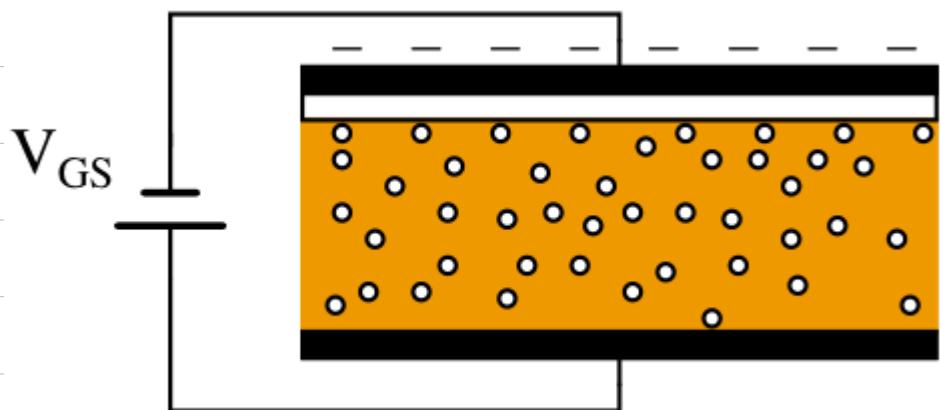
- Al aplicar voltaje menor que el voltaje de flatband  $V_{FB}$  ( $< 0$ ) en compuerta, el campo eléctrico atrae huecos hacia la interfaz entre el cuerpo y el dieléctrico
- El óxido queda dispuesto entre dos conductores: un metal arriba y un semiconductor abajo
- Aparece una capacitancia de valor:

$$C_{MOS,ac} = C_{ox} \cdot W \cdot L$$

Donde

- W = ancho
- L = longitud del canal

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

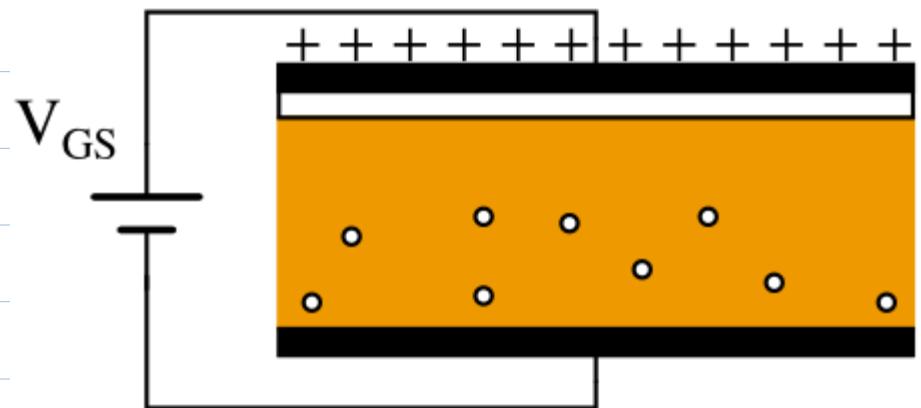


# Agotamiento: $V_{FB} < V_{GB} < V_T$

- Al aplicar voltaje en compuerta mayor que  $V_{FB}$ , el voltaje positivo en compuerta repele a los huecos y produce una región de agotamiento
- La región de agotamiento es en efecto un dieléctrico que aumenta la distancia entre placas paralelas y reduce la capacitancia

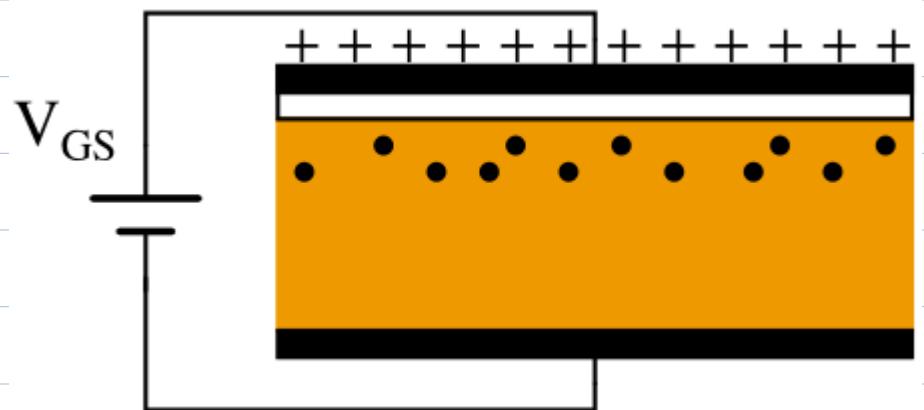
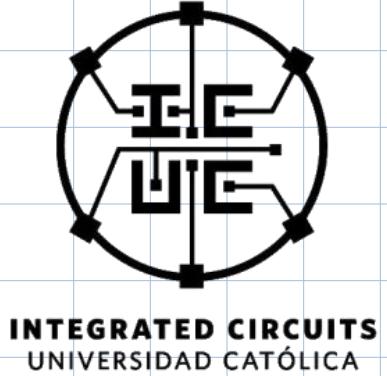
$$C_{\text{MOS,dep}} = C_{\text{MOS,ac}} \parallel C_{\text{dep}}$$

- La capacitancia de agotamiento depende del ancho de la región de agotamiento, que es función del voltaje
- La región de agotamiento queda totalmente desprovista de portadores de carga cuando  $V_{GB} = V_T$



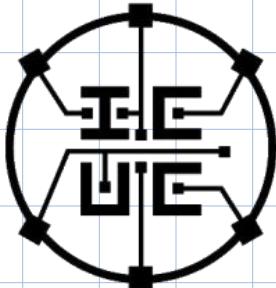
# Inversión $V_{GB} > V_T$ – baja frecuencia

- Al aplicar en compuerta un voltaje mayor que un umbral  $V_T$ , el material tipo P se “invierte” y comienza a tener mayor concentración de electrones libres que de huecos
- Estos electrones quedan justo debajo del sustrato y acercan las placas paralelas del capacitor, aumentando su capacitancia al nivel que tenía al operar en modo agotamiento

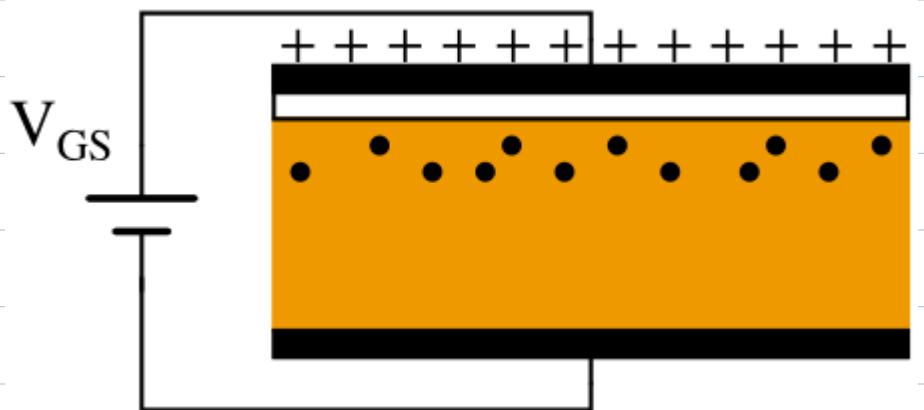


# Inversión $V_{GB} > V_T$ – alta frecuencia

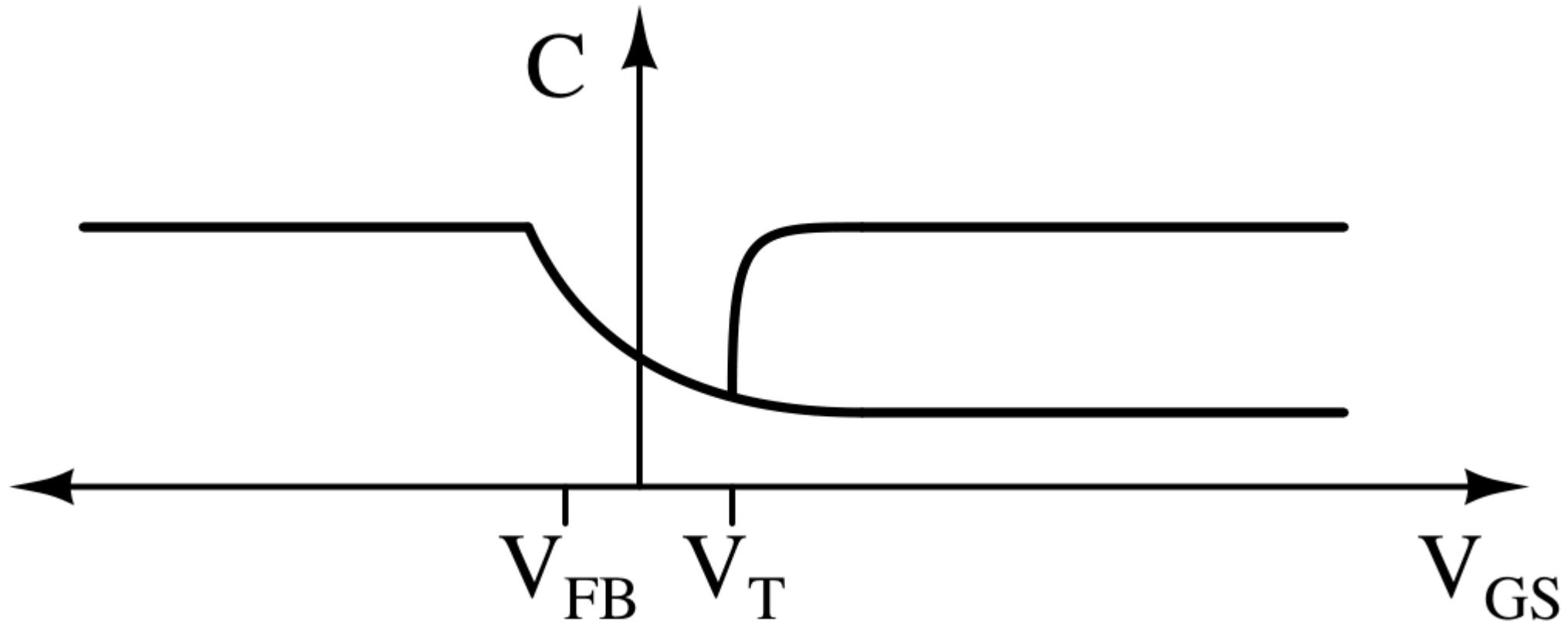
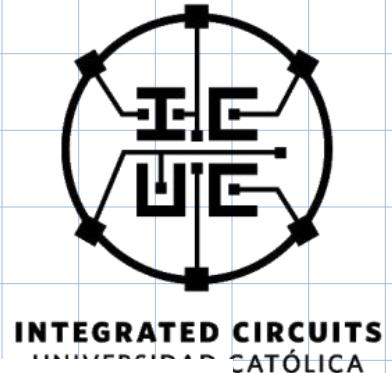
- Si aplicamos una señal de alta frecuencia superpuesta a la polarización, los electrones libres no alcanzan a poblar el sustrato, resultando en una capacitancia menor que a baja frecuencia



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



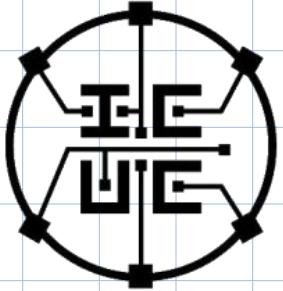
# Curva de capacitancia del MOS



El MOSCap de sustrato N presenta características opuestas (espejadas en eje x)



4.04



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MOSFET en región de triodo

Dependencias:

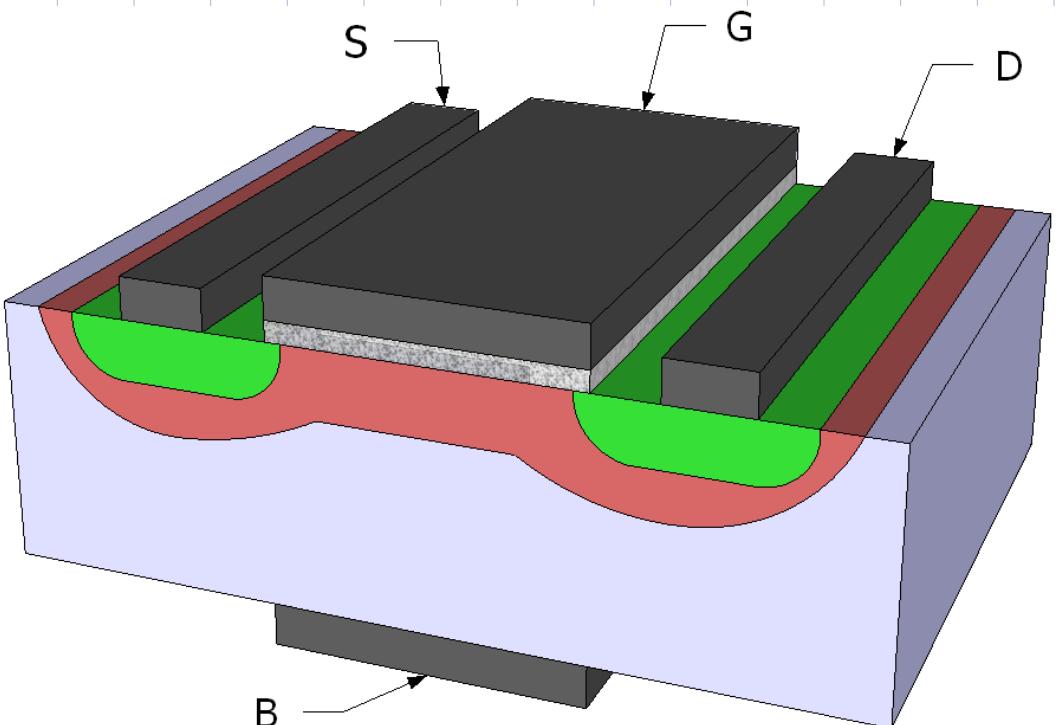
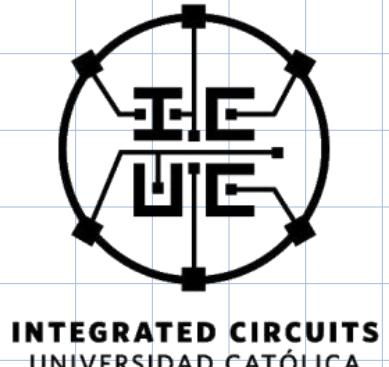
- 4.01 El transistor de efecto de campo: otra válvula de corriente
- 4.03 El MOSFET como capacitor

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

# Hablemos ahora del MOSFET (no del MOSCap), sin voltaje de compuerta

- No hay canal
  - la compuerta ve un capacitor al sustrato, equivalente a la conexión en serie del capacitor del óxido de compuerta y el capacitor de la región de agotamiento (4.03)
- Si el voltaje de compuerta es negativo, la región de agotamiento se hace más delgada y, por lo tanto, la capacitancia de la región de agotamiento crece (4.03)



$$V_{GS} \leq 0$$

# Inversión: aplicamos voltaje de compuerta y creamos un canal conductor

Condición:

$$V_{GS} \geq V_T$$

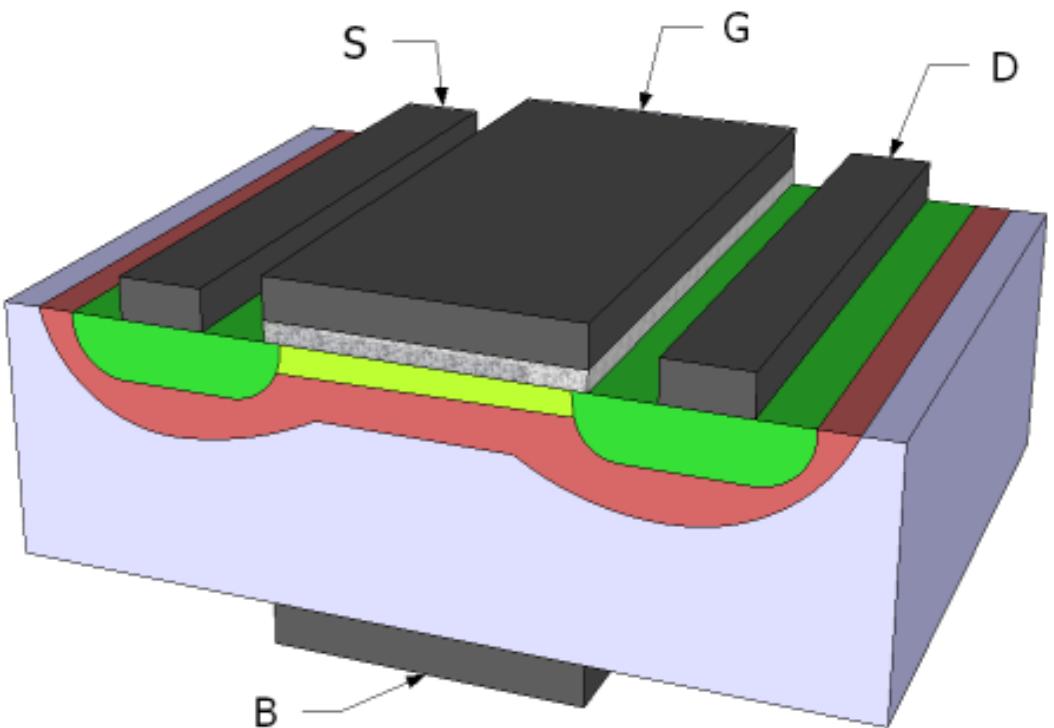
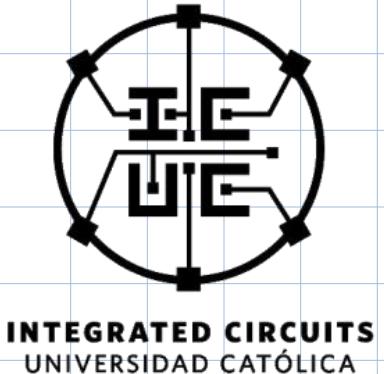
Carga móvil en el canal:

$$Q_{ch} = (C_{ox}WL) \cdot (V_{GS} - V_T)$$

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

El exceso de  $V_{GS}$  por sobre  $V_T$  es tan importante que tiene nombre: **voltaje de overdrive  $V_{OV}$**

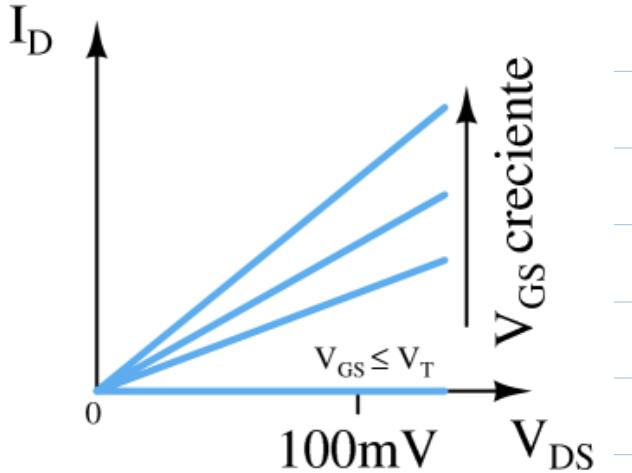
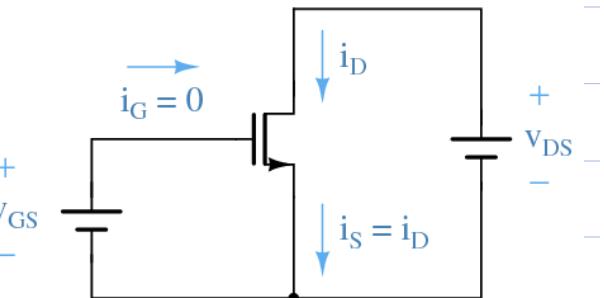
$$V_{OV} = V_{GS} - V_T$$



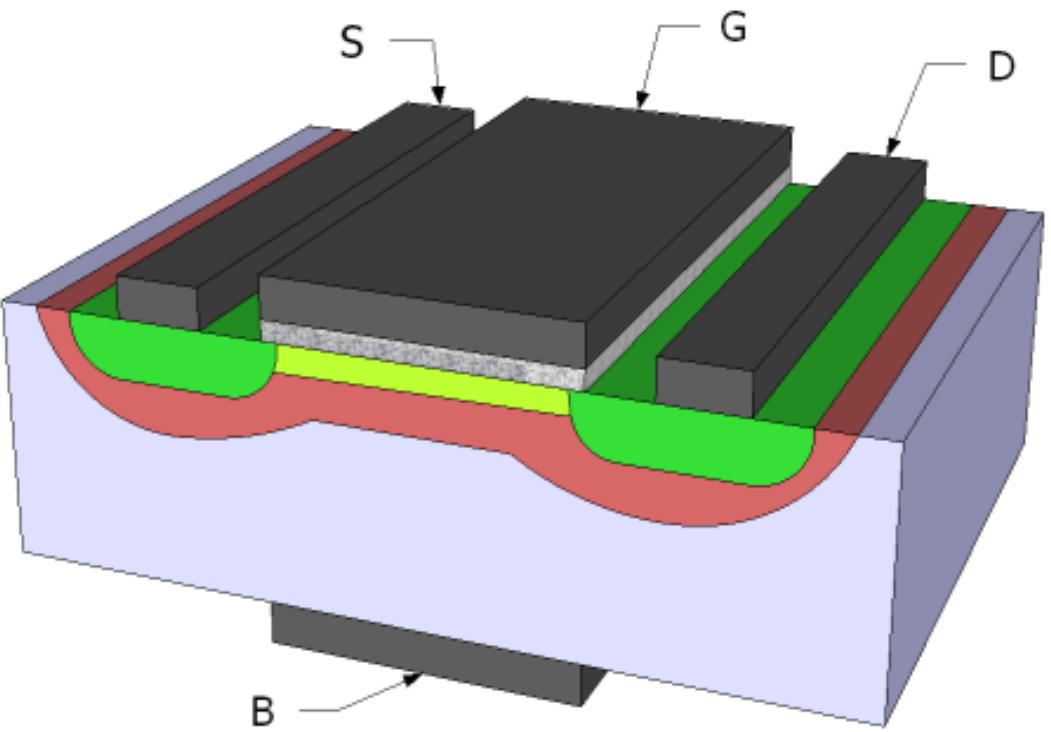
# Ahora apliquemos $V_{DS}$ pequeño

- La corriente que circula entre dren y fuente es proporcional a  $V_{DS}$ 
  - El transistor opera como una resistencia que depende de  $V_{GS}$ !

$$I_D = \frac{V_{DS}}{r_{ds}(V_{GS})}$$

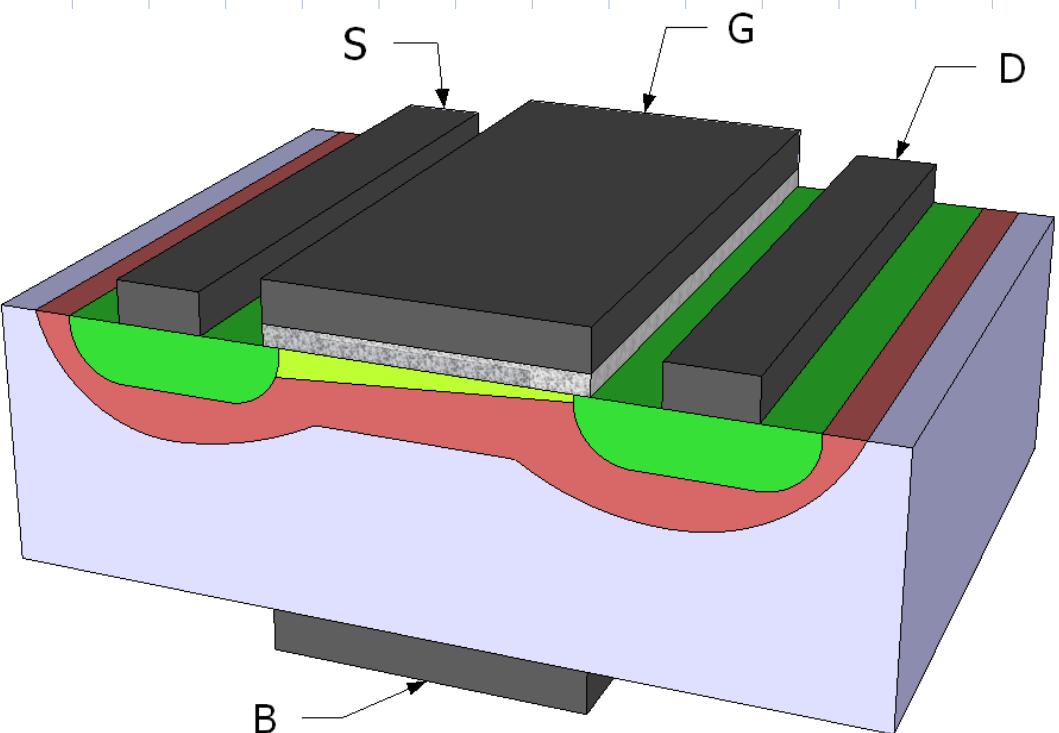
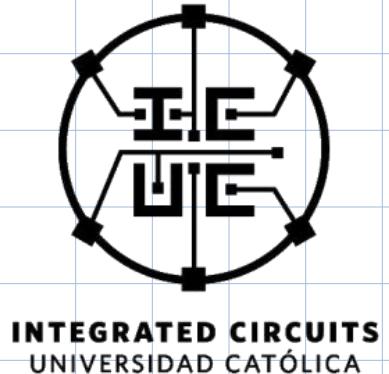


$V_{GS} \geq V_T$   
 $V_{DS}$  pequeño



# Hagamos crecer $V_{DS}$

- El canal se estrecha cerca del terminal de dren
- La corriente ya no crece tan rápido como  $V_{DS}$
- Tenemos que estudiarlo a partir de la física de estado sólido que requiere supuestos:
  - La corriente es controlada por la concentración de carga móvil en el canal (buena aproximación)
  - “Supuesto de canal gradual” – el campo vertical establece la carga del canal, de modo que podemos aproximar la carga móvil disponible a través de la diferencia de voltaje entre compuerta y canal
  - La velocidad de los portadores es proporcional al campo lateral ( $v = \mu E$ , estilo ley de Ohm)
    - éste es un supuesto muuuuy aproximado...



# Derivación de la relación $i_D - v_{DS}$ en región de triodo

$$d_q(x) = -C_{ox}Wdx(V_{GS} - V_T - V(x))$$

$$E = -\frac{dV(x)}{dx}$$

$$vel = \frac{dx}{dt} = -\mu E(x) = \mu \frac{dV(x)}{dx}$$

$$-I_D = \frac{dq}{dx} \frac{dx}{dt}$$

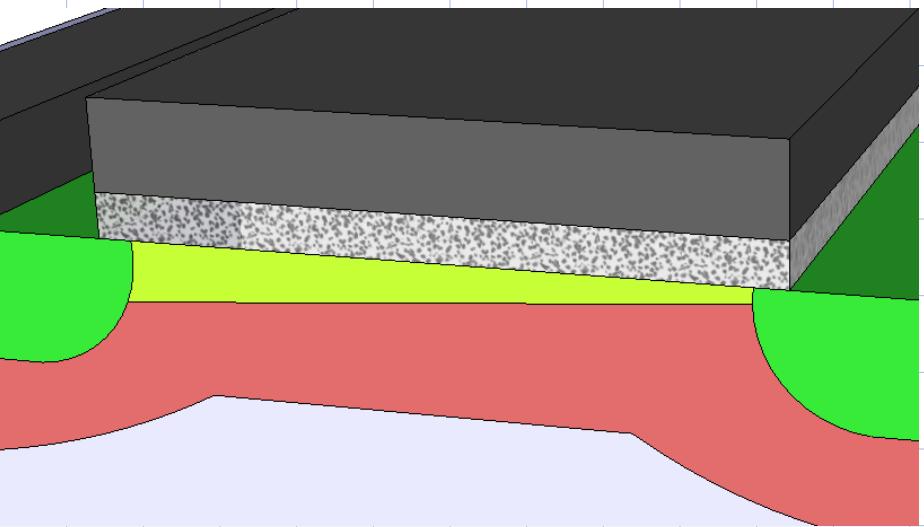
$$\rightarrow I_D = \mu C_{ox} W (V_{gs} - V(x) - V_T) \frac{dV(x)}{dx}$$

$$I_D dx = \mu C_{ox} W (V_{gs} - V(x) - V_T) dV(x)$$

$$\int_0^L I_D dx = \int_0^L \mu C_{ox} W (V_{gs} - V(x) - V_T) dV(x)$$

$$\rightarrow I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

¿Qué curva es ésta?

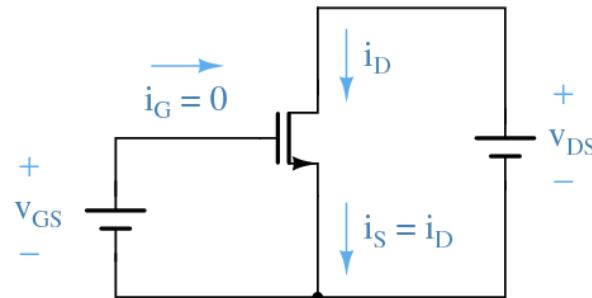
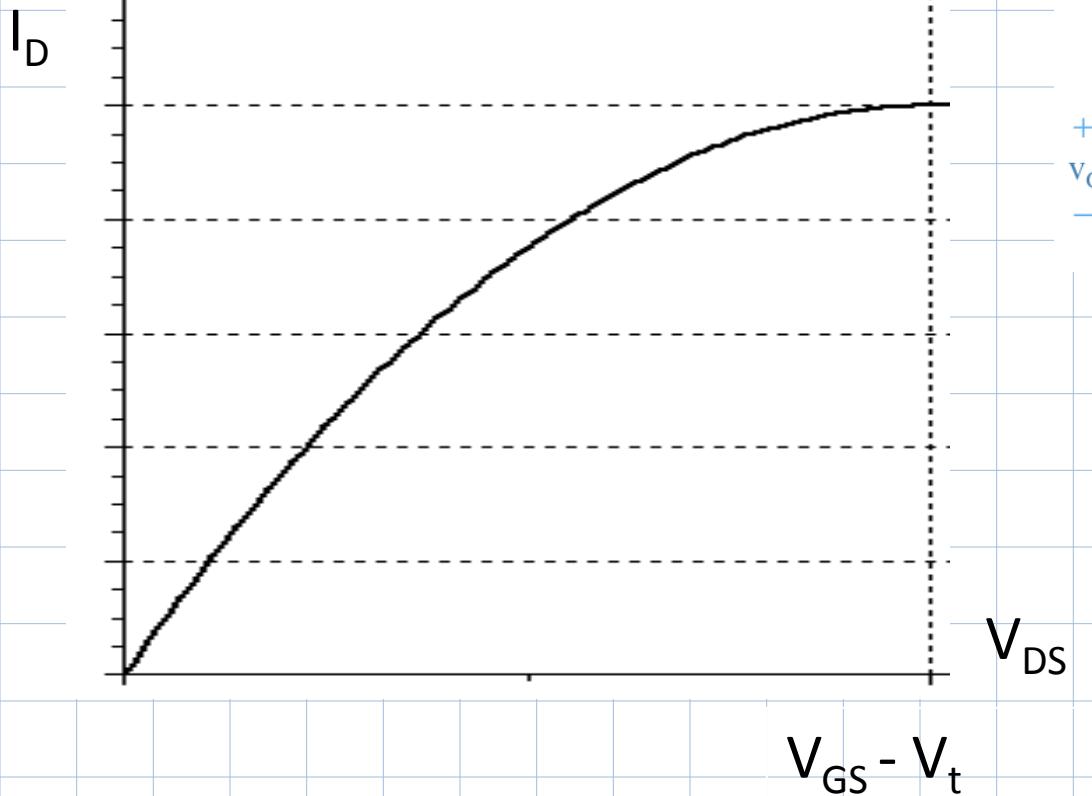


$$C_{ox} \sim 5 \frac{fF}{\mu m}$$

$$\mu_n \sim 400 \frac{\text{cm}^2}{Vs}$$

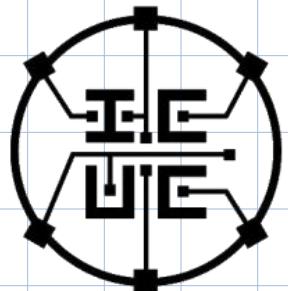
$$\mu_p \sim 100 \frac{\text{cm}^2}{Vs}$$

# ¡Es una parábola!



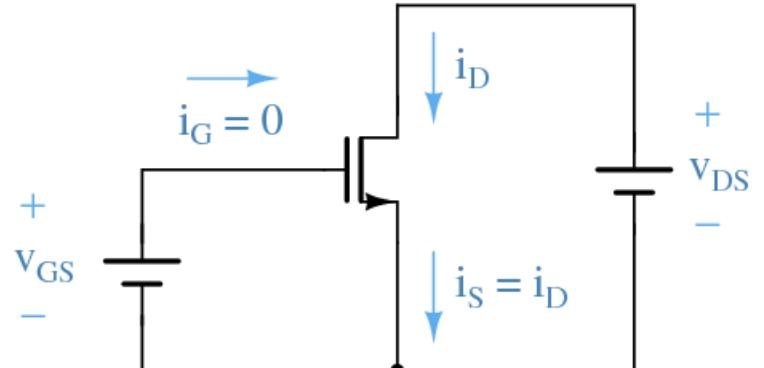
$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$V_{GS} \geq V_T, \quad V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$$



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

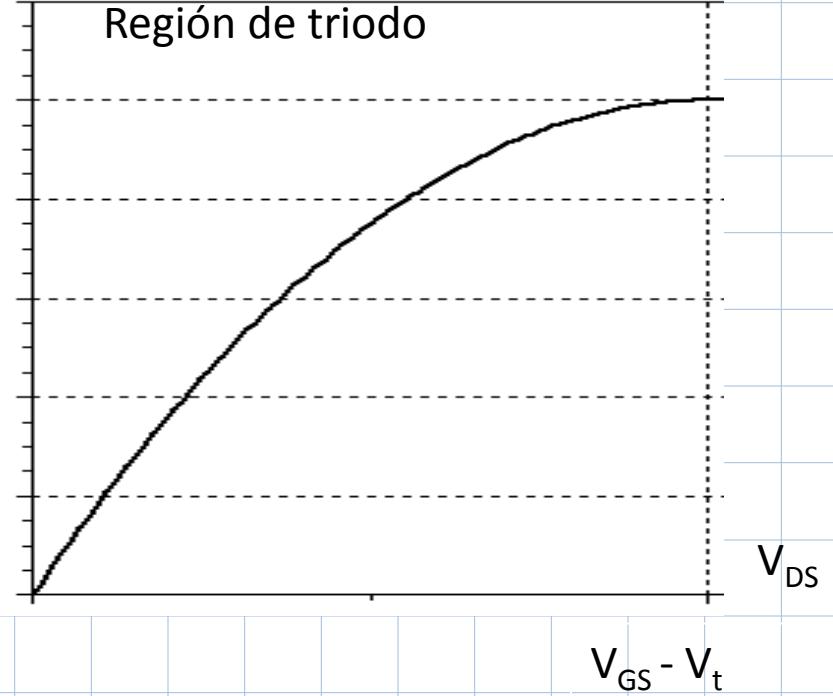
# Resistencia equivalente (absoluta, no incremental) para $V_{DS}$ pequeño



$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad / \text{ } v_{DS} \text{ pequeño...}$$

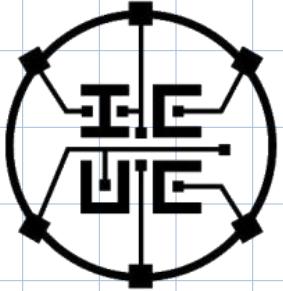
$$I_D \approx \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) V_{DS}$$

$$\rightarrow r_{ds} \approx \frac{1}{\mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)}$$





4.05



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MOSFET en región activa

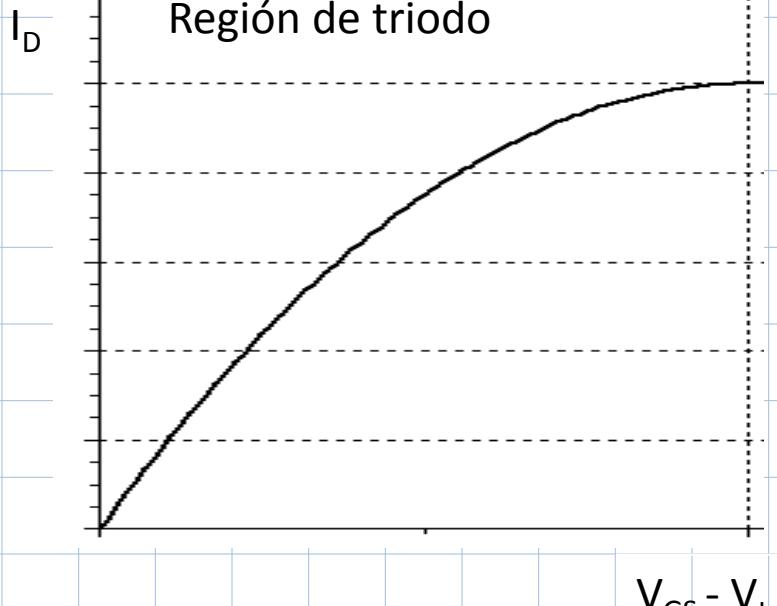
Dependencias:

- 4.04 El MOSFET en región de triodo

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

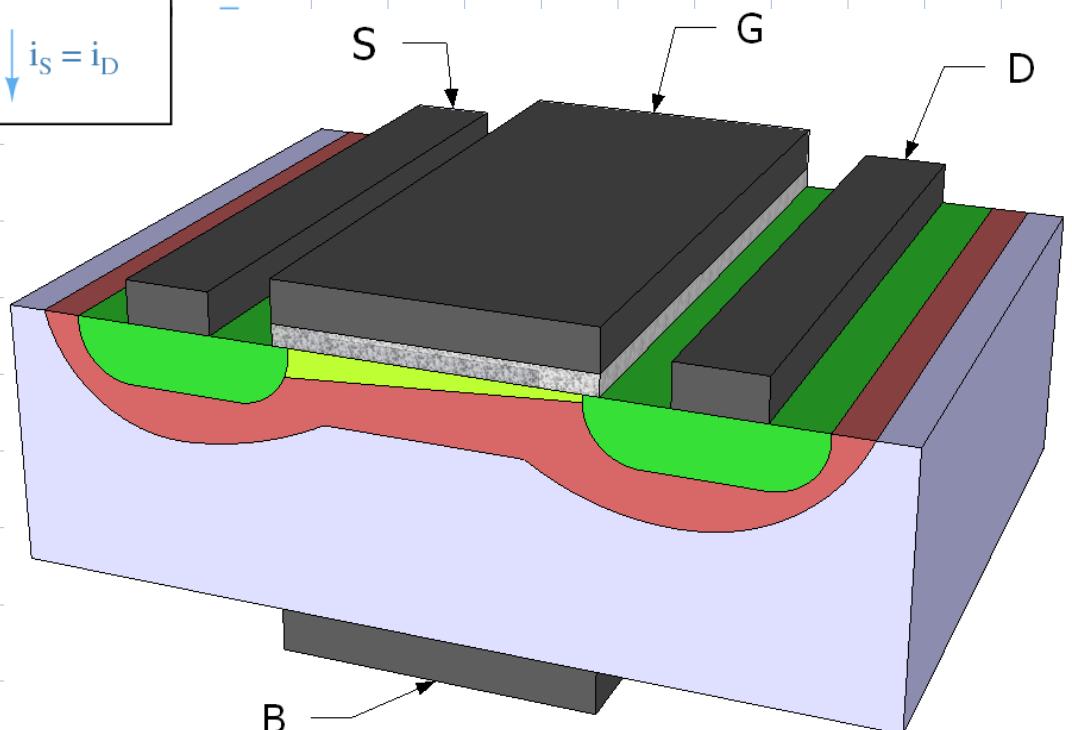
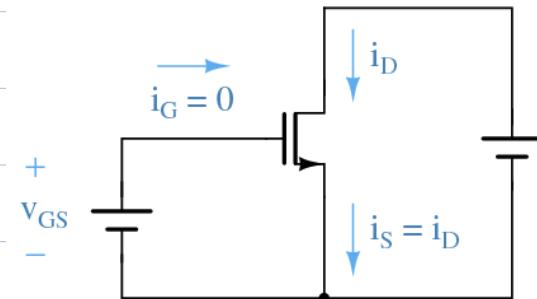
## Electrónica en cápsulas

# Recordemos de 4.04, región de triodo



$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$V_{GS} \geq V_T, \quad V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$$



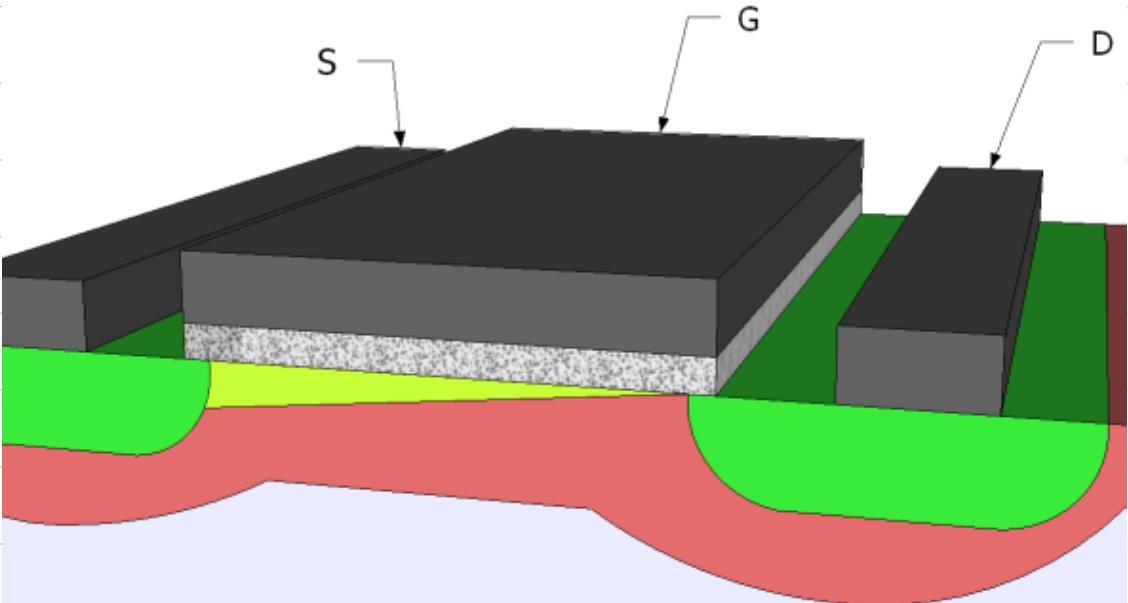
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Estrangulamiento del canal

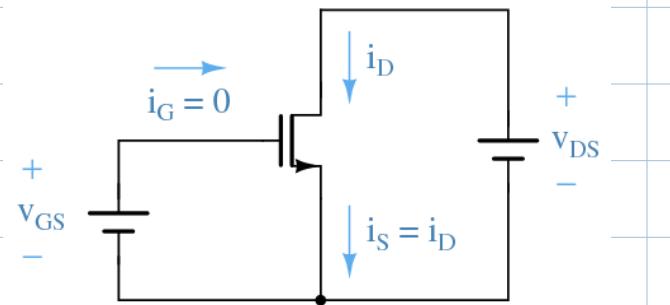
¿Qué pasa si  $V_{DS}$  excede  $V_{GS} - V_T$ ?

- Salimos de la región activa
- Voltaje efectivo a lo largo del canal es  $V_{GS} - V_t$ 
  - En la región donde la carga en el canal cae a 0, hay un campo eléctrico lateral elevado que barre los portadores de carga y produce la caída de tensión adicional (región de agotamiento de la unión PN del dren)
- En un análisis de primer orden, **la corriente se vuelve independiente de  $V_{DS}$**  cuando el canal está estrangulado

$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{← } V_{DS} = V_{GS} - V_T$$



# Operación en regiones de triodo y activa

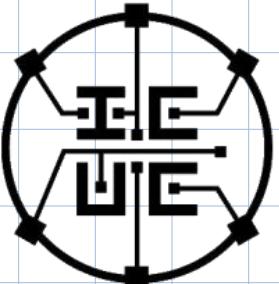
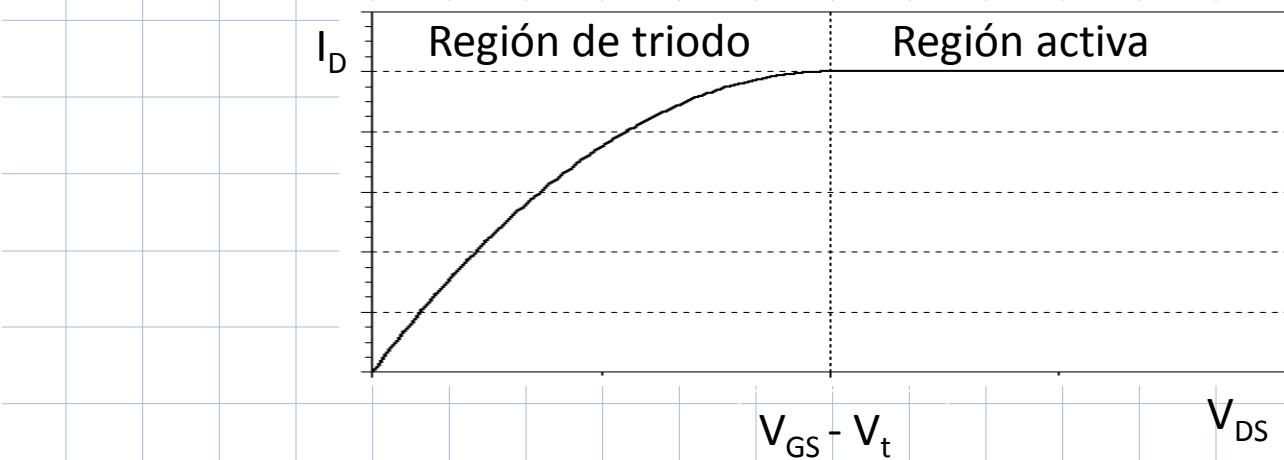
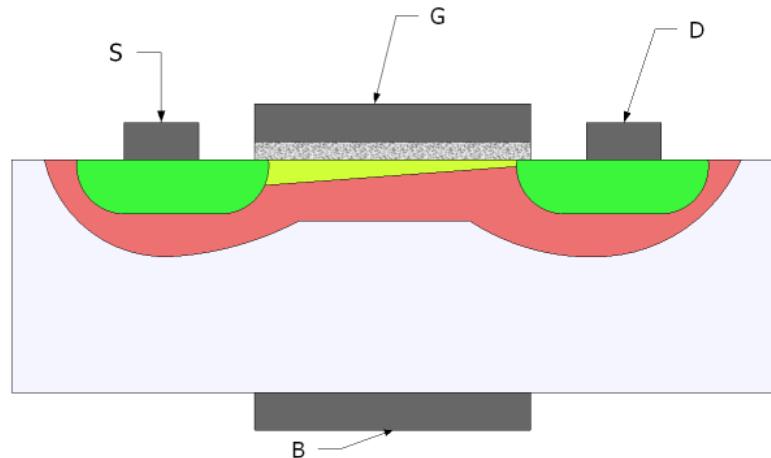


En región de triodo ( $V_{GS} > V_T$ ,  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$ )

$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

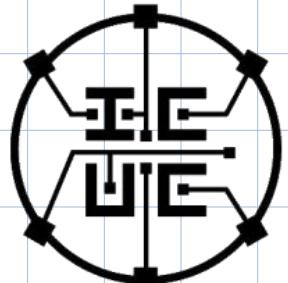
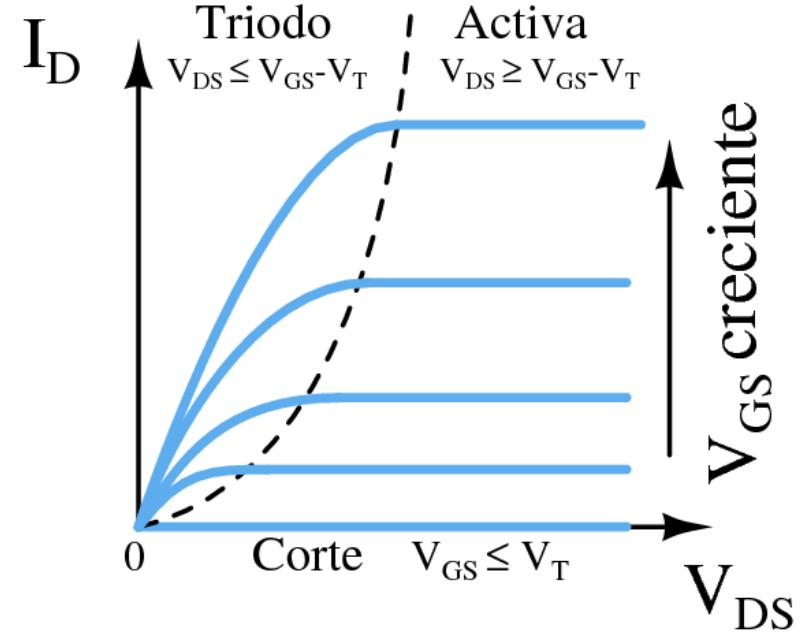
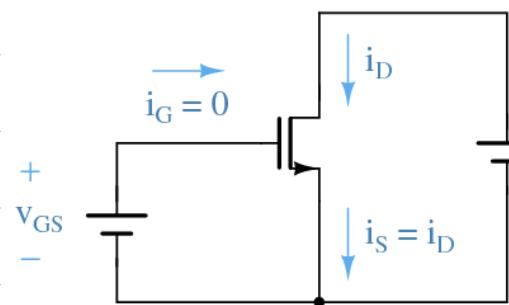
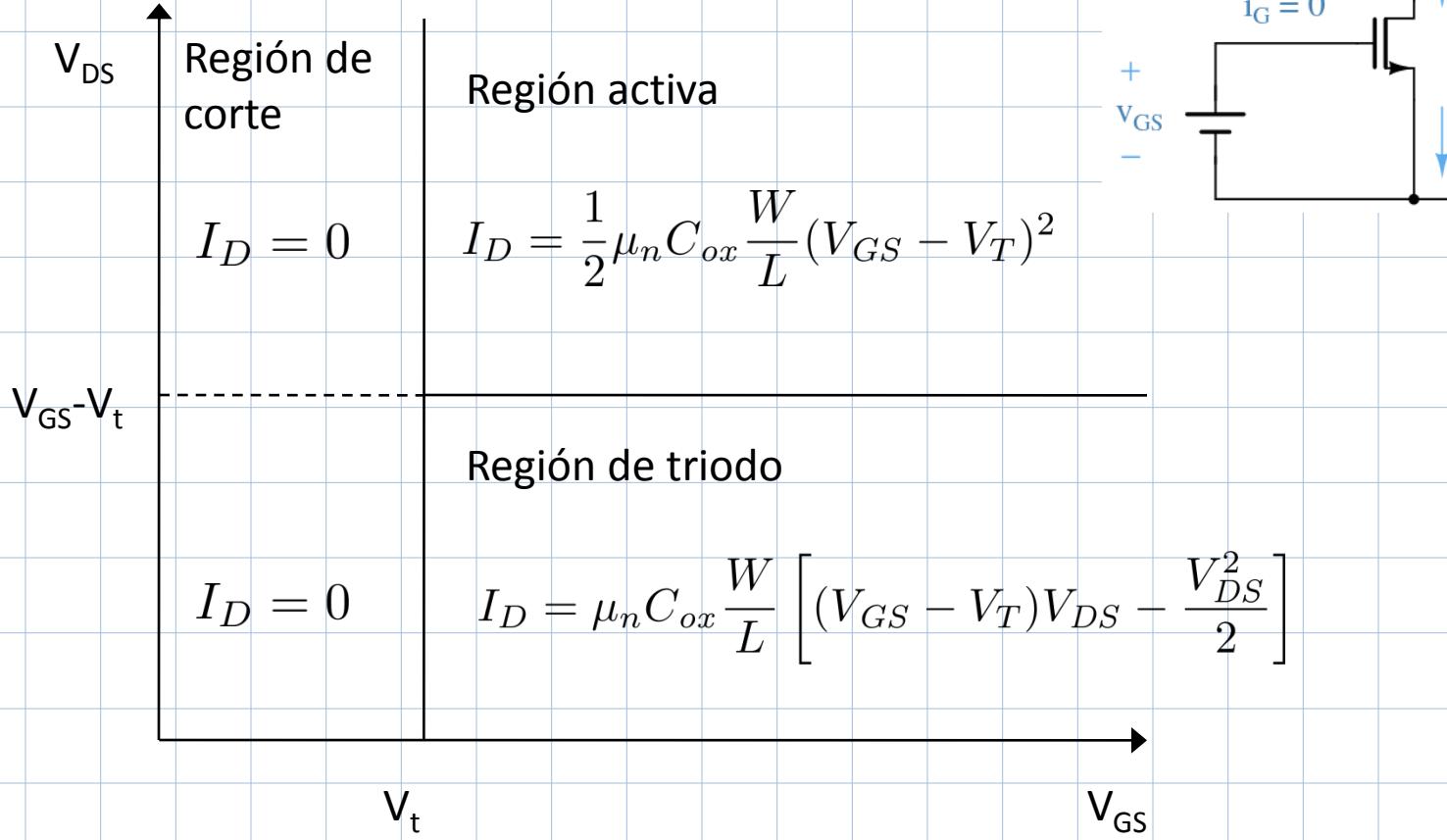
En región activa ( $V_{GS} > V_T$ ,  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ )

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

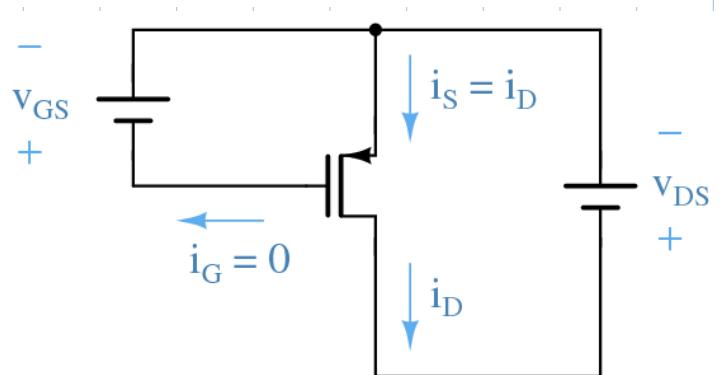
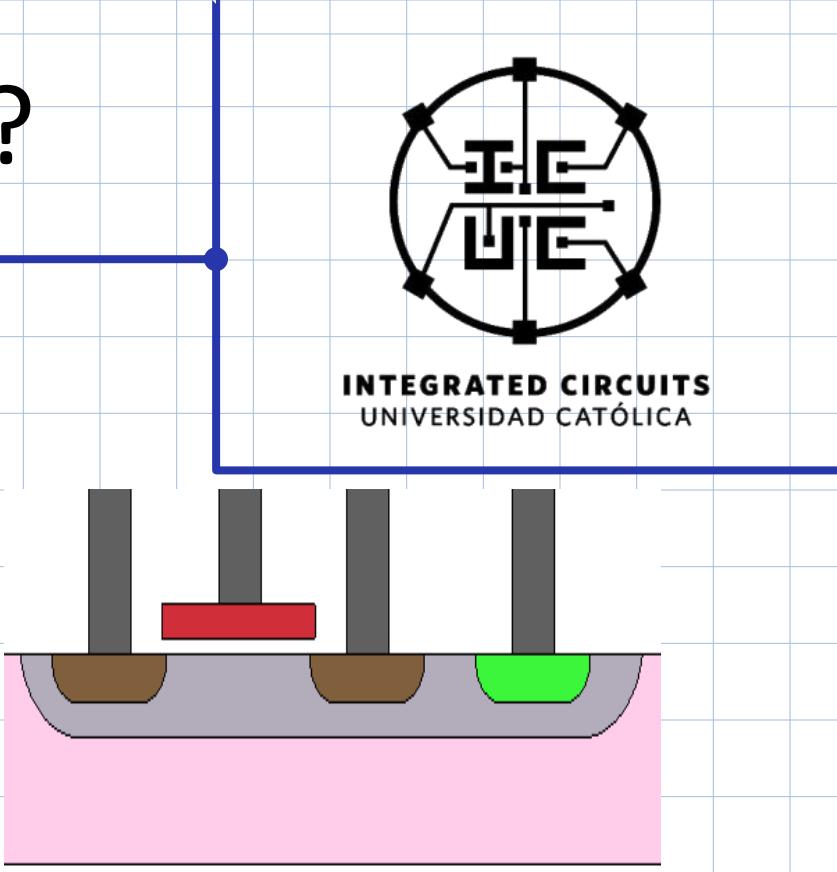
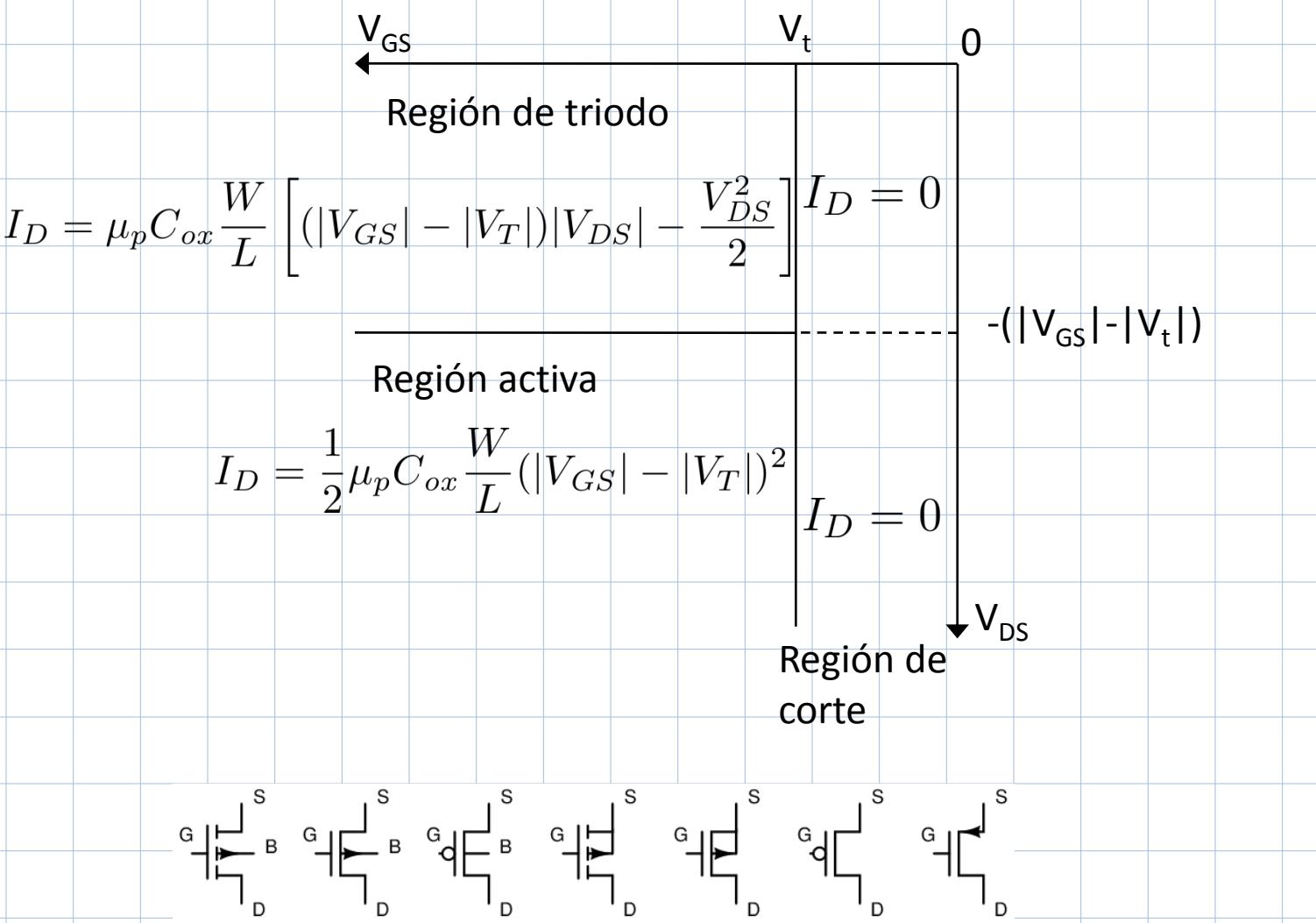


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Resumen modelo MOSFET canal N

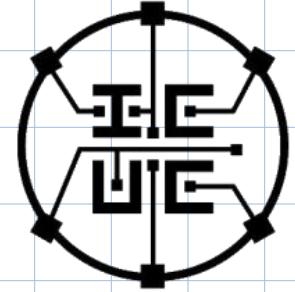


# ¿Cómo sería el MOSFET canal P?





4.06



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Consideraciones adicionales del MOSFET

Dependencias:

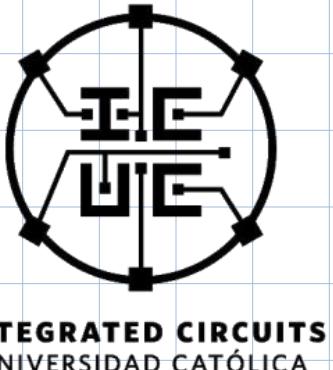
- 4.03 El MOSFET como capacitor
- 4.04 El MOSFET en región de triodo
- 4.05 El MOSFET en región activa

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

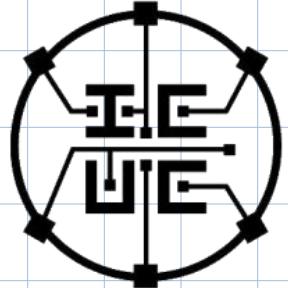
# Exactitud del modelo

- Las ecuaciones presentadas constituyen el modelo I-V más básico del MOSFET
  - llamado modelo de canal largo, modelo cuadrático, modelo de campo bajo
- Lamentablemente este modelo **no describe adecuadamente** los dispositivos CMOS modernos
  - La miniaturización ha producido dispositivos que operan con campo eléctrico elevado
    - algunos supuestos de la lámina 4.04-5 son inválidos
    - Aparecen otras dependencias de segundo orden
- Igual vamos a usar este modelo simple durante el curso para familiarizarnos con las bases de la operación de los circuitos con transistores
  - En cursos más avanzados mejoraremos el modelo y haremos simplificaciones...



# Efectos de la temperatura

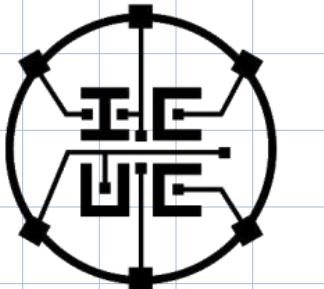
- En general, modelar todos los efectos de la temperatura sobre un transistor no es sencillo...
- Al subir la temperatura, la movilidad de los portadores de carga se ve reducida
- Pero el voltaje de umbral decrece a razón de un par de mV por grado Celsius...
- **El efecto neto del aumento de la temperatura es una reducción en la corriente**
- **¿Qué sucede en transistores de potencia, que se calientan mucho cuando están conduciendo?**



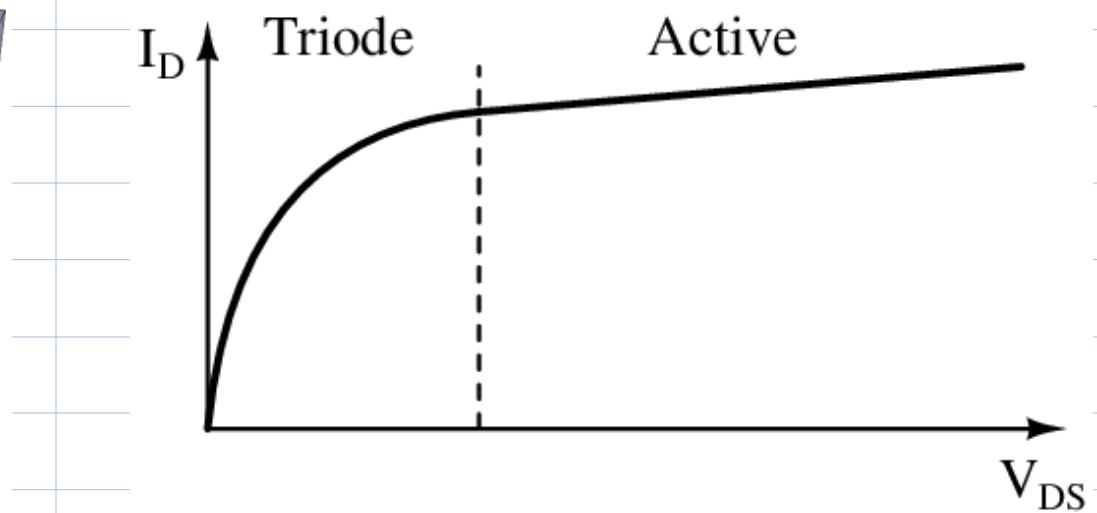
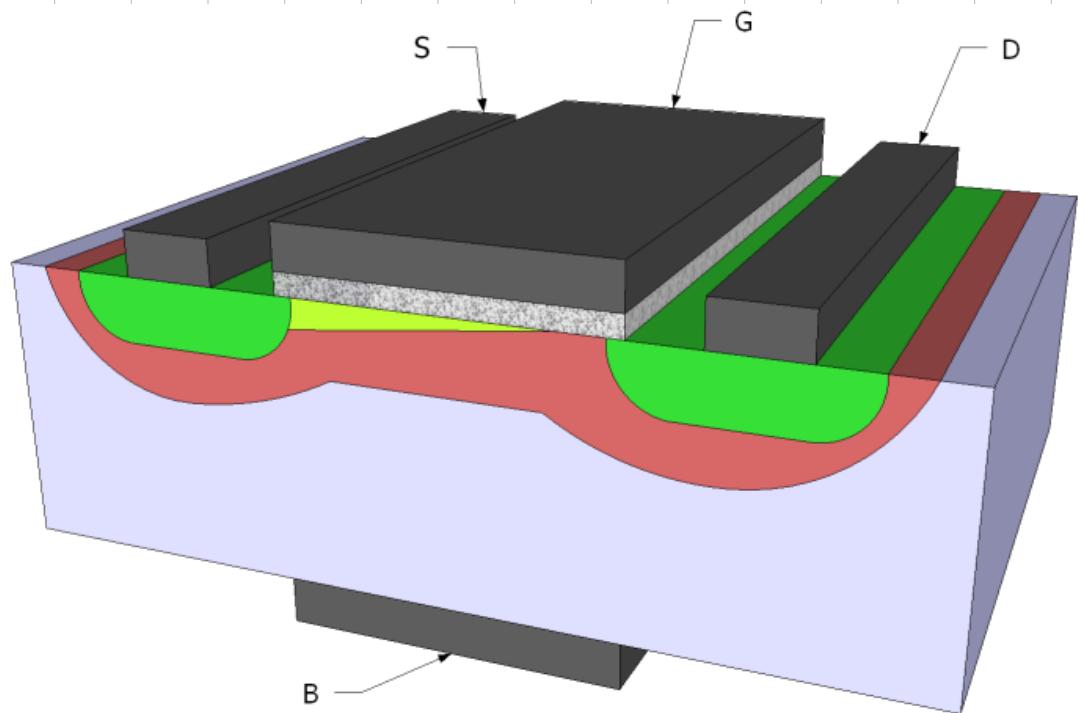
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Perfeccionando el modelo: conductancia de salida

- En el modelo considerado hasta ahora, la corriente de dren en región activa es independiente de  $V_{DS}$
- En realidad, la corriente de dren sí depende un poco de  $V_{DS}$



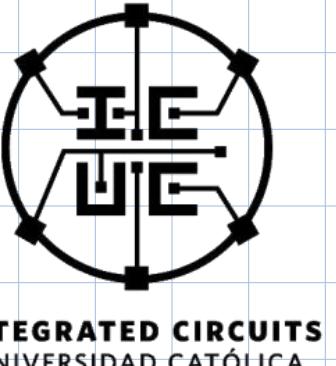
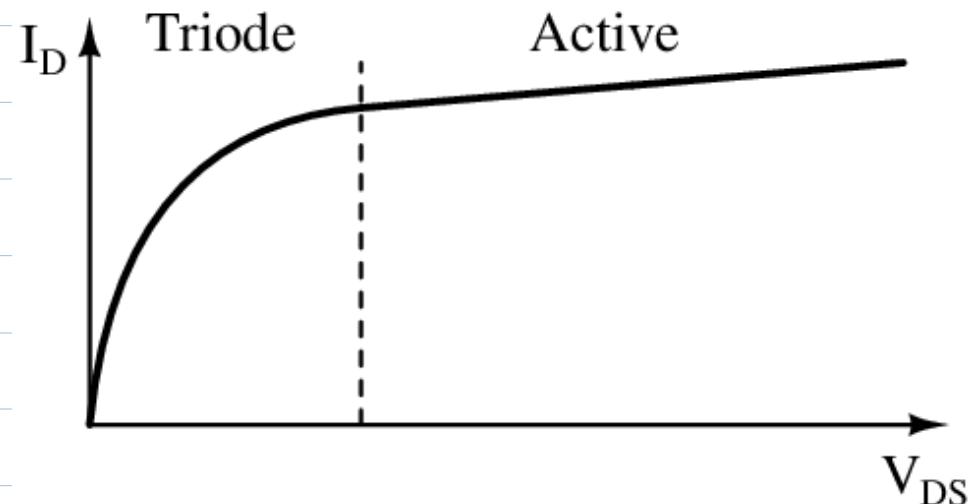
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



# Consecuencia en el modelo: resistencia dren-fuente finita

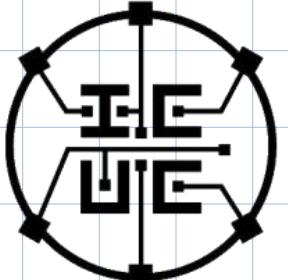
- La resistencia finita entre dren y fuente (a veces llamada “resistencia de salida”) es causada por una serie de efectos (CLM, DIBL, SCBE)
- La influencia precisa de  $V_{DS}$  sobre  $I_D$  es muy difícil de modelar...
- El modelo más sencillo asume que  $I_D$  aumenta linealmente con  $V_{DS}$  según el factor de corrección  $\lambda$ 
  - $\lambda$  es inversamente proporcional a la longitud de canal: mientras más largo el canal, menor es  $\lambda$ , y mayor es la resistencia de salida

$$i_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

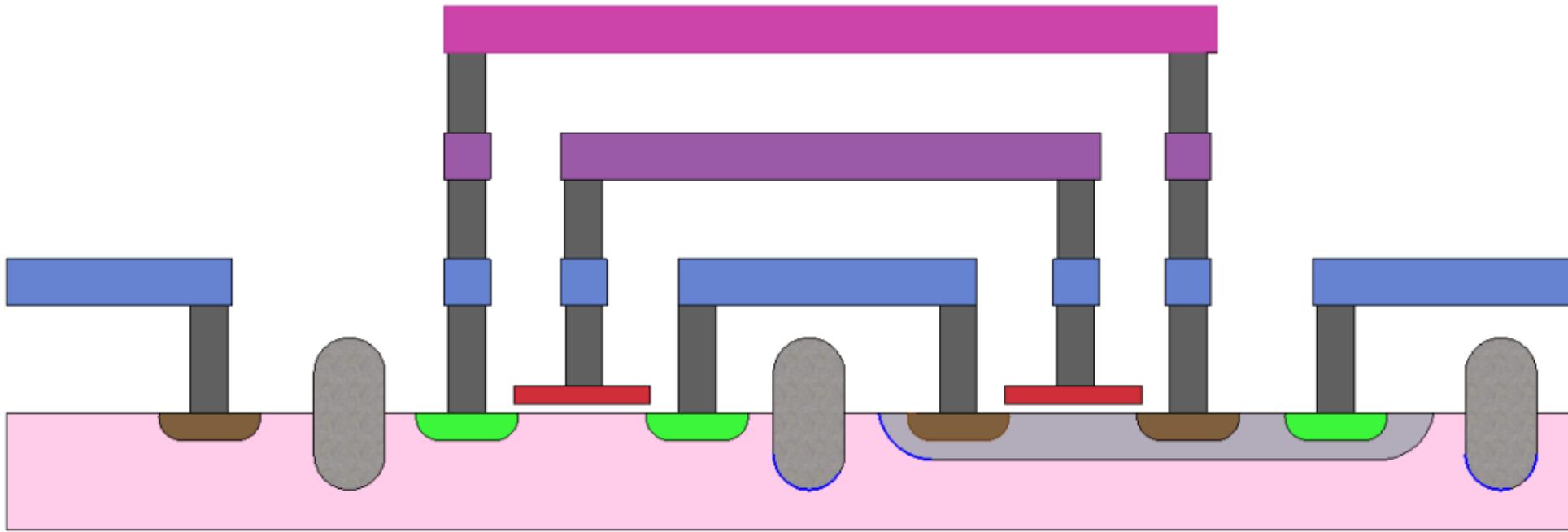


# Cuidados con las uniones PN del MOSFET

- En un MOSFET, las uniones PN deben estar polarizadas en forma inversa
  - Una polarización directa resulta en corrientes no deseadas



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



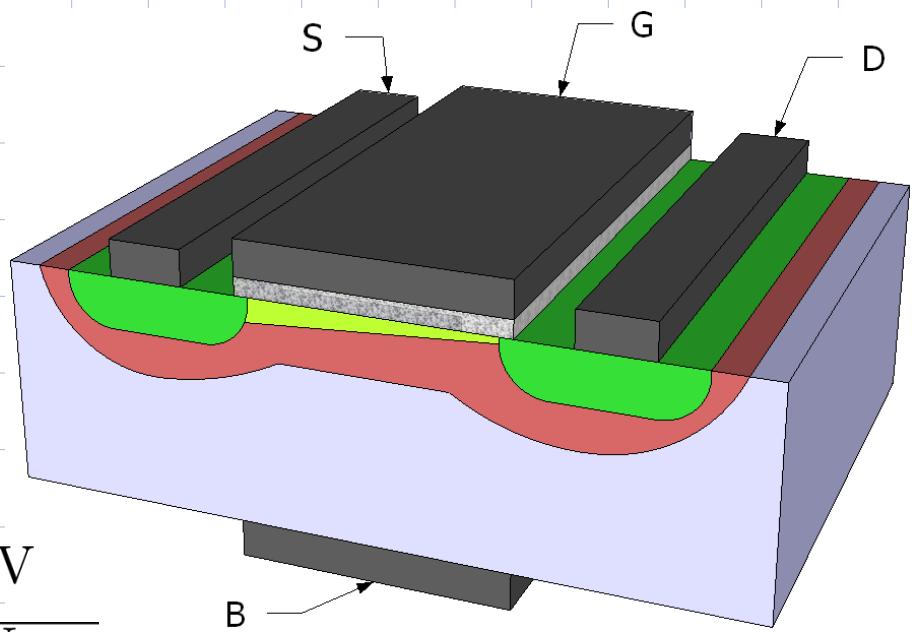
# Perfeccionando el modelo: efecto del cuerpo

- Si el voltaje de cuerpo cae por debajo del voltaje de fuente, la región de agotamiento se ensancha
- Como consecuencia, mayor carga latente negativa queda al descubierto
- Esa carga negativa repele a los electrones del canal
- Necesitamos mayor voltaje de compuerta para formar el canal,  $V_T$  crece

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left( \sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

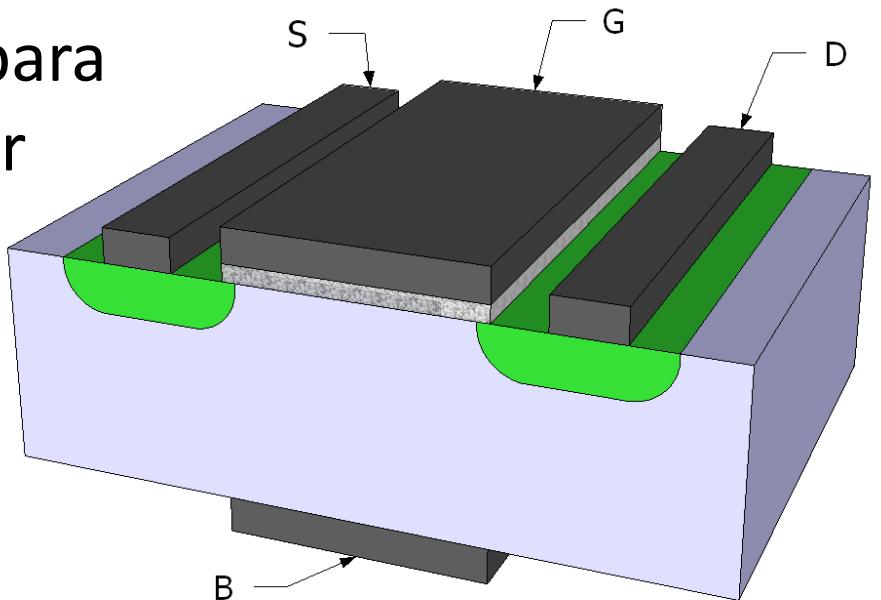
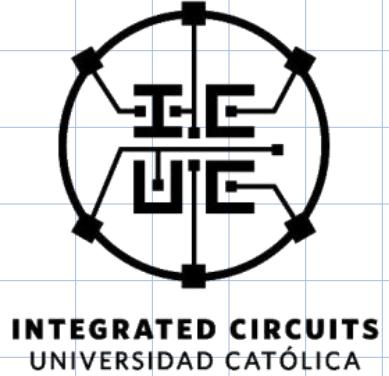
$$2\phi_F \approx 0.6V$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_S}}{C_{ox}}$$



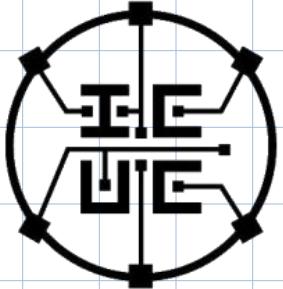
# Precaución: ESD, ruptura de compuerta y protección

- El óxido bajo la compuerta es muy delgado, del orden de 1 nm para procesos de 45nm
- **¿De qué magnitud es el campo eléctrico?**
- Basta con pequeño voltaje de compuerta para romper el dieléctrico y destruir el transistor
- Para resolver este problema, existen diversas medidas:
  - Reglas de antena
  - Diodos de protección
  - Capacitores de protección de ESD





4.07



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MOSFET como amplificador - primera aproximación

Dependencias:

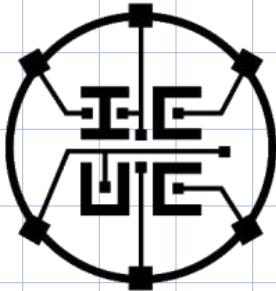
- 1.14 Curva (recta) de carga
- 4.05 El MOSFET en región activa

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

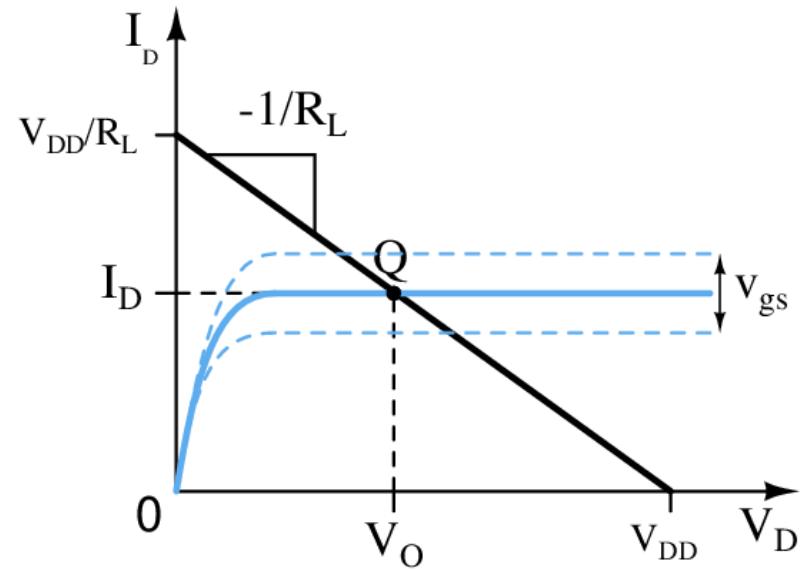
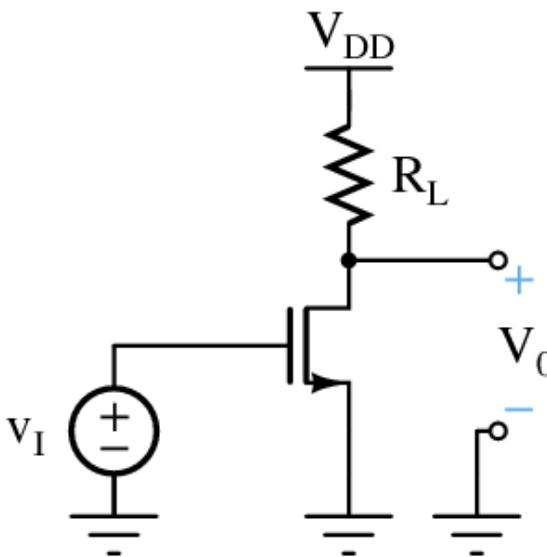
Electrónica en cápsulas

# Ya conocemos las ecuaciones del MOSFET... ¿Ahora qué?

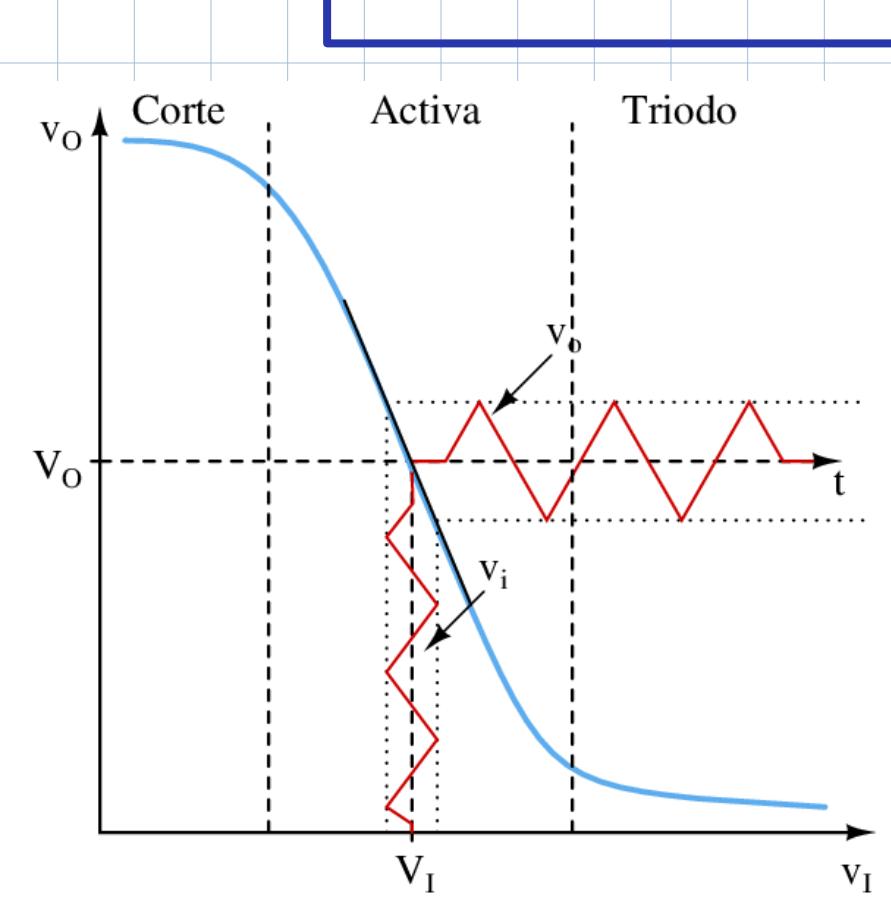
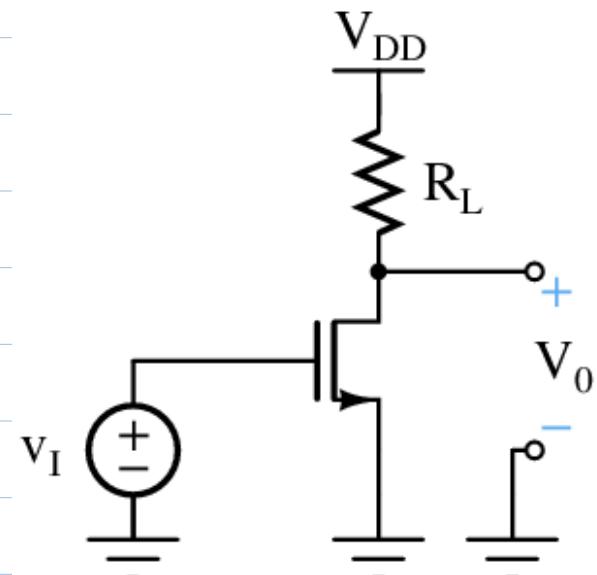
- Vamos a analizar nuestro primer amplificador usando el modelo cuadrático
- Más adelante aprenderemos a usar un modelo más sencillo para realizar el mismo análisis



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



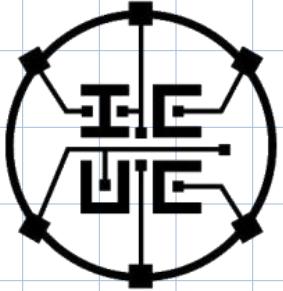
# Curva de transferencia estática del amplificador



En la próxima cápsula aprenderemos una técnica para realizar estos cálculos en forma sistemática



4.08



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MOSFET en pequeña señal

Dependencias:

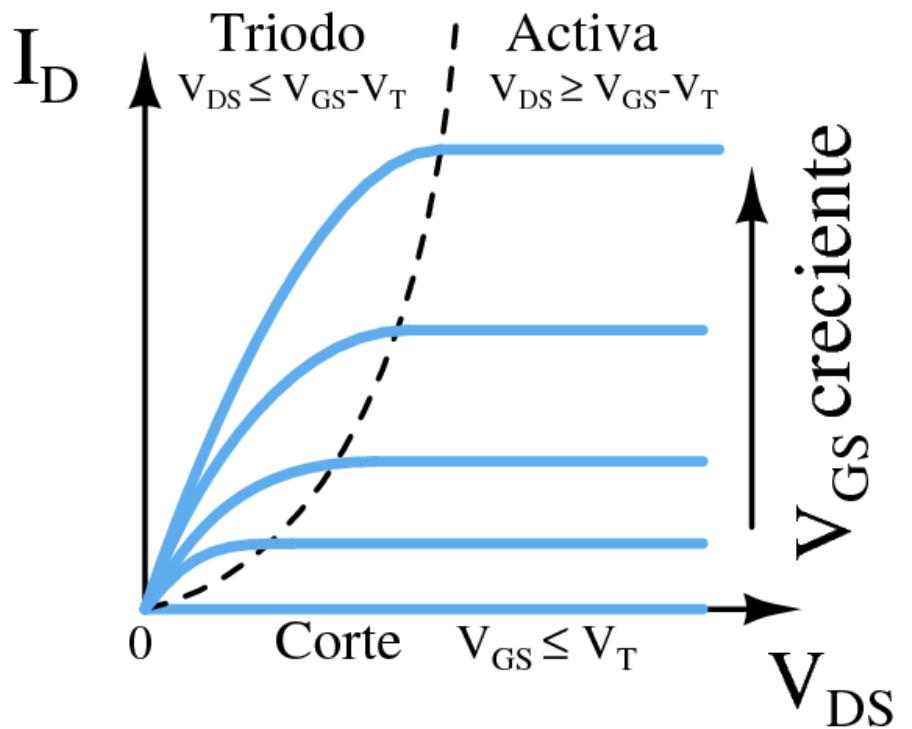
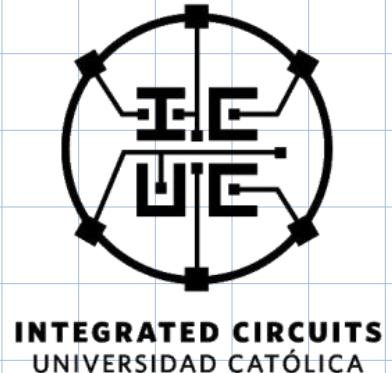
- 1.12 Curvas de transferencia estática
- 4.06 Consideraciones adicionales del MOSFET
- 4.07 El MOSFET como amplificador - primera aproximación

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

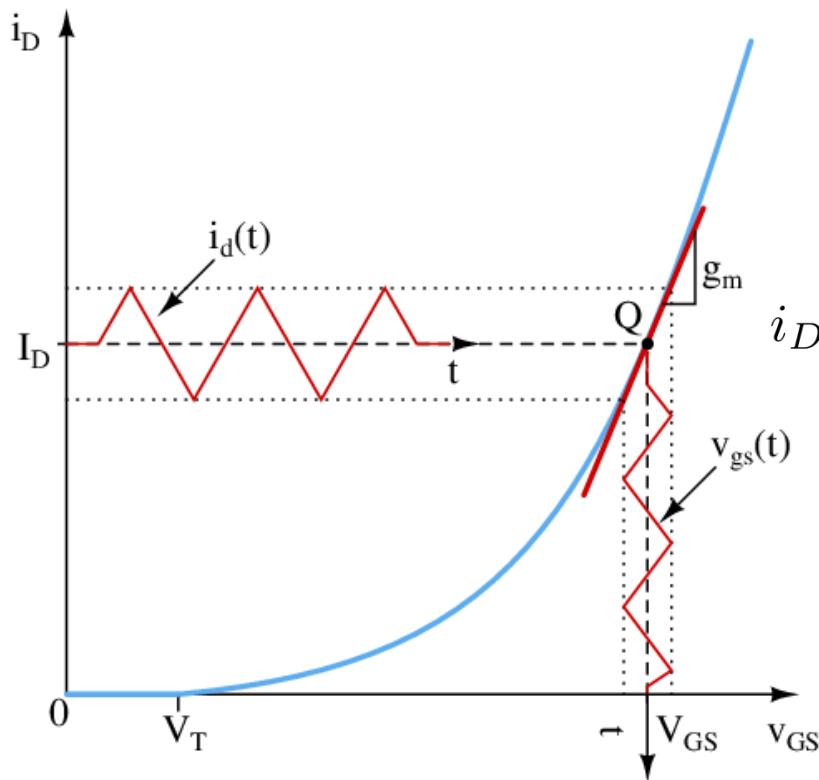
Electrónica en cápsulas

# ¿Pequeña señal?

- En 4.07 hemos analizado el funcionamiento de un amplificador y hemos determinado su ganancia
  - El amplificador tenía sólo un transistor
  - Para analizar el circuito fue necesario determinar la función de transferencia estática no lineal del amplificador...
  - Esta técnica no es muy práctica para circuitos formados por múltiples elementos no lineales...
- Hoy aprenderemos una técnica de análisis que consiste en **linealizar el modelo del transistor en torno al punto de operación**
- Este análisis se denomina análisis para pequeña señal, o análisis incremental de un circuito
- Comenzaremos estudiando otra curva del MOSFET... **¿Cómo es la curva  $I_D$  vs  $V_{GS}$ ?**



# Modelo del MOSFET para pequeñas señales



$$i_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_T)^2$$

pero  $v_{GS} = V_{GS} + v_{gs}$

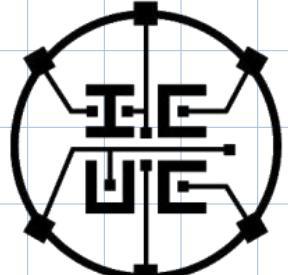
$$\rightarrow i_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} ((V_{GS} - V_T) + v_{gs})^2$$

$$i_D = \underbrace{\frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2}_{I_D} + \underbrace{\mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) v_{gs}}_{i_d} + \underbrace{\mu C_{ox} \frac{W}{L} v_{gs}^2}_{\approx 0}$$

$$\rightarrow i_d = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) v_{gs}$$

$$g_m \triangleq \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} = \frac{i_d}{v_{gs}} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} V_{OV}$$

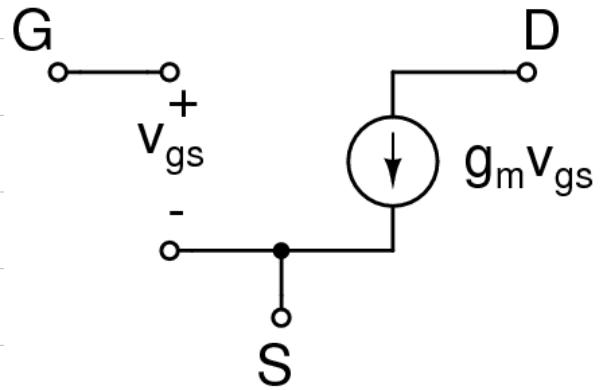
¿Cuándo es válido este modelo?



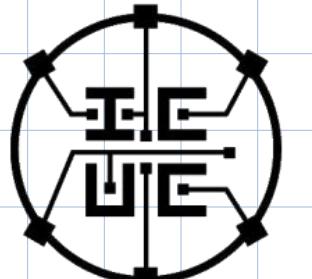
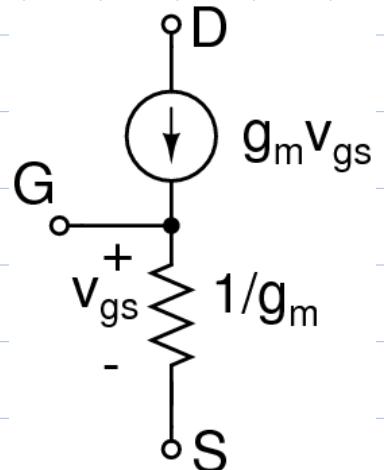
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Circuito equivalente en pequeña señal

- Modelo  $\pi$



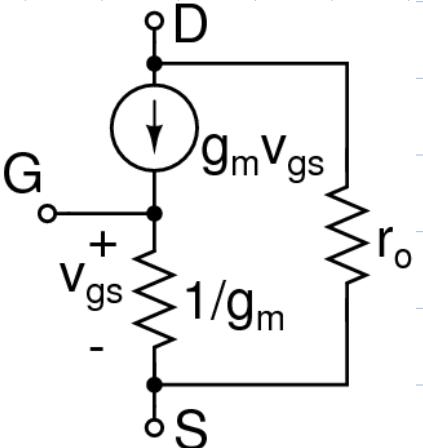
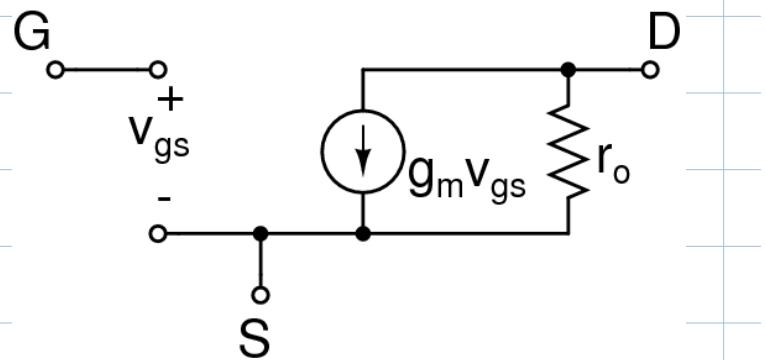
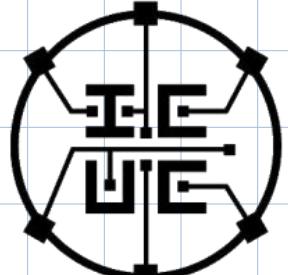
- Modelo T



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

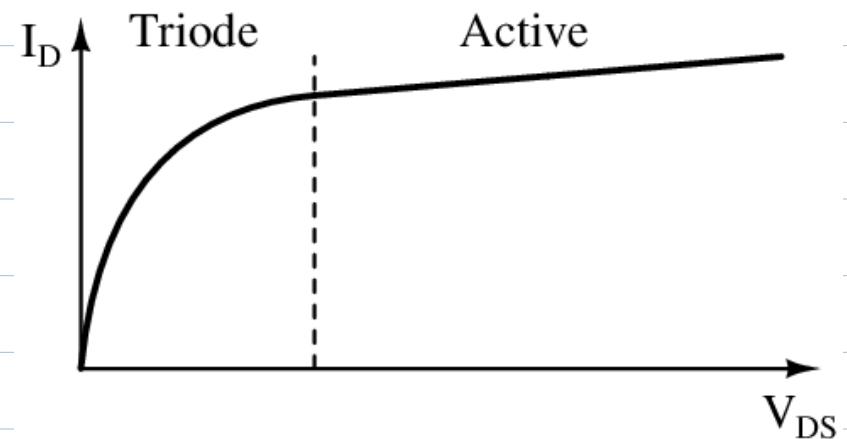
# Resistencia de salida finita y consecuencia en pequeña señal

La resistencia de salida aparece en el modelo para pequeña señal



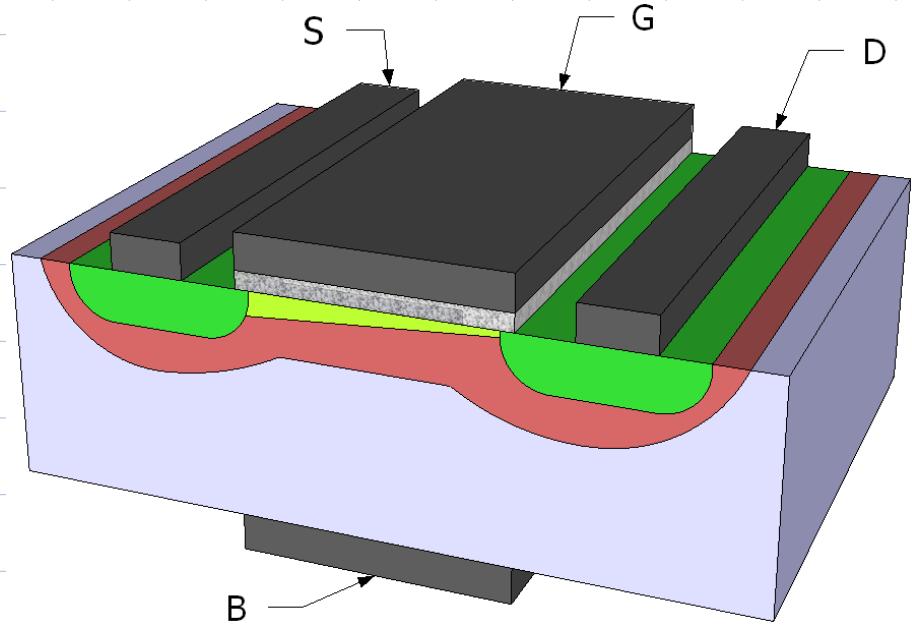
$$r_o = \frac{|V_A|}{I_D} = \frac{1}{\lambda I_D}$$

$g_m$  también cambia cuando existe  $\lambda$

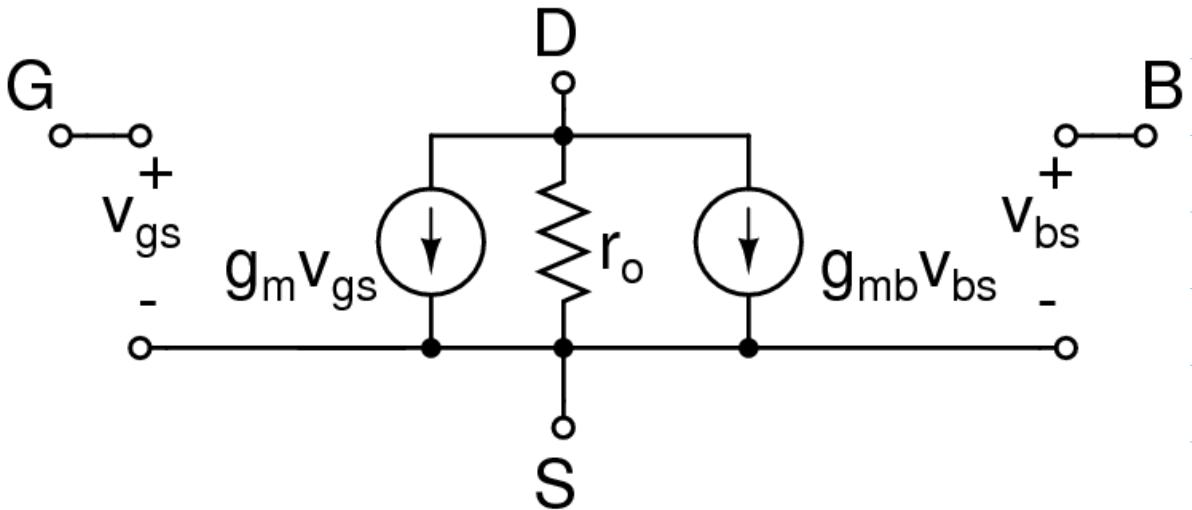


$$i_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

# Efecto del cuerpo en pequeña señal

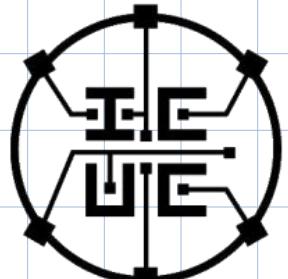


$$V_T = V_{To} + \gamma \left( \sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$



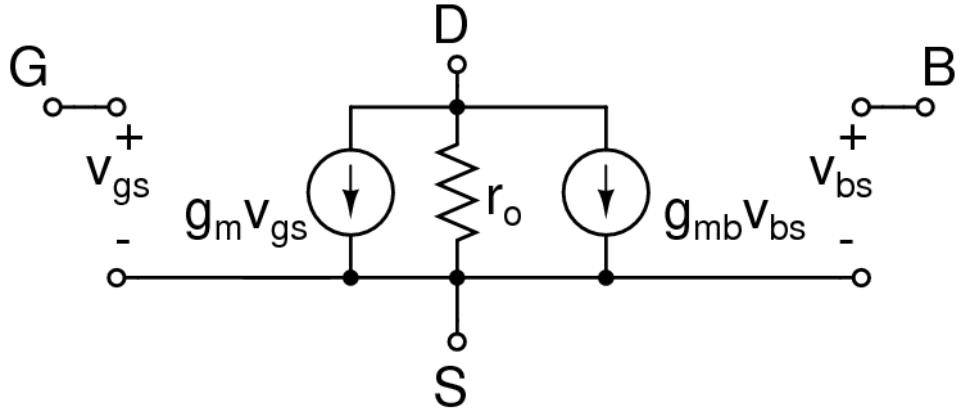
$$g_{mb} = \chi \cdot g_m$$

$$\chi = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}}$$



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Resumen modelo estático de cuatro terminales, pequeña señal



Transconductancia

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}}$$

$$g_m = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)(1 + \lambda V_{DS})$$

$$g_m = \sqrt{2\mu C_{ox} \frac{W}{L} I_D (1 + \lambda V_{DS})}$$

Resistencia de salida finita

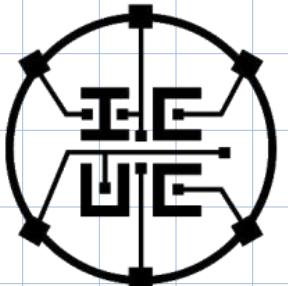
$$r_o = \frac{|V_A|}{I_D} = \frac{1}{\lambda I_D}$$

Efecto del cuerpo

$$g_{mb} = \chi \cdot g_m$$

$$\chi = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}}$$

¿Y cómo son los PMOS en pequeña señal?



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

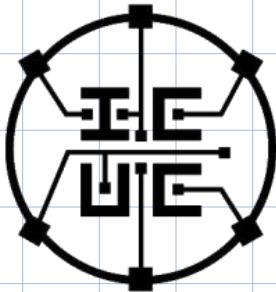
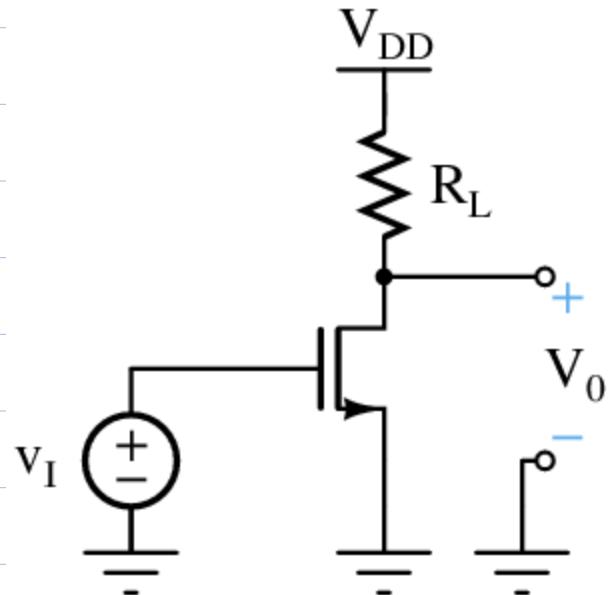
# Otra vez, receta para el análisis en pequeña señal

1. Determinar voltajes de nodo y **corrientes de rama en Q**, el punto de operación DC
2. Encontrar **modelos de pequeña señal en torno a Q** para todos los dispositivos del circuito
3. **Apagar fuentes independientes DC**, sustituyendo fuentes independientes de voltaje DC por cortocircuitos, y fuentes de corriente independientes DC por circuitos abiertos
4. **Reemplazar dispositivos no lineales** (e.g., transistores) por modelos de pequeña señal
  - Modelo captura variaciones en torno a punto de operación Q
  - Es posible eliminar componentes pasivos que no afectan las señales de interés (e.g., capacitancias de acoplamiento)
5. **Analizar el circuito como si fuera lineal**



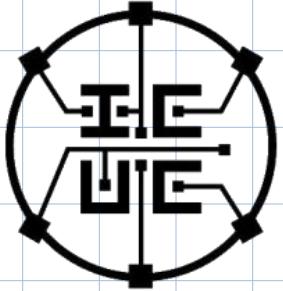
¡Son 2 ejercicios en 1!

# Finalicemos esta cápsula con un análisis similar al de 4.07





4.09



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MOSFET conectado como diodo

Dependencias:

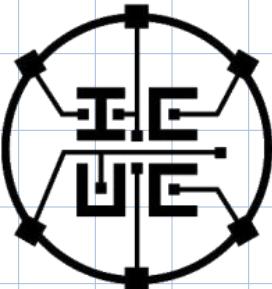
- 4.05 El MOSFET en región activa
- 4.08 El MOSFET en pequeña señal

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

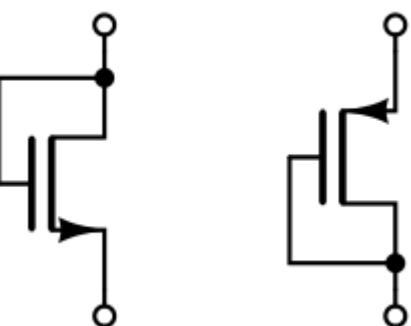
Electrónica en cápsulas

# Electrónica es acerca de dispositivos y topologías...

- Hace un tiempo dijimos que para aprender electrónica es importante aprender a reconocer topologías circuitales
- Hoy veremos una que se usa mucho en electrónica: la del MOSFET conectado como diodo

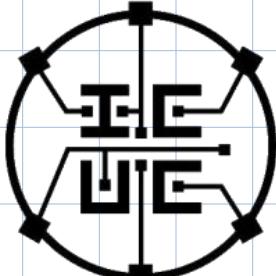


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

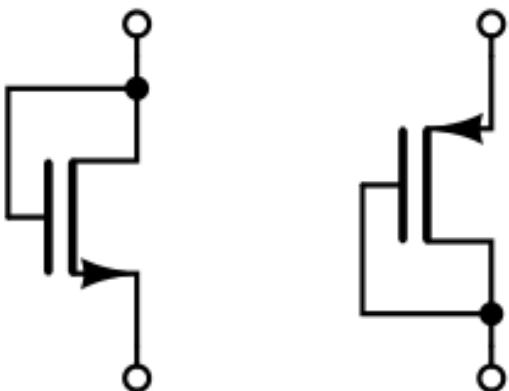


# Un MOSFET conectado como diodo conduce en una sola dirección

- Si  $V_{GS}$  tiene el signo correcto y supera a  $V_T$ , entonces el MOSFET conectado como diodo conduce
  - De otro modo, no hay conducción
- El MOSFET, por lo tanto, se comporta como una válvula de corriente de dos terminales



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Si el MOSFET conectado como diodo tiene suficiente  $V_{GS}$  y conduce, ¿en qué región de operación se encuentra?

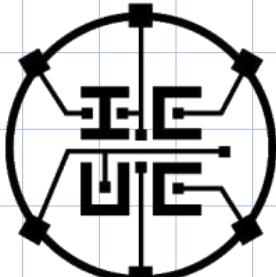
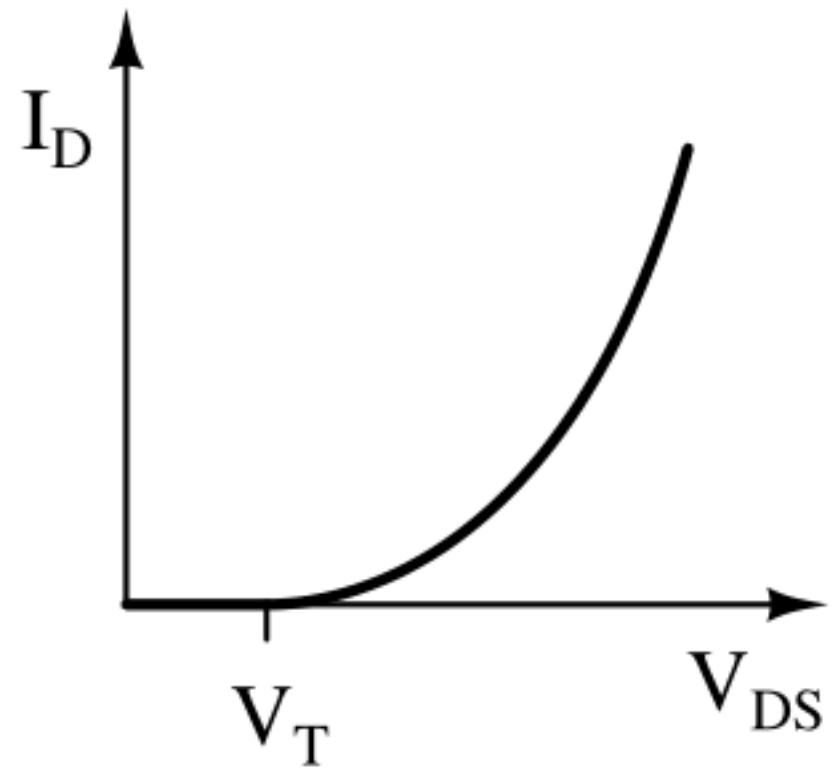
# Un MOSFET conectado como diodo tiene una relación voltaje-corriente cuadrática

- Dado que  $V_D = V_G$ :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{DS} - V_T)^2$$



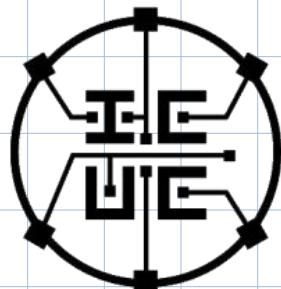
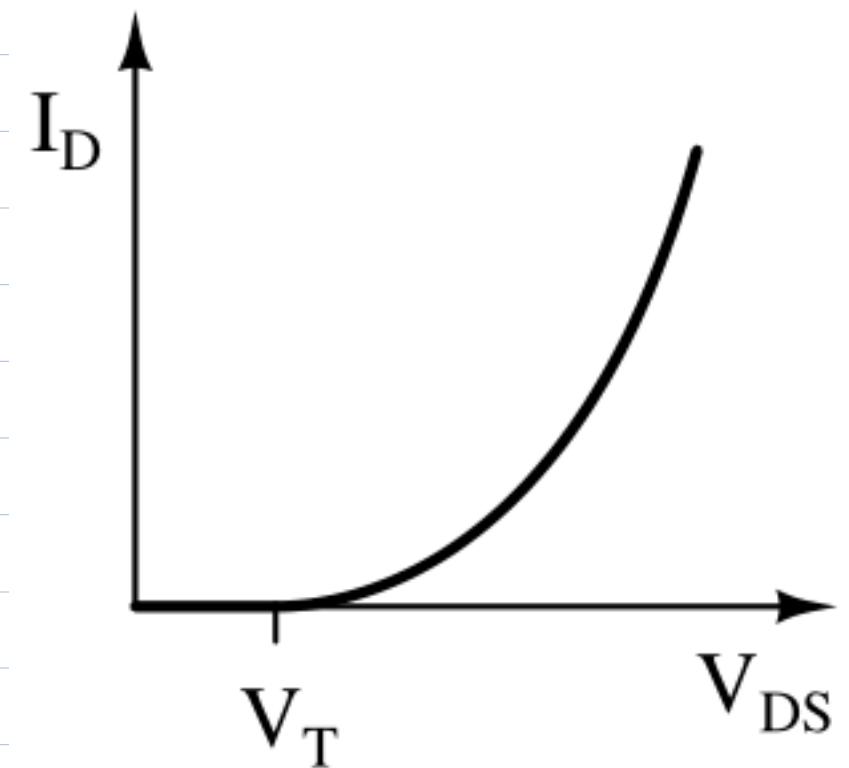
- Esta curva es válida si aplicamos voltaje al MOSFET o si le aplicamos corriente
  - Si aplicamos corriente  $I_D$ , el MOSFET producirá el voltaje necesario  $V_{DS}$  para conducir precisamente esa corriente



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Un MOSFET conectado como diodo tiene un comportamiento incremental resistivo

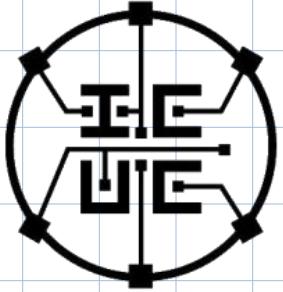
Calculemos el modelo del MOSFET conectado como diodo para señales pequeñas:



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



4.10



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Análisis de un amplificador en pequeña señal

Dependencias:

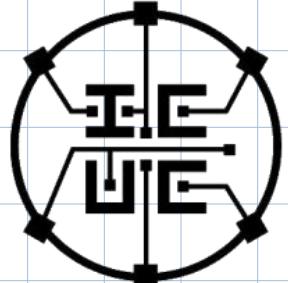
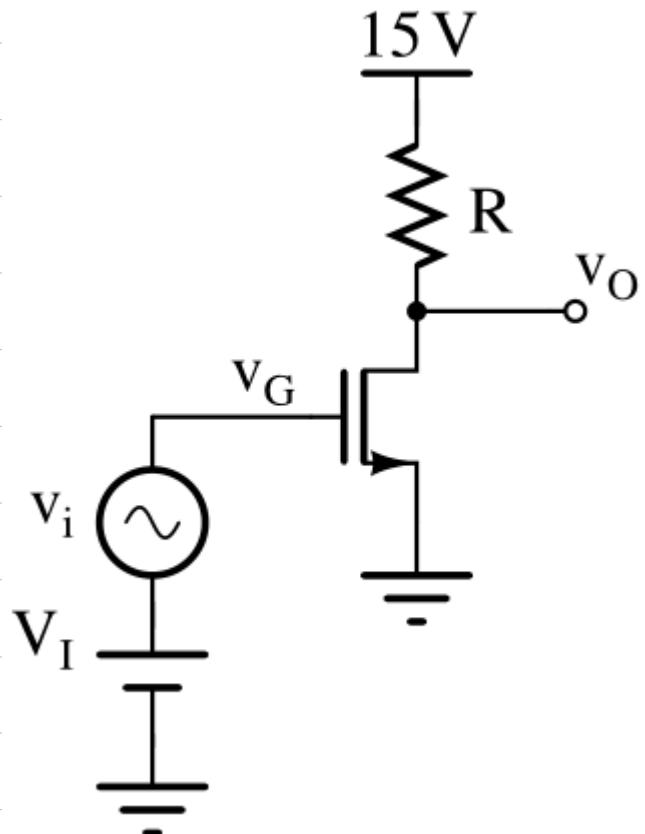
- 4.08 El MOSFET en pequeña señal

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

# Apliquemos lo aprendido en 4.08 y calculemos la ganancia del amplificador

Recordemos: primero en DC y luego en AC



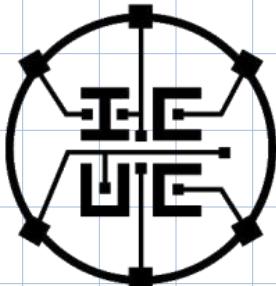
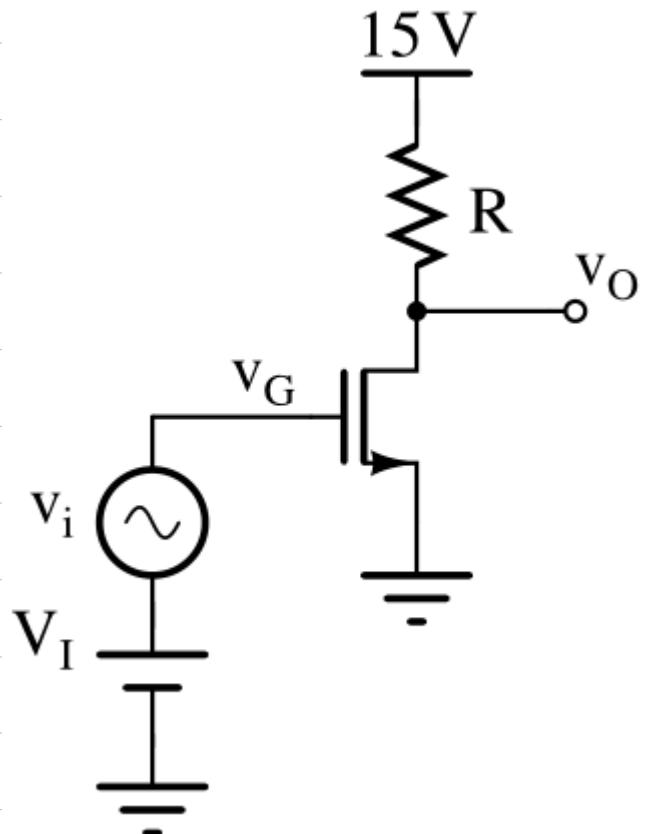
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Parámetros

$\mu_{Cox} W/L = 1 \text{ mA/V}^2$   
 $V_T = 1 \text{ V}$   
 $\lambda = 0$   
 $R = 2.5\text{k}$   
 $V_I = 2 \text{ V}$

# Ahora cambiemos el voltaje $V_I$ y veamos qué sucede con la ganancia

Recordemos: primero en DC y luego en AC



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

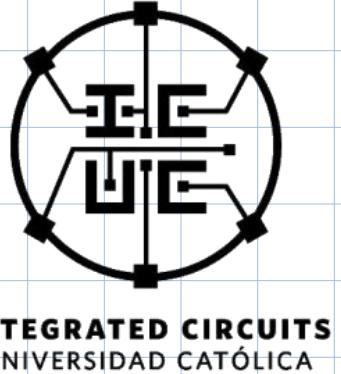
Parámetros

$\mu_{Cox} W/L = 1 \text{ mA/V}^2$   
 $V_T = 1 \text{ V}$   
 $\lambda = 0$   
 $R = 2.5\text{k}$   
 $V_I = 3 \text{ V}$

# Conclusiones

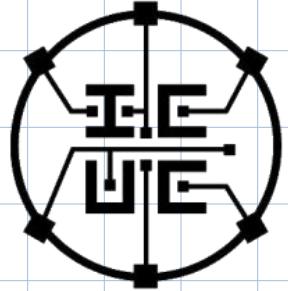
- Parece que es importante tener bien definida la polarización
  - Si el nivel DC del voltaje de entrada cambia, el nivel DC de salida y la corriente cambian
  - Si la corriente cambia, también cambia la ganancia
  - Si el voltaje DC de salida cambia mucho, podría ocurrir que el transistor salga de región activa y la ganancia del amplificador colapse

Debemos buscar estrategias de polarización





4.11



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Polarización por voltaje

Dependencias:

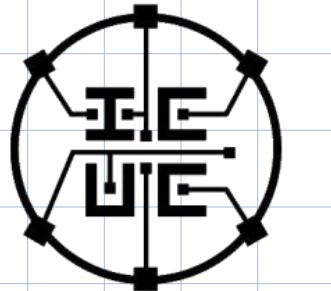
- 4.10 Análisis de un amplificador en pequeña señal

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

## Electrónica en cápsulas

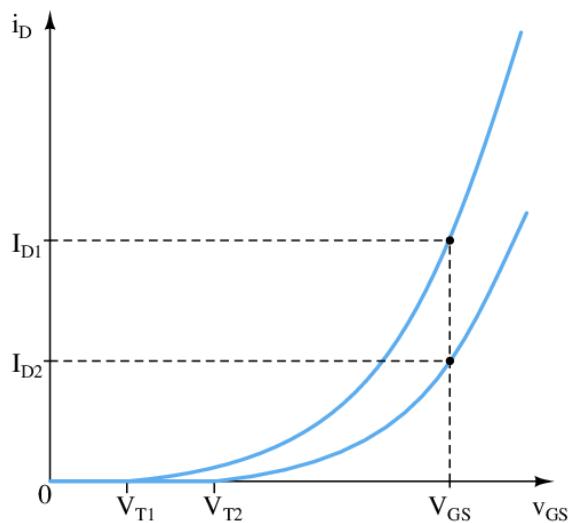
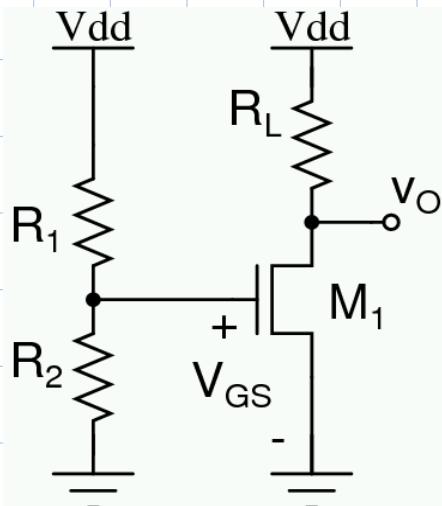
# Polarización: ¿Qué y para qué?

- La polarización (*bias*) de un circuito **define el punto de operación Q** (en DC), que implica:
  - Corrientes DC ( $I_D$ ) en los transistores
  - Voltajes DC de nodos
  - **Modelos incrementales** para análisis en pequeña señal ( $g_m$ ,  $r_o$ )
- Polarización estable y adecuada asegura el “buen comportamiento” de los transistores en región activa
- Diferentes estrategias de polarización (circuitos discretos vs. circuitos integrados):
  - En circuitos discretos, uso de **resistores de polarización**, y **capacitores de acoplamiento**
    - En general, los resistores aseguran buen comportamiento mediante realimentación
  - En circuitos integrados, uso de **transistores únicamente** (fuentes de corriente); capacitores de acoplamiento son eliminados mediante **topologías diferenciales** (materia de otros cursos)
    - Para polarizar un transistor usando fuente de corriente de polarización, ésta va conectada al **nodo de baja impedancia**

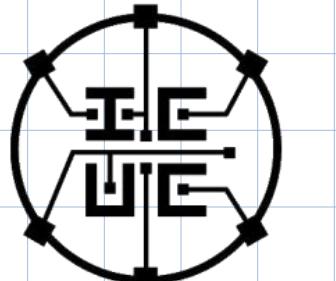


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

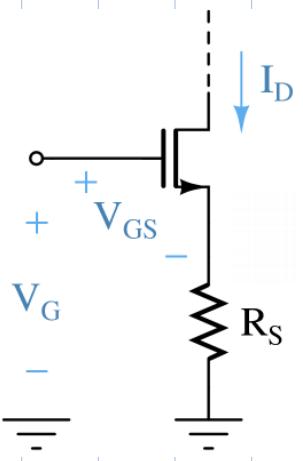
# Polarización mediante $V_{GS}$



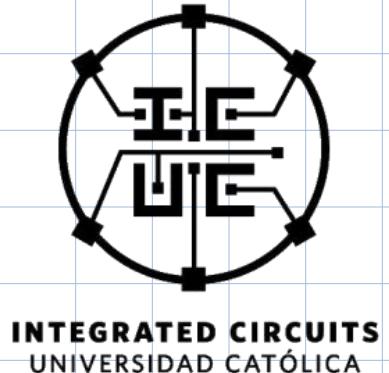
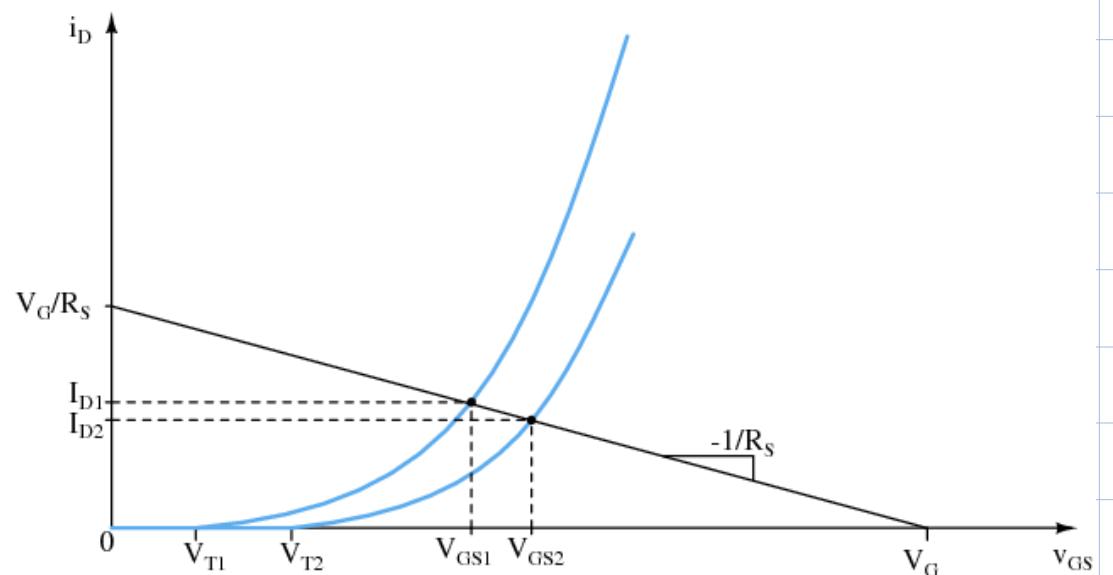
- Polarización más sencilla
  - corriente de polarización:
- Muy sensible a variaciones PVT
  - requiere ajustes...



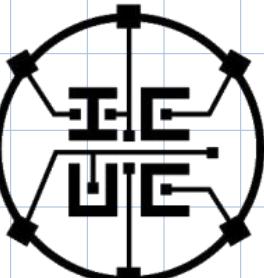
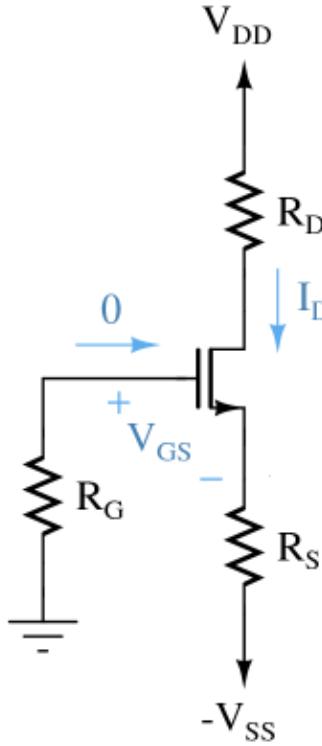
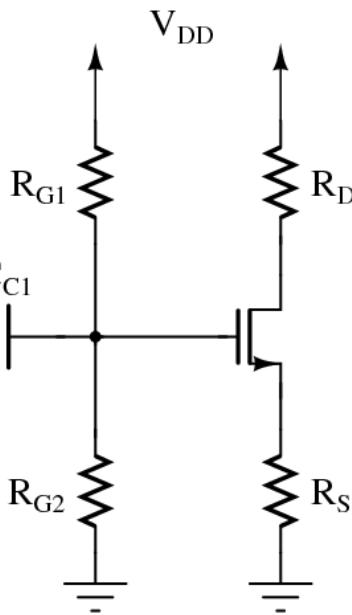
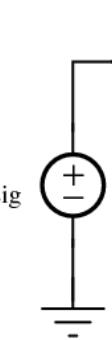
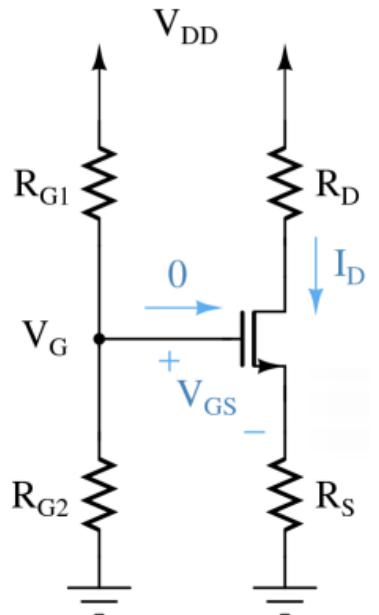
# Polarización con resistencia de degeneración de fuente



- Polarización práctica y robusta en circuitos discretos
- Poco sensible a variaciones PVT gracias a la realimentación

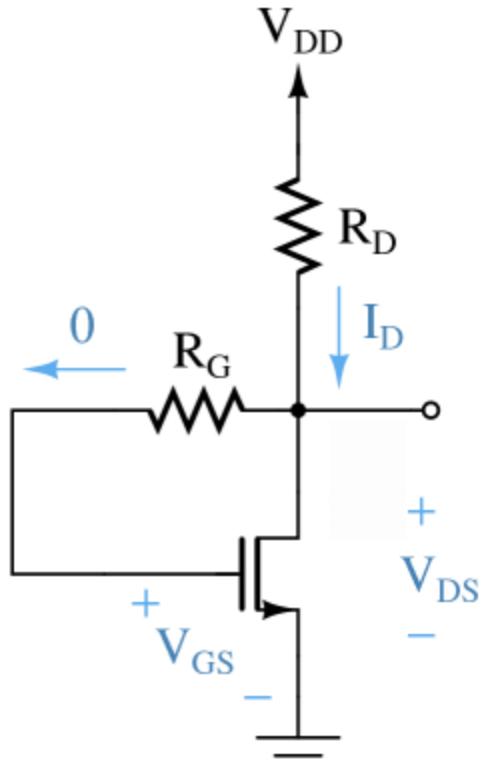


# ¿Cómo generamos $V_G$ ?

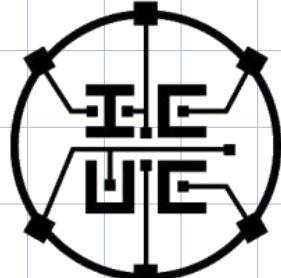


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Autopolarización



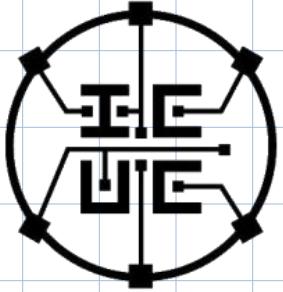
- Polarización muy simple y estable
- También emplea realimentación
- La excursión de salida puede verse afectada



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



4.12



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Polarización por corriente

Dependencias:

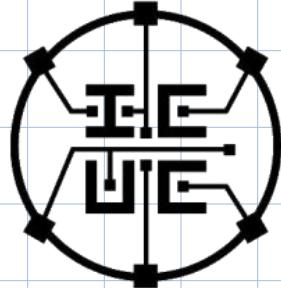
- 4.10 Análisis de un amplificador en pequeña señal
- 4.11 Polarización por voltaje

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

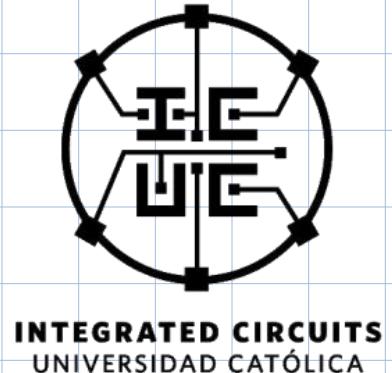
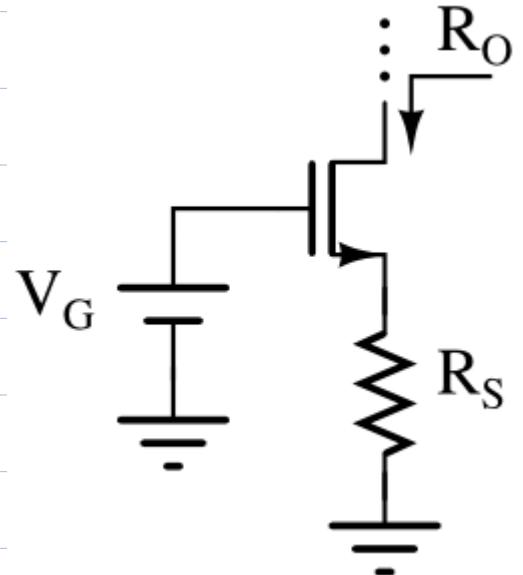
Electrónica en cápsulas

# ¿Cuál es la idea?

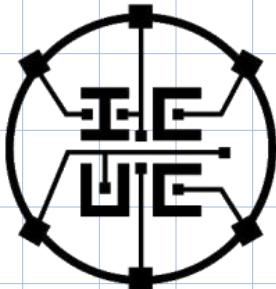
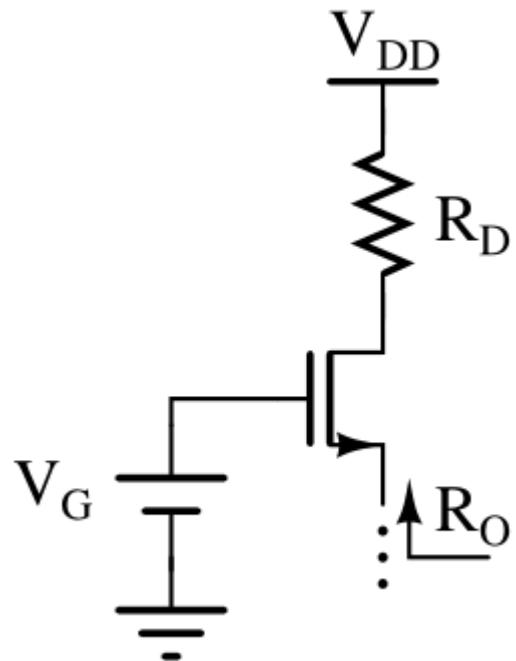
- La idea central de polarizar un transistor mediante una fuente de corriente es **forzar una corriente determinada a través del transistor**
- Para ello es necesario usar una fuente de corriente
  - **¿Qué impedancia debe tener la fuente de corriente?**
- La fuente de corriente fuerza esa corriente en el transistor
  - **¿El transistor debe tener alta o baja impedancia en el nodo donde conecto esa fuente de corriente?**



# Impedancia del dren de un transistor con compuerta a tierra

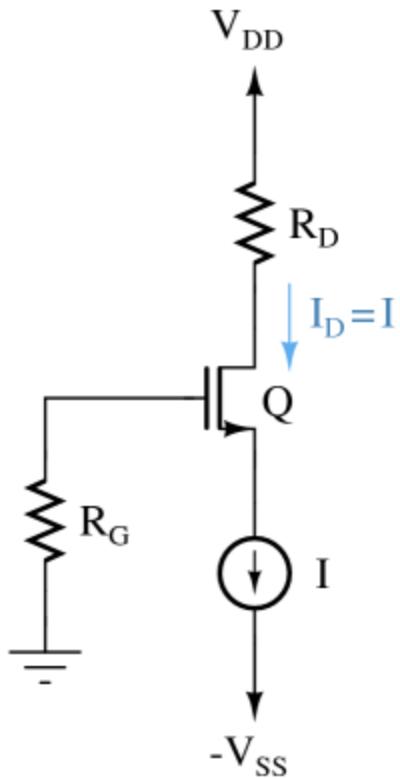


# Impedancia de la fuente de un transistor con compuerta a tierra



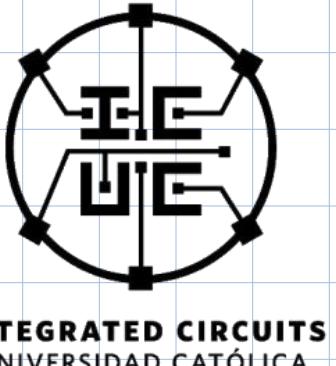
**Conclusión: ¿por dónde me conviene inyectar la corriente del transistor?**

# Polarización mediante fuente de corriente constante



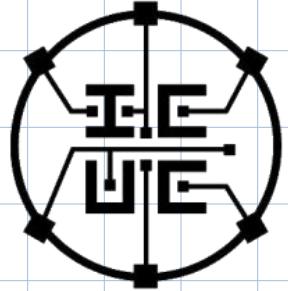
Es la forma de polarización más utilizada en MOSFETs de ICs

- Muy económica en términos de bien raíz del silicio
- Insensible a variaciones PVT
- La fuente de corriente va conectada al nodo de baja impedancia (ver lámina anterior)
- En 4.13 aprenderemos a implementar la fuente de corriente





4.13



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Espejos de corriente

Dependencias:

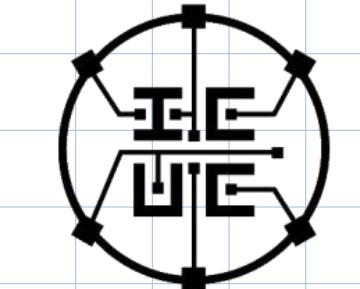
- 4.09 El MOSFET conectado como diodo
- 4.12 Polarización por corriente

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

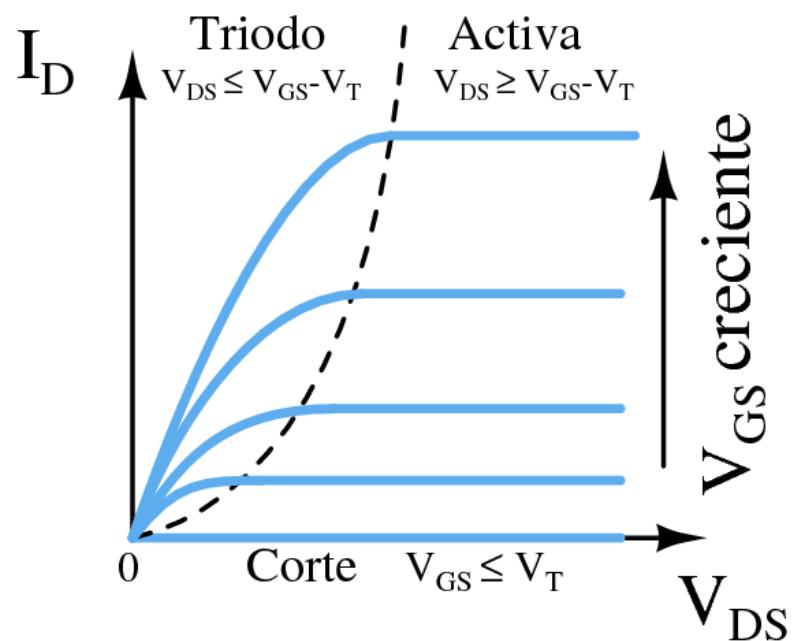
Electrónica en cápsulas

# ¿Espejo? ¿Qué es lo que refleja?

- Un espejo de corriente **copia la corriente** de una rama, en otra rama
- Los espejos de corriente son muy útiles para generar las fuentes de corriente empleadas en 4.12
- El espejo de corriente basa su operación en la polarización de un MOSFET en región activa
- Esta cápsula muestra en forma **descriptiva** diferentes opciones para espejos de corriente

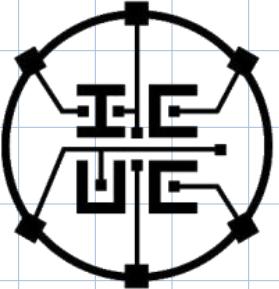


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

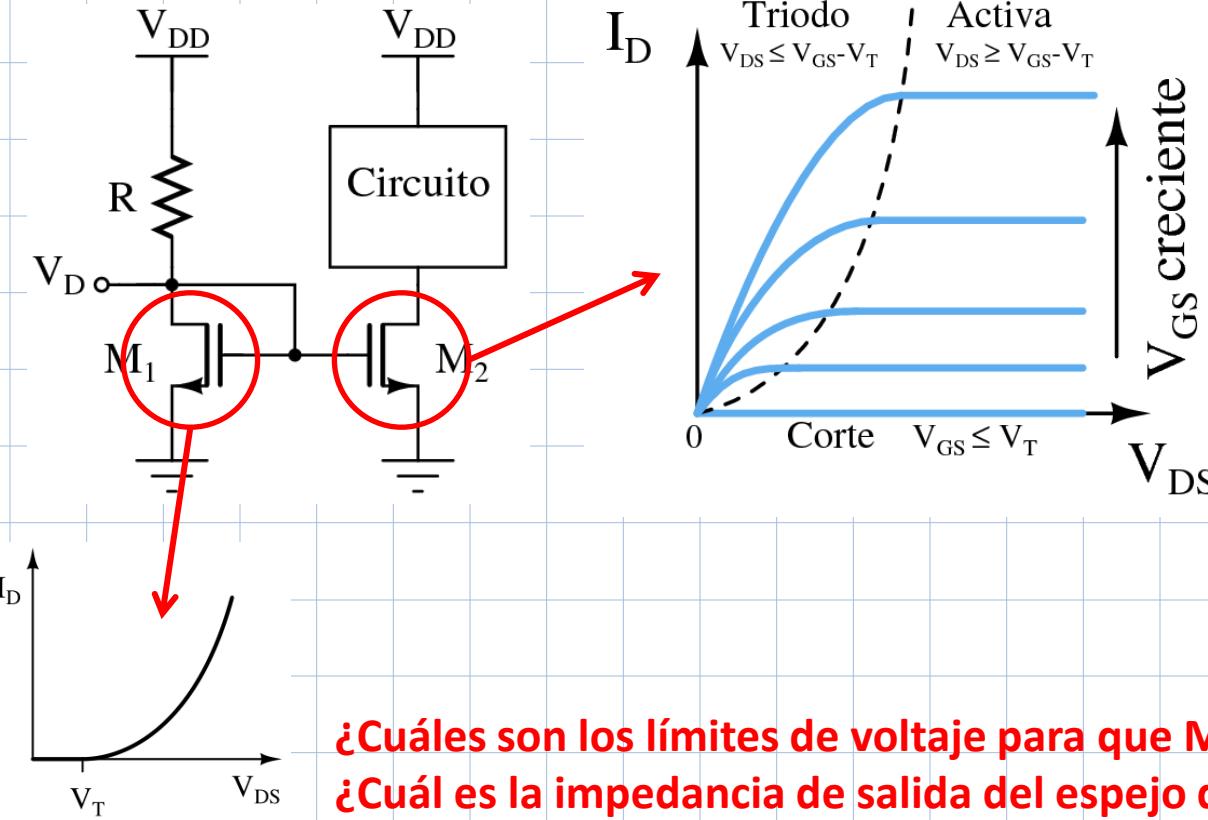


# Un espejo de corriente tiene dos partes

- Una parte que toma una corriente de referencia y genera un voltaje (recordar 4.09)
- Otra parte que usa ese voltaje como entrada y produce una corriente de salida



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

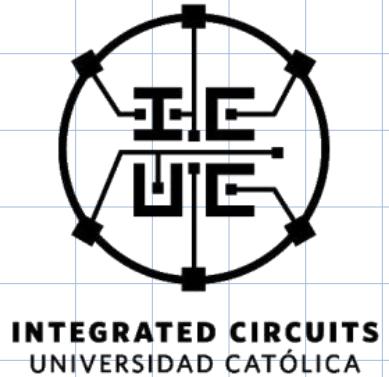
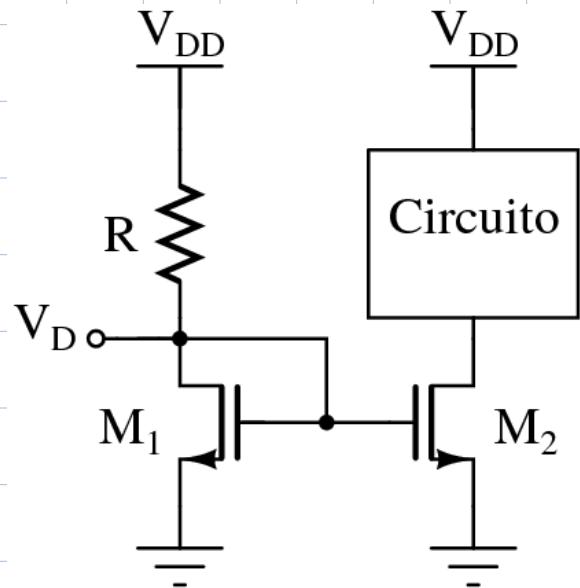


Considere  $M_2 = M_1$

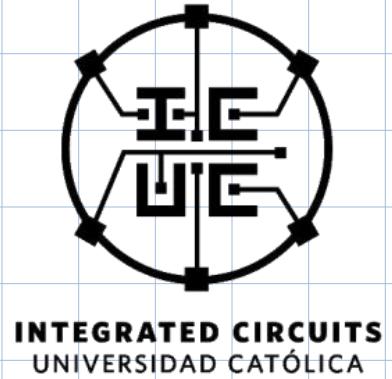
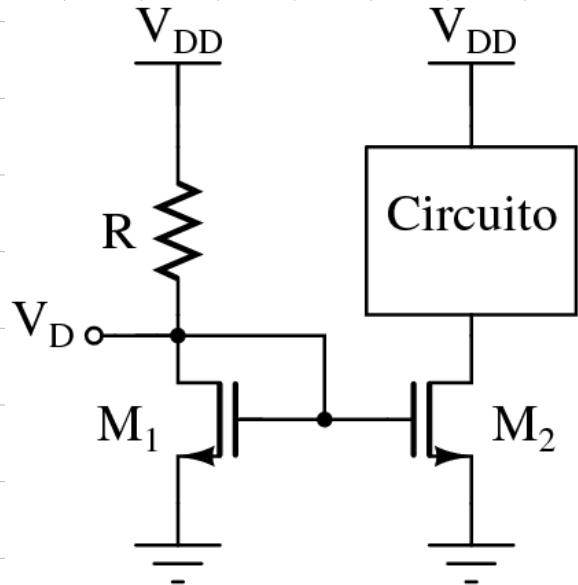
Encuentre  $I_{D2}$ ,  $V_D$

Repita para  $W_2 = 2W_1$

# ¿Qué pasa si hay disparidad entre M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub>?

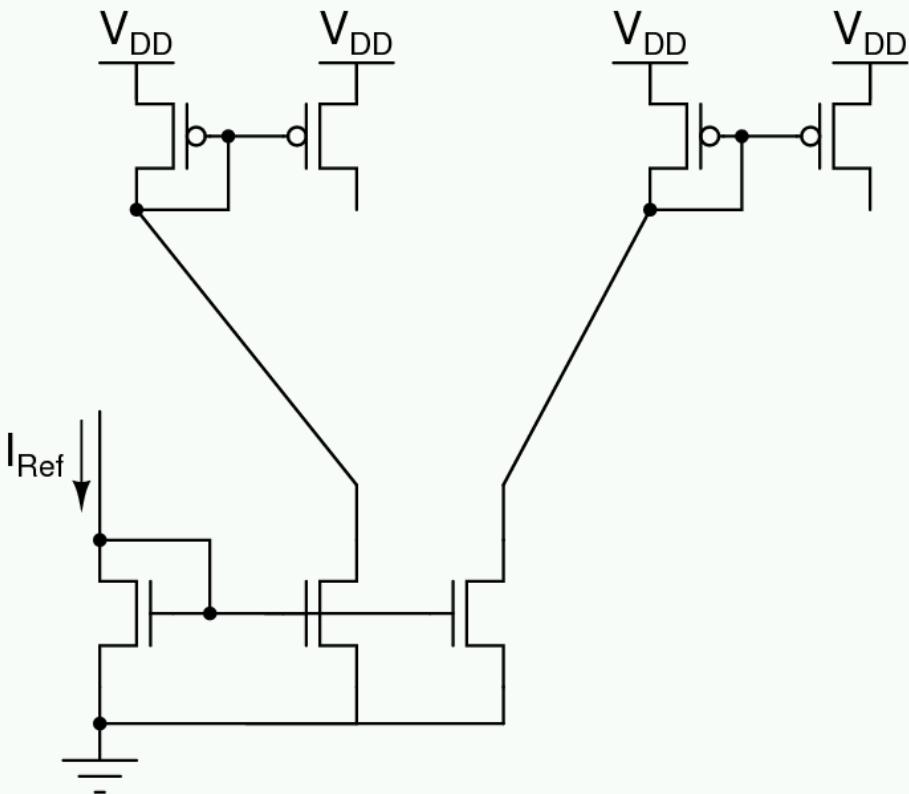
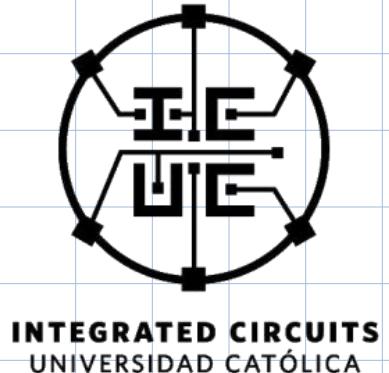


# ¿Qué pasa si $\lambda \neq 0$ ?



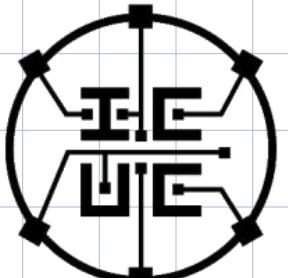
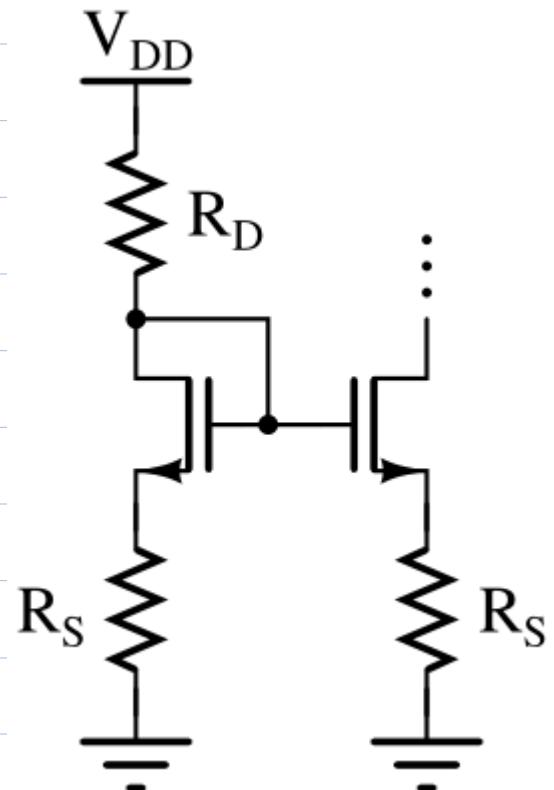
# Distribución de corrientes en un chip

- En general sólo tendremos una única fuente de corriente de referencia en un chip
- Podemos producir o distribuir las corrientes en el chip de dos maneras diferentes:
  - Distribuir voltajes de compuerta
    - Lo cual produce errores debido a caídas IR y gradientes del proceso de fabricación
    - Sólo lo haremos localmente para evitar errores
  - Distribuir corrientes
    - Una fuente de corriente global que nace cerca de la referencia de corriente lleva la referencia a circuitos de polarización locales
    - Desventaja: consume corriente adicional



# Espejo de corriente con degeneración de fuente

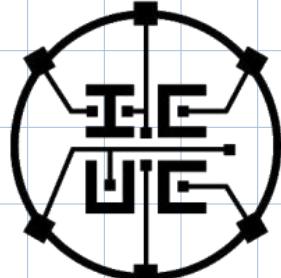
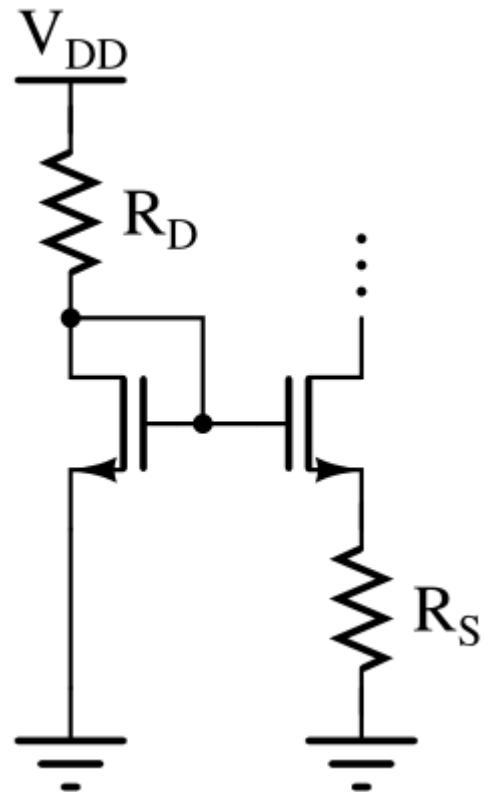
Es más preciso y tiene mayor impedancia de salida



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

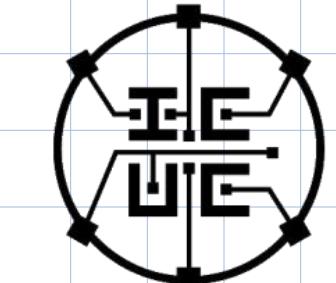
# Fuente de corriente de Widlar

Usa degeneración de fuente para generar corrientes pequeñas usando resistores de valor moderado

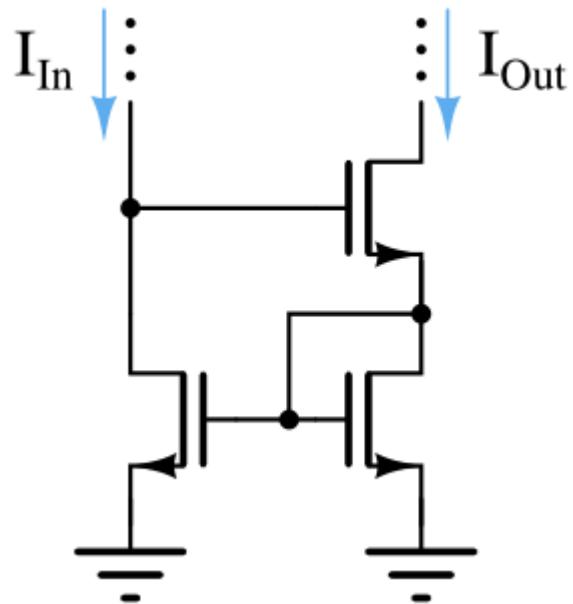


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Espejo de corriente de Wilson

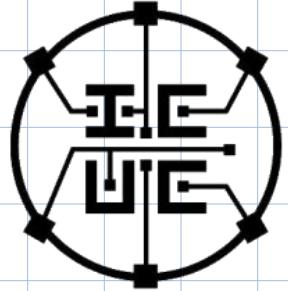


Aumenta impedancia de salida mediante realimentación





4.14



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Amplificadores MOS

Dependencias:

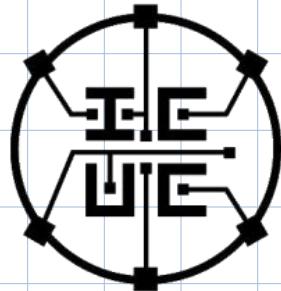
- 1.09 Introducción a los amplificadores electrónicos
- 4.08 El MOSFET en pequeña señal

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

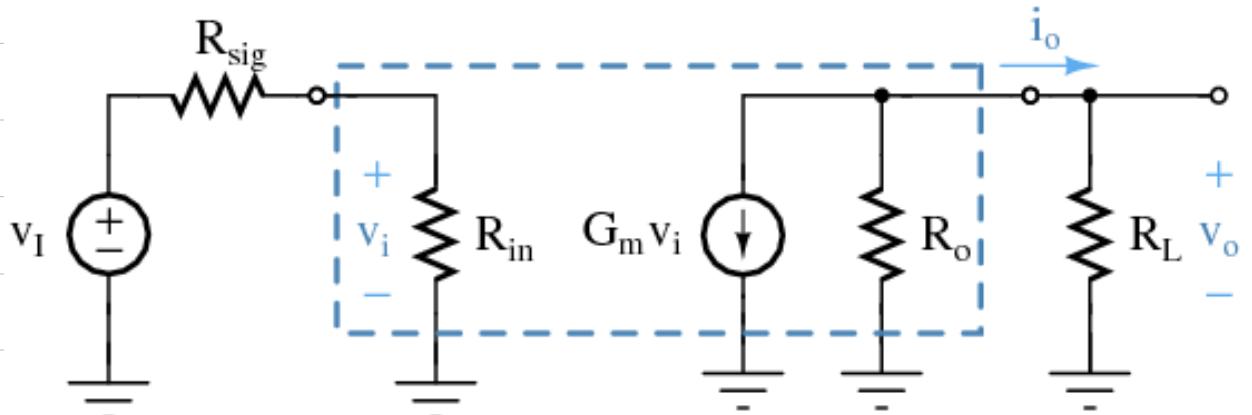
Electrónica en cápsulas

# Amplificadores MOS

- Lo más común: amplificador de voltaje
  - La entrada y la salida son señales de voltajes
  - Como vimos en 1.09, hay otros tipos de amplificadores, pero ningún amplificador es realmente un Thévenin perfecto o un Norton perfecto
- Internamente el MOS es parecido a una fuente de **corriente controlada por voltaje**, o transconductor...
  - Solución: convertir  $V \rightarrow I \rightarrow V$



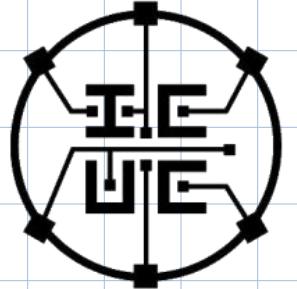
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



# $g_{\text{meff}}$ , $r_{\text{in}}$ y $r_{\text{out}}$

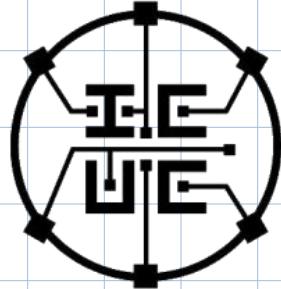
- **Cualquier amplificador lineal** puede ser representado como un Thévenin con fuente controlada, o como un Norton con fuente controlada
- Entonces es posible modelar casi cualquier amplificador con MOSFETs, con un nivel de complejidad arbitrario\*, usando sólo tres parámetros incrementales:  $r_{\text{in}}$ ,  $g_{\text{meff}}$  y  $r_{\text{out}}$
- Corolario: para lograr mayor ganancia, hay que aumentar  $g_{\text{meff}}$  y  $r_{\text{out}}$
- $g_{\text{meff}}$ ,  $r_{\text{in}}$  y  $r_{\text{out}}$  son parámetros incrementales y pueden estar implementados mediante una combinación de componentes circuitales
  - Ej:  $r_{\text{out}}$  podría ser implementado con un diodo (!)

\* Aquí despreciamos no linealidades y respuesta en frecuencia



# Ejemplo: calculemos los parámetros incrementales $g_{\text{meff}}$ , $r_{\text{in}}$ y $r_{\text{out}}$

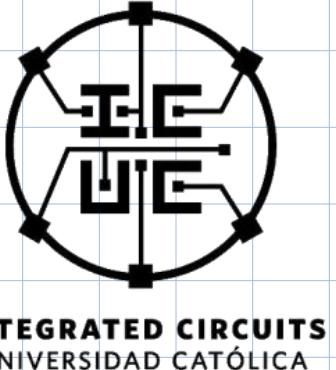
- Consideremos impedancia de fuente nula
- El amplificador tiene ganancia 10 cuando la carga es muy alta, y ganancia 5 cuando la carga es 1k
- Si la impedancia de fuente crece a 100k, la ganancia del amplificador baja a la mitad



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

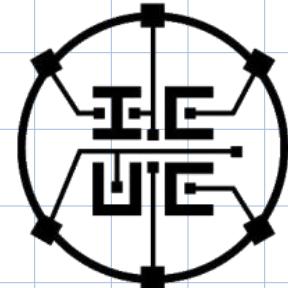
# ¿Cómo hacer amplificadores con MOSFETs?

- Existen **tres configuraciones elementales** de amplificadores con MOSFETs (NMOS o PMOS):
  - Amplificador de **fuente común** (CS)
    - Caso general: amplificador de CS con resistencia en la fuente
  - Amplificador de **compuerta común** (CG)
  - Amplificador de **dren común** (CD)
- Todos requieren polarización
- Todos requieren una carga circuital, activa o pasiva
- En la práctica, es posible diseñar diversos amplificadores basados en combinaciones de estas tres topologías
- Dominar bien sus ganancias e impedancias de puerto facilita el análisis orientado al diseño
- Comenzaremos con el CS en la próxima cápsula...



# Síntesis - amplificadores MOS sin carga

\* precaución cuando hay carga... evitar el mal uso  
de este resumen a toda costa

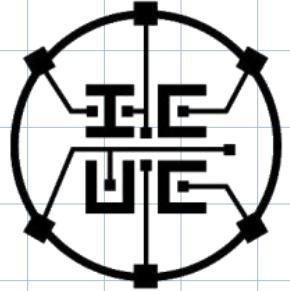


**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Config.	Ganancia de voltaje	Ganancia de corriente	Resistencia de entrada	$ G_{\text{meff}} $	Resistencia de salida	Uso principal
CS	Alta ( $g_m \cdot r_o$ )	Alta	Alta ( $\infty$ )	$g_m$	Alta ( $r_o$ )	Amplificador de voltaje
CS con degeneración de fuente	Alta* ( $\sim g_m \cdot r_o$ )	Alta	Alta ( $\infty$ )	$\sim g_m / (1 + g_m \cdot R_s)$	Alta ( $\sim g_m \cdot r_o \cdot R_s$ )	Amplificador de voltaje
CG	Alta	$\approx 1$	Baja ( $\sim 1/g_m$ )	$g_m$	Alta ( $\sim g_m \cdot r_o \cdot R_s$ )	Buffer de corriente
CD	$\approx 1$	Alta	Alta ( $\infty$ )	$g_m$	Baja ( $\sim 1/g_m$ )	Buffer de voltaje



4.15



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Amplificador de CS

Dependencias:

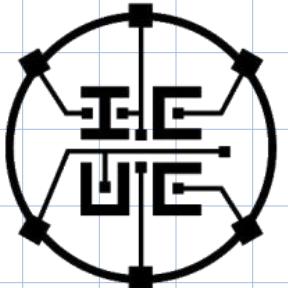
- 4.14 Amplificadores MOS

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

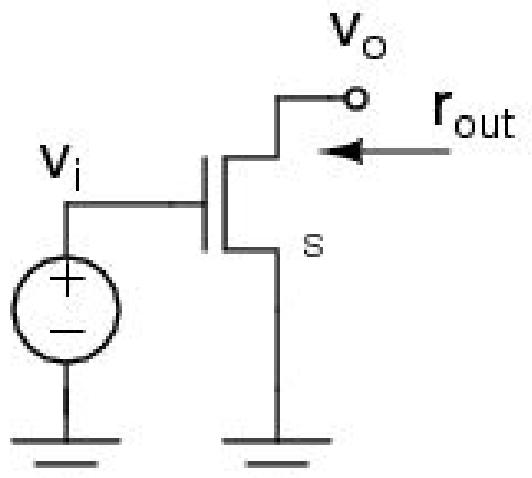
Electrónica en cápsulas

# Amplificador de fuente común (CS)

- Por lejos el más utilizado, ya sea de forma individual o en combinación con otras etapas
- Terminales
  - Entrada: compuerta
  - Salida: dren
  - Común: fuente
- Características: buen transconductor
  - Alta ganancia de voltaje
  - Alta impedancia de entrada
  - Alta impedancia de salida (podría no importarnos)

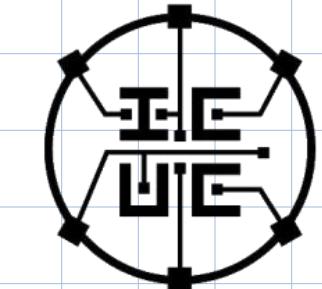


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

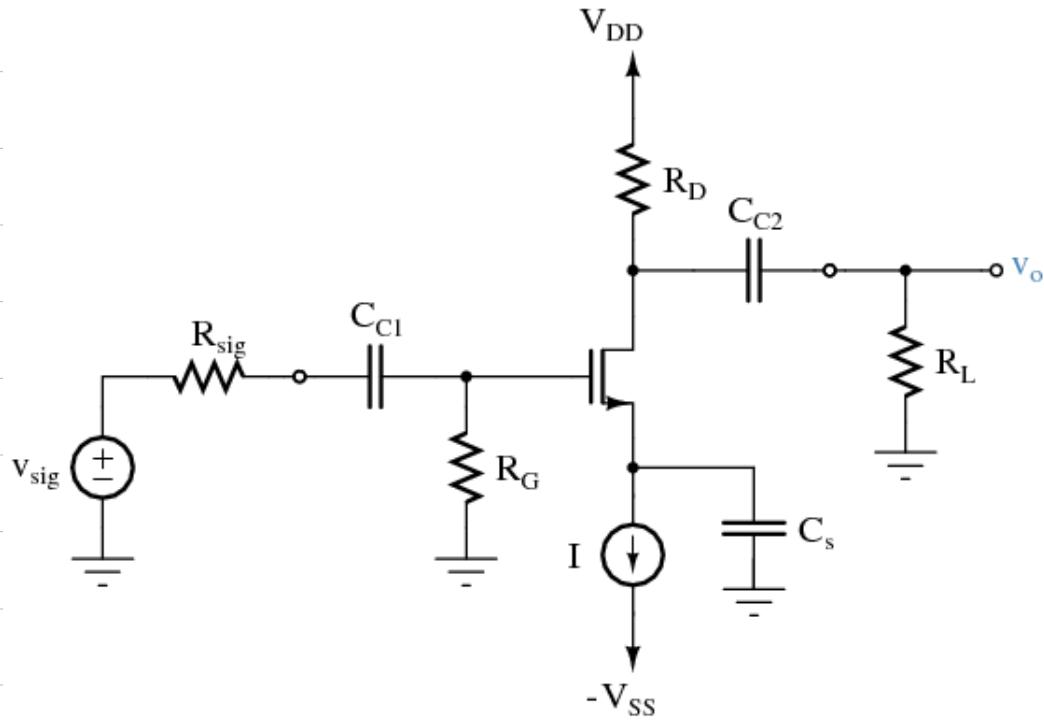


Polarización y carga  
no se muestran

# Análisis de un amplificador de CS



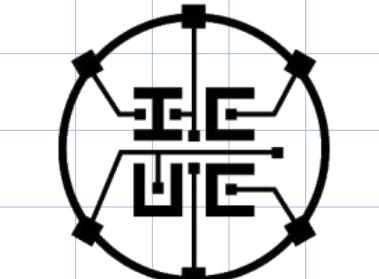
**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



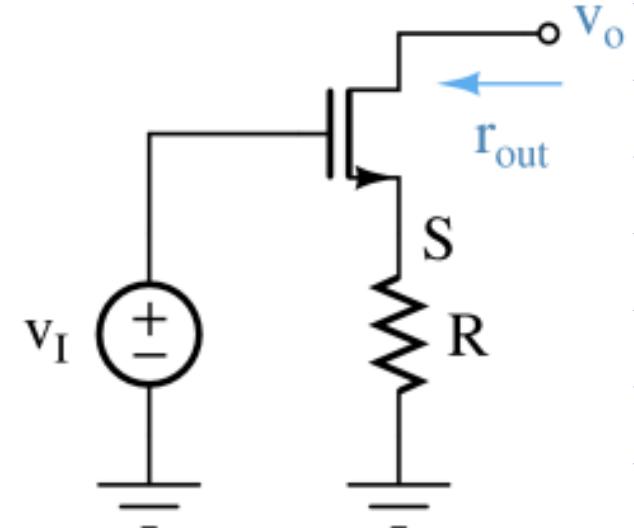
Existen muchas formas de implementar un amplificador de CS. Se muestra una de ellas.

# Variante: amplificador de CS con degeneración de fuente

- Generalización del CS, éste incluye una resistencia entre fuente y el riel correspondiente
  - Esta resistencia mejora la **estabilidad de polarización DC** gracias a la **realimentación**
  - También aumenta la resistencia de salida...
  - ... y disminuye la transconductancia efectiva
  - Puede ser implementada mediante un resistor o cualquier componente resistivo

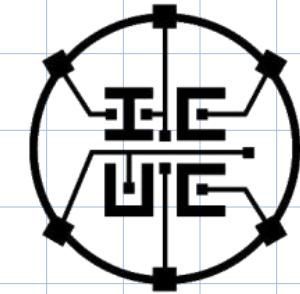


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



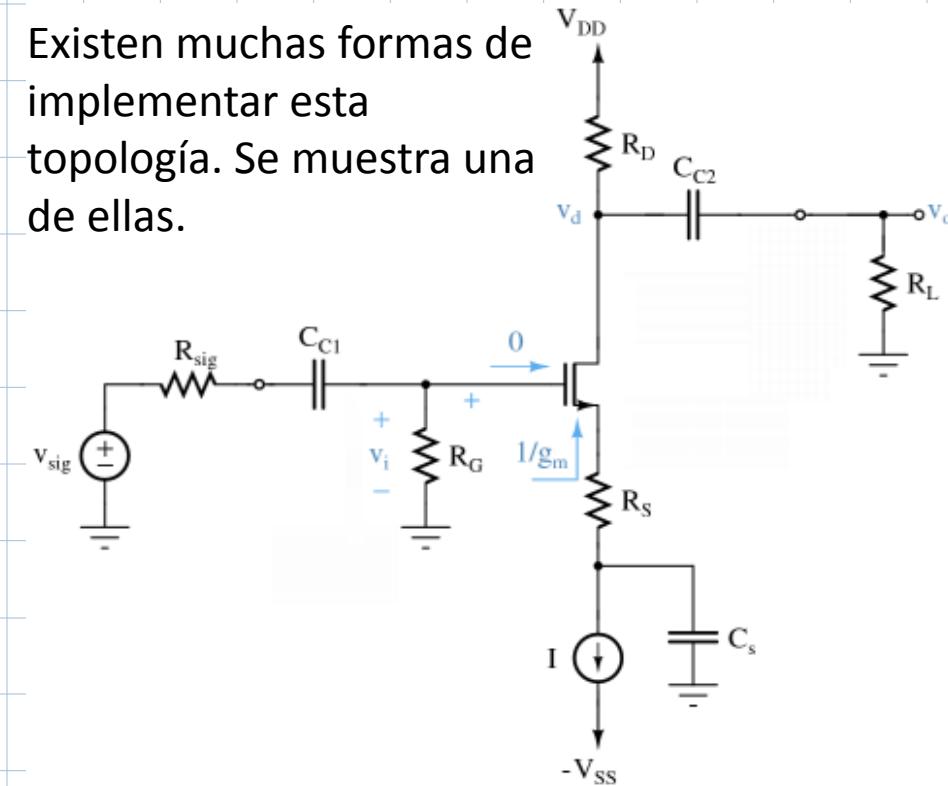
Polarización y carga  
no se muestran

# Análisis de un amplificador de CS con degeneración de fuente



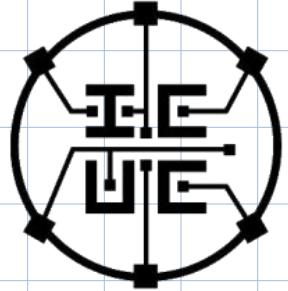
**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Existen muchas formas de implementar esta topología. Se muestra una de ellas.





4.16



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Amplificador de CG

Dependencias:

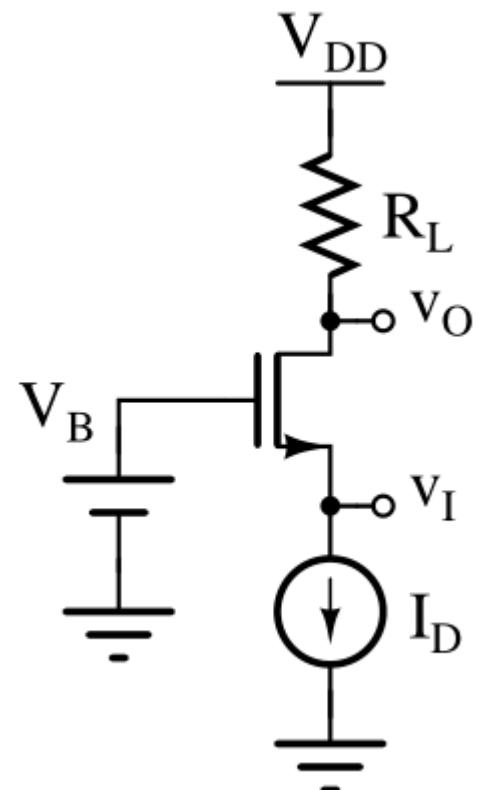
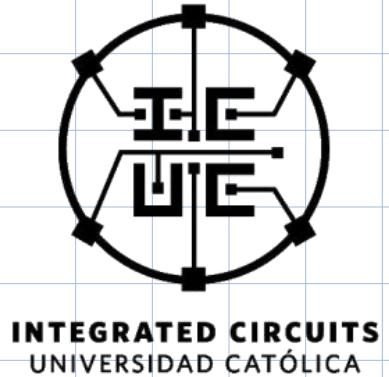
- 4.14 Amplificadores MOS

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

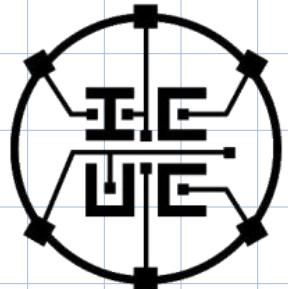
Electrónica en cápsulas

# Amplificador de compuerta común (CG)

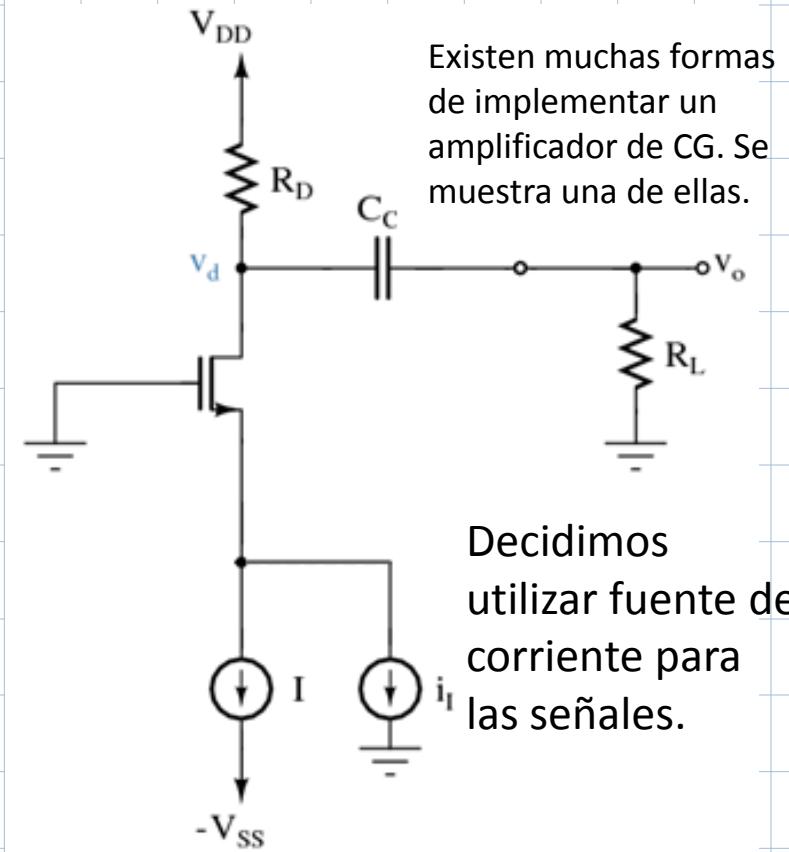
- Muy utilizado como **buffer de corriente**, usualmente como complemento de la etapa CS
- Terminales
  - Entrada: fuente
  - Salida: dren
  - Común: compuerta
- Características: buen buffer de corriente
  - Baja impedancia de entrada
  - Alta impedancia de salida
  - Ganancia de corriente prácticamente unitaria



# Análisis de un amplificador de CG

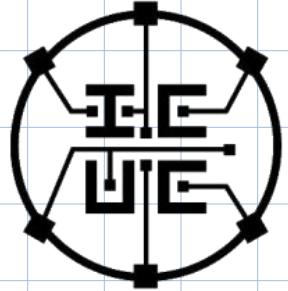


**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA





4.17



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Amplificador de CD

Dependencias:

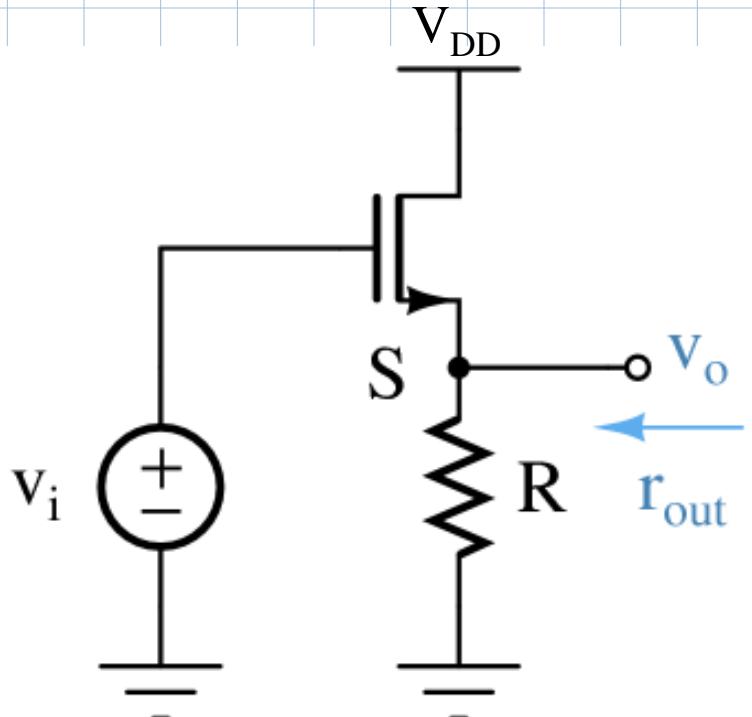
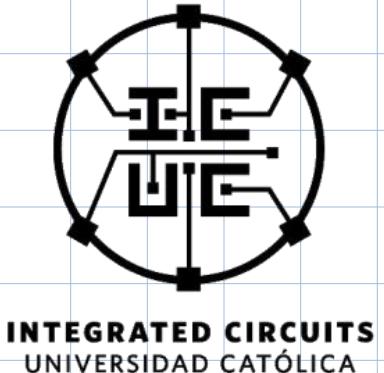
- 4.14 Amplificadores MOS

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

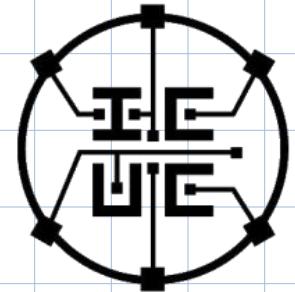
# Amplificador de dren común (CD), también llamado “seguidor de fuente”

- Muy utilizado como **buffer de voltaje**
- Terminales
  - Entrada: compuerta
  - Salida: fuente
  - Común: dren
- Características: buen buffer de voltaje
  - Alta impedancia de entrada
  - Baja impedancia de salida
  - Ganancia de voltaje prácticamente unitaria

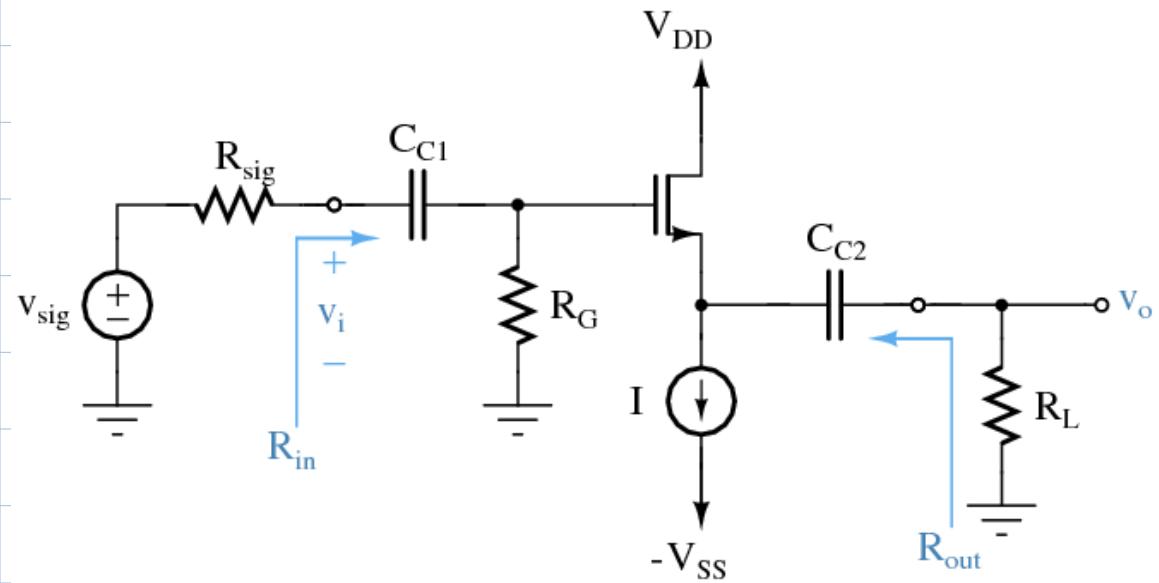


$R$  es **carga y polarización**. En general, carga y polarización pueden ir separadas.

# Análisis de un amplificador de CD



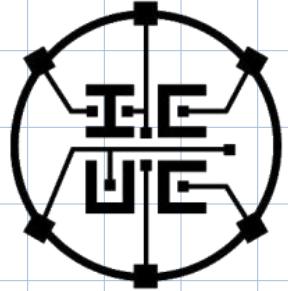
**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Existen muchas formas de implementar un amplificador de CD. Se muestra una de ellas.



4.18



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Cargas circuitales no lineales

Dependencias:

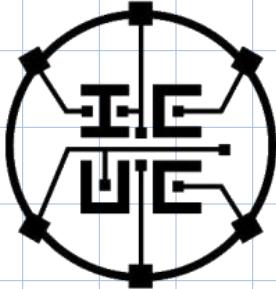
- 4.09 El MOSFET conectado como diodo
- 4.13 Espejos de corriente
- 4.14 Amplificadores MOS

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

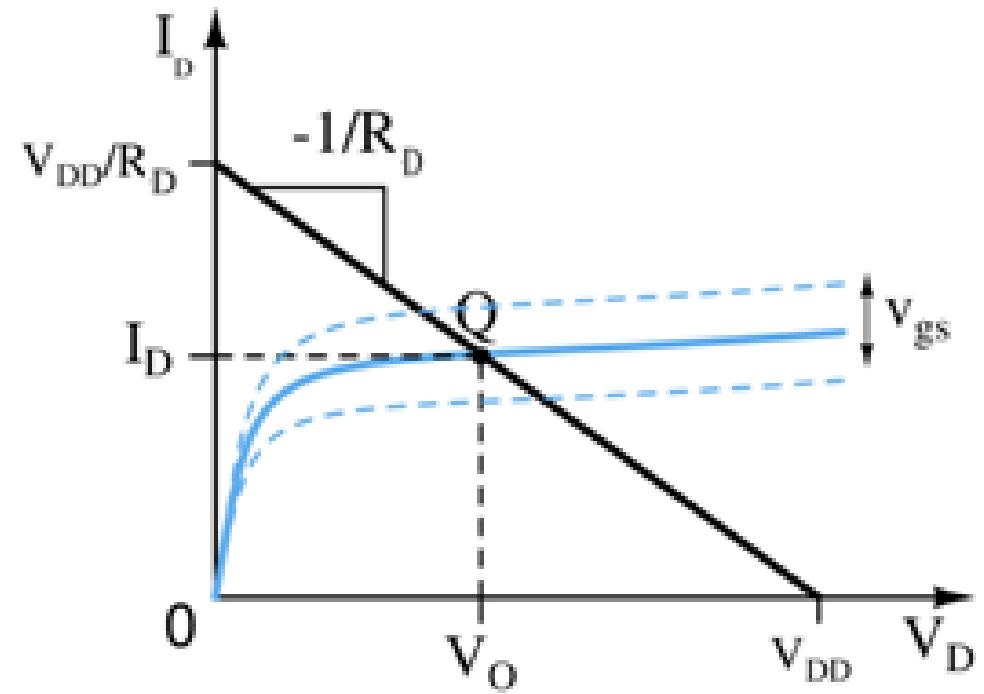
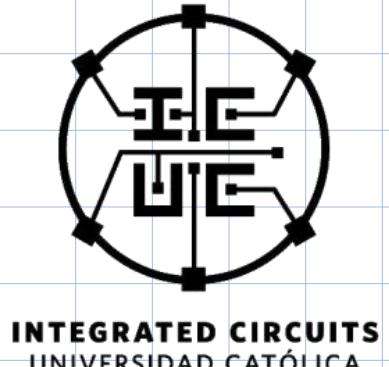
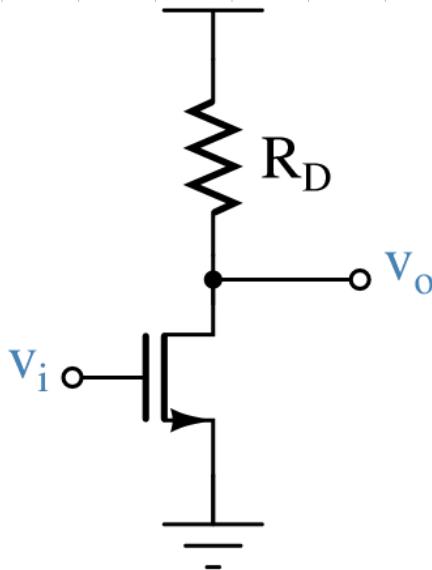
# No todas las cargas son resistores

- En las cápsulas anteriores aprendimos las tres configuraciones elementales de amplificadores (CS, CG, CD)...
  - ... y que normalmente se utilizan en combinaciones para lograr diferentes especificaciones
- En esta cápsula profundizaremos en dos ideas importantes en el diseño de amplificadores:
  - Carga activa
  - Carga como diodo
- Existen muchas más configuraciones de dos o más transistores, algunas de las cuales son materia de otros cursos

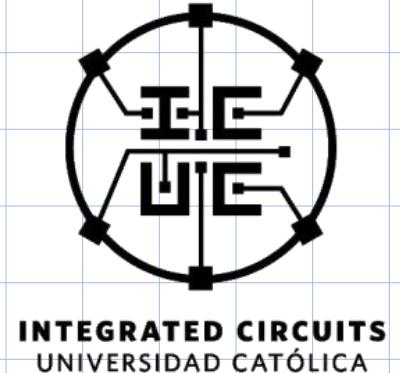
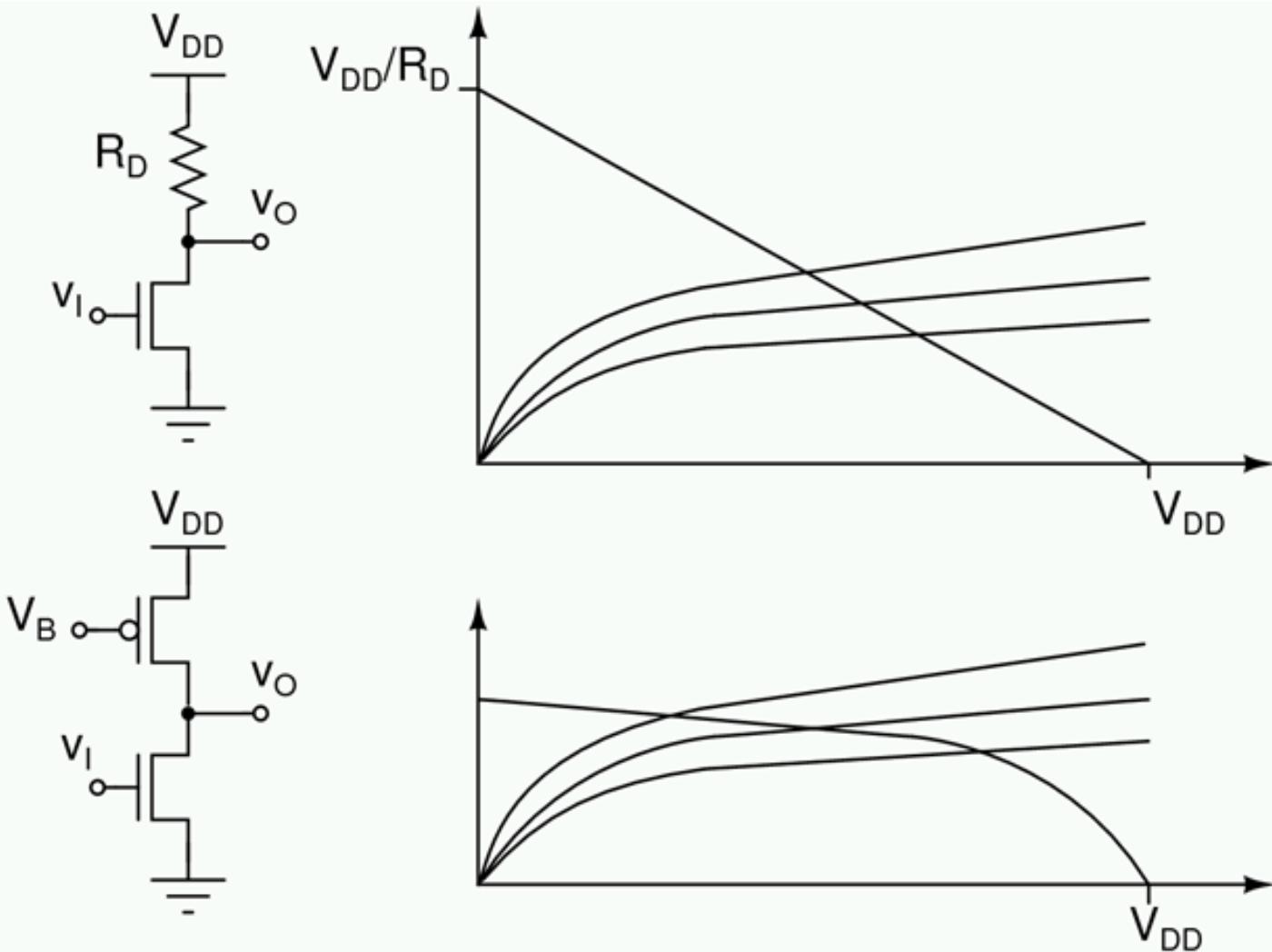


# Carga activa: motivación

- Alta ganancia es muy útil en circuitos con realimentación. ¿Cómo lograrla?
  - ¿Muchas etapas? mala idea... **¿Por qué?**
- ¿Cómo obtener la mayor ganancia en una sola etapa?
- ¿Cómo aprovechar al máximo el “bien raíz” del silicio?
- Sabemos que  $|A_v| = g_m R_D$  y  $g_m = 2I_D/V_{ov}$

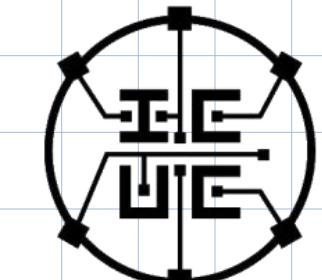


# Idea genial: PMOS como carga del NMOS

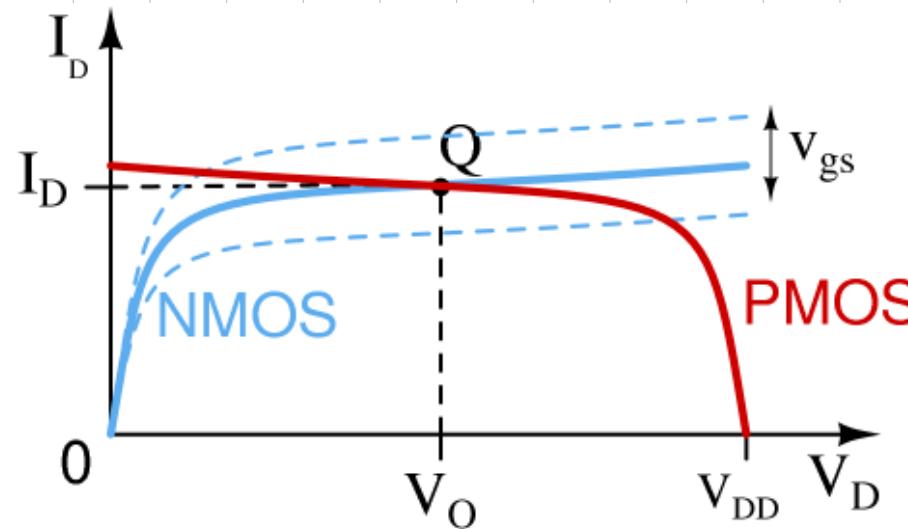
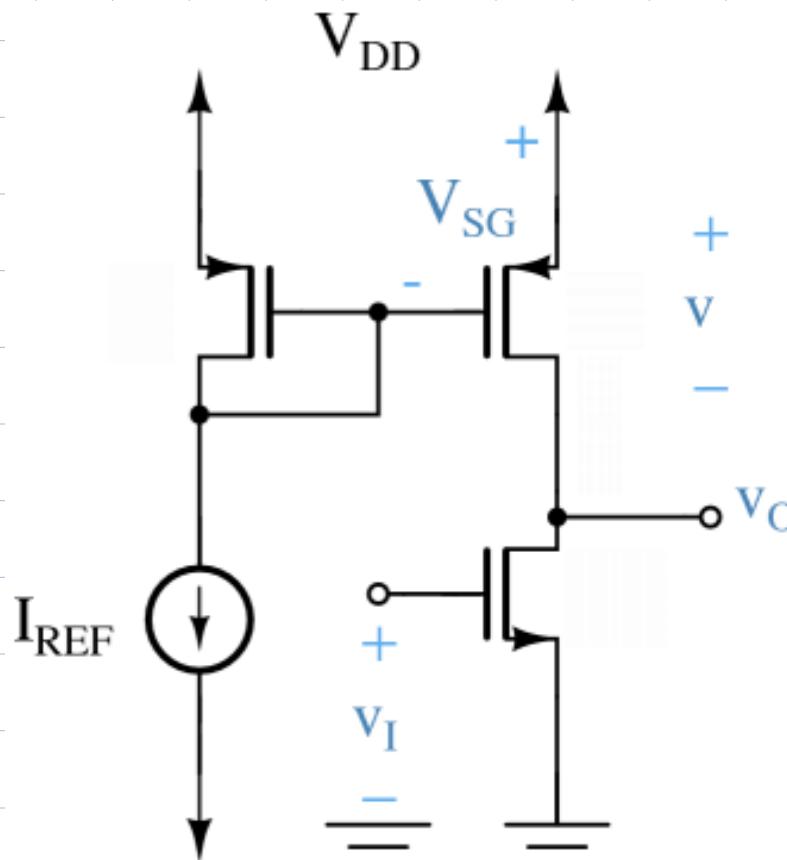


- En lugar de  $R_D$ , usamos el PMOS con  $V_{GS} = \text{cte}$ 
  - ¡se convierte en  $r_o$ !!
- El PMOS va conectado al nodo de alta impedancia del CS
  - No es polarización, sino carga
- El PMOS ocupa mucho menos espacio que un  $R_D$  grande
  - ¡y requiere menor alimentación!!
- Esta es una de las tantas ventajas de los CMOS...

# Análisis de un amplificador con carga activa

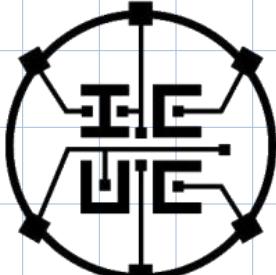


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



# ¿Qué tal otra carga circuital no lineal?

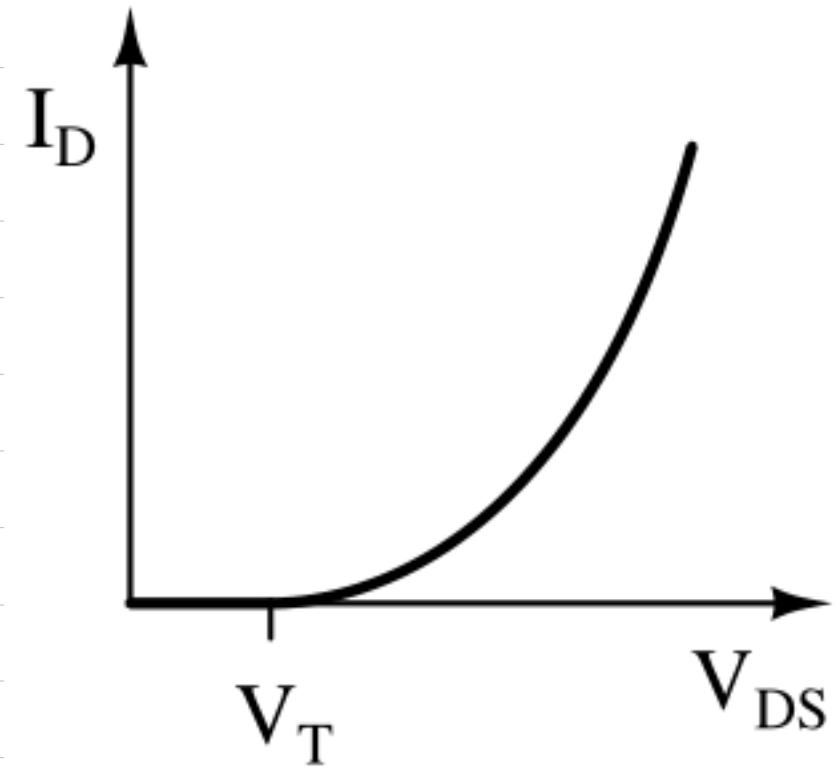
- Recordemos de 4.09: un MOSFET conectado como diodo tiene impedancia incremental  $\sim 1/g_m$



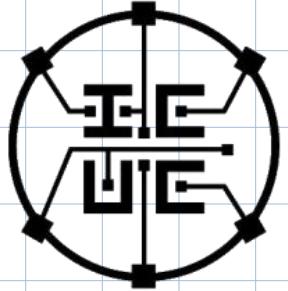
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



- Tal vez podemos usar esa característica como carga de un amplificador MOS



# Ejemplo: amplificador de CS con carga de MOSFET conectado como diodo

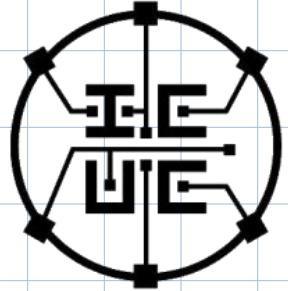


**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

**La ganancia es ratiométrica**



4.19



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Configuración cascodo

Dependencias:

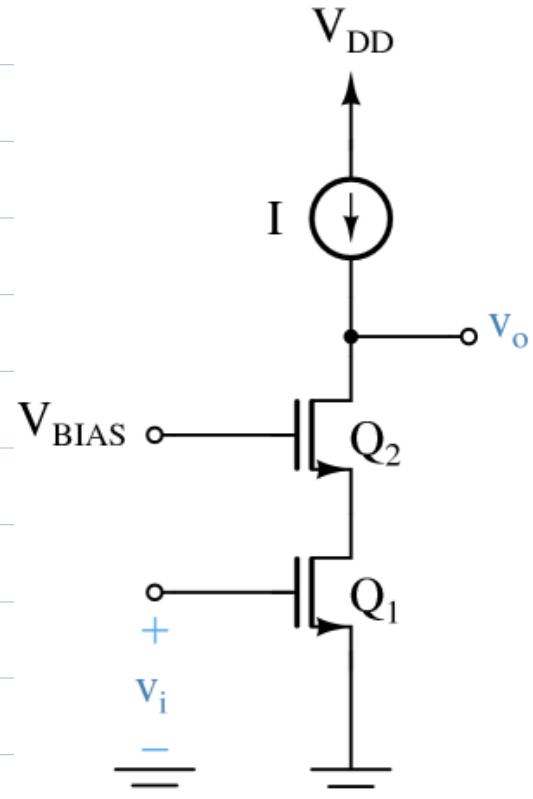
- 4.14 Amplificadores MOS
- 4.15 Amplificador de CS
- 4.16 Amplificador de CG

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

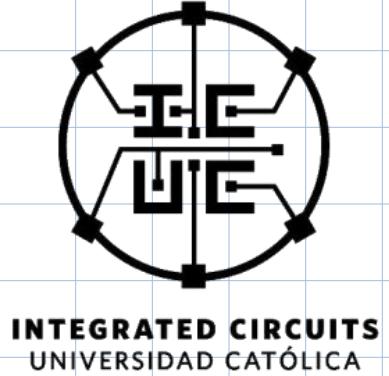
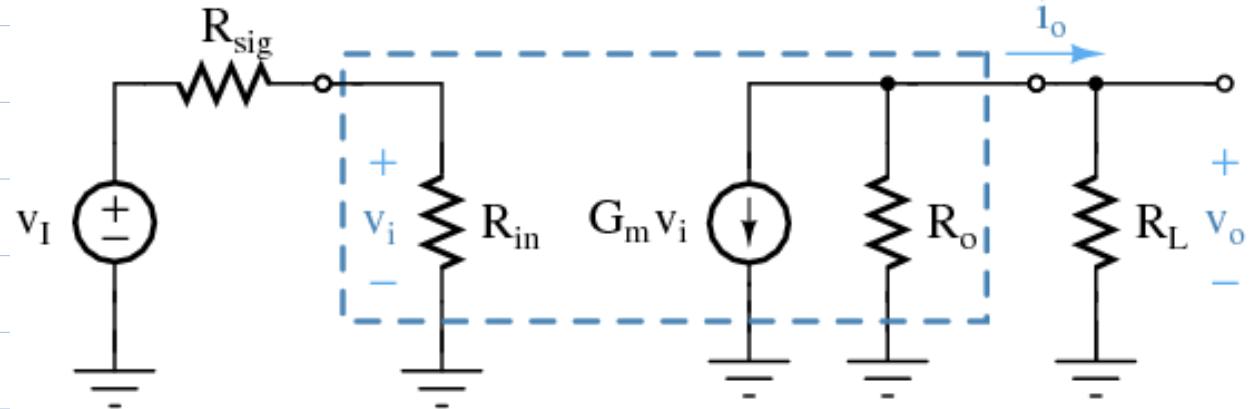
Electrónica en cápsulas

# Motivación

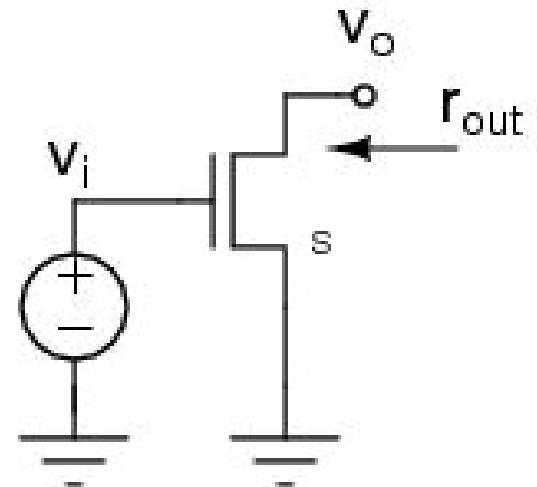
- Etapa CS es una buena fuente de corriente
- Etapa CG es un buen buffer de corriente
  - Se lleva la mayor parte de la corriente de la fuente controlada de la etapa CS ( $1/g_m$  vs.  $r_o$ )
  - Aumenta la impedancia de salida
  - Hace que  $V_{DS}$  sea más estable
    - mitiga efecto Miller en  $C_{GD}$
- El cascodo es la **conexión CS-CG en cascada**
  - Ambos MOSFETs son del mismo sabor
  - La corriente del CG entra por su nodo de baja impedancia



# Recordemos $g_{\text{meff}}$ y $r_{\text{out}}$

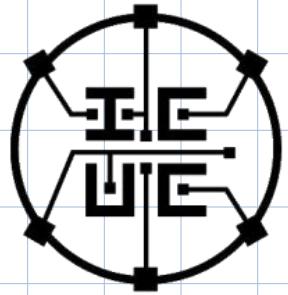


- Para lograr alta ganancia necesitamos un  $g_{\text{meff}}$  alto y un  $r_{\text{out}}$  alto
- Sabemos que la etapa CS es un buen transductor, pero su impedancia de salida no es tan alta como nos gustaría
  - Especialmente en tecnologías más nuevas

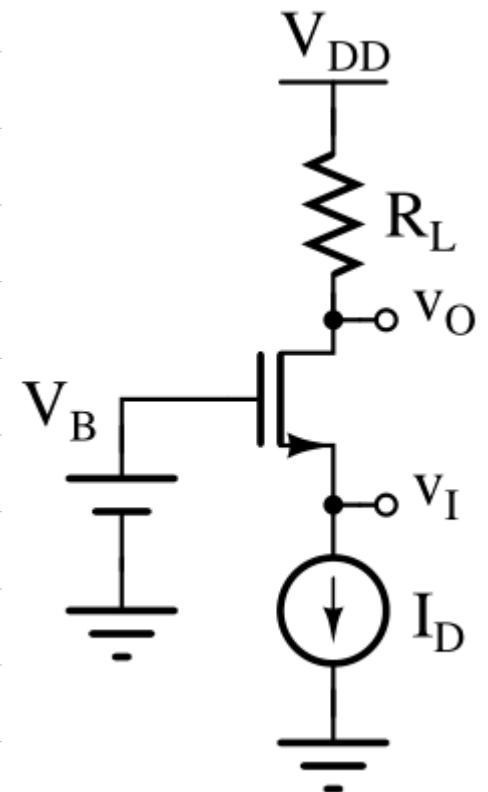


La etapa de CS tiene buen  $g_m$

# Recordemos las impedancias de la etapa CG

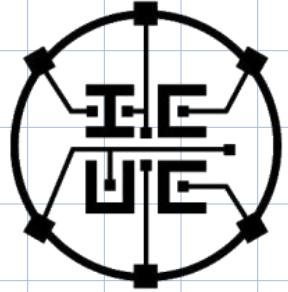


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

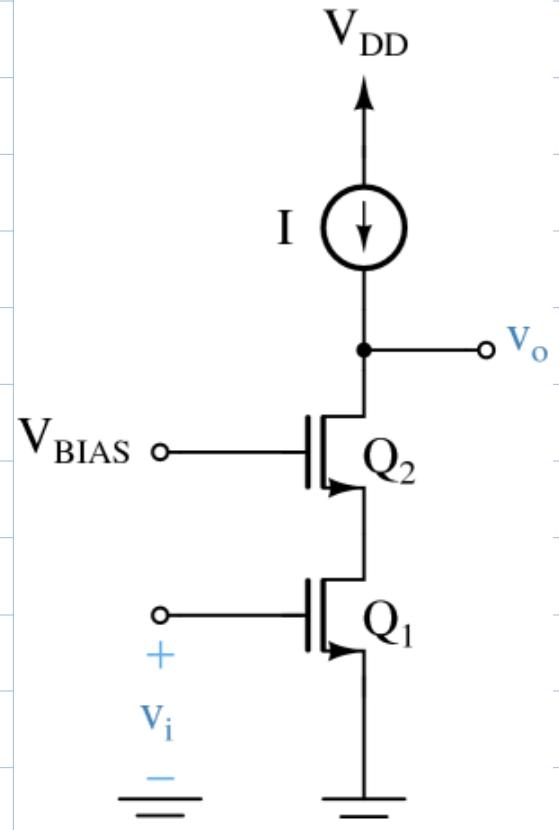


Una etapa CG entrega en su salida la misma corriente de la entrada, pero con **mayor impedancia**

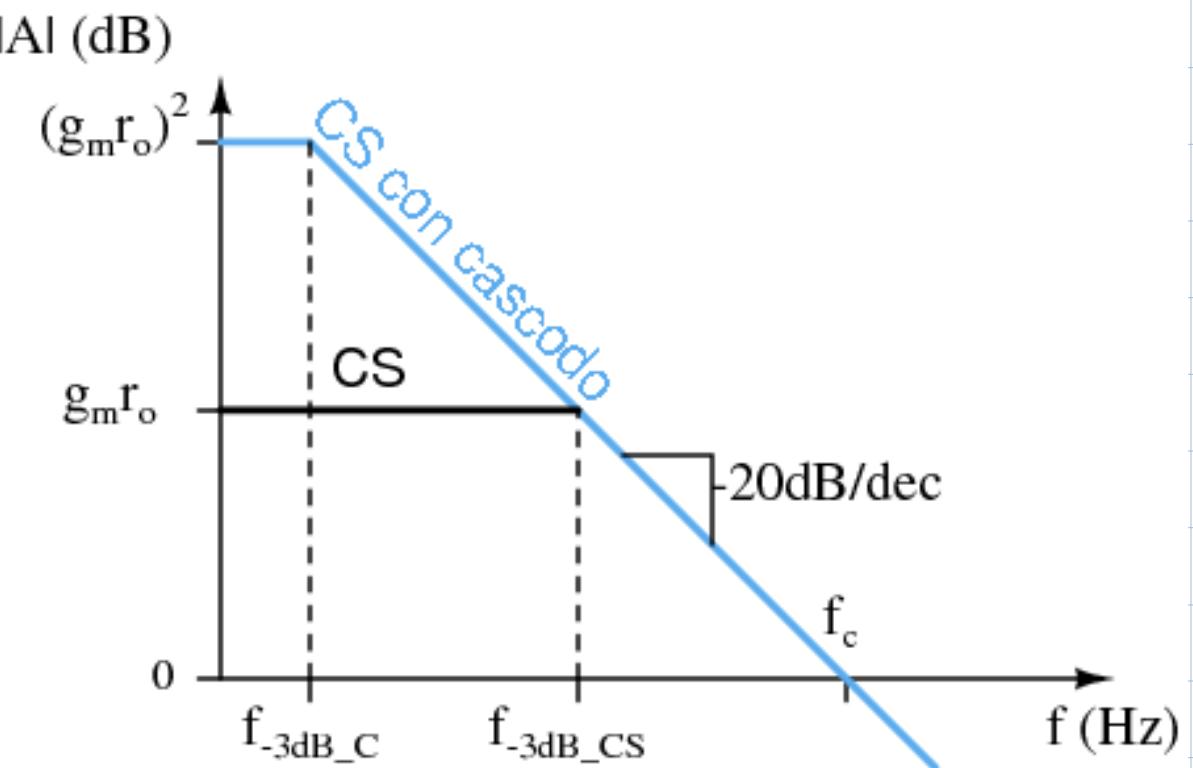
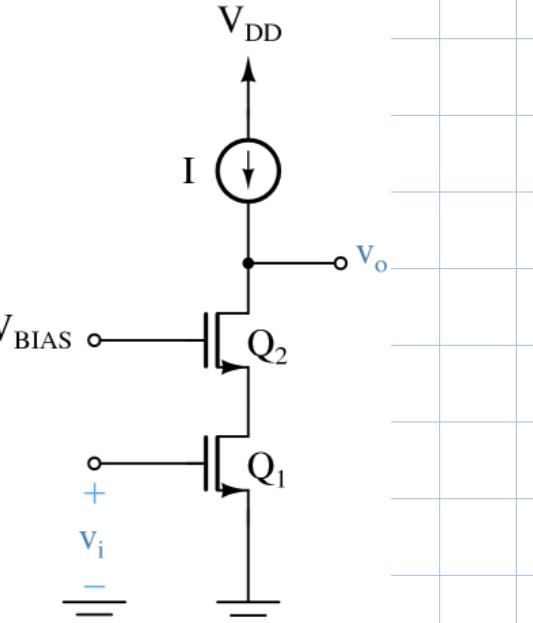
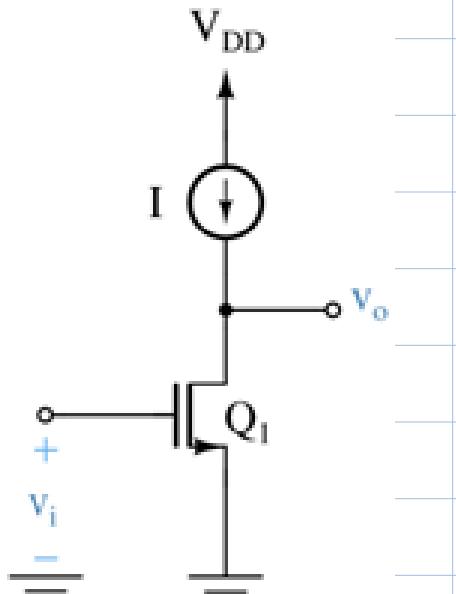
Cascodo: aprovechamos el  $g_m$  de la etapa CS, y el aumento de  $r_{out}$  de la etapa CG



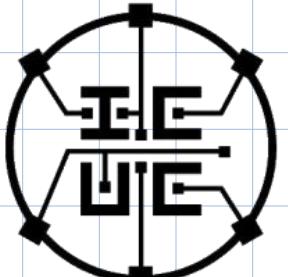
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



# Respuesta en frecuencia: CS vs. CS con cascodo, asumiendo carga capacitiva $C_L$



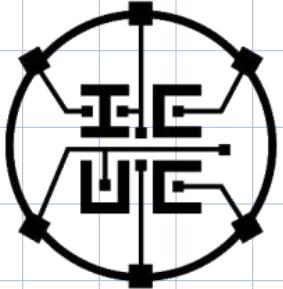
¿Cómo es la excusión de salida del cascodo respecto de la excusión de salida de la etapa de CS?



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



4.20



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Cascodos plegados, cascodos telescópicos y espejos de corriente cascodeados

Dependencias:

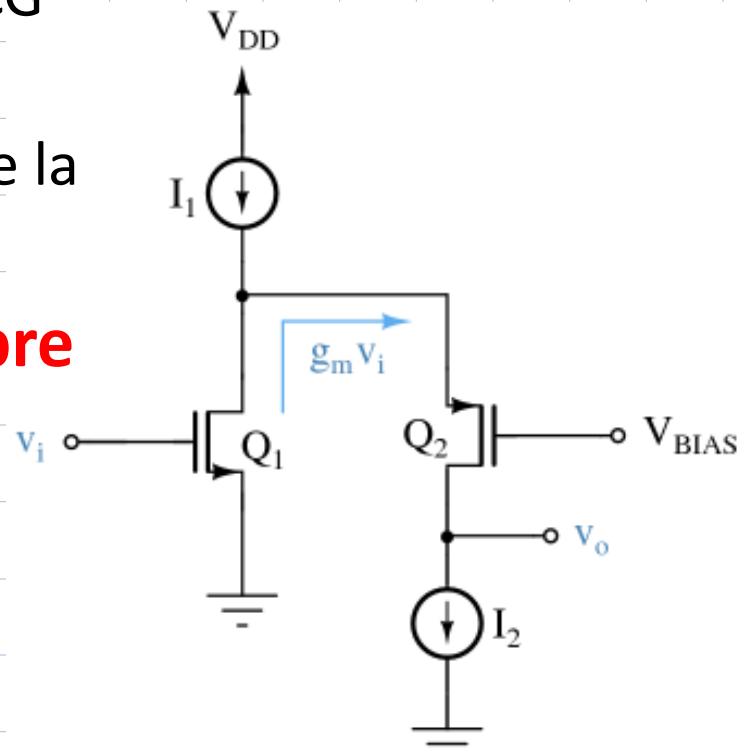
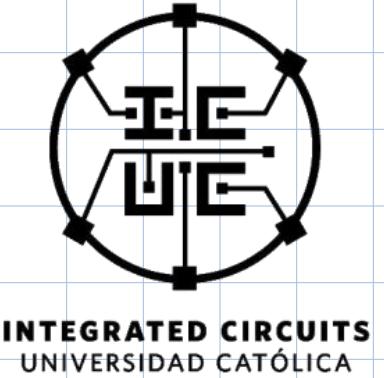
- 4.19 Configuración cascodo

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

## Electrónica en cápsulas

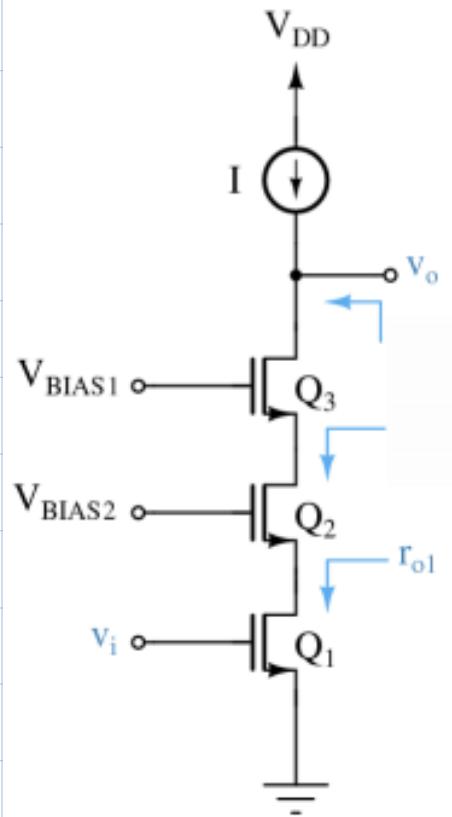
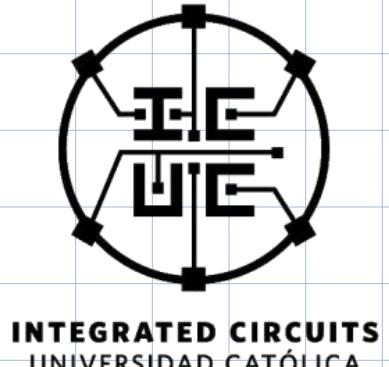
# Cascodo plegado: igual al cascodo en pequeño señal, pero diferente en DC

- La corriente del CG entra por su nodo de baja impedancia, igual que en el cascodo convencional
  - Pero en el cascodo plegado, los transistores de CS y CG son de distinto sabor
  - La fuente de corriente adicional “pliega” el camino de la señal
- **¿Cuál es la ventaja del cascodo plegado por sobre el cascodo convencional?**



# Cascodo telescopico: cascodeando un cascodo (!)

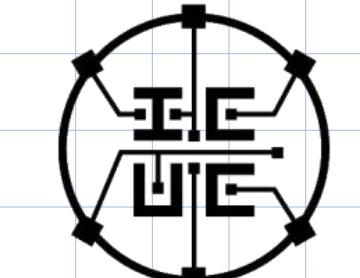
- Ya aprendimos que una etapa CG aumenta la impedancia de una etapa de CS...
- **¿Una etapa de CG podrá aumentar la impedancia de salida de una etapa de CS que ya está cascodeada?**



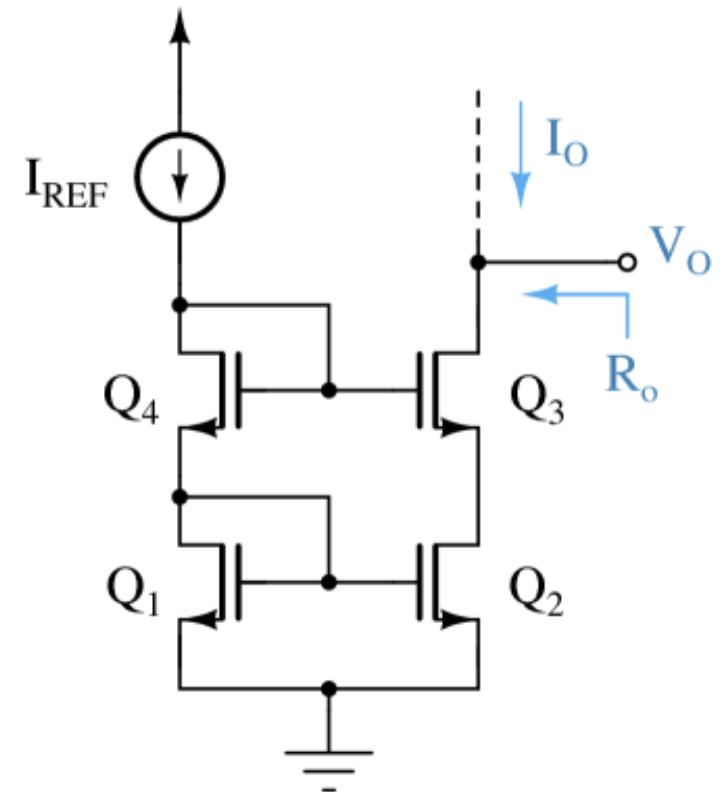
**¿Cuál es la desventaja de un cascodo telescopico?**

# Espejos de corriente cascodeados

¿Cómo generamos el voltaje de compuerta de los dispositivos en CG? Una opción es usando MOSFETs conectados como diodos

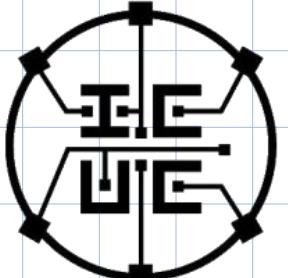


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

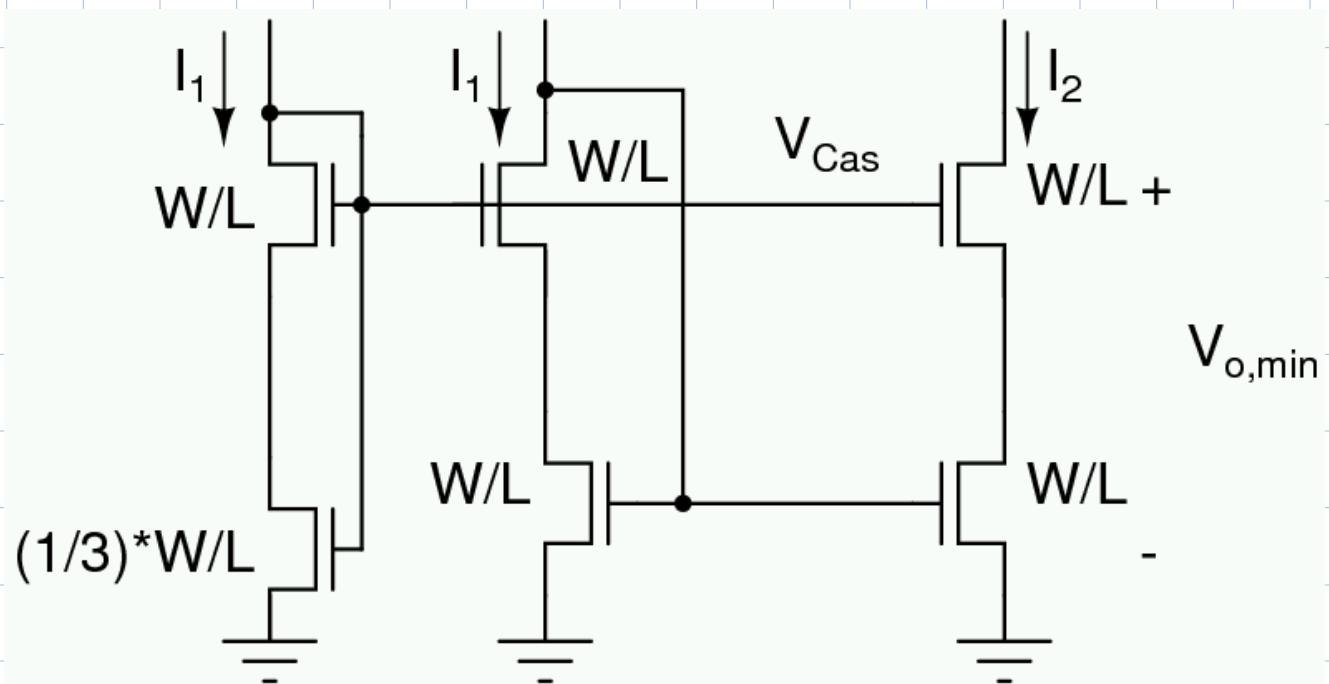


# Polarización de espejo de corriente cascodeado maximizando excursión

Es posible maximizar la excusión de salida produciendo un  $V_{DS} \approx V_{OV}$

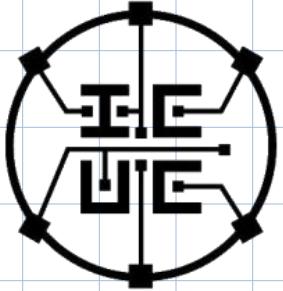


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA





4.21



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Supercascodo y seguidor de fuente mejorado

Dependencias:

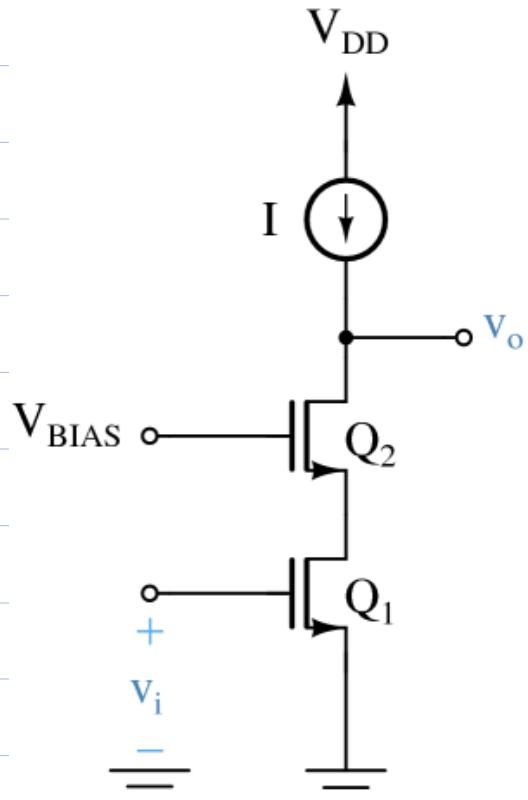
- 4.17 Amplificador de CD
- 4.19 Configuración cascodo

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

# Otro mecanismo para tener $V_{DS}$ constante...

- El cascodo logra un  $V_{DS}$  casi constante en el CS
  - Esto implica que la **corriente no depende del voltaje de salida**, logrando un mejor transconductor



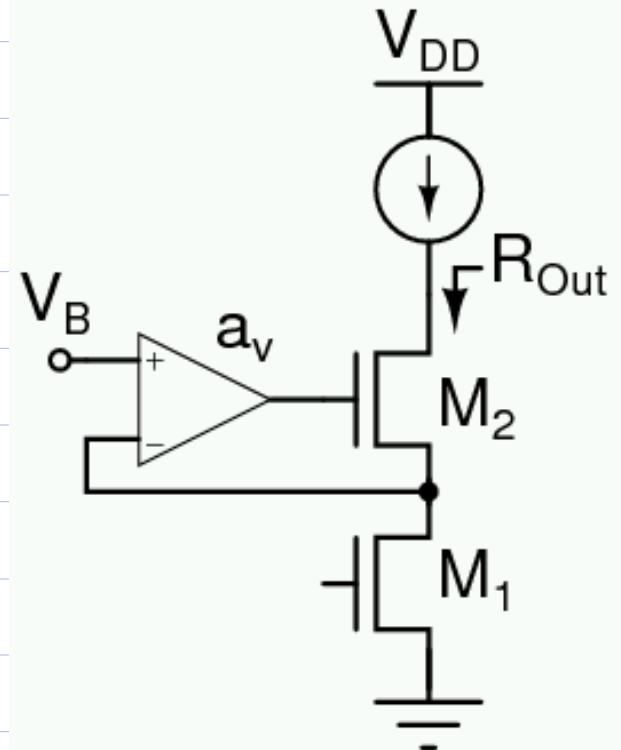
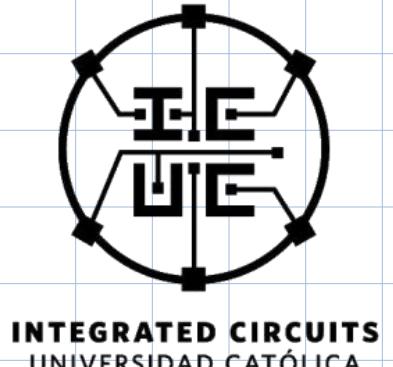
- Tal vez es posible lograr el mismo efecto mediante realimentación...

# Supercascodo, cascodo activo o gain booster

$$R_{out}(\sin a_v) = g_m 2 r_{o2} r_{o1}$$

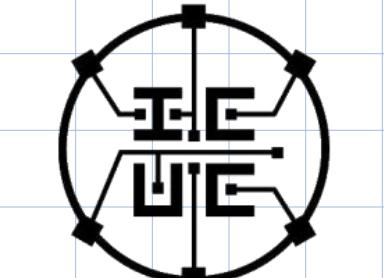
$$R_{out}(\text{con } a_v) = g_m 2 r_{o2} r_{o1} \cdot (1 + a_v)$$

$$A_v = g_m 1 g_m 2 r_{o1} r_{o2} (1 + a_v)$$

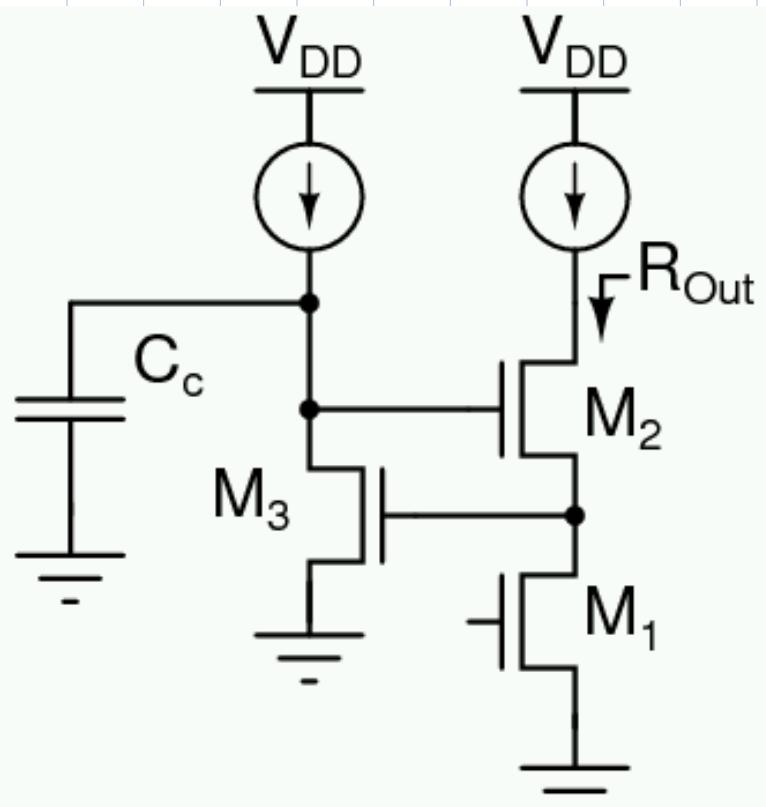


# Implementación práctica del gain booster

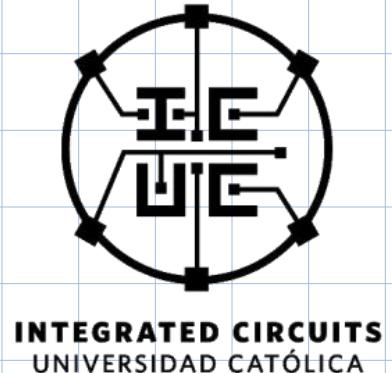
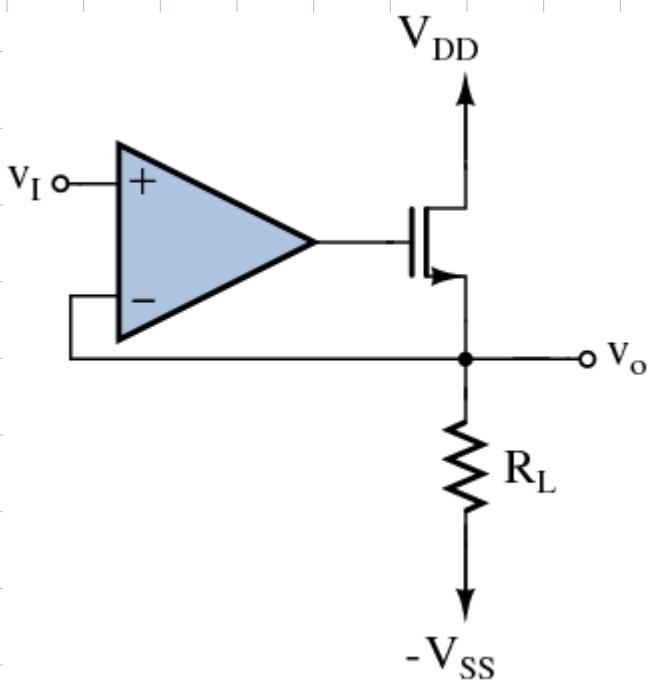
- Podemos usar una simple etapa CS como amplificador auxiliar
  - Desventaja: reduce el voltaje disponible
- Hay muchas otras implementaciones más avanzadas
  - Ejemplo: un cascodo plegado totalmente diferencial puede servir como amplificador auxiliar



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



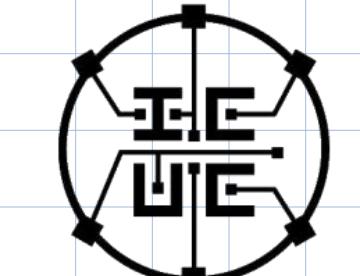
# Seguidor de fuente mejorado: CD con realimentación



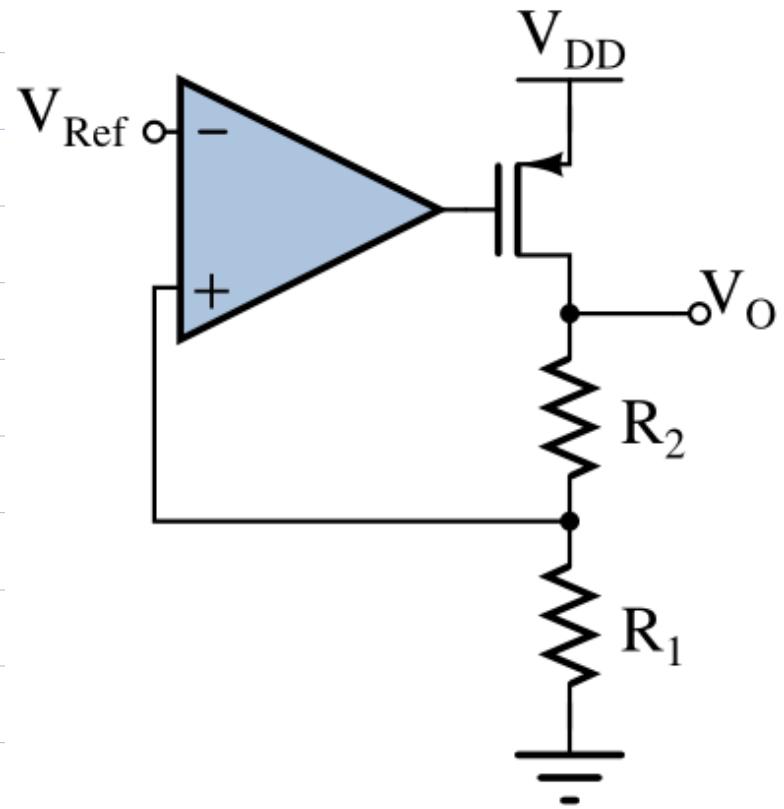
Puede ser usado para regular voltaje

# LDO

- Esto no es un seguidor de fuente
- ¿Realimentación positiva o negativa?
- ¿MOSFET en región activa o en triodo?

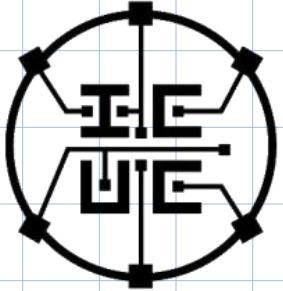


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA





4.22



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# MOSFET como interruptor

Dependencias:

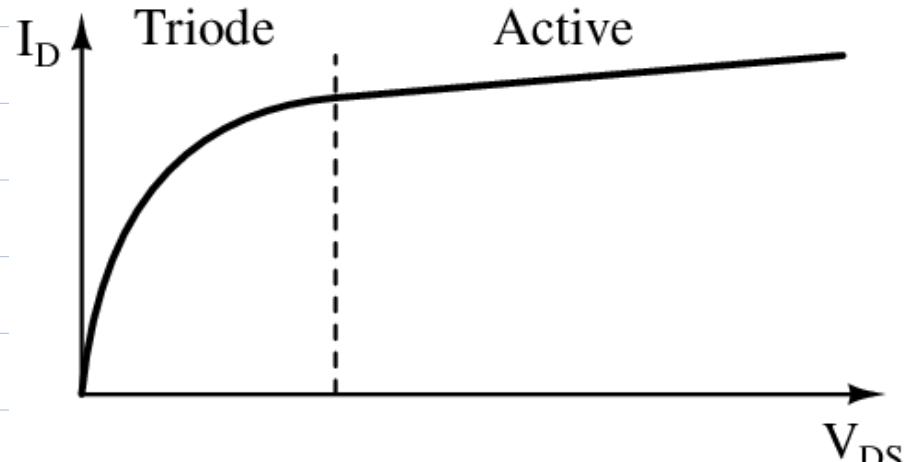
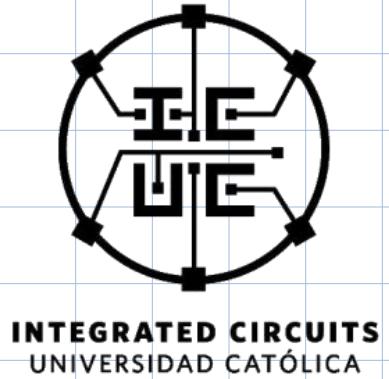
- 4.04 El MOSFET en región de triodo

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

# Introducción

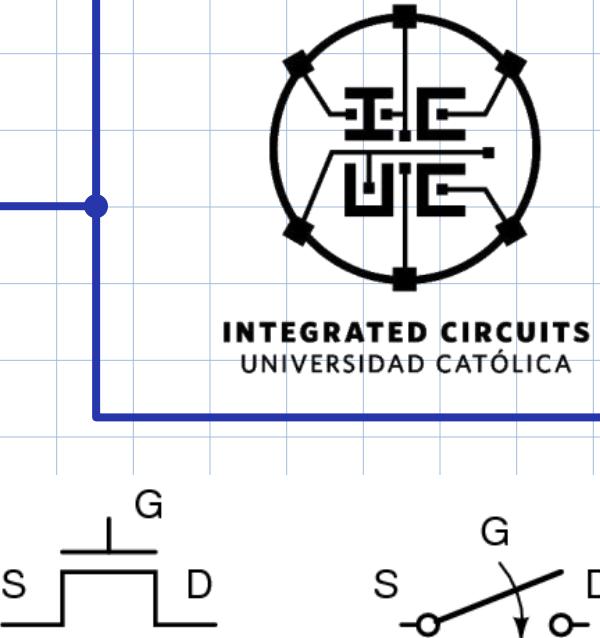
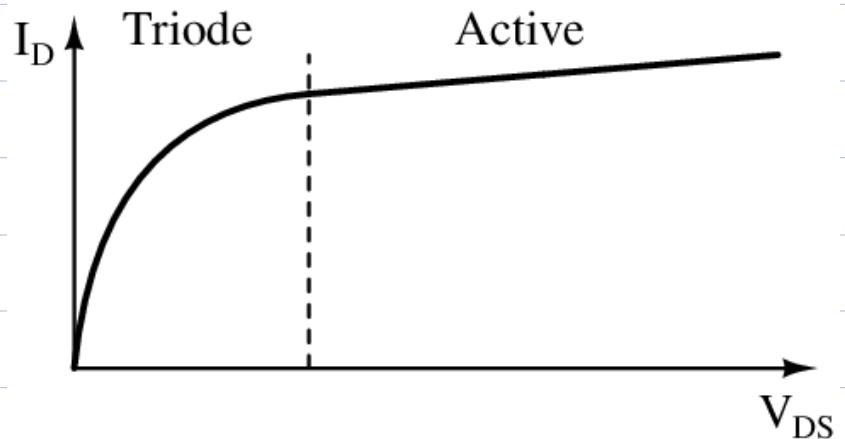
- Además de la región activa, el MOSFET puede operar en triodo y en corte
  - $|V_{GS}|$  alto: deja pasar mucha corriente (cerrado)
  - $|V_{GS}|$  bajo: no deja pasar corriente (abierto)
- La altísima resistencia de entrada de un MOSFET es ideal para conexiones en cascada
  - cada etapa maneja una carga puramente capacitiva
- Consecuentemente los MOSFETs son ampliamente utilizados
  - como interruptores (commutadores, switches),
  - y en circuitos digitales (de hecho, su principal uso)



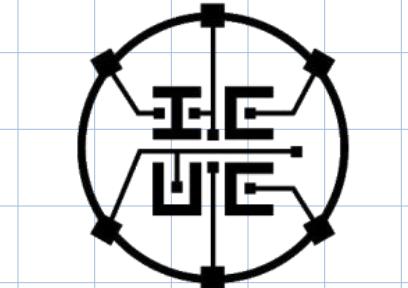
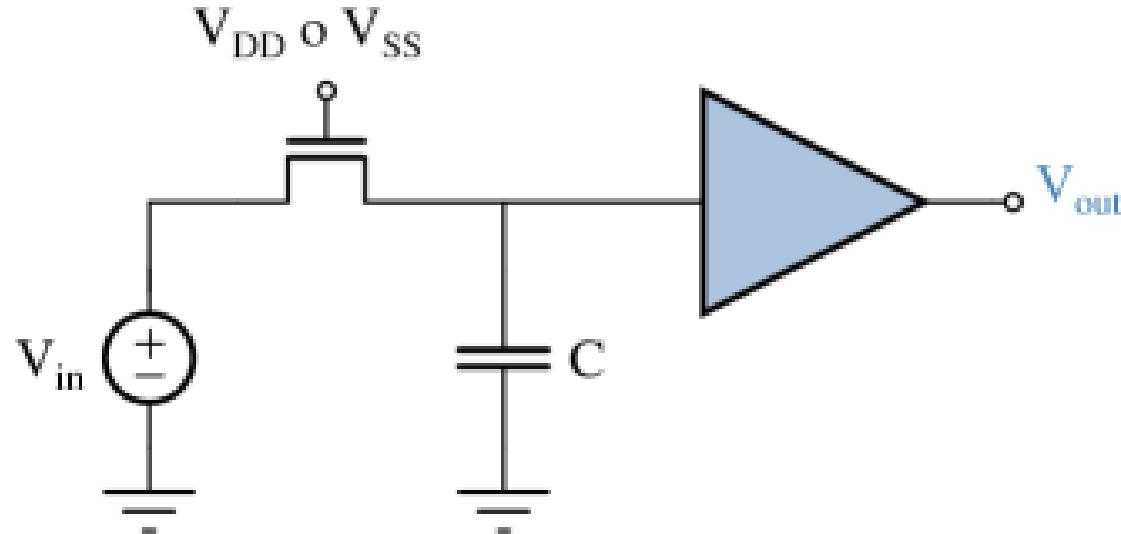
# El MOSFET como interruptor

- Conexiones
  - D y S: terminales del interruptor
  - G: terminal de control
- Operación: en corte ( $I_{DS} = 0$ ) y triodo ( $V_{DS} \approx 0$ )

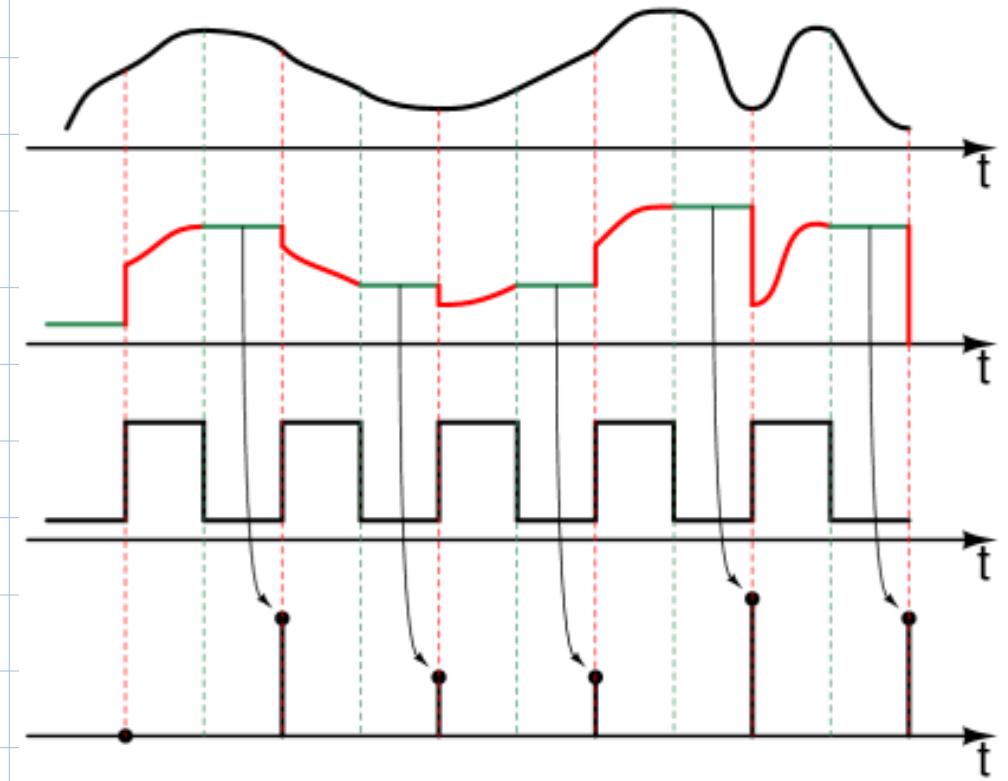
Cálculo de  $R_{DS}$  en función de  $V_{GS}$ :



# Ejemplo: *sample & hold* sencillo



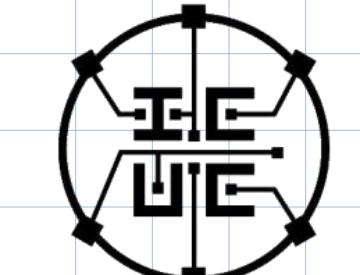
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



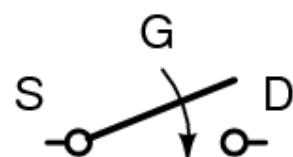
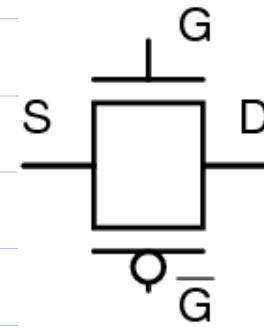
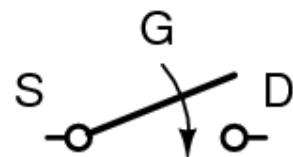
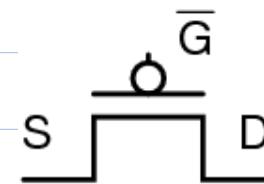
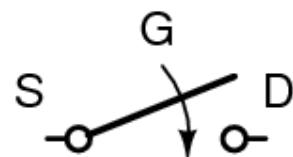
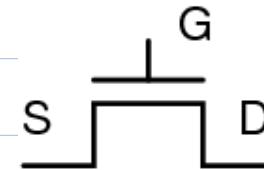
¿Cuál es el máximo voltaje de entrada que admite este circuito?

# Interruptores NMOS, PMOS, y CMOS (compuerta de transmisión)

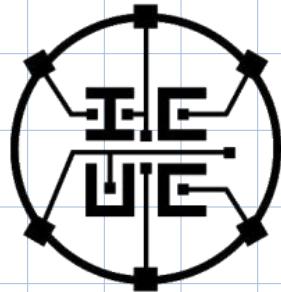
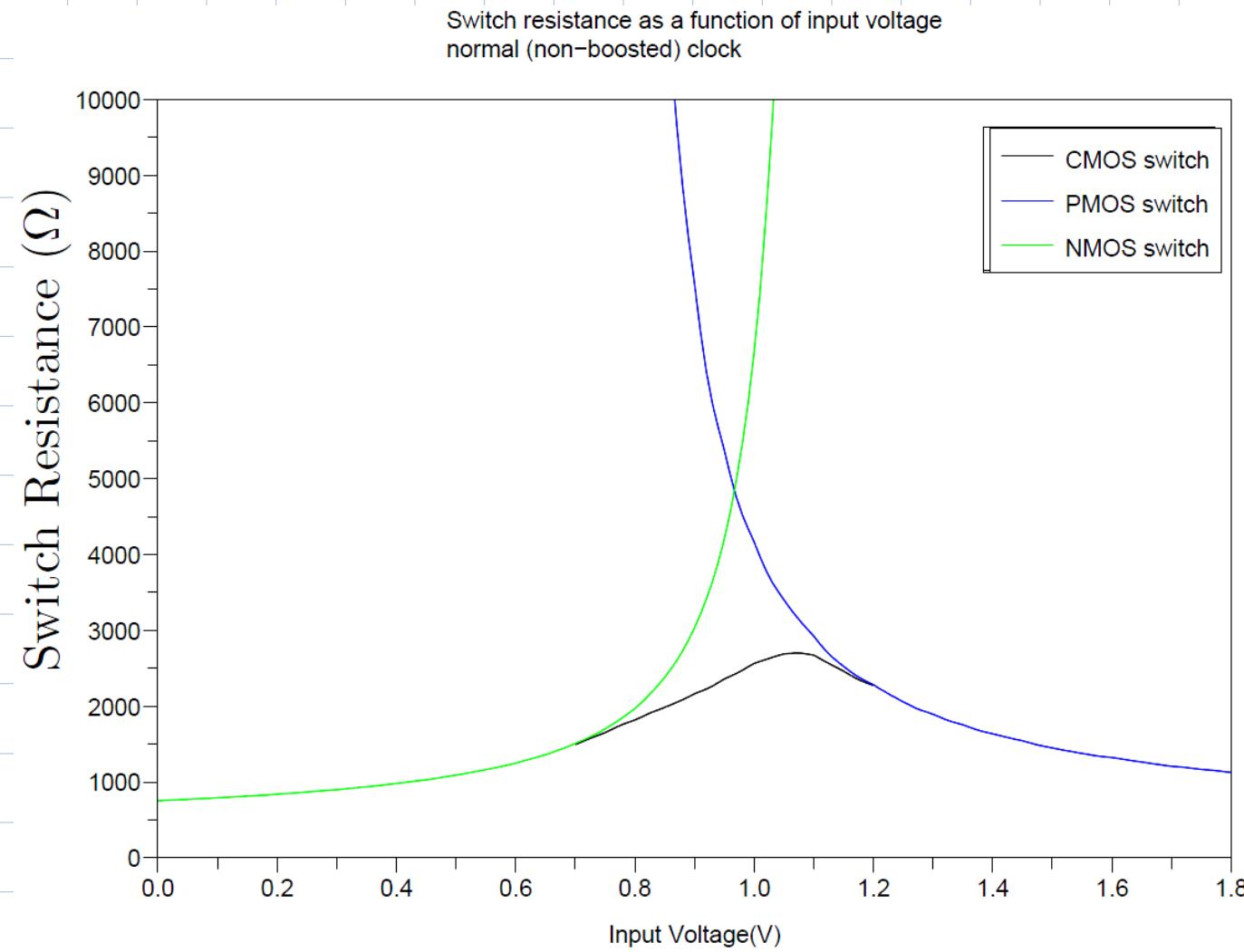
- Suponga que  $V_G$  puede ser  $V_{DD}$  o  $V_{SS}$ ; entonces
  - interruptor NMOS funciona bien cuando  $V_S$  o  $V_D$  es bajo
  - interruptor PMOS funciona bien cuando  $V_S$  o  $V_D$  es alto
  - interruptor CMOS cubre todo el rango
- **¿Qué sucede si el voltaje del nodo a conmutar sobrepasa los rieles  $V_{DD}$  o  $V_{SS}$ ?**



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

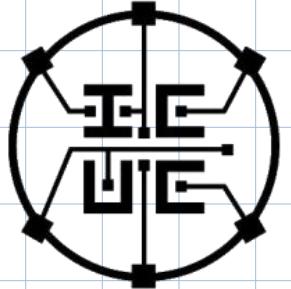


# $R_{DS}$ vs. voltaje de entrada



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

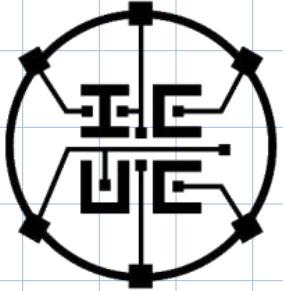
# Ejemplo: encendiendo un motor



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



4.23



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El inversor lógico y otras compuertas

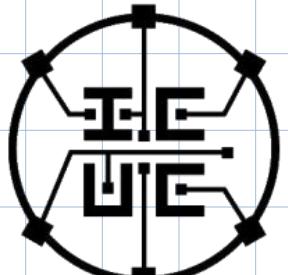
Dependencias:

- 4.22 MOSFET como interruptor

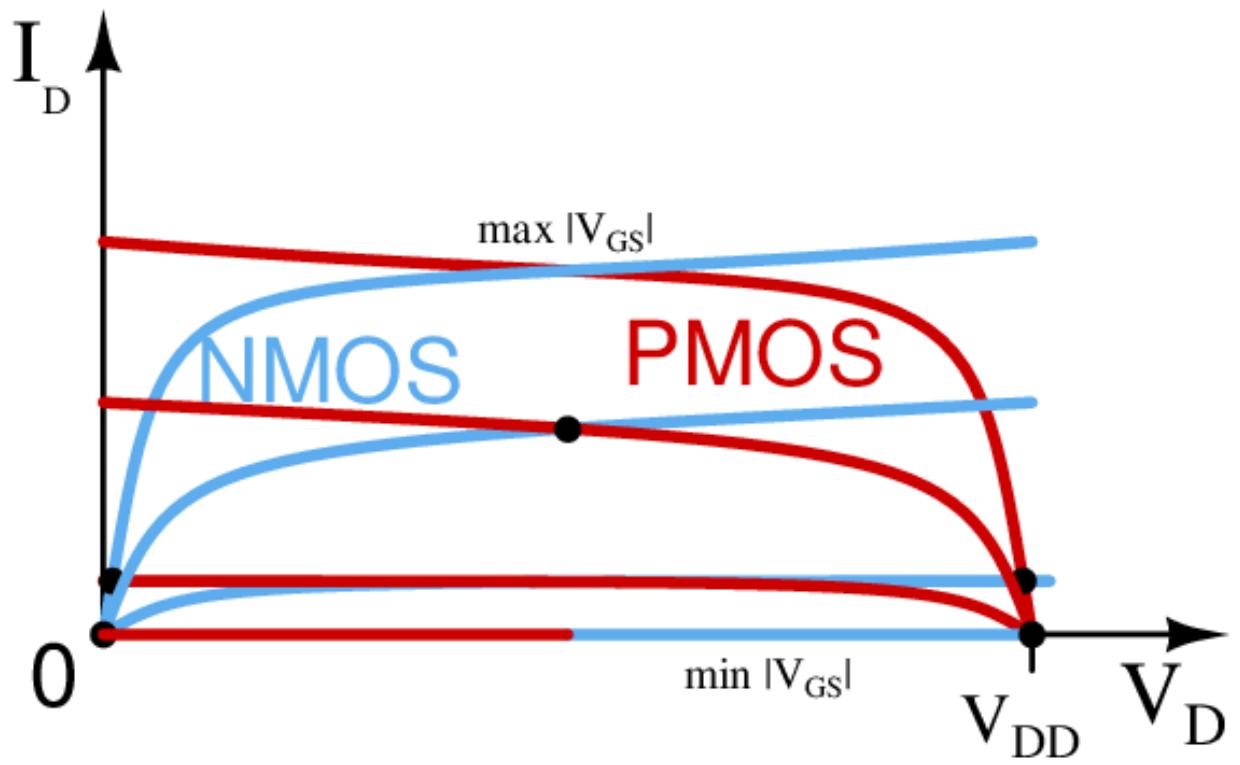
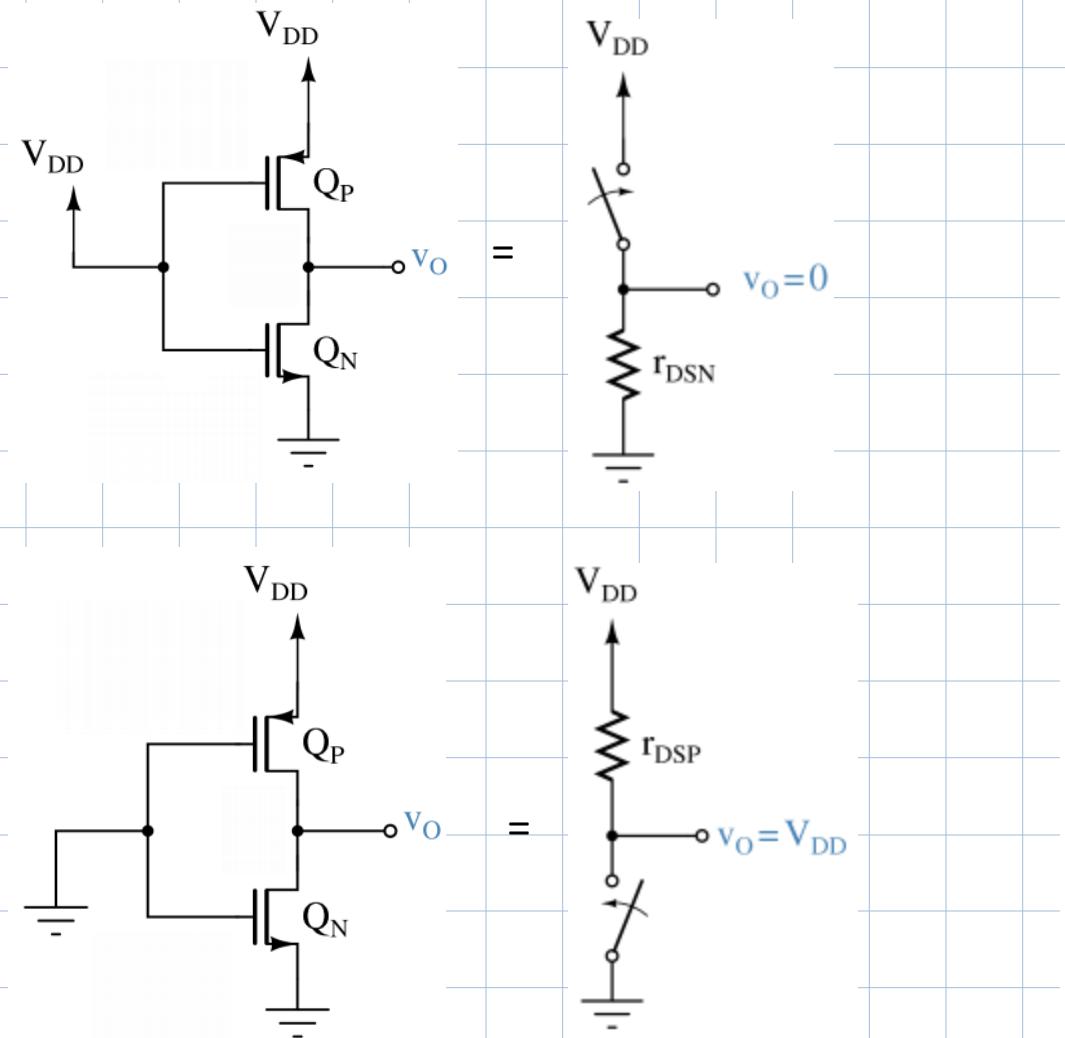
[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

## Electrónica en cápsulas

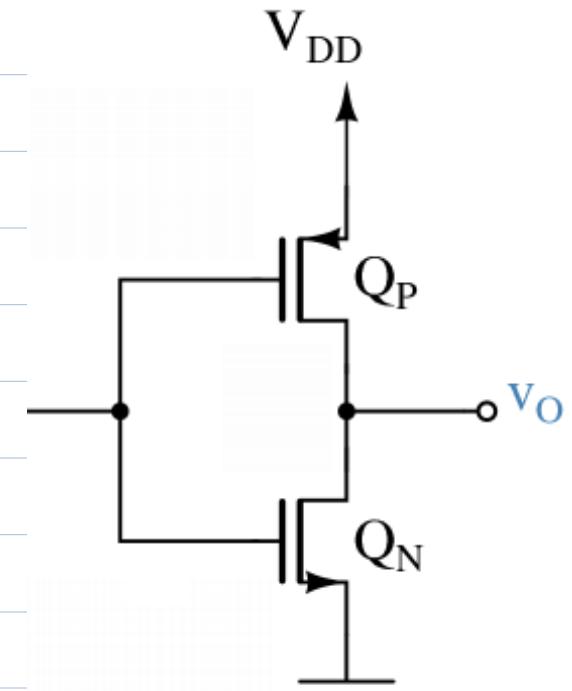
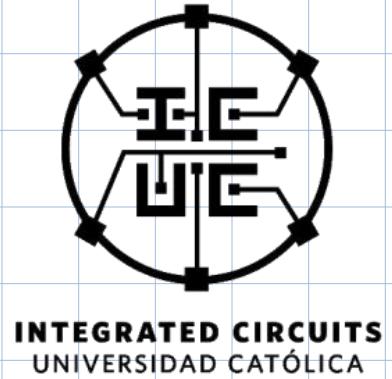
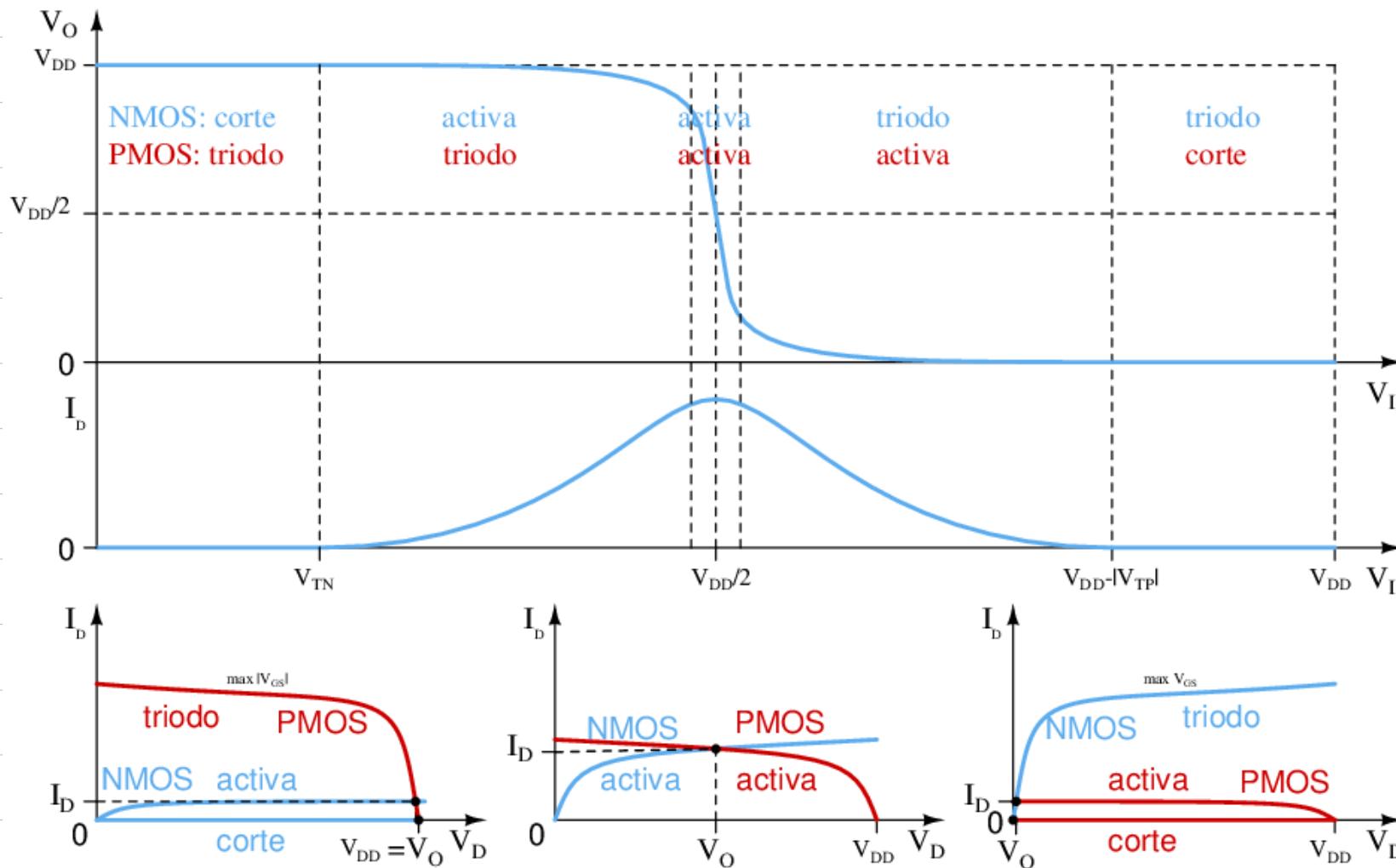
# Introducción



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



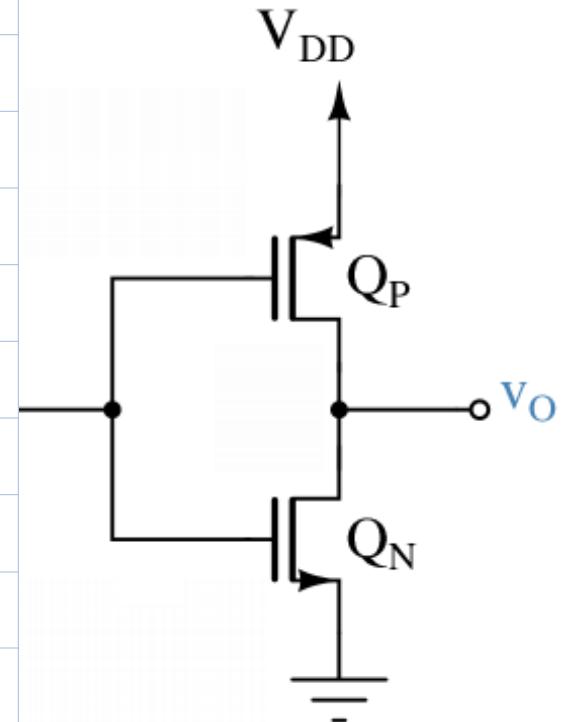
# Curva característica y consumo estático de corriente



**¿Cuál es el consumo estático de un conversor lógico?**

# Algunas conclusiones

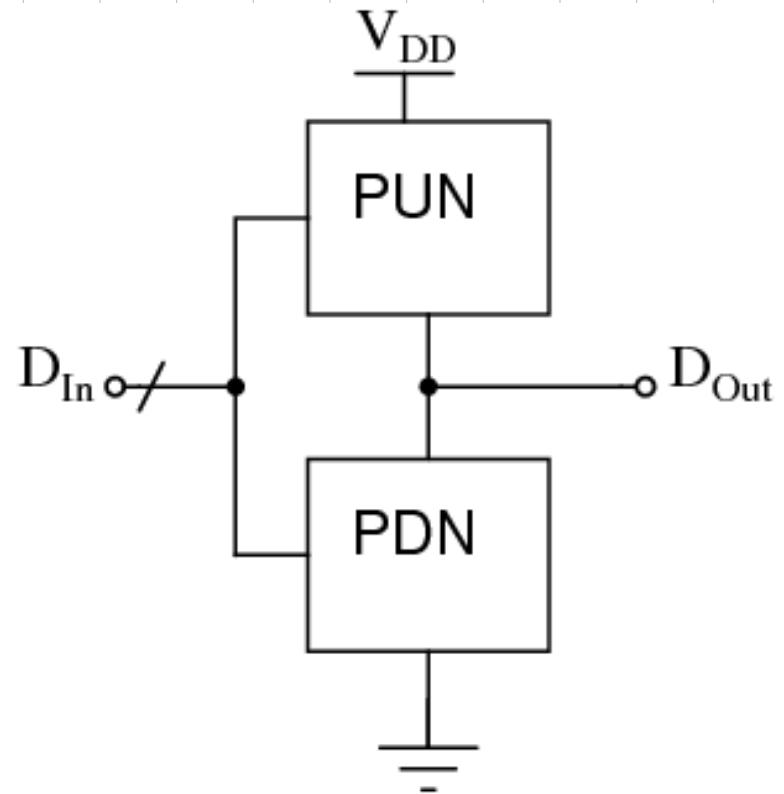
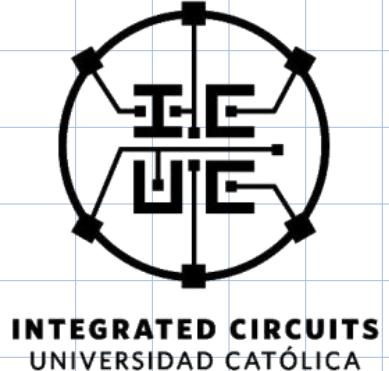
- El inversor lógico conecta su salida a alguno de los rieles de alimentación, en función de la entrada
  - La conexión en cada caso es realizada mediante MOSFETs operando en triodo
- Idealmente **sólo una** de las conexiones (a  $V_{DD}$  o a tierra) debe estar activa
  - De otro modo se produce un cortocircuito y consume mucha corriente
- Tal vez es posible crear circuitos más complejos que conecten su salida a  $V_{DD}$  o a tierra en función de la entrada digital...



# Compuertas lógicas

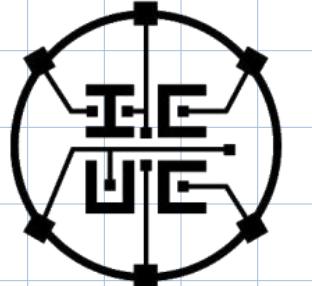
Idea central:

- Usar MOSFETs como interruptores
- Conectar la salida a  $V_{DD}$  y a tierra mediante dos redes de interruptores (PUN y PDN)
- Conmutar la salida **sólo a uno de los rieles**, según sean las entradas
  - Corriente es idealmente nula
  - Nunca encender PUN y PDN al mismo tiempo



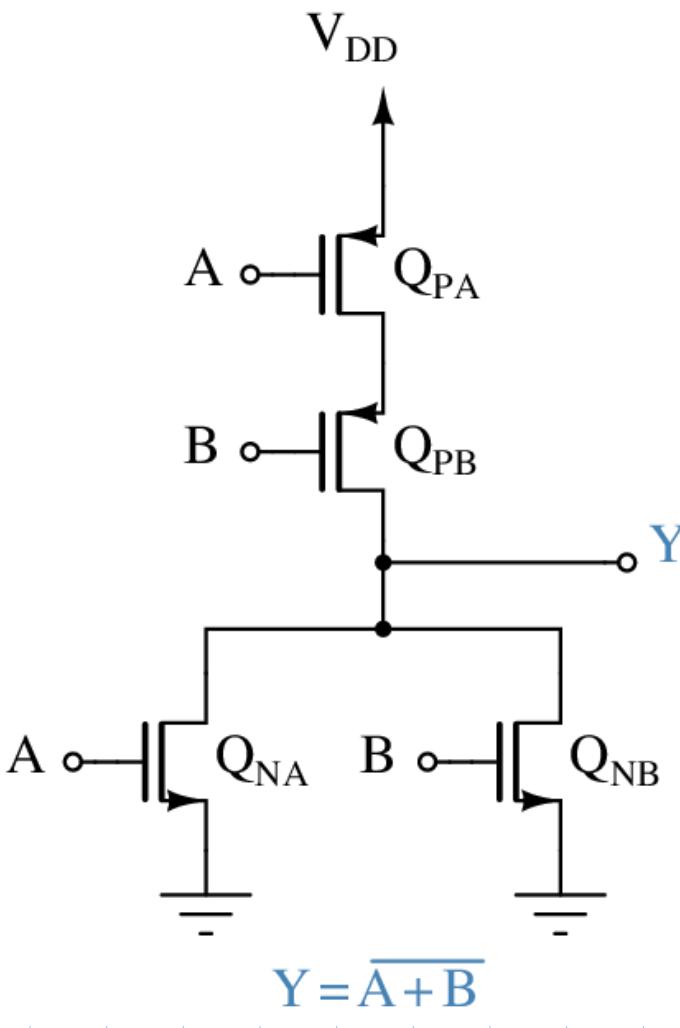
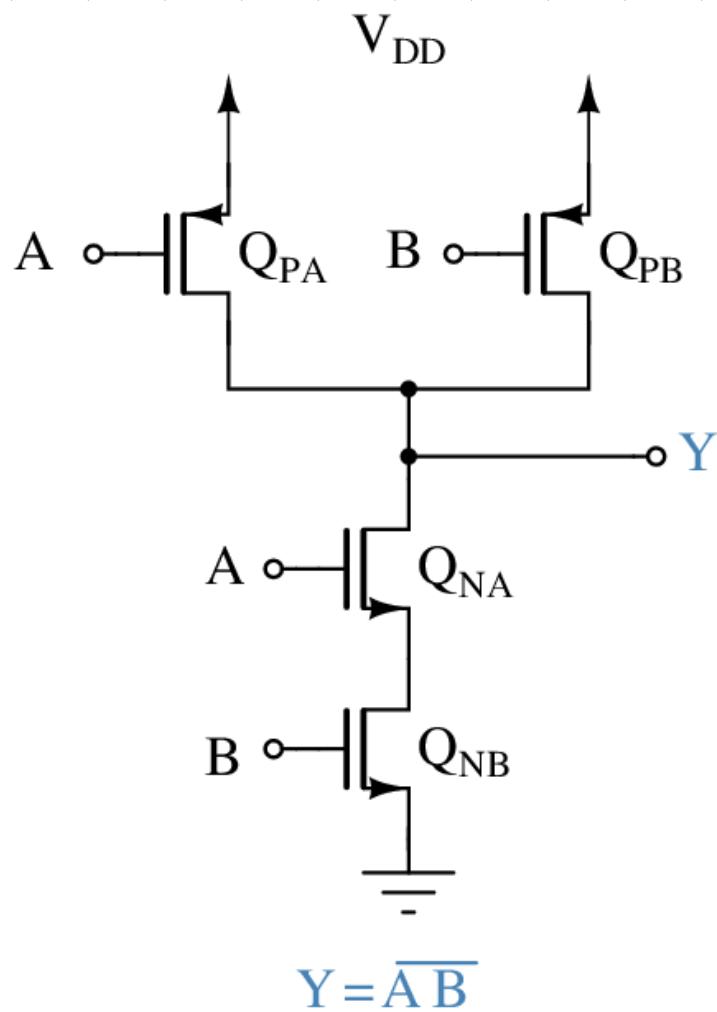
# Compuertas lógicas: síntesis de la PDN y de la PUN

1. La PDN puede ser sintetizada expresando  $Y_b$  como una función de las variables no complementadas; si aparecen variables complementadas, éstas deben ser invertidas.
2. La PUN puede ser sintetizada expresando  $Y$  como una función de las variables complementadas, y aplicando dichas variables a las compuertas de los transistores PMOS; si aparecen variables no complementadas en la expresión, éstas deben ser invertidas.
3. La PDN puede ser obtenida a partir de la PUN (y viceversa) utilizando la propiedad de dualidad



**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Ejemplos

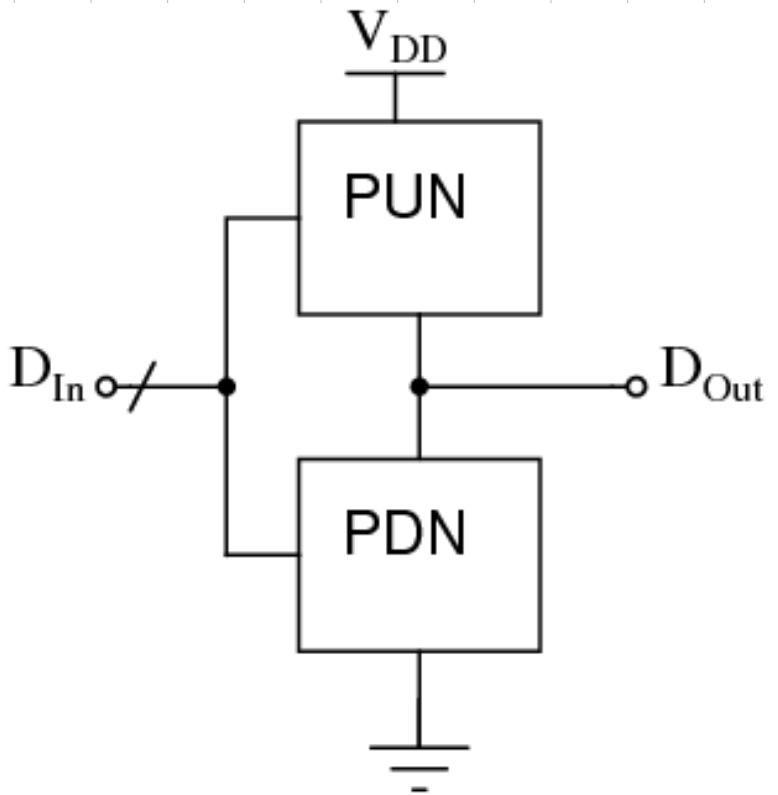
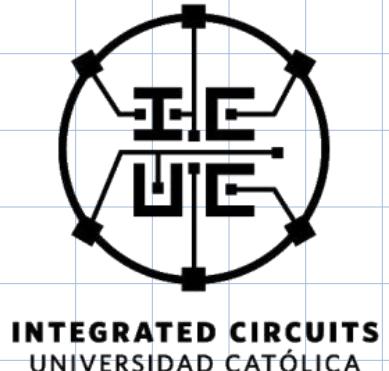


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

¿Cómo asignamos el tamaño  
a los transistores en las  
compuertas lógicas?

# Consumo digital

- Acabamos de decir que un circuito digital no consume **potencia estática**
  - Esto no es cierto, en la práctica las corrientes de fuga son relevantes en circuitos integrados modernos... pero asumamos por un momento que son nulas
- **¿Por qué los circuitos digitales consumen potencia, y cómo puedo calcularla?**



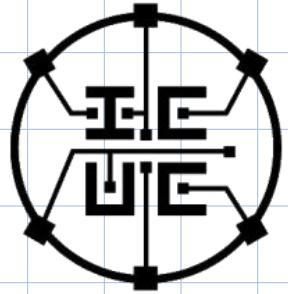


4.24

# Capacitancias de los MOSFETs

Dependencias:

- 4.03 El MOSFET como capacitor



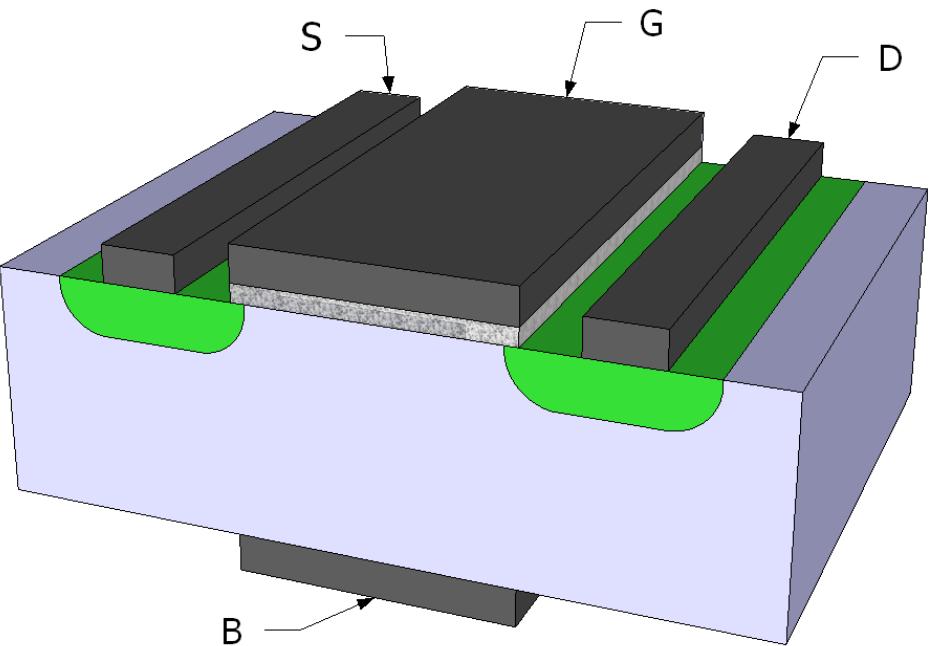
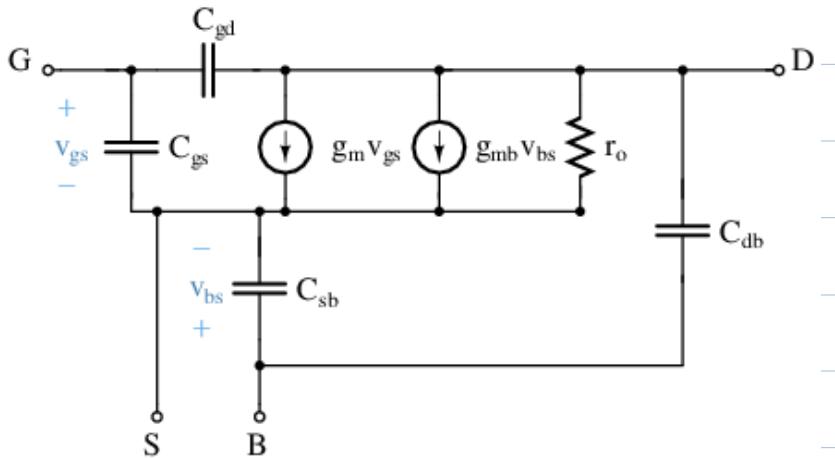
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

# Capacitancias de los MOSFETs

- La operación del MOSFET se ve limitada a alta frecuencia debido a sus capacitancias internas
  - Efecto capacitivo de compuerta:  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$  y  $C_{gb}$  (cap. intrínsecas)
  - Capacitancias de traslape  $C_{oi}$  (extrínseca)
  - Capacitancias de las uniones PN (extrínsecas)
- Modelo para alta frecuencia, pequeña señal:



# Modelo

Capacitancia

Corte

Triodo

Activa

$C_{gs}$

$C_{ol}$

$\frac{1}{2} WLC_{ox} + C_{ol}$

$\frac{2}{3} WLC_{ox} + C_{ol}$

$C_{gd}$

$C_{ol}$

$\frac{1}{2} WLC_{ox} + C_{ol}$

$C_{ol}$

$C_{gb}$

$WLC_{ox} \parallel C_{CB}$

"pequeña"

"pequeña"

$C_{sb}$

$$C_{jsb} = \frac{C_{sb0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{SB}}{V_0}}}$$

$$C_{jsb} + C_{CB}/2$$

$$C_{jsb} + \frac{2}{3} C_{CB}$$

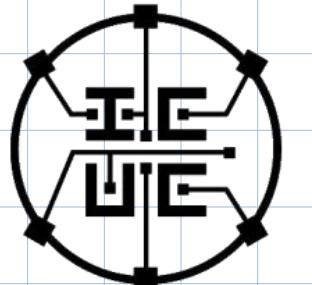
$C_{db}$

$$C_{jdb} = \frac{C_{db0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{DB}}{V_0}}}$$

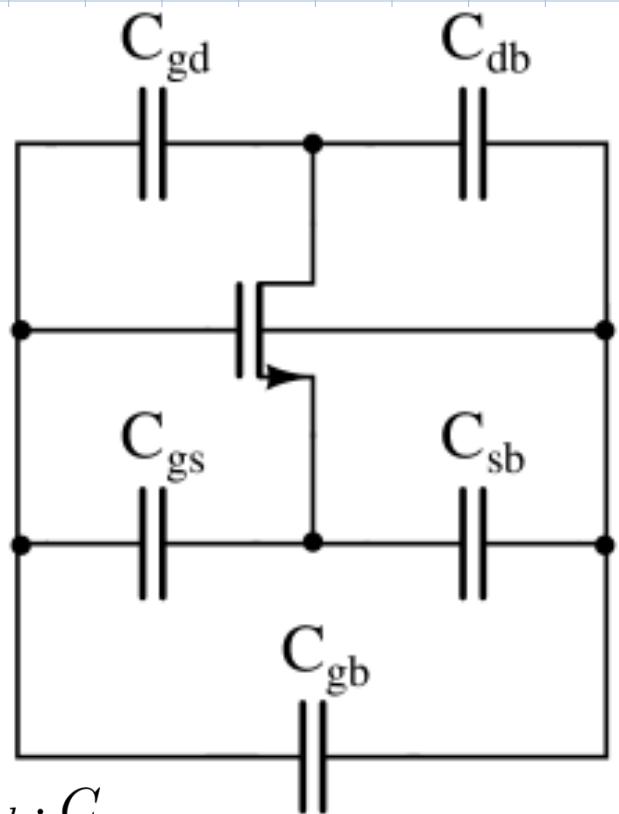
$$C_{jdb} + C_{CB}/2$$

$$C_{jdb}$$

$$C_{ol} = W \cdot L_{ol} \cdot C_{ox}$$

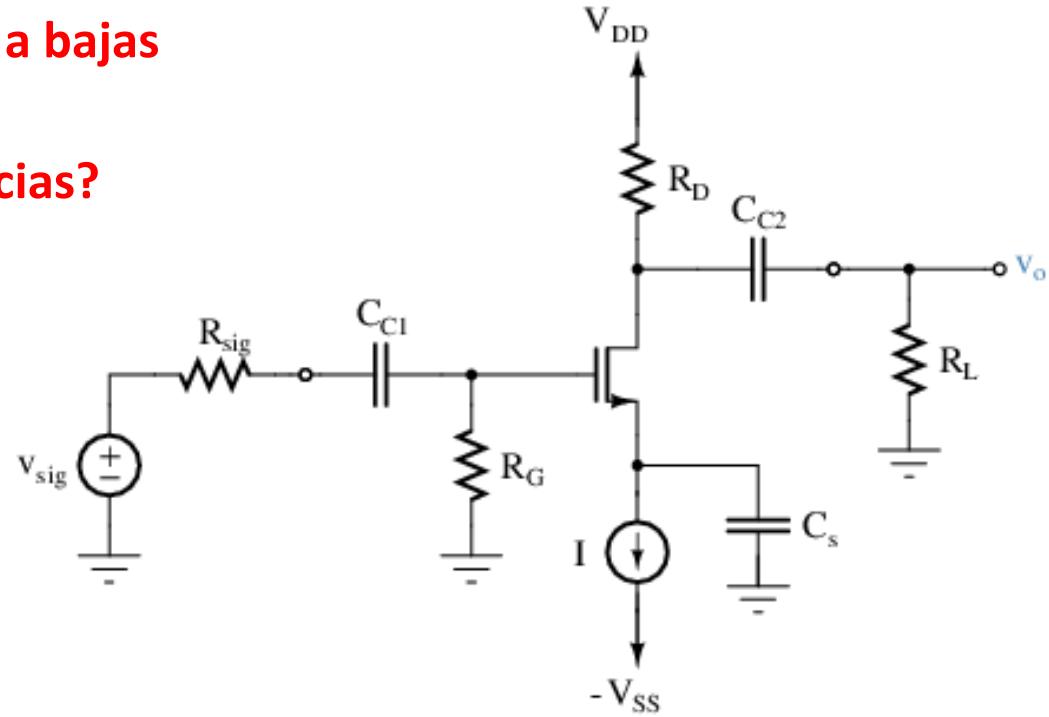
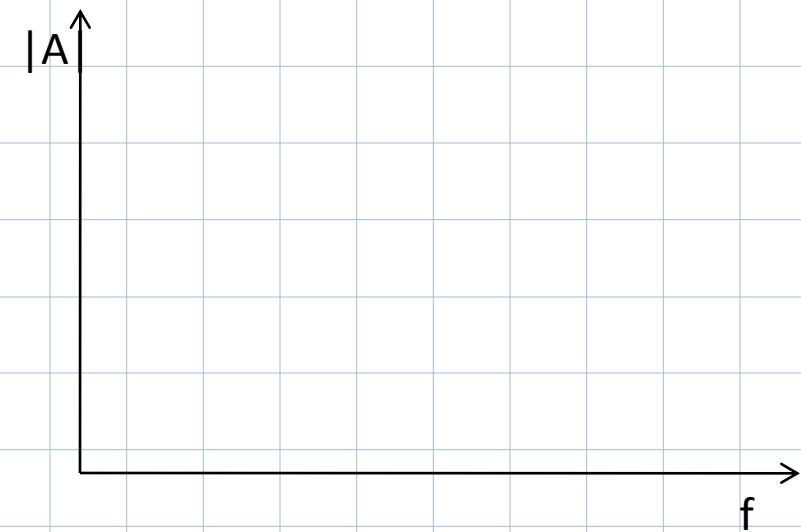
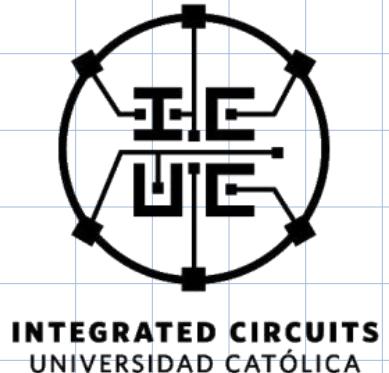


INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA



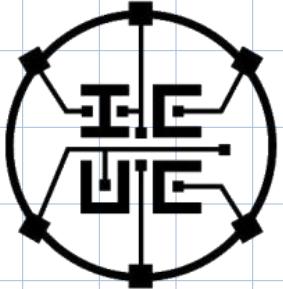
# Respuesta en frecuencia

- Para calcular la respuesta en frecuencia, es necesario obtener la función de transferencia del circuito
  - En general no es fácil...
  - Peor aún en el caso de un amplificador de varios transistores...
- Intuitivamente, **¿qué elementos limitan la ganancia a bajas frecuencias?**
- **¿Qué elementos limitan la ganancia a altas frecuencias?**





4.25



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MOSFET de agotamiento, el JFET y el MESFET

Dependencias:

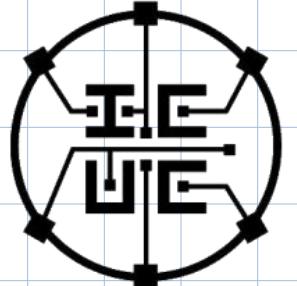
- 4.02 CMOS y circuitos integrados

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas

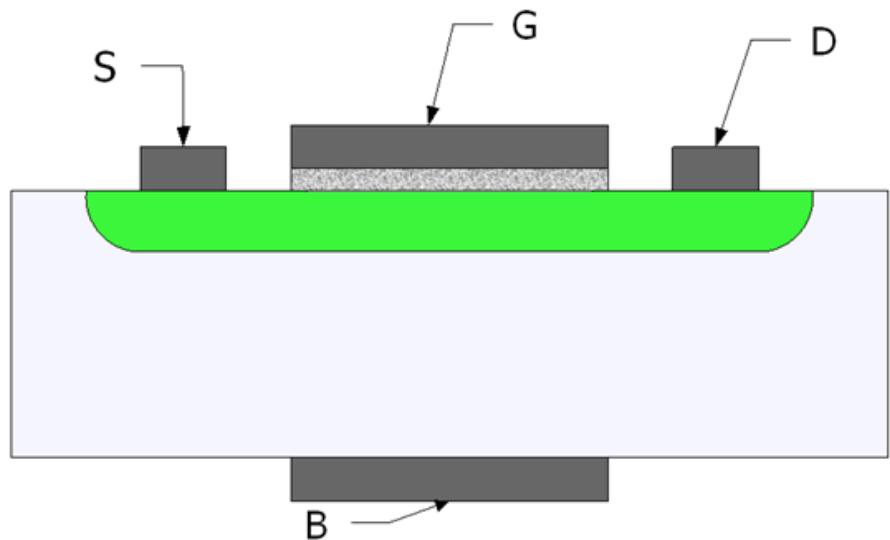
# Otros FETs

- Hemos aprendido bastante acerca del FET más utilizado en la actualidad
- Pero existen otros FETs... hoy veremos un par de ellos en forma descriptiva
  - El MOSFET de agotamiento era útil cuando no había CMOS
  - El JFET sigue siendo útil en circuitos de RF
  - El MESFET o MEtal-Semiconductor FET es más rápido (y caro) que MOSFETs y JFETs



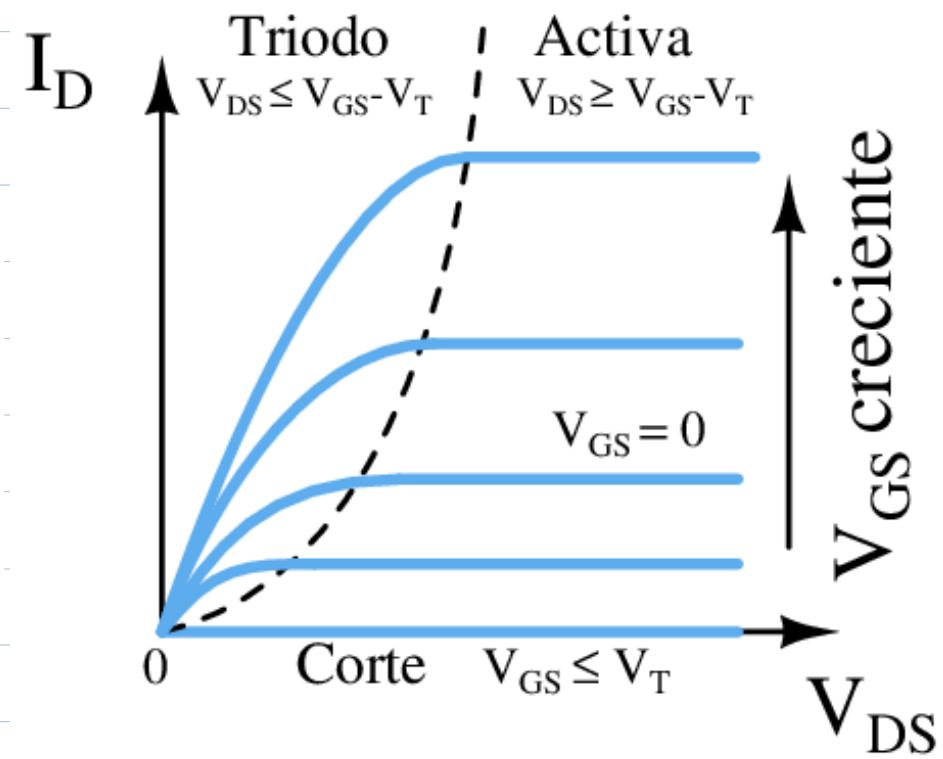
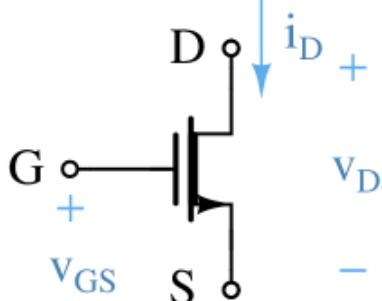
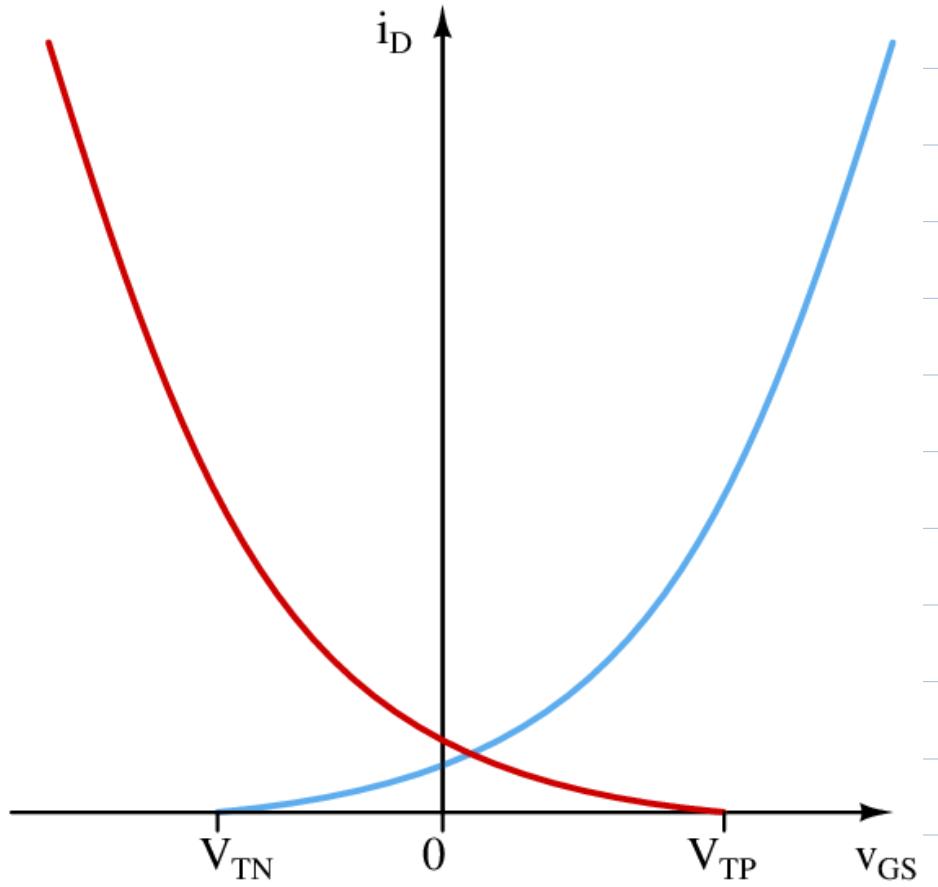
# El MOSFET de agotamiento

- Parecido al MOSFET de enriquecimiento, pero con un canal real, físicamente implantado en el sustrato
- Las curvas características son muy similares a las del MOSFET de enriquecimiento; el modelo es parecido
  - pero en este caso, el voltaje  $V_T$  es de signo contrario
- Existe circulación de corriente para  $V_{GS}=0$ 
  - Esta corriente se denomina  $I_{DSS}$



# El MOSFET de agotamiento:

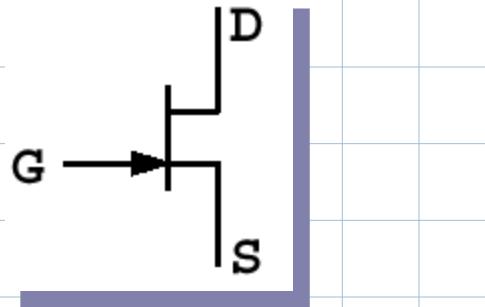
$$V_{TN} < 0, V_{TP} > 0$$



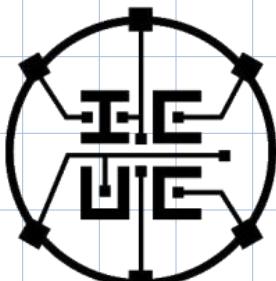
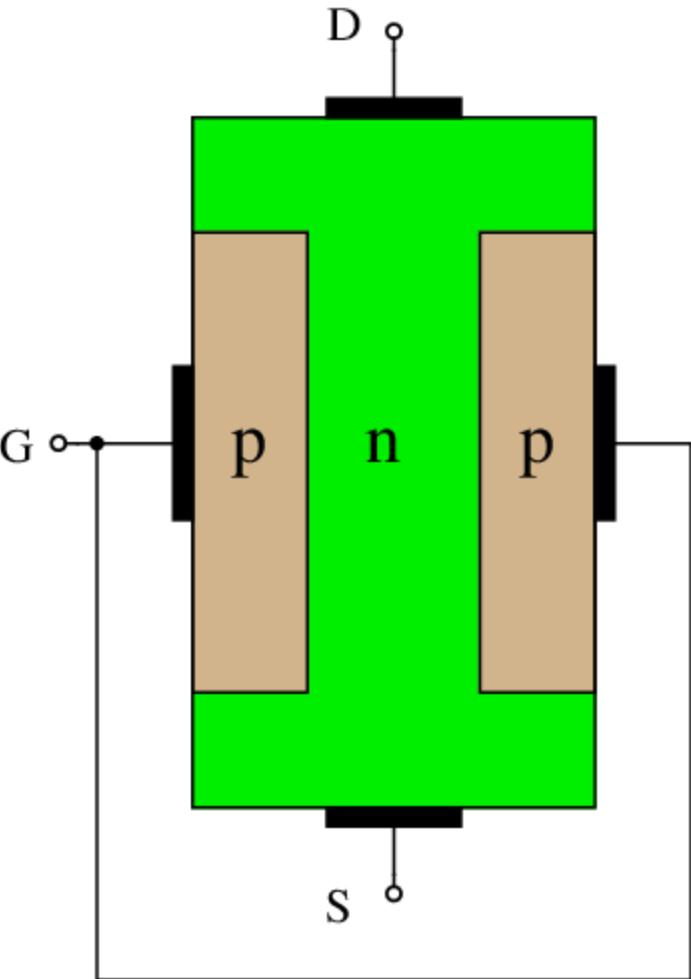
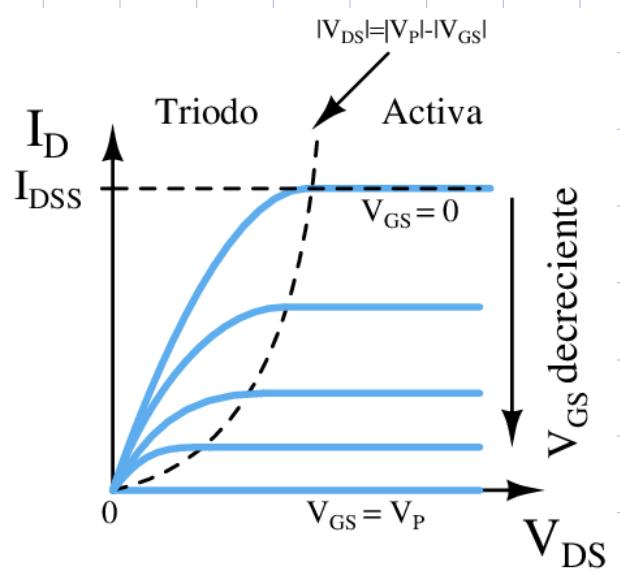
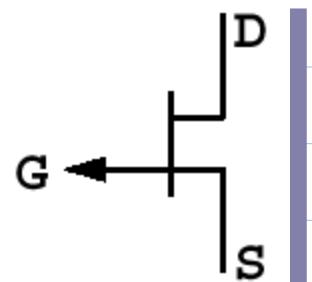
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El JFET o FET de unión

Canal N



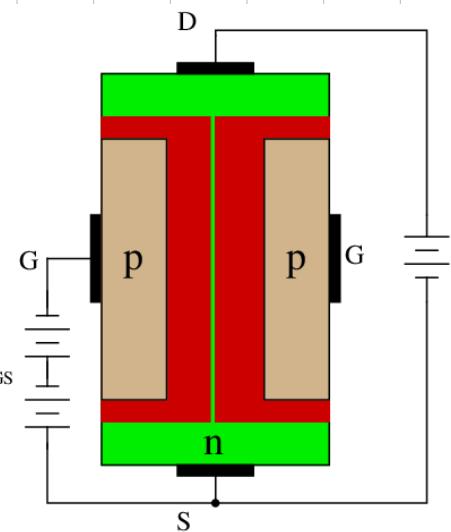
Canal P



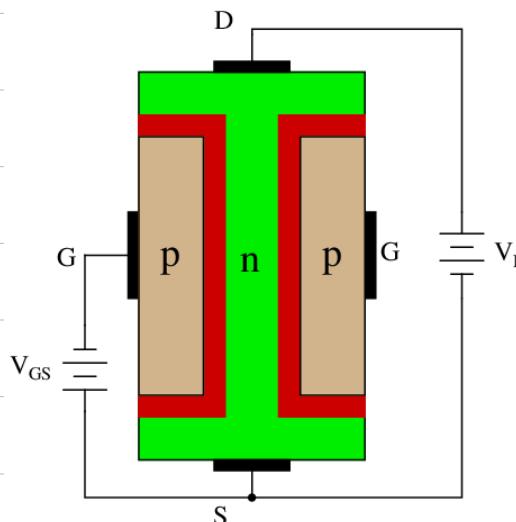
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# Zonas de operación del JFET

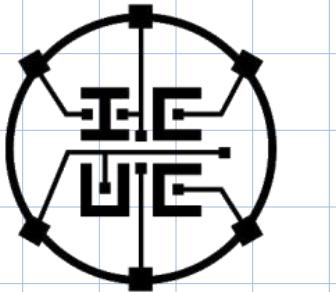
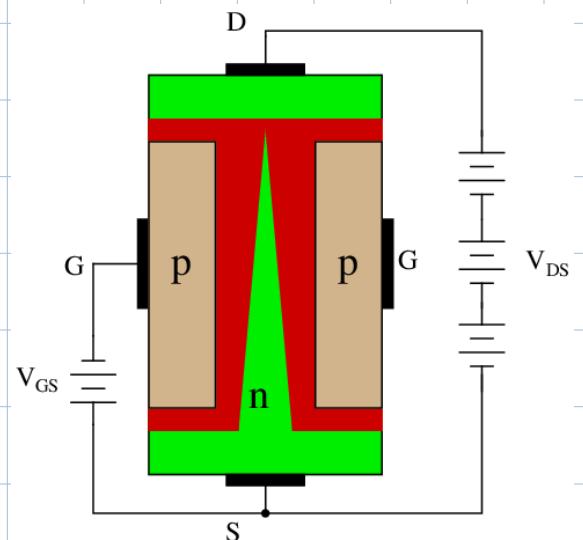
Estrangulamiento:  
sin conducción



Triodo



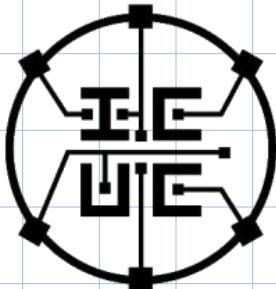
Saturación



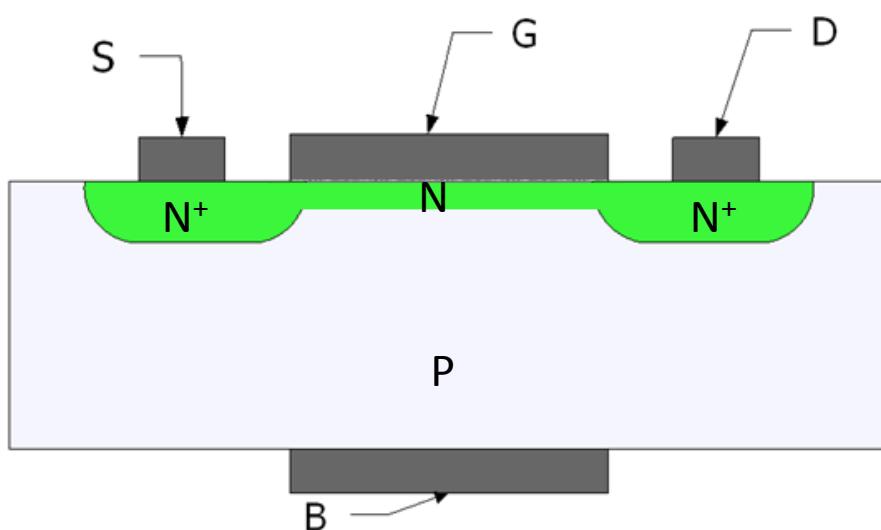
**INTEGRATED CIRCUITS**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

# El MESFET

El **MESFET** o MEtal-Semiconductor FET tiene un principio de operación muy similar al del JFET, pero en lugar de unión PN, utiliza una unión Schottky (metal-semiconductor)



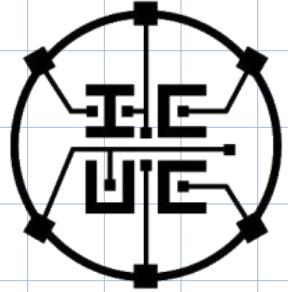
INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA





4.25

El MOSFET de agotamiento, el  
JFET y el MESFET



INTEGRATED CIRCUITS  
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Gracias por su atención

[angel@uc.cl](mailto:angel@uc.cl)

Electrónica en cápsulas