

Etapas Diferenciales

Leandro Fuentes

lfuentes@fi.uba.ar

Calendario

Capítulo 1: Introducción

- Clase 1: Transistores Bipolar y MOS. Pequeña señal. Circuitos monoetapas
- Clase 2: Cadence - Introducción y Circuitos monoetapas
- Clase 3: Par diferencial. Amplificador diferencial. Implementación básica

Capítulo 2: Respuesta en Frecuencia y Estabilización

- Clase 4: Amplificador operacional: Respuesta en frecuencia, estabilidad. Capacidades asociadas al transistor MOS
- Clase 5: Cadence - Amplificador operacional. Operación en DC, offset sistemático, ganancia
- Clase 6: Estabilización, Miller, cero asociado, compensaciones avanzadas
- Clase 7: Cadence - Amplificador operacional. Respuesta en frecuencia, estabilidad

Calendario

Capítulo 3: Amplificadores Avanzados

- Clase 8: Amplificadores avanzados. Current mirror opamp, cascode, folded amplifier, folded cascode.
- Clase 9: Amplificadores avanzados. Push-pull output, Diff-diff, CMFB
- Clase 10: Cadence - Amplificadores avanzados

Capítulo 4: Ruido y Offset

- Clase 11: Offset
- Clase 12: Ruido
- Clase 13: Cadence - Diseño con offset y ruido

Capítulo 5: Circuitos Auxiliares

- Clase 14: Circuitos auxiliares. Referencias, bandgap, osciladores
- Clases 15 y 16: Extra – Introducción al diseño físico de semiconductores (layout)

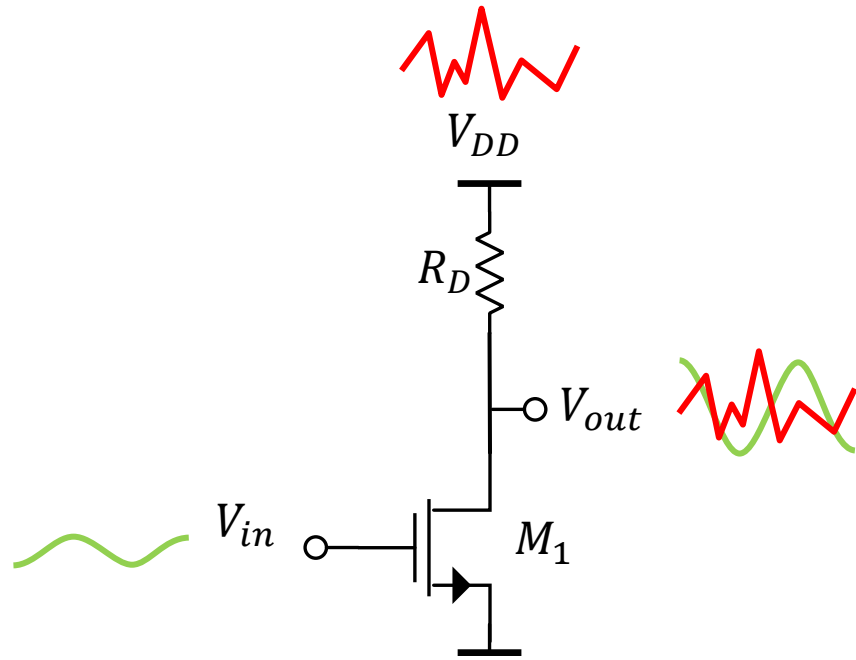
Contenido Clase 3

- Operación diferencial vs single-ended
- Definiciones de modos y ganancias
- Etapas fully-differential de baja ganancia
- Par diferencial con carga espejo (5-OTA)
 - Rango de modo común de entrada (ICMR)
 - Rango de salida (Output swing)
 - Análisis de pequeña señal
- Amplificadores operacionales
 - 2-stage OTA (7-OTA)

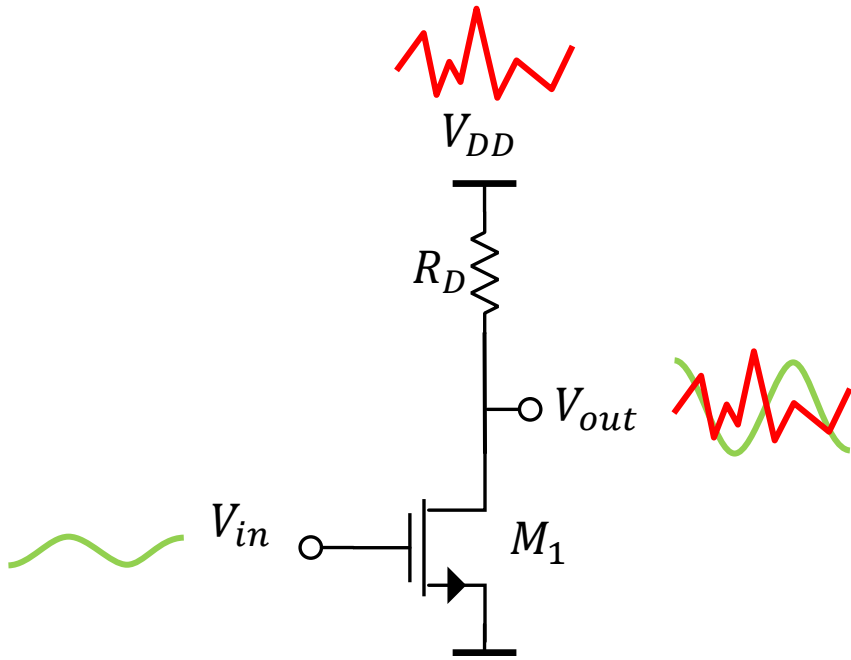
Contenido Clase 3

- Operación diferencial vs single-ended
- Definiciones de modos y ganancias
- Etapas fully-differential de baja ganancia
- Par diferencial con carga espejo (5-OTA)
 - Rango de modo común de entrada (ICMR)
 - Rango de salida (Output swing)
 - Análisis de pequeña señal
- Amplificadores operacionales
 - 2-stage OTA (7-OTA)

- Para la siguiente etapa SE, ¿cuál es la ganancia desde V_{DD} hacia V_{out} ? ¿Cómo compara con la ganancia desde V_{in} hacia V_{out} ?

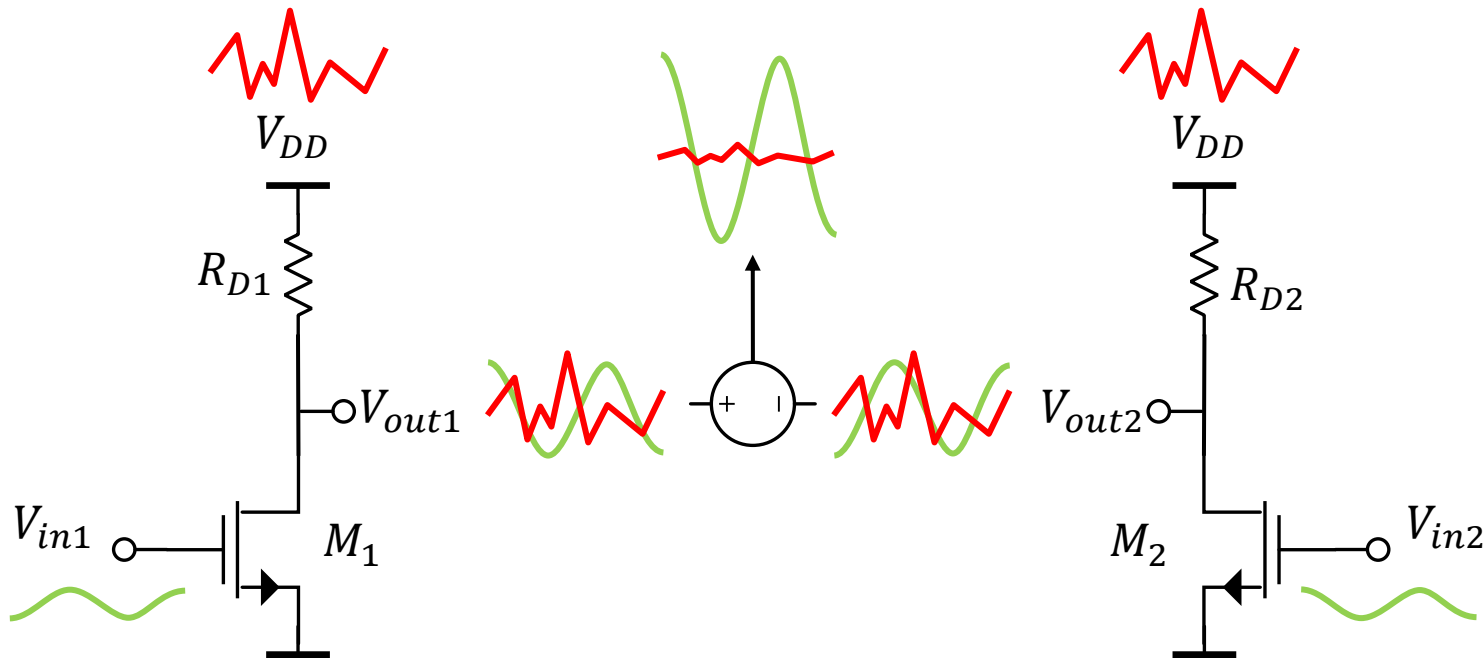


- Para la siguiente etapa SE, ¿cuál es la ganancia desde V_{DD} hacia V_{out} ? ¿Cómo compara con la ganancia desde V_{in} hacia V_{out} ?

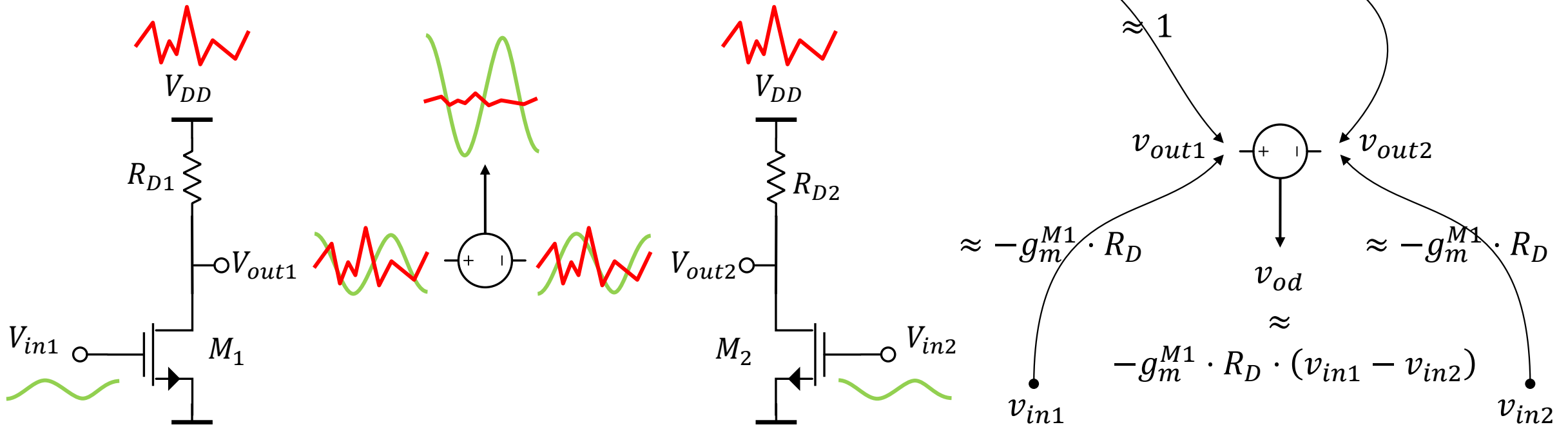


$$\begin{aligned} \frac{v_{out}}{v_{DD}} &\approx 1 \\ \frac{v_{out}}{v_{in}} &\approx -g_m^{M1} \cdot R_D \\ v_{out} &\approx -g_m^{M1} \cdot R_D \cdot v_{in} + v_{DD} \end{aligned}$$

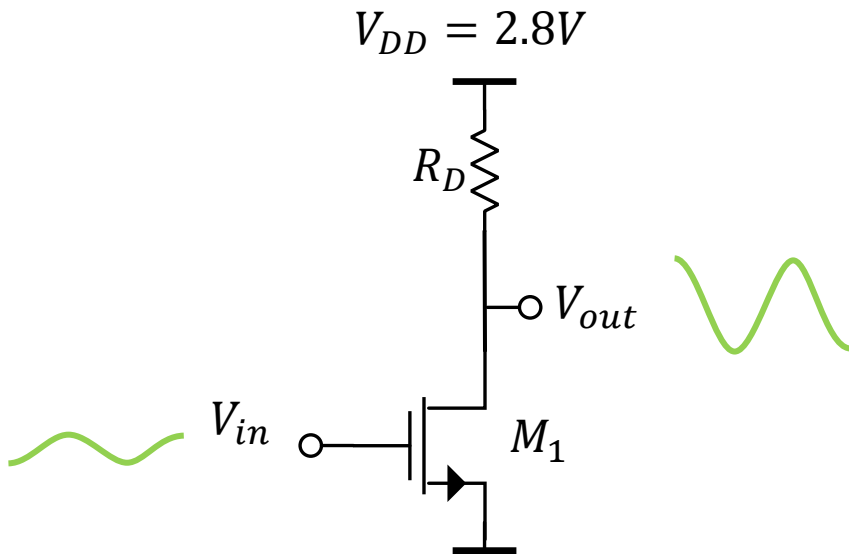
- Para la siguiente etapa DIFF, ¿cuál es la ganancia desde V_{DD} hacia V_{out} ? ¿Cómo compara con la ganancia desde V_{in} hacia V_{out} ?



- Para la siguiente etapa DIFF, ¿cuál es la ganancia desde V_{DD} hacia V_{out} ? ¿Cómo compara con la ganancia desde V_{in} hacia V_{out} ?



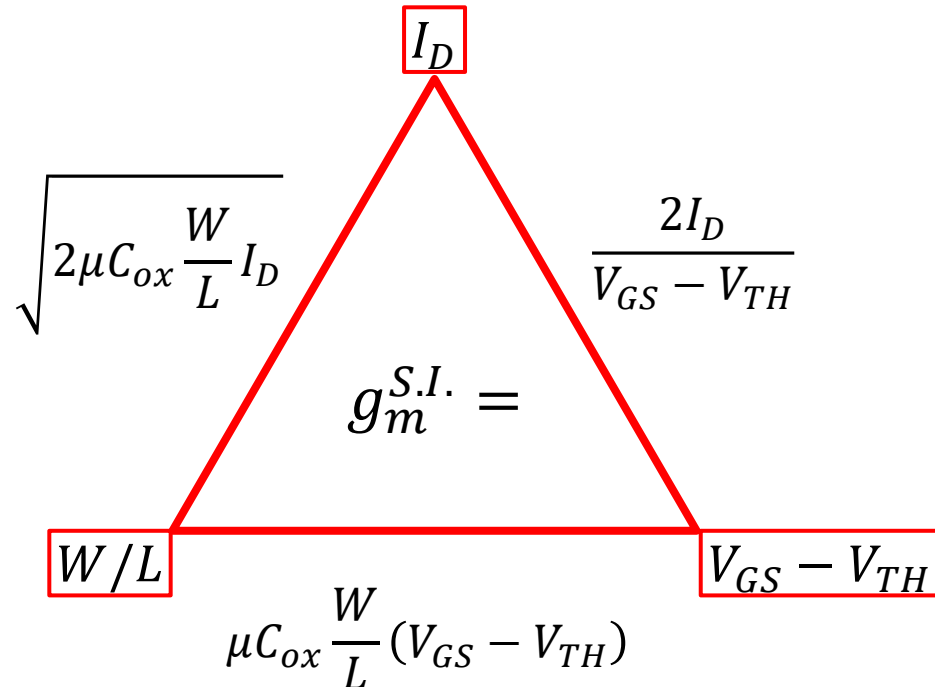
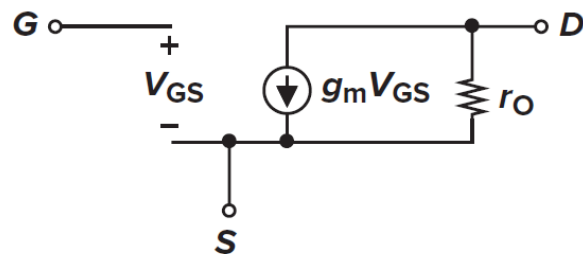
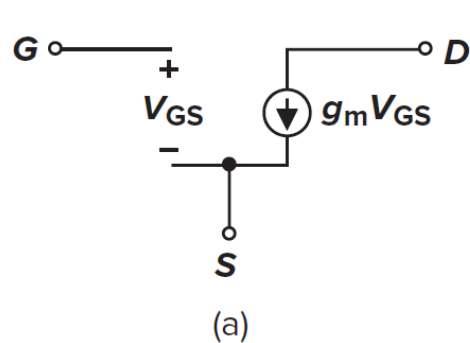
- Ejercicio de la clase 1: para la siguiente etapa CS con carga resistiva, en donde $V_{out}^Q = V_{DD}/2 = 1.4V$, responda:
 - ¿Cuál es la mayor ganancia de tensión posible?
 - ¿Cómo varía el resultado si en lugar de MOS usa BJT?
 - ¿Existe manera de superar el máximo valor hallado?



Cheat-sheet del modelo de pequeña señal

- En strong inversion

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



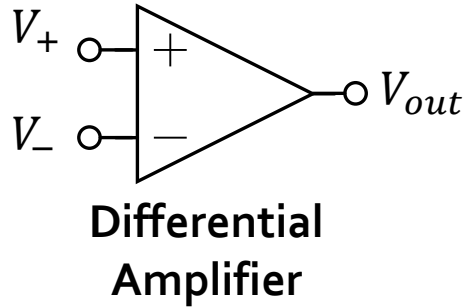
$$g_{ds} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_Q \approx \lambda I_D$$

$$r_o = \frac{1}{g_{ds}} \approx \frac{1}{\lambda I_D} \propto \frac{L}{I_D}$$

Contenido

- Operación diferencial vs single-ended
- Definiciones de ganancias y modos
- Etapas fully-differential de baja ganancia
- Par diferencial con carga espejo (5-OTA)
 - Rango de modo común de entrada (ICMR)
 - Rango de salida (Output swing)
 - Análisis de pequeña señal
- Amplificadores operacionales
 - 2-stage OTA (7-OTA)

- Algunas definiciones:

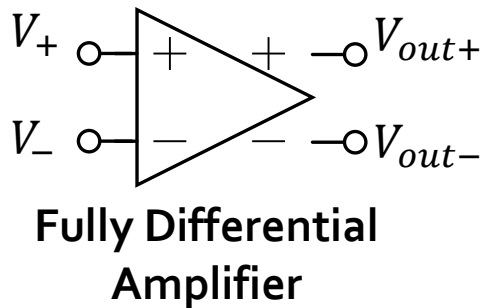


$$V_{id} = V_+ - V_-$$

$$V_{iCM} = \frac{V_+ + V_-}{2}$$

$$A_{vd} = \frac{V_{out}}{V_{id}}$$

$$A_{vCM} = \frac{V_{out}}{V_{iCM}}$$



$$V_{od} = V_{out+} - V_{out-}$$

$$V_{oCM} = \frac{V_{out+} + V_{out-}}{2}$$

$$A_{vd} = \frac{V_{od}}{V_{id}}$$

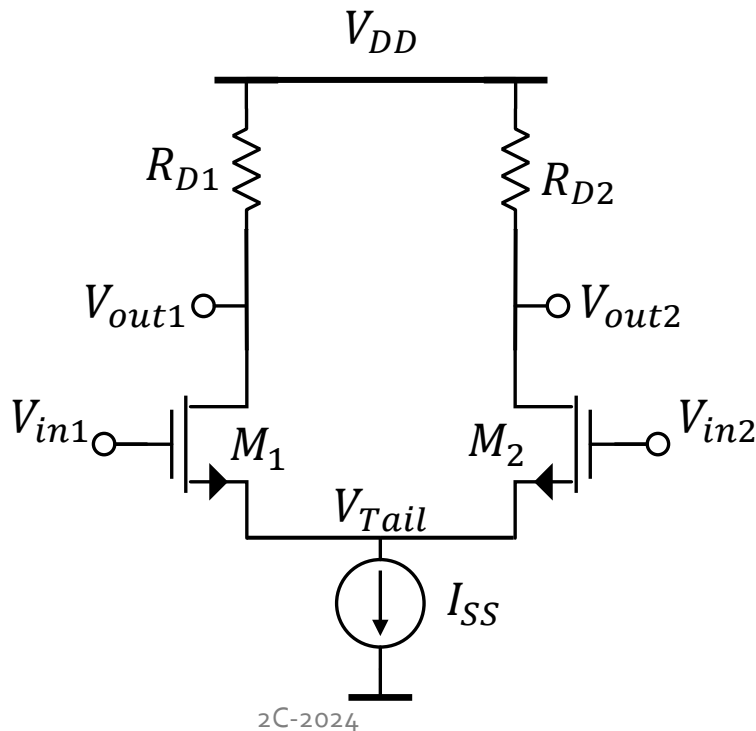
$$A_{vCM} = \frac{V_{oCM}}{V_{iCM}}$$

$$A_{vCM \rightarrow DM} = \frac{V_{od}}{V_{iCM}}$$

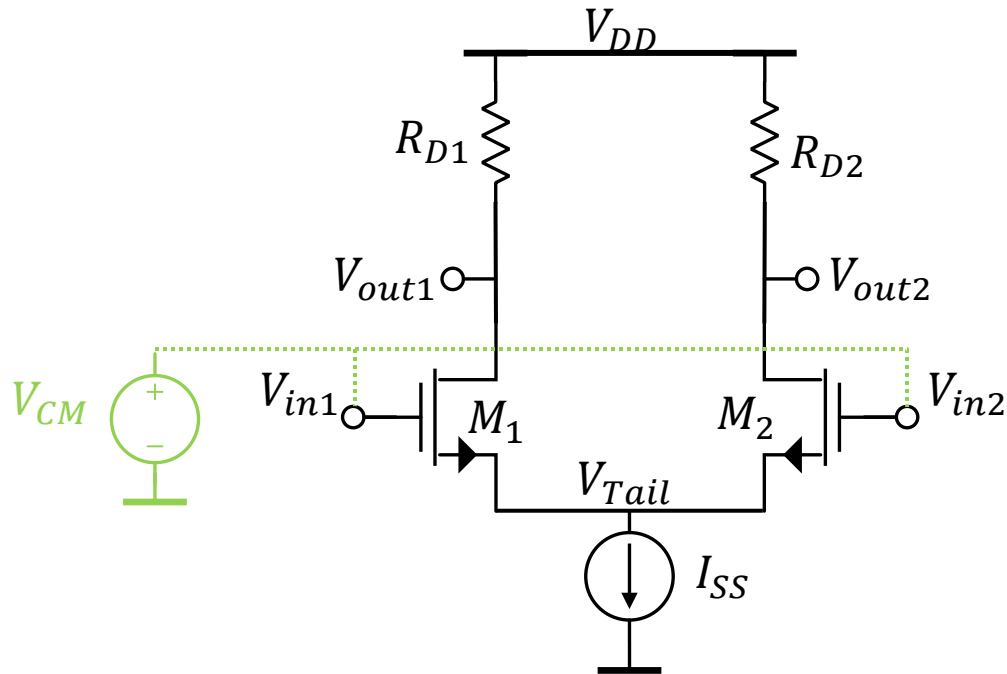
Contenido

- Operación diferencial vs single-ended
- Definiciones de ganancias y modos
- Etapas fully-differential de baja ganancia
- Par diferencial con carga espejo (5-OTA)
 - Rango de modo común de entrada (ICMR)
 - Rango de salida (Output swing)
 - Análisis de pequeña señal
- Amplificadores operacionales
 - 2-stage OTA (7-OTA)

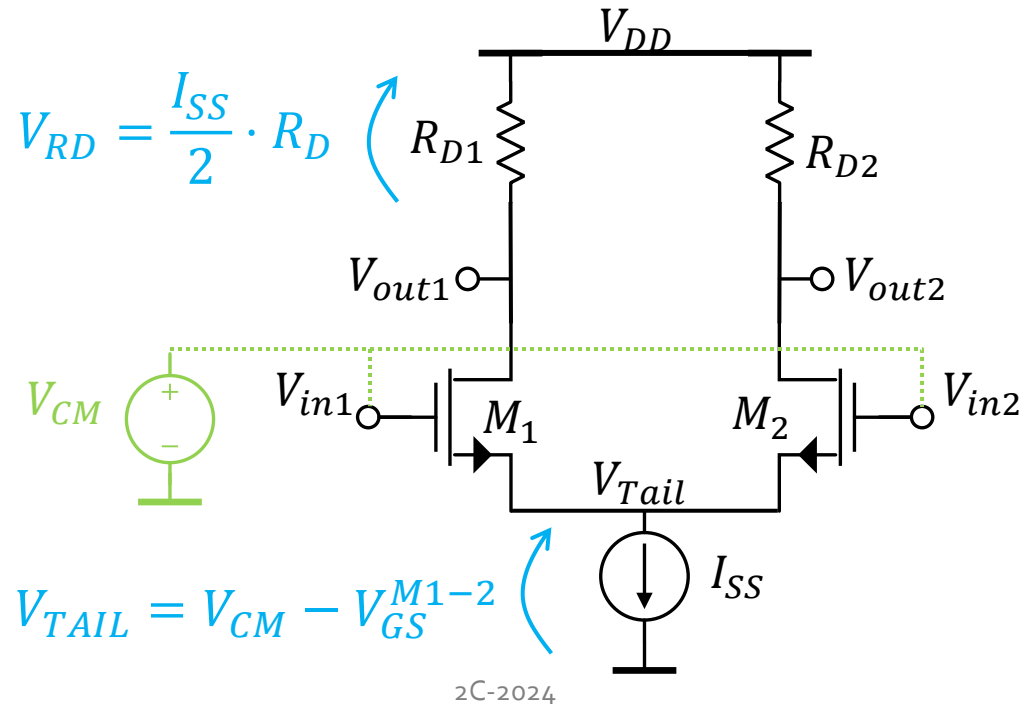
- Par acoplado por source
 - Ofrece una forma robusta de polarizar usando la corriente de Tail I_{SS}
 - Es mucho más insensible a variaciones del CM de entrada
 - Suele ser la primer etapa en cualquier amplificador diferencial



- Obtenga las tensiones y corrientes DC cuando la señal de entrada diferencial es cero
 - Suponga $M1$, $M2$ y la fuente I_{SS} en saturación
- Expresé g_m , g_{ds} y V_{ov} de $M1$, $M2$ usando el modelo cuadrático



- Obtenga las tensiones y corrientes DC cuando la señal de entrada diferencial es cero
 - Suponga $M1$, $M2$ y la fuente I_{SS} en saturación
- Expresé g_m , g_{ds} y V_{ov} de $M1$, $M2$ usando el modelo cuadrático

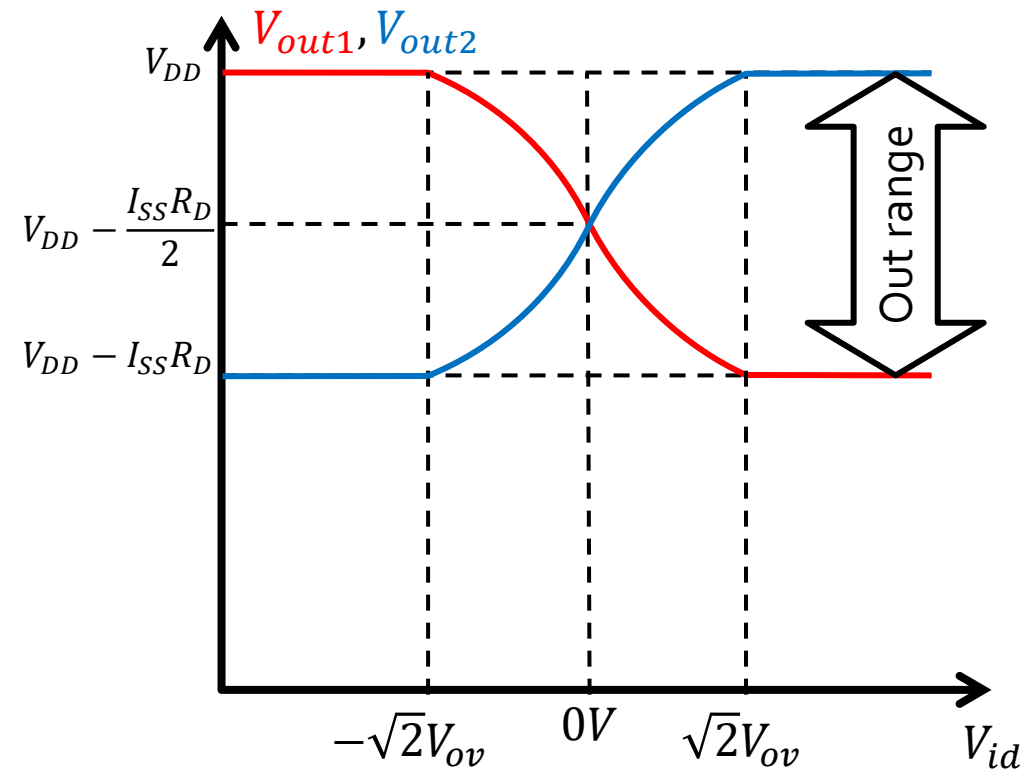
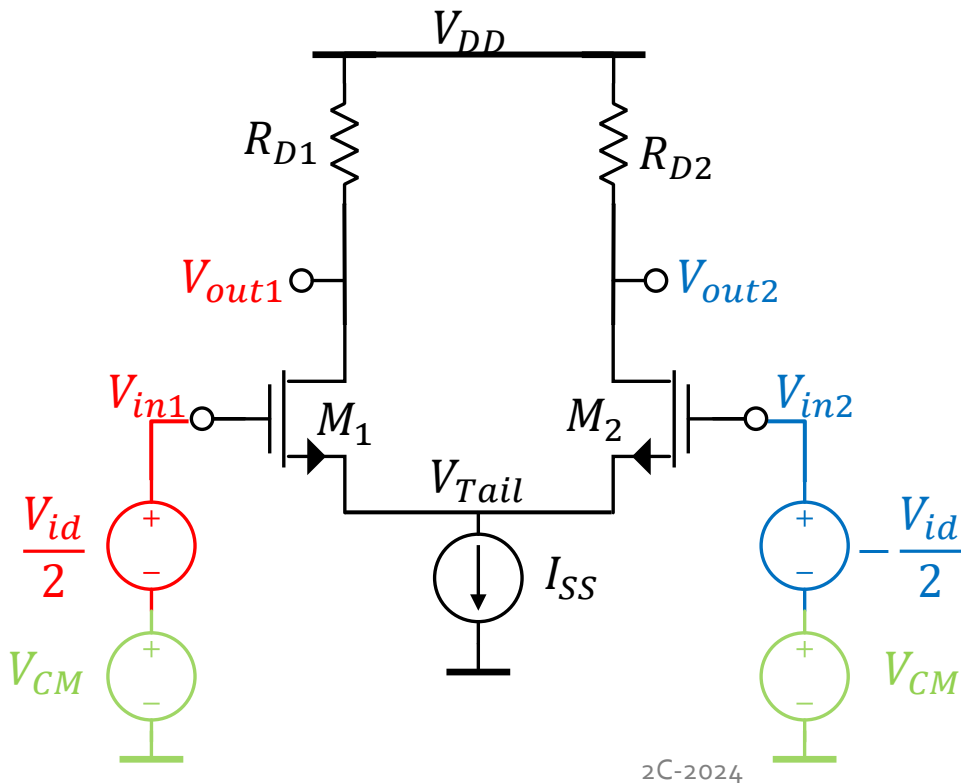


$$V_{ov}^{M1-2} = \sqrt{\frac{I_{SS}/2}{\frac{1}{2}\mu_N C_{ox} M_1}}$$

$$g_m^{M1-2} = \sqrt{2\mu_N C_{ox} M_1 \frac{I_{SS}}{2}}$$

$$g_{ds}^{M1-2} = \lambda_{1-2} \cdot \frac{I_{SS}}{2}$$

- Obtenga las tensiones y corrientes DC cuando la señal de entrada diferencial varía
 - Suponga $M1$, $M2$ y la fuente I_{SS} en saturación

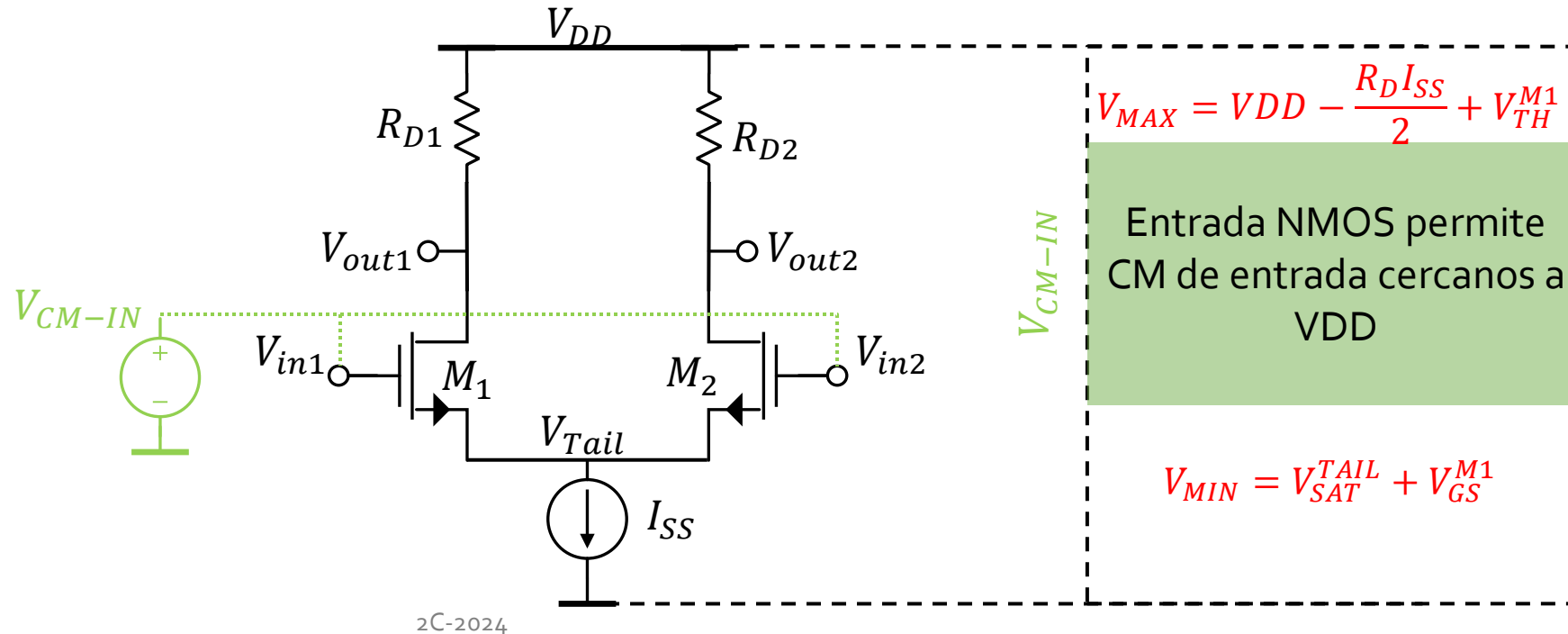


- Si $|V_{in1} - V_{in2}| < \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_N C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{2}V_{ov}$ se puede obtener que:

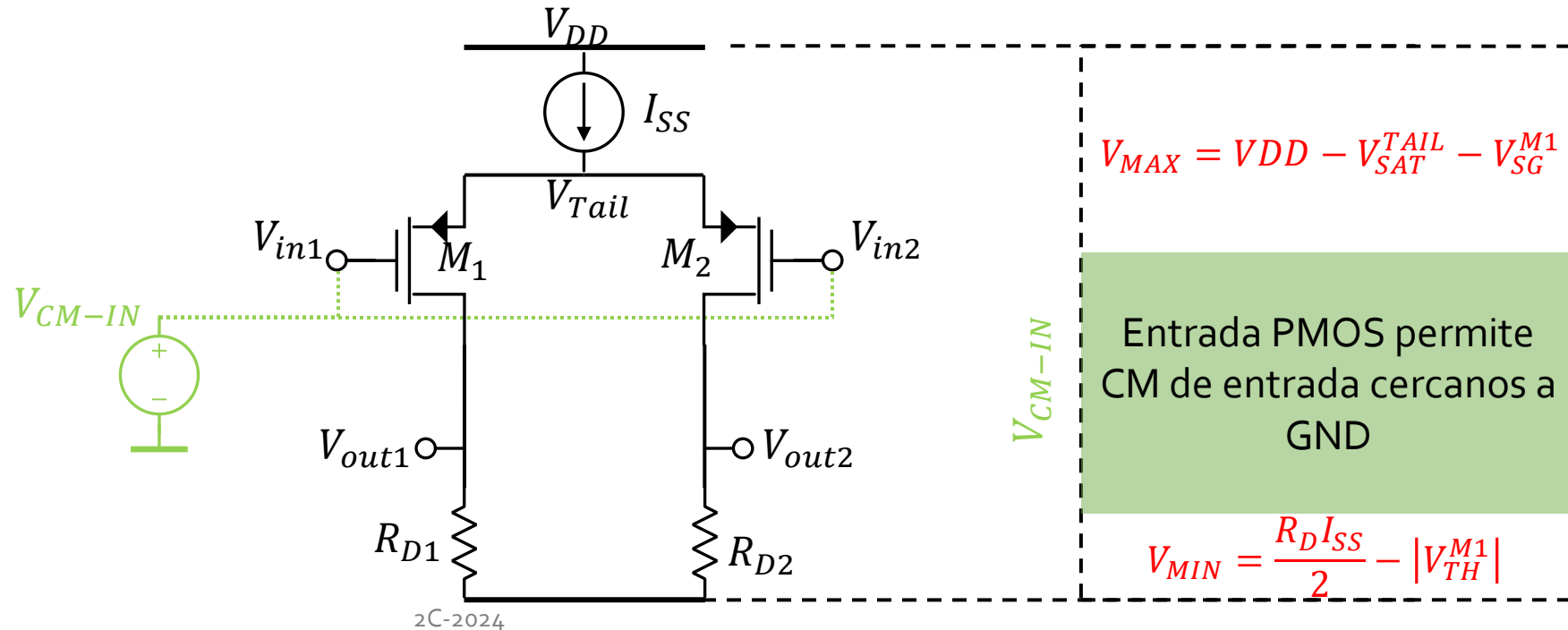
$$I_{D1} - I_{D2} = \sqrt{\mu_N C_{ox} \frac{W}{L} I_{SS} (V_{in1} - V_{in2})} \underbrace{\sqrt{1 - \frac{\mu_N C_{ox} \frac{W}{L}}{4I_{SS}} (V_{in1} - V_{in2})^2}}_{\text{Y si: } |V_{in1} - V_{in2}| \ll \sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_N C_{ox} \frac{W}{L}}} = 2V_{ov}}$$
$$I_{D1} - I_{D2} \approx \sqrt{\mu_N C_{ox} \frac{W}{L} I_{SS} (V_{in1} - V_{in2})}$$

- La corriente diferencial es una función impar de la tensión
- Los armónicos de 2do orden se ven fuertemente atenuados

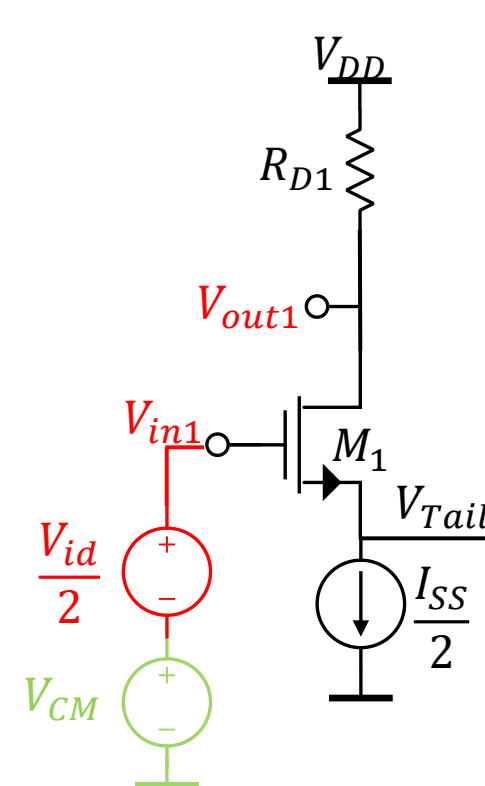
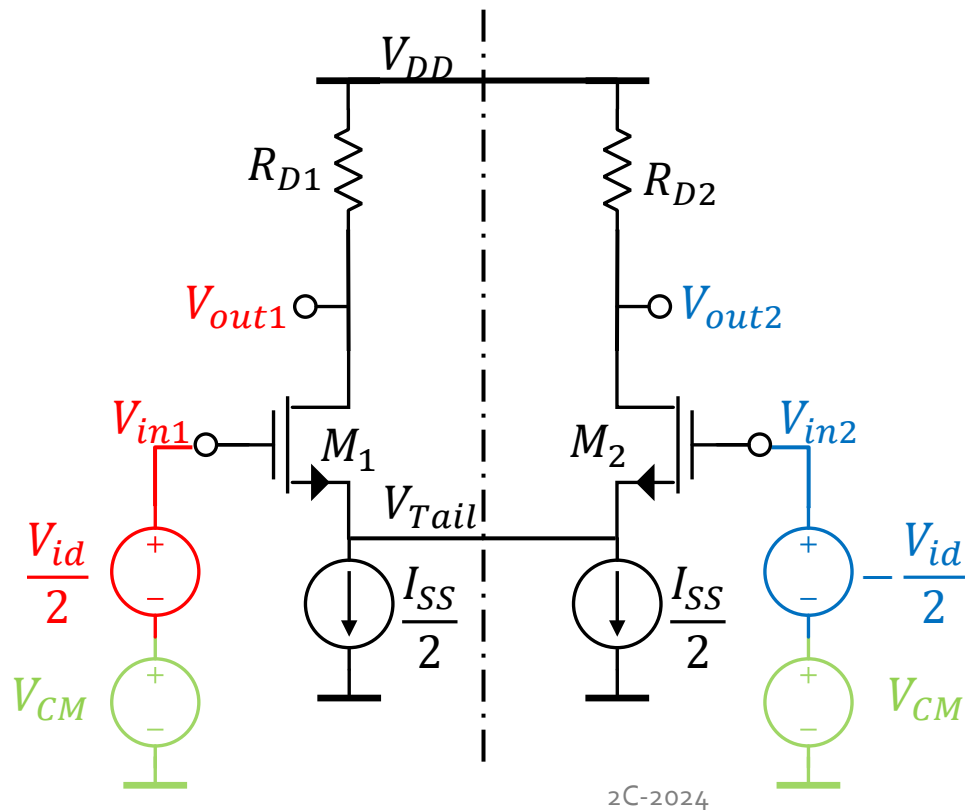
- Suponiendo $V_{id} = 0V$ ¿cuál es el rango de tensión de CM de entrada V_{CM-IN} para el cual todos los dispositivos se mantienen en saturación?



- Suponiendo $V_{id} = 0V$ ¿cuál es el rango de tensión de CM de entrada V_{CM-IN} para el cual todos los dispositivos se mantienen en saturación?

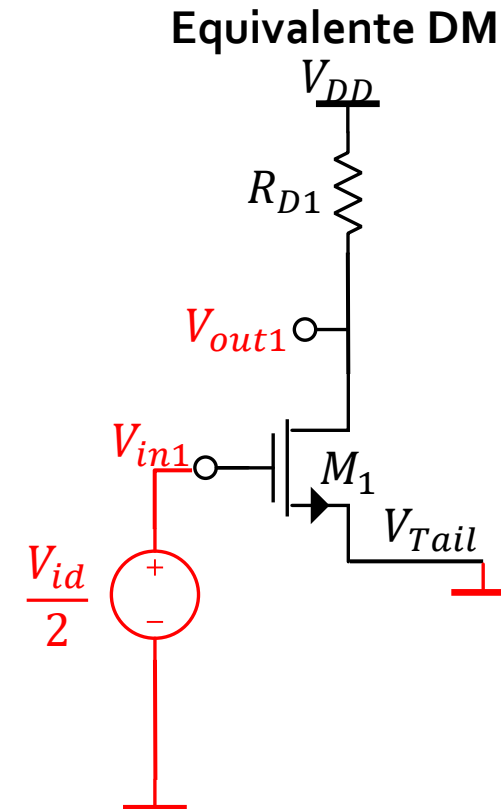
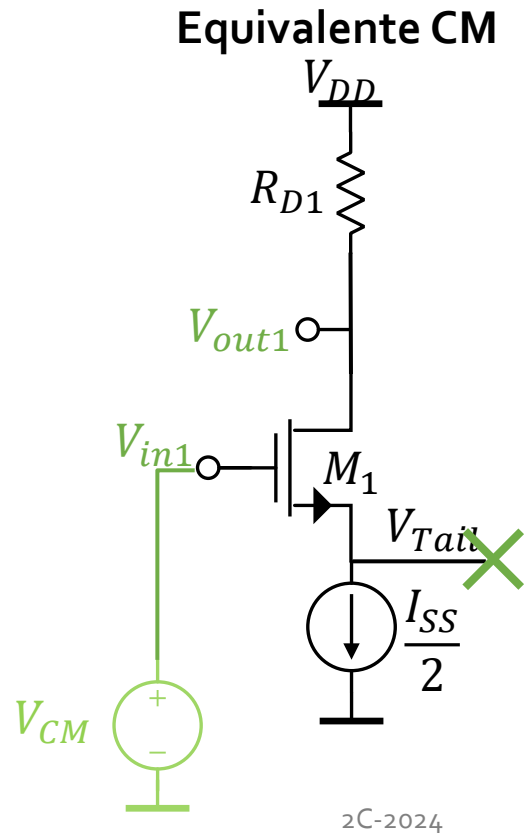


- Aprovechamos la simetría del circuito para simplificar el análisis → Modos Común y Diferencial

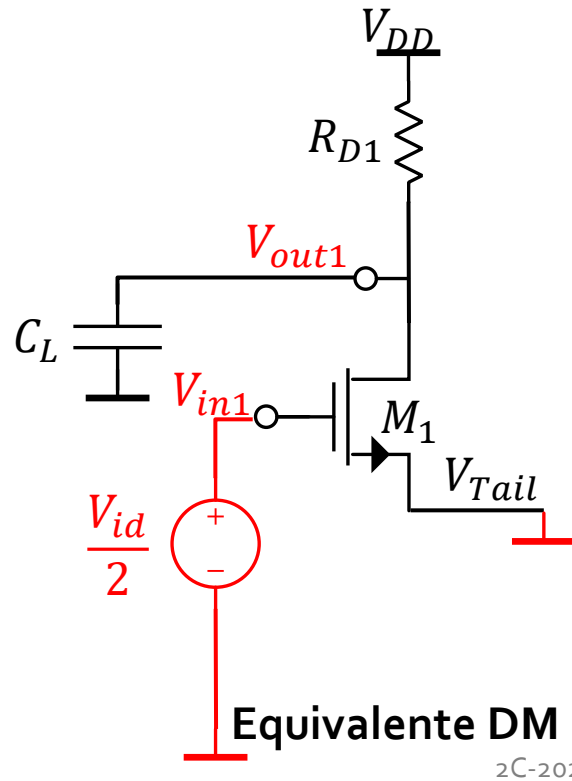
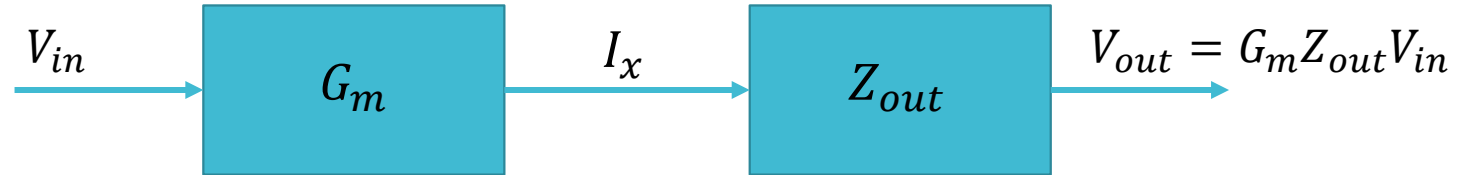


Reemplazar por:
CM → Circuito Abierto
DM → Tierra Virtual

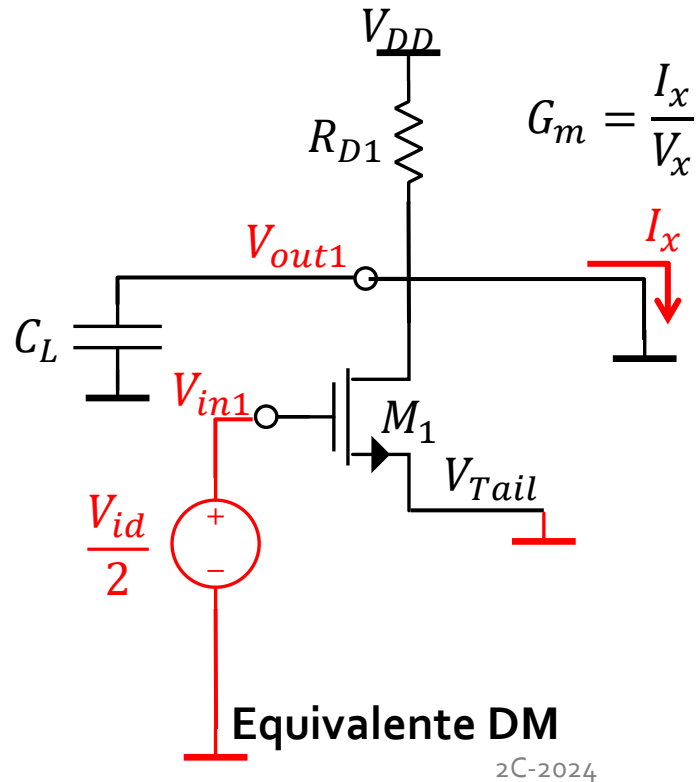
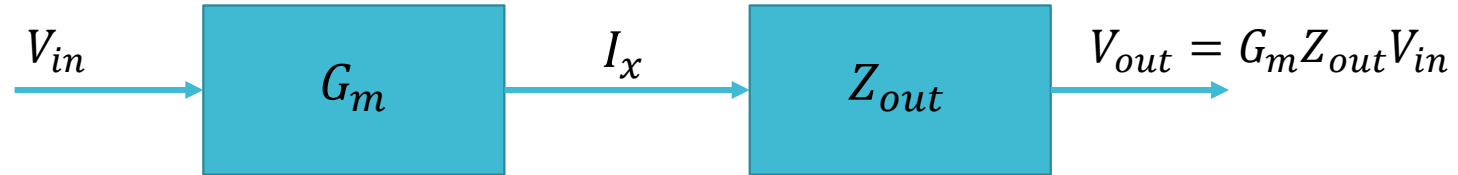
- Aprovechamos la simetría del circuito para simplificar el análisis → Modos Común y Diferencial



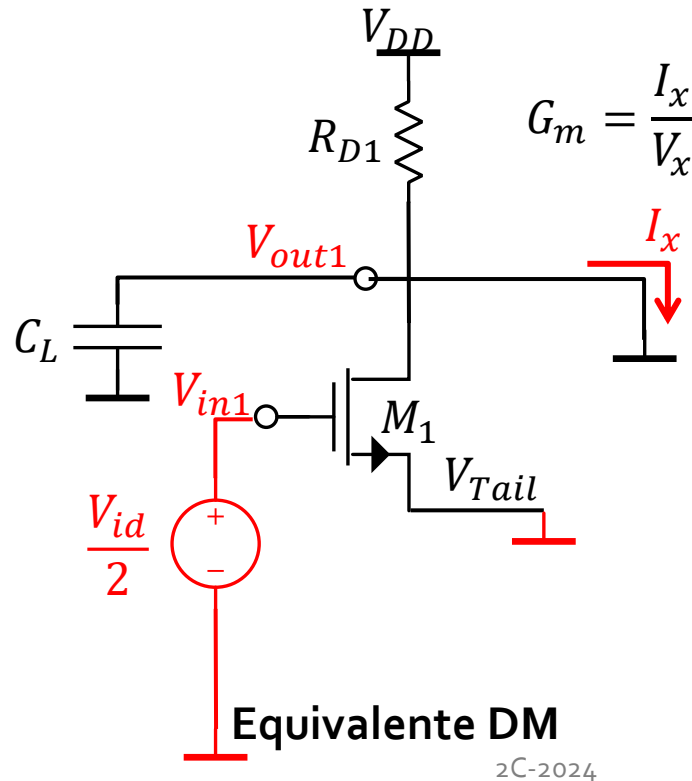
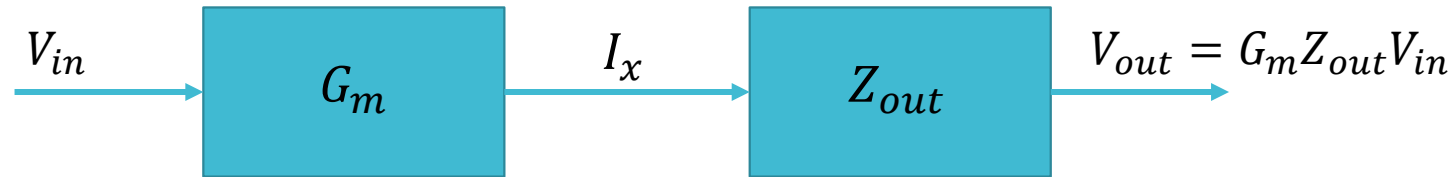
- Ganancia en DM



- Ganancia en DM



- Ganancia en DM



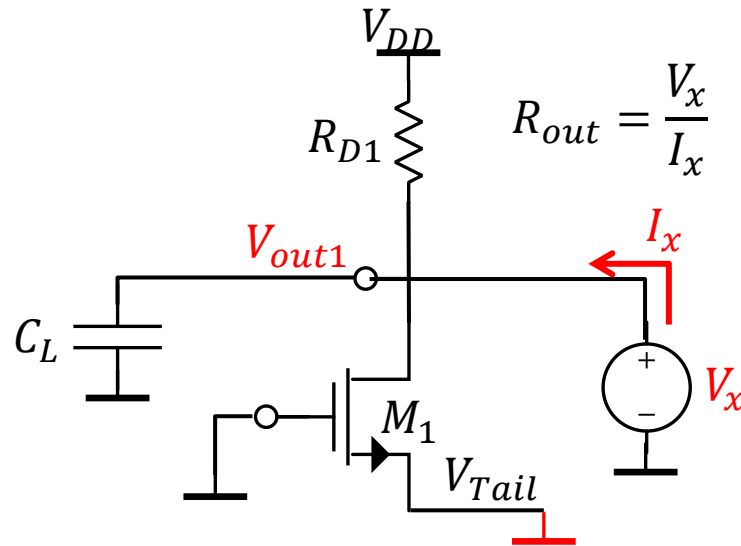
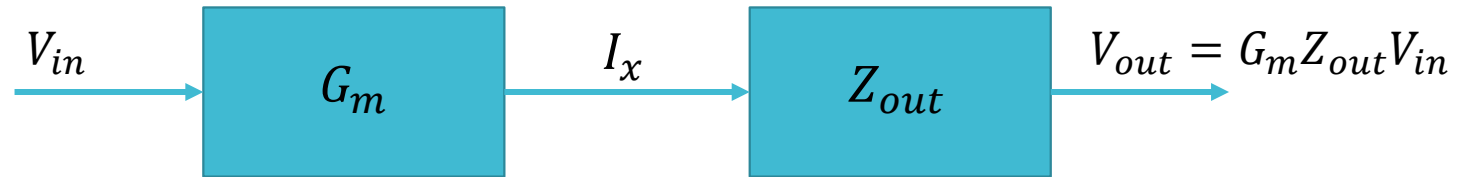
$$v_{Tail} \approx 0V \rightarrow v_{gs}^{M1} \approx v_{in1} = \frac{V_{id}}{2} = V_x$$

$$i_d^{M1} \approx V_x \cdot g_m^{M1}$$

$$I_x = -i_d^{M1} \approx -V_x \cdot g_m^{M1}$$

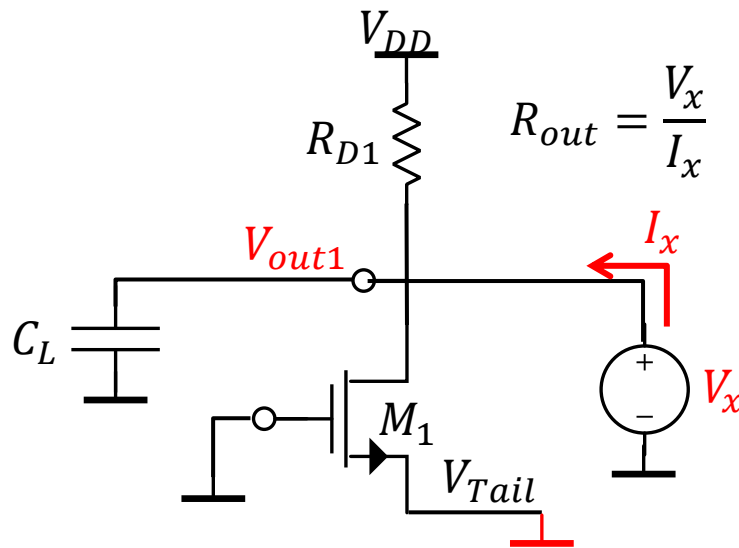
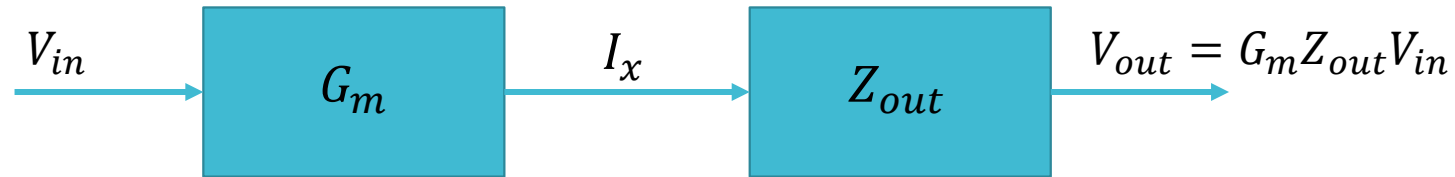
$$G_m = \frac{I_x}{V_x} \approx -g_m^{M1}$$

- Ganancia en DM



Equivalente DM

- Ganancia en DM



$$I_x = i_d^{M1} + i_C + i_{RD}$$

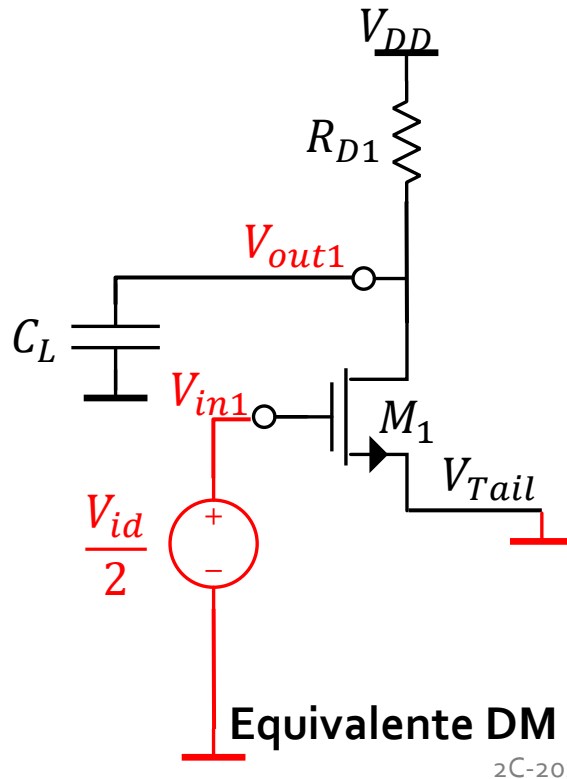
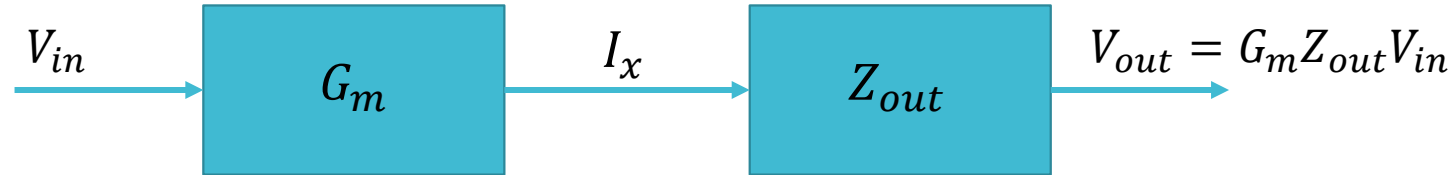
$$I_x = \frac{V_x}{r_o^{M1}} + sC_L V_x + \frac{V_x}{R_D}$$

$$R_{out} = \frac{V_x}{I_x} \approx \frac{r_o^{M1} || R_D}{1 + sC_L(r_o^{M1} || R_D)}$$

$$R_{out} = \frac{V_x}{I_x} \approx \frac{R_D}{1 + sC_L R_D}$$

Equivalente DM

- Ganancia en DM

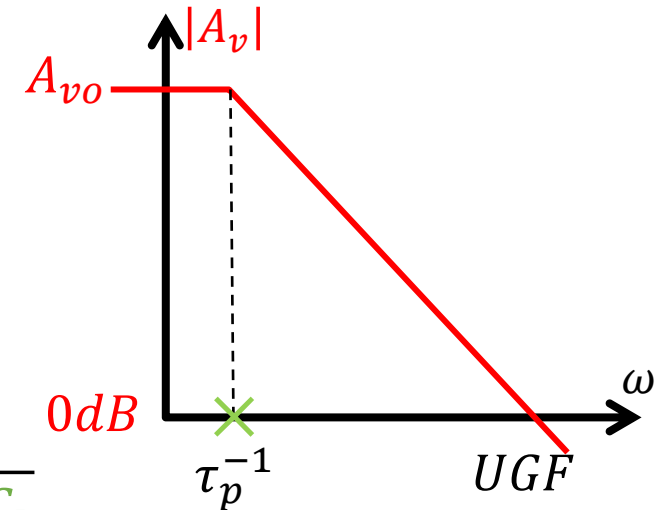


$$G_m = -g_m^{M1}$$

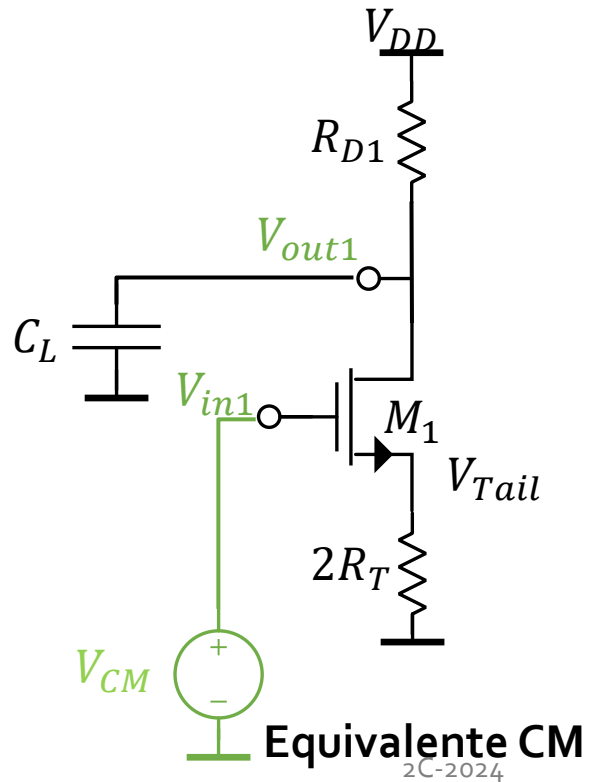
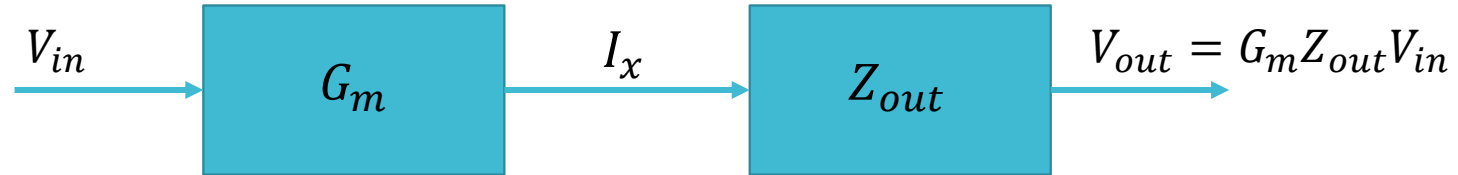
$$Z_{out} = R_D \frac{1}{1 + sR_D C_L}$$

$$A_v^{DM} = -g_m^{M1} R_D \frac{1}{1 + sR_D C_L}$$

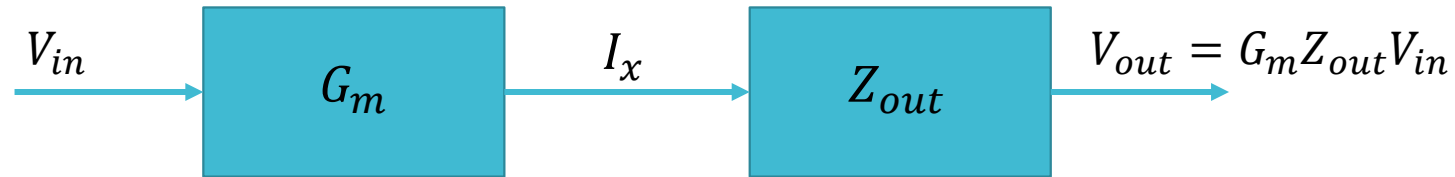
$$UGF = GBW = \frac{g_m^{M1}}{C_L}$$



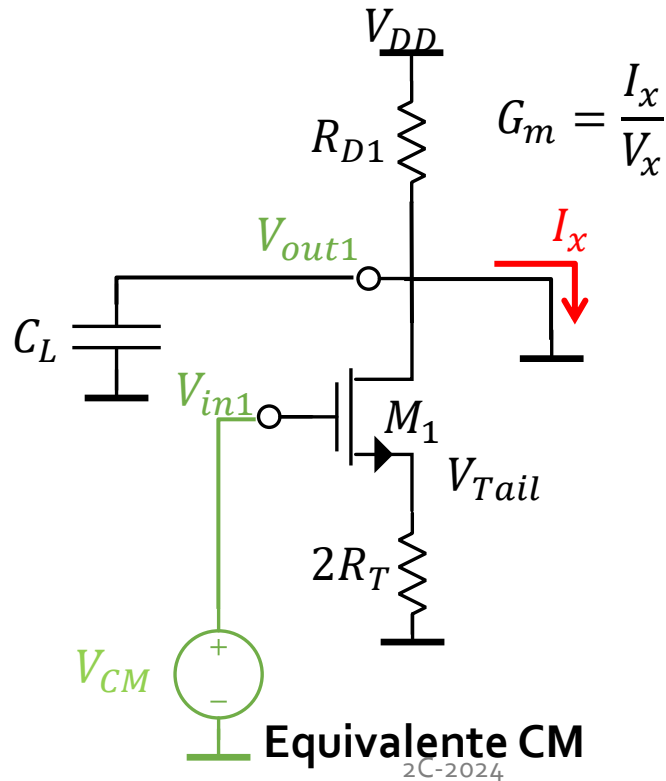
- Transferencia en CM



- Transferencia en CM

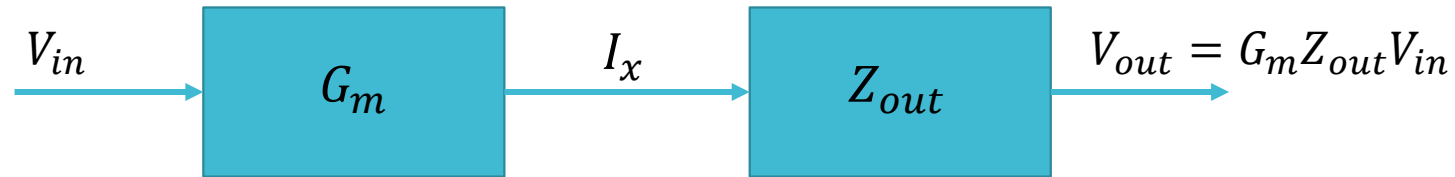


Etapas CS con degeneración:



$$G_m = -\frac{g_m^{M1}}{1 + g_m^{M1} 2R_T} \approx -\frac{1}{2R_T}$$

- Transferencia en CM

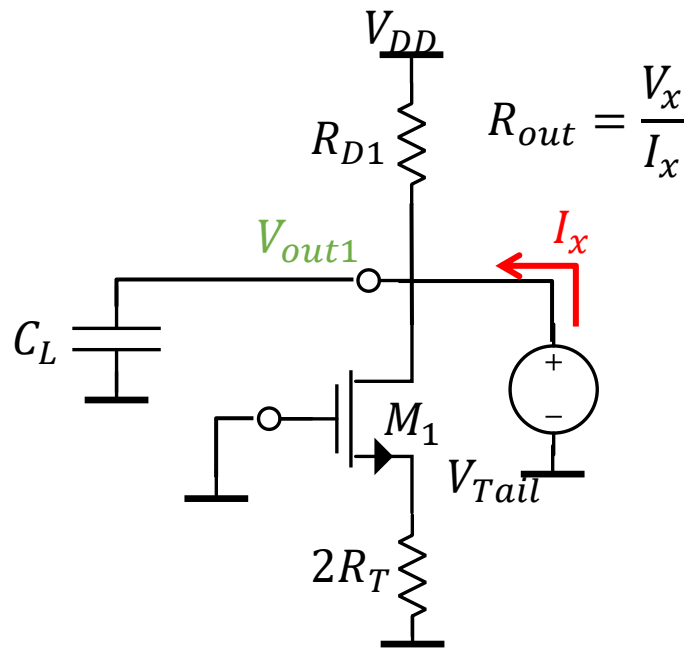


$$I_x = i_d^{M1} + i_C + i_{RD}$$

Etapá CS con degeneración:

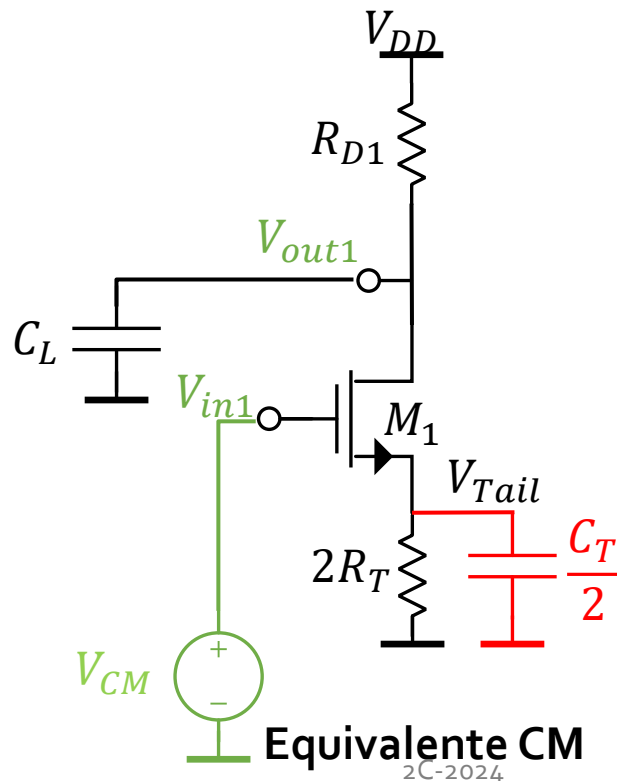
$$I_x = \frac{V_x}{r_o^{M1} + 2R_T + g_m^{M1} \cdot r_o^{M1} \cdot 2R_T} + sC_L V_x + \frac{V_x}{R_D}$$

$$R_{out} = \frac{V_x}{I_x} \approx \frac{R_D}{1 + sC_L R_D}$$



Equivalente CM
2C-2024

- Transferencia en CM
 - Idealmente la ganancia en CM es nula!
 - Requiere R_T alta (y baja capacidad en el Tail, no mostrado en la expresión)



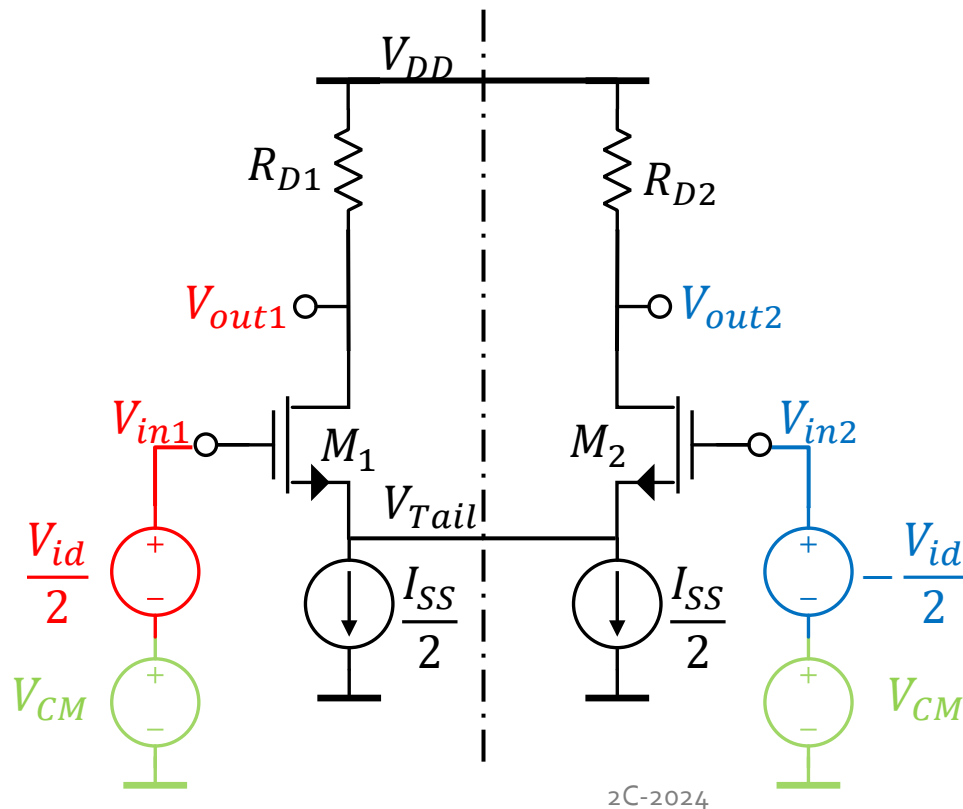
$$G_m = -\frac{g_m^{M1}}{1 + g_m^{M1} 2R_T} \approx -\frac{1}{2R_T} \text{ (en DC)}$$

$$Z_{out} = R_D \frac{1}{1 + sR_D C_L}$$

$$A_v^{CM} \approx -\frac{R_D}{2R_T} \frac{1}{1 + sR_D C_L}$$

La capacidad del tail cortocircuita $2R_T$,
agregando un cero que incrementa A_v^{CM}
en altas frecuencias.

- Resumen modos común y diferencial



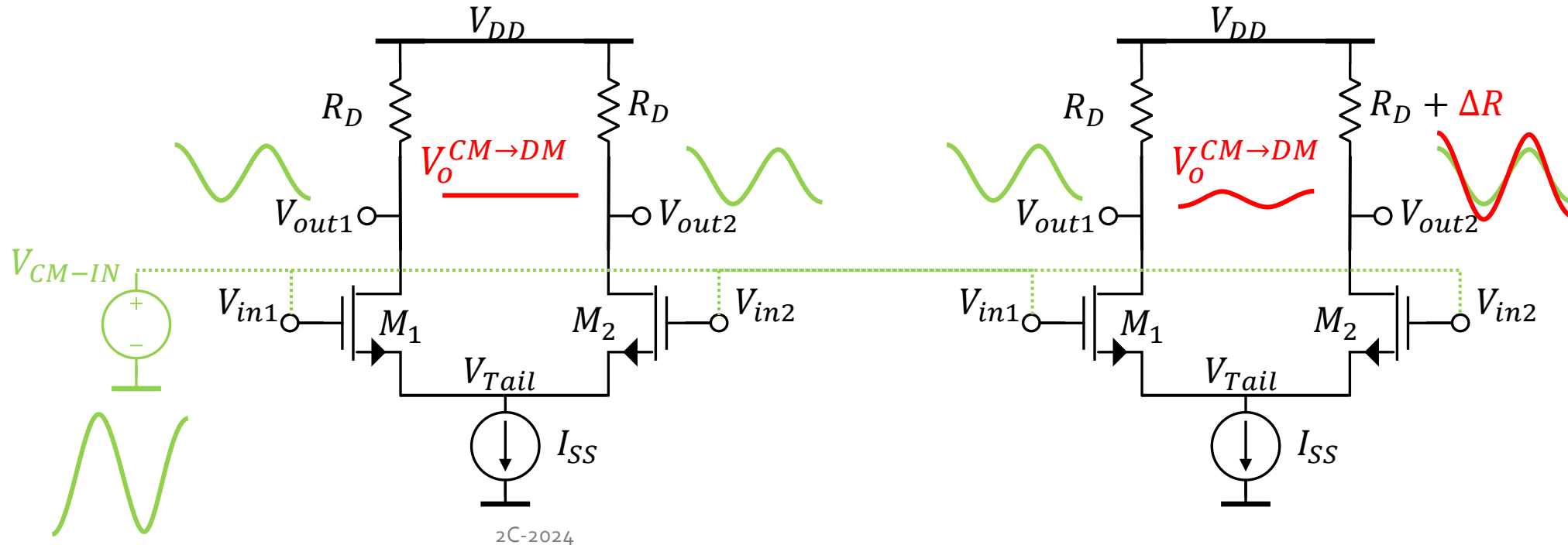
$$\begin{aligned}
 &\text{DM} \left\{ \begin{aligned} G_m &= -g_m^{M1} \\ Z_{out} &= R_D \frac{1}{1 + sR_D C_L} \\ A_v^{DM} &= -g_m^{M1} R_D \frac{1}{1 + sR_D C_L} \end{aligned} \right. \\
 &\text{CM} \left\{ \begin{aligned} G_m &= -\frac{g_m^{M1}}{1 + g_m^{M1} 2R_T} \approx -\frac{1}{2R_T} \text{ (en DC)} \\ Z_{out} &= R_D \frac{1}{1 + sR_D C_L} \\ A_v^{CM} &\approx -\frac{R_D}{2R_T} \frac{1}{1 + sR_D C_L} \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

- El circuito de la derecha tiene mismatch y eso produce conversión CM \rightarrow DM

- Demuestre:

$$A_{vCM \rightarrow DM} \approx A_{vCM} \cdot \frac{\Delta R}{R_D}$$

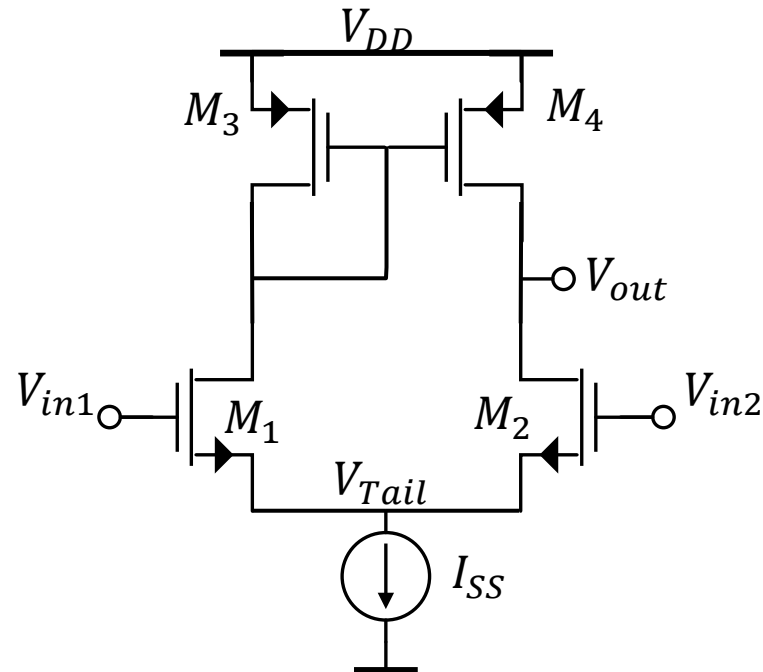
$$CMRR \stackrel{\text{def}}{=} \frac{A_v^{DM}}{A_{vCM \rightarrow DM}} \approx \frac{A_v^{DM}}{\frac{\Delta R}{R_D} A_v^{CM}} = \frac{g_m^{M1} 2R_T}{\frac{\Delta R}{R_D}}$$



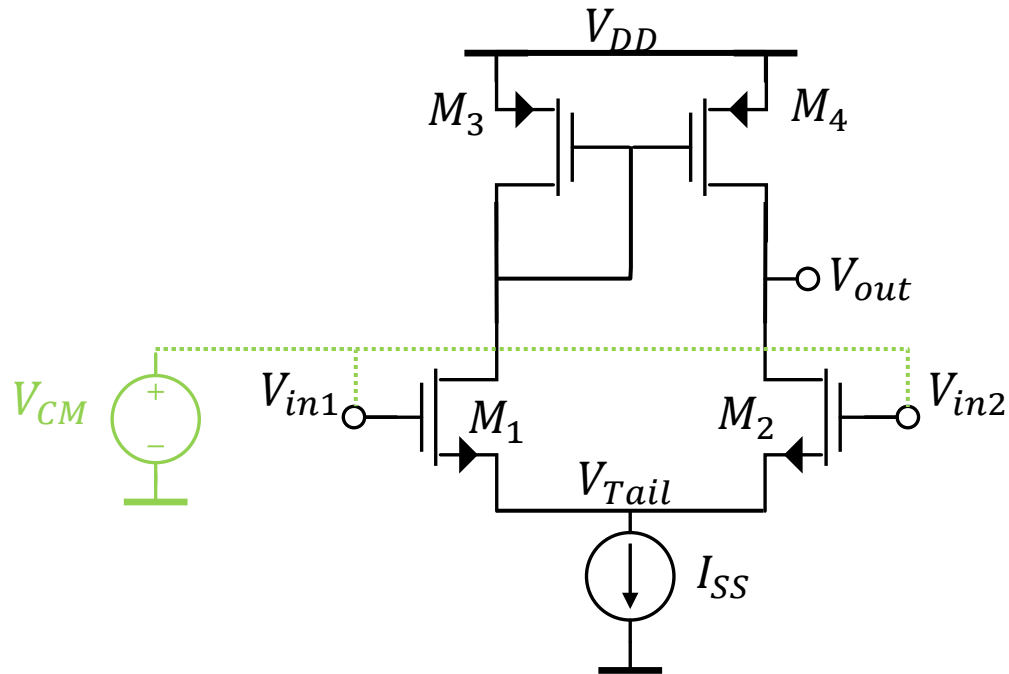
Contenido

- Operación diferencial vs single-ended
- Definiciones de ganancias y modos
- Etapas fully-differential de baja ganancia
- Par diferencial con carga espejo (5-OTA)
 - Rango de modo común de entrada (ICMR)
 - Rango de salida (Output swing)
 - Análisis de pequeña señal
- 2-stage OTA (7-OTA)
 - Comparación con 5-OTA

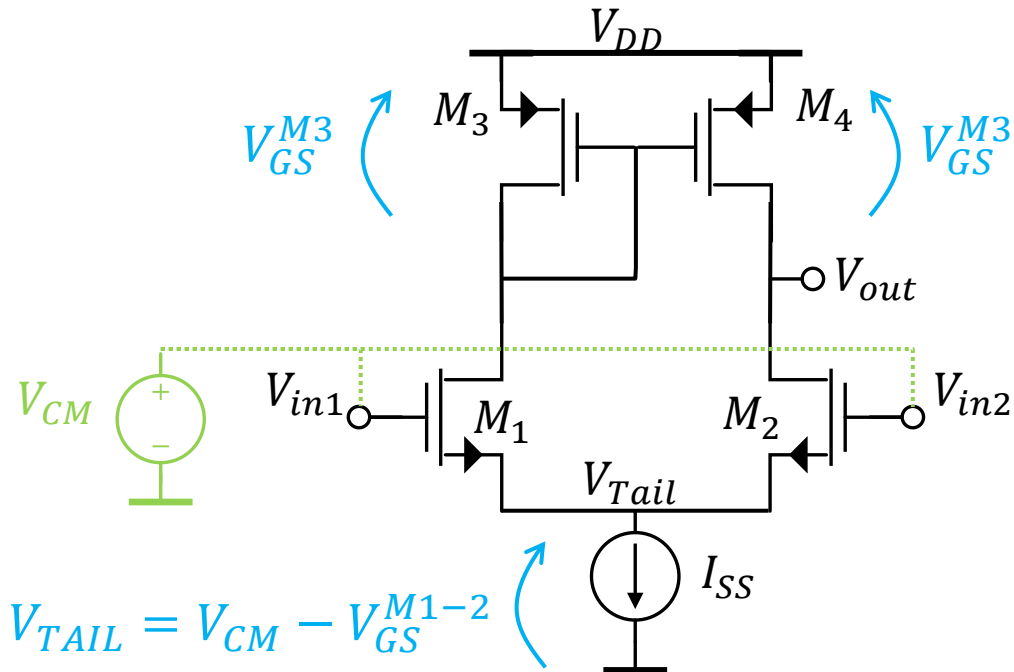
- Conocido también como 5-transistor Operational Transconductance Amplifier (OTA)
 - Ganancia moderada
 - Polarización simple
 - Salida SE



- Obtenga las tensiones y corrientes DC cuando la señal de entrada diferencial es cero
 - Suponga todos los MOS en saturación
- Expresa el g_m y el V_{ov} de M_1, M_2, M_3, M_4



- Obtenga las tensiones y corrientes DC cuando la señal de entrada diferencial es cero
 - Suponga todos los MOS en saturación
- Expresé el g_m y el V_{ov} de $M1, M2, M3, M4$



$$V_{out} = V_{DD} - V_{GS}^{M3}$$

$$V_{ov}^{M1-2} = \sqrt{\frac{I_{SS}/2}{\frac{1}{2}\mu_N C_{ox} M_1}}$$

$$g_m^{M1-2} = \sqrt{2\mu_N C_{ox} M_1 \frac{I_{SS}}{2}}$$

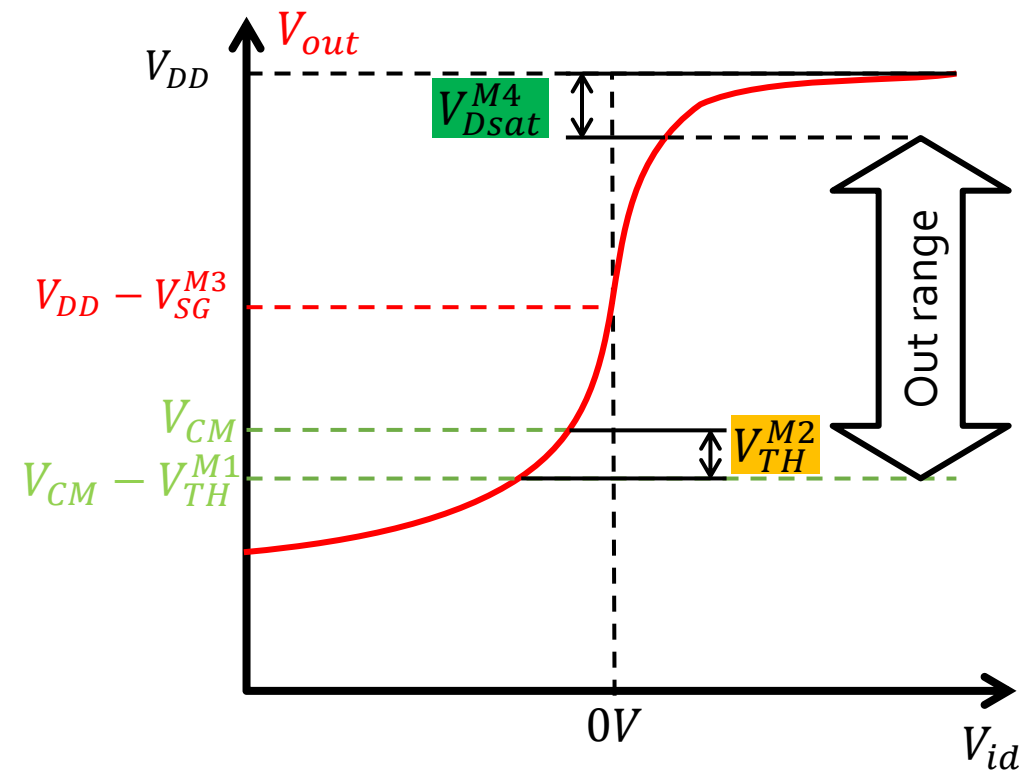
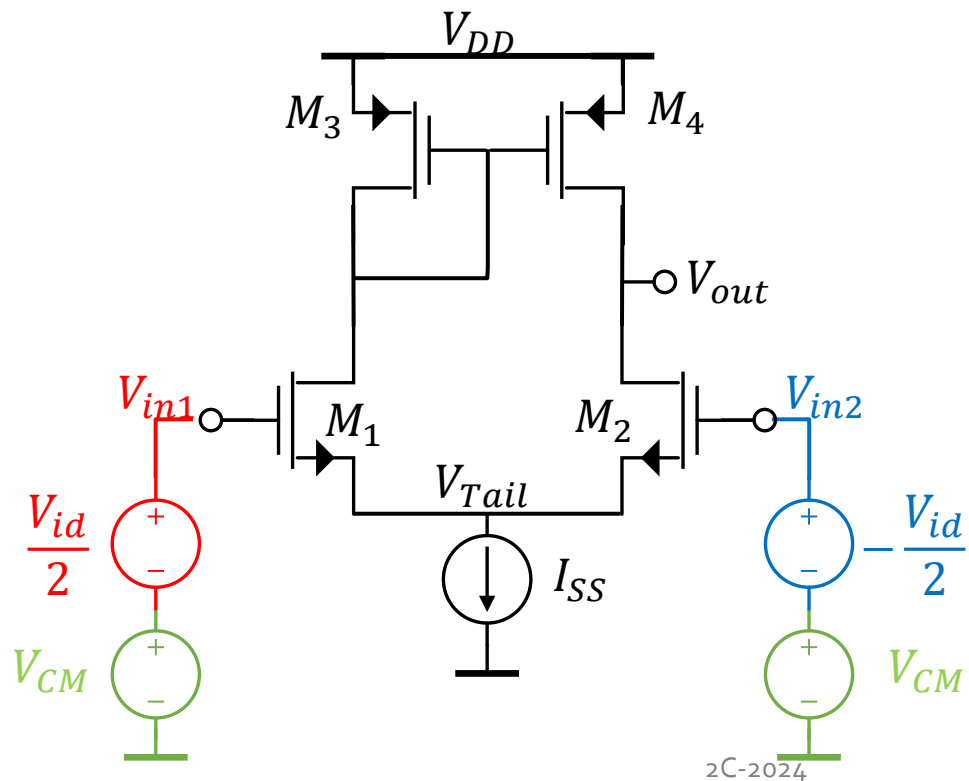
$$g_{ds}^{M1-2} = \lambda_{1-2} \cdot \frac{I_{SS}}{2}$$

$$V_{ov}^{M3-4} = \sqrt{\frac{I_{SS}/2}{\frac{1}{2}\mu_P C_{ox} M_3}}$$

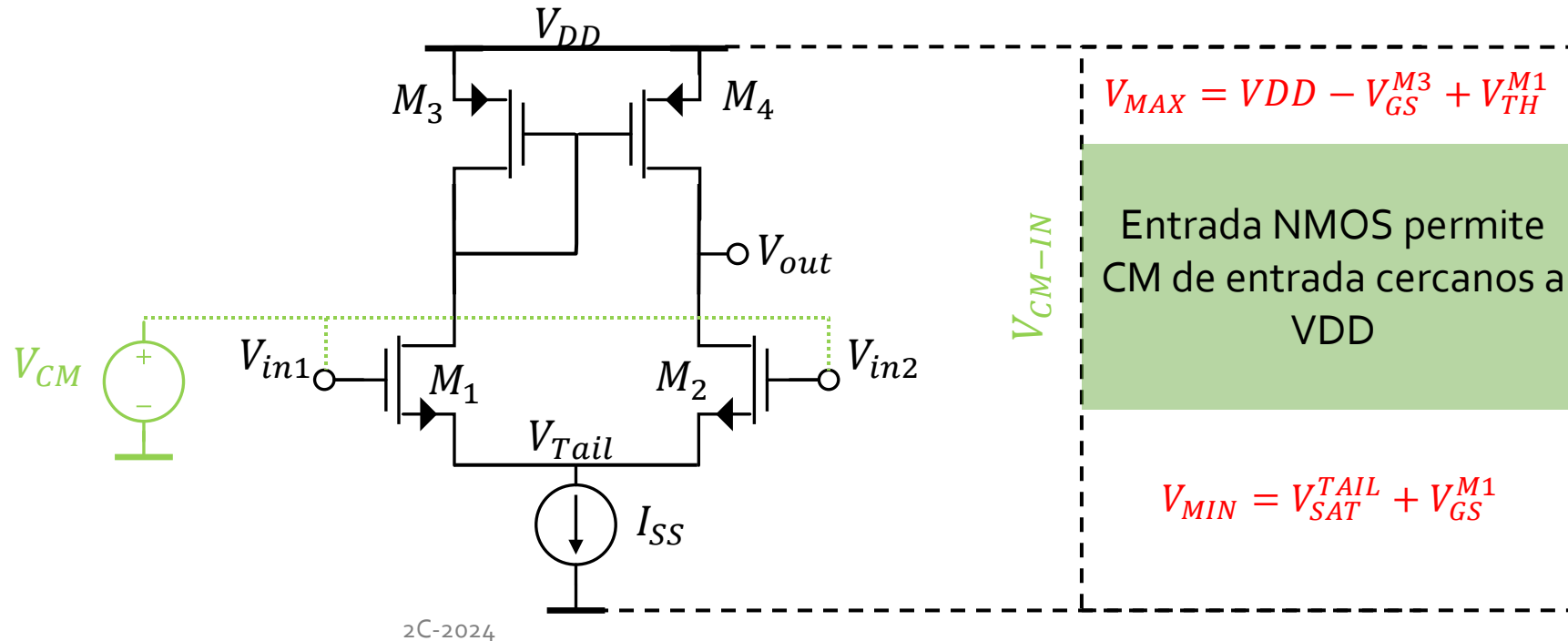
$$g_m^{M3-4} = \sqrt{2\mu_P C_{ox} M_3 \frac{I_{SS}}{2}}$$

$$g_{ds}^{M3-4} = \lambda_{3-4} \cdot \frac{I_{SS}}{2}$$

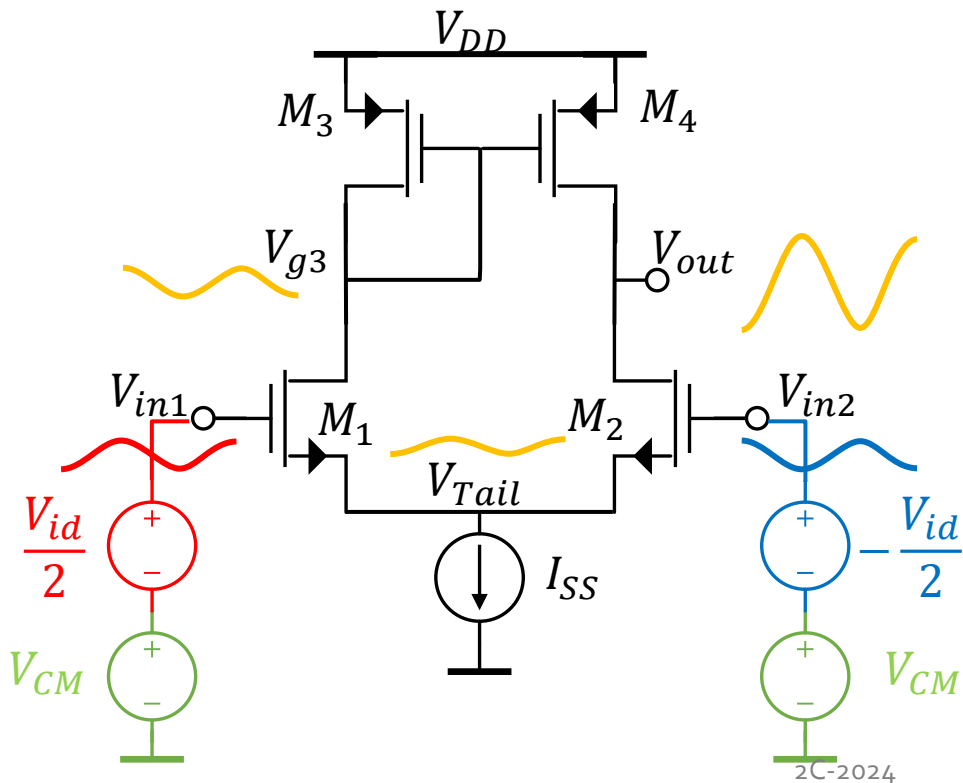
- Obtenga las tensiones y corrientes cuando la señal de entrada diferencial varía
 - Suponga todos los MOS en saturación cuando $V_{id} = 0V$



- Suponiendo $V_{id} = 0V$ ¿cuál es el rango de tensión de CM de entrada V_{CM-IN} para el cual todos los dispositivos se mantienen en saturación?



- ¿Cómo analizar este circuito que no es verdaderamente simétrico?
 - No podemos suponer que V_{Tail} se comporte como tierra virtual en el caso diferencial
 - Realizar en análisis con un hemicircuito es incorrecto (a pesar de que el resultado es casi el correcto...)
- Se puede analizar el circuito tal cual, sin distinguir entre modo común y diferencial (ver link)
- Y además, simplificar un poco usando el método de Norton: $G_m \cdot R_{out}$ (esto vamos a hacer)

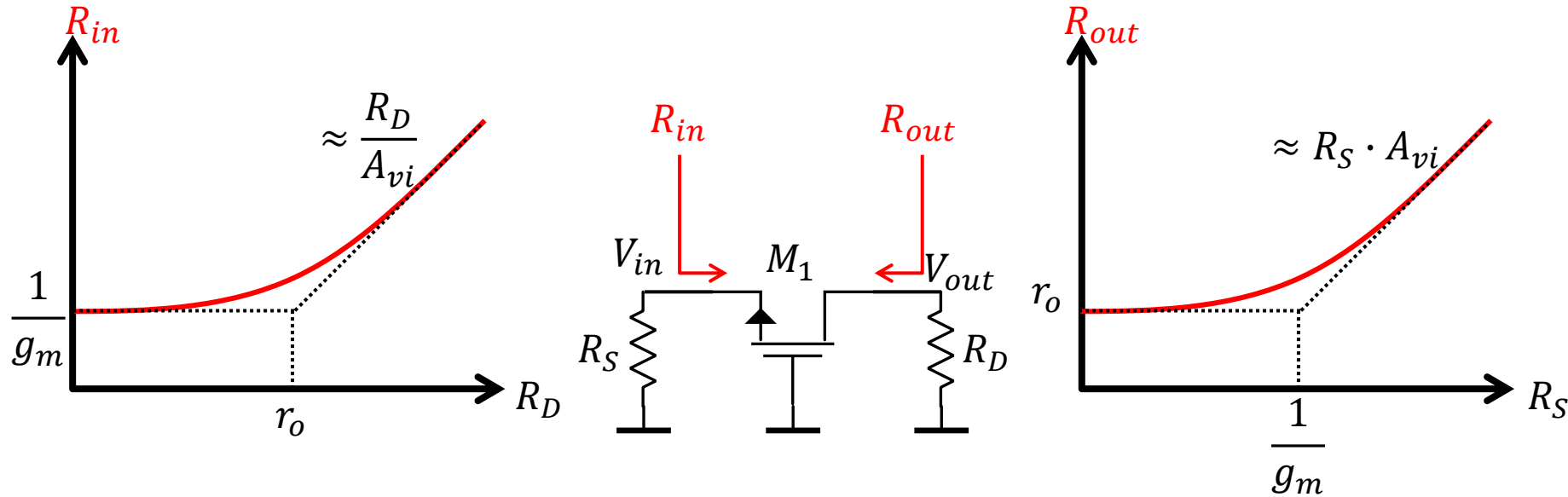


- Recordatorio de Clase 1:

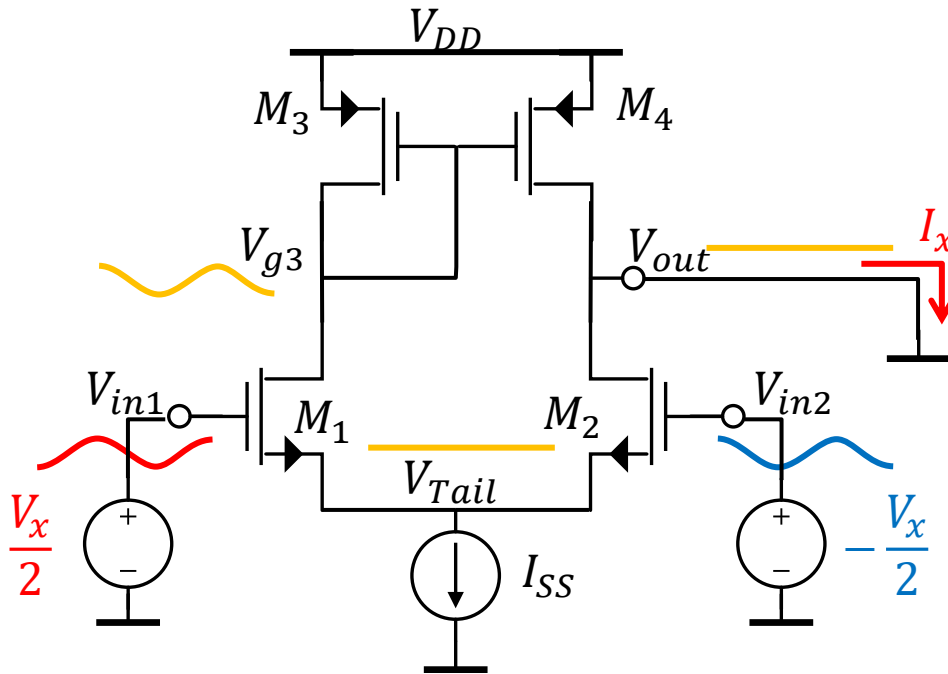
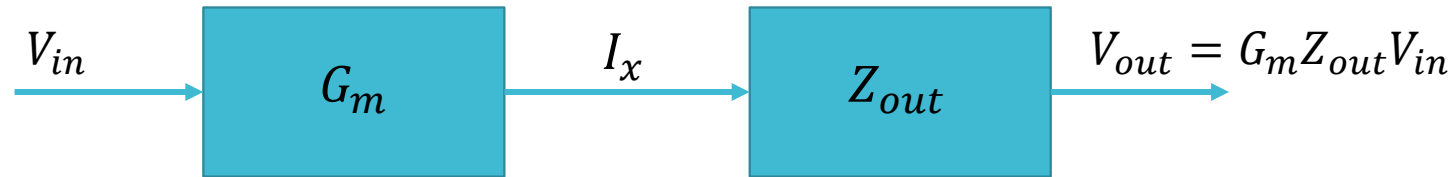
- Resistencia vista desde el source con carga en el drain
- Resistencia vista desde el drain con carga en el source

$$R_{in} = \frac{R_D + r_o}{1 + g_m r_o} \approx \frac{R_D + r_o}{A_{vi}}$$

$$R_{out} = R_S + r_o + R_S g_m r_o \approx r_o + R_S \cdot A_{vi}$$

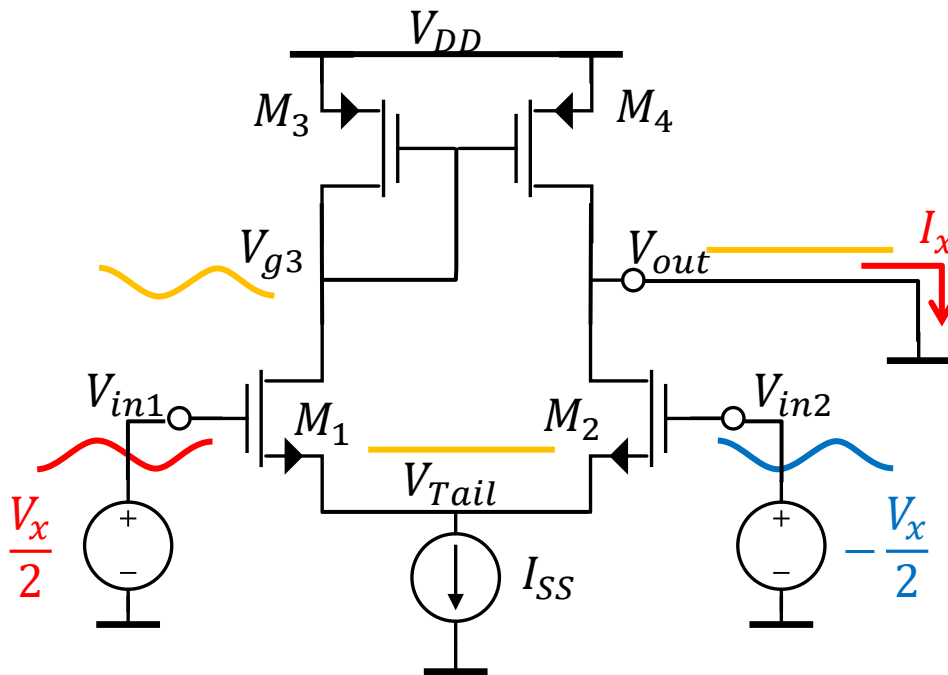
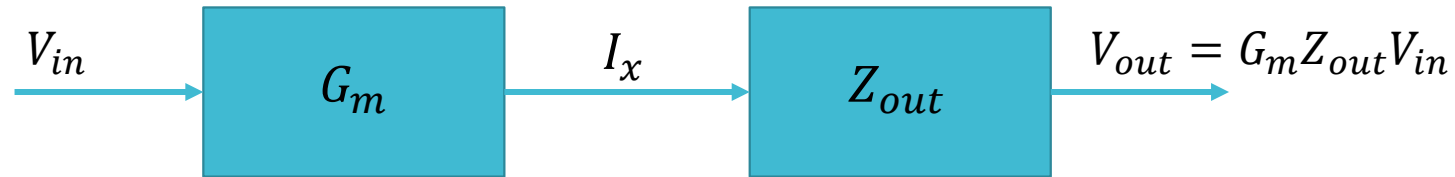


- Análisis aproximado: Modo diff



Como $V_{out} = 0V$ la aproximación $V_{Tail} \approx 0V$ (masa virtual) tiene menos error que en el análisis con un hemicircuito. Poca variación en V_{g3} y ninguna en V_{out} permiten estimar muy poca variación en V_{Tail}

- Análisis aproximado: Modo diff



$$v_{Tail} \approx 0V \rightarrow v_{gs}^{M1} \approx v_{in1}$$

$$v_{gs}^{M2} \approx v_{in2}$$

$$i_d^{M1} \approx v_{in1} \cdot g_m^{M1}$$

$$i_d^{M2} \approx v_{in2} \cdot g_m^{M2}$$

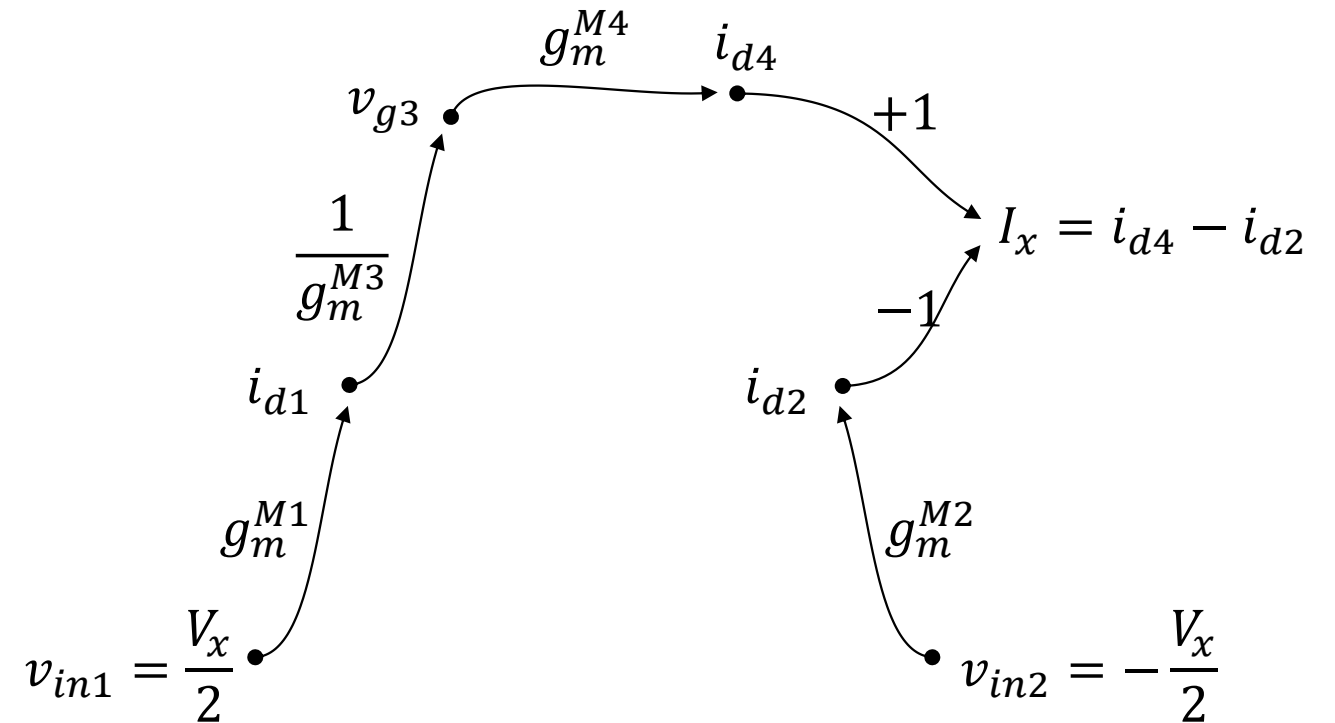
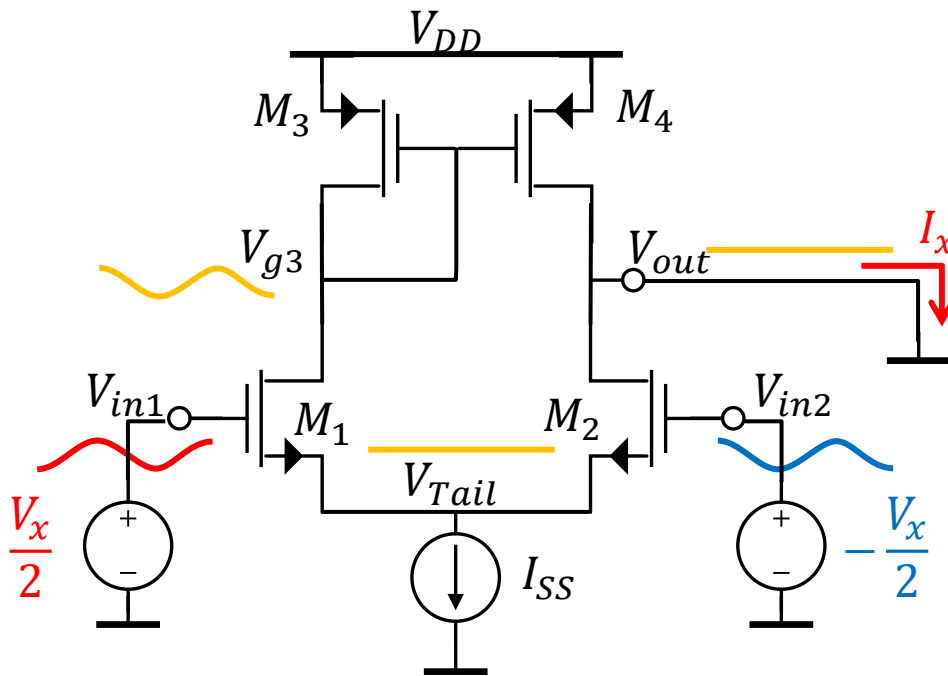
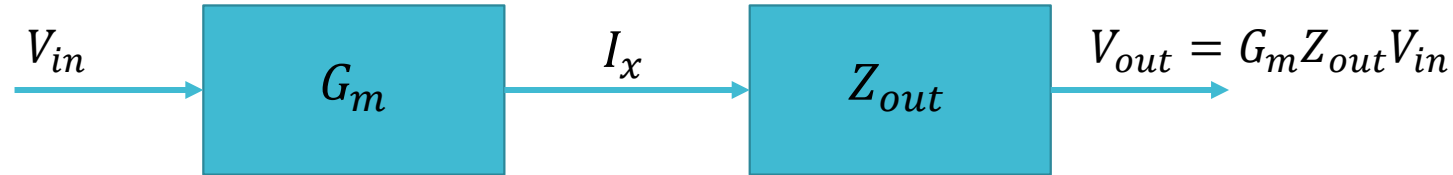
$$i_d^{M4} = i_d^{M3} = i_d^{M1} \cdot \frac{g_m^{M4}}{g_m^{M3}}$$

$$I_x = i_d^{M4} - i_d^{M2} \approx g_m^{M1} \cdot (v_{in1} - v_{in2})$$

$$G_m = \frac{I_x}{V_x} \approx +g_m^{M1}$$

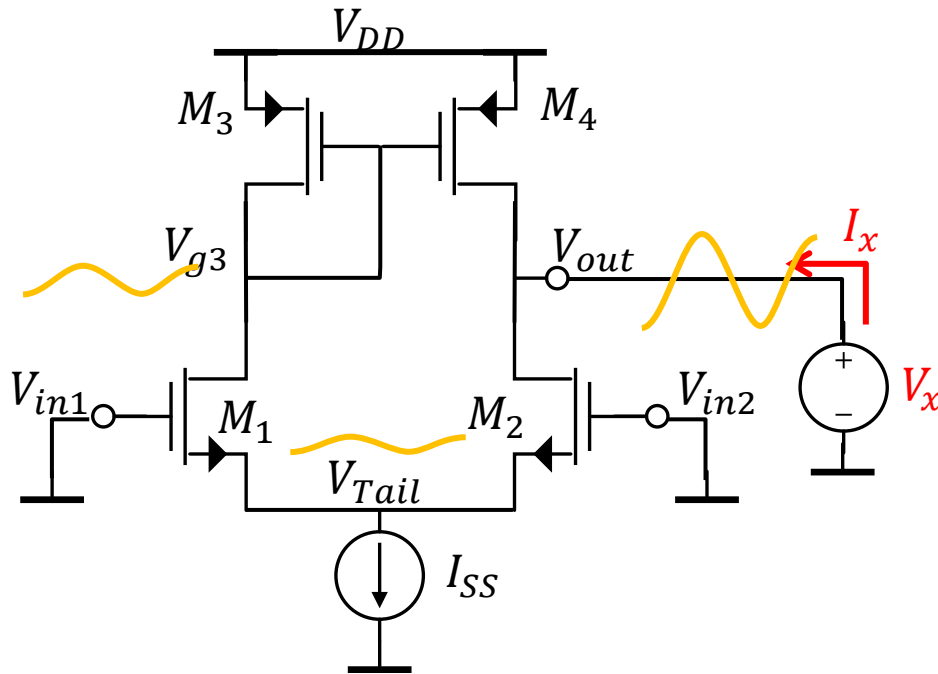
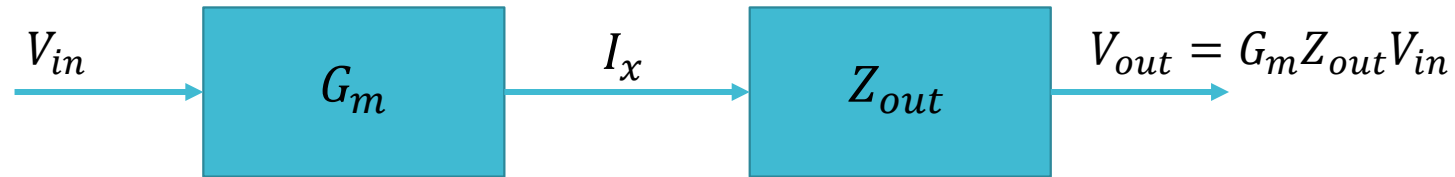
Como $V_{out} = 0V$ la aproximación $V_{Tail} \approx 0V$ (masa virtual) tiene menos error que en el análisis con un hemicircuito. Poca variación en V_{g3} y ninguna en V_{out} permiten estimar muy poca variación en V_{Tail}

- Análisis aproximado: Modo diff

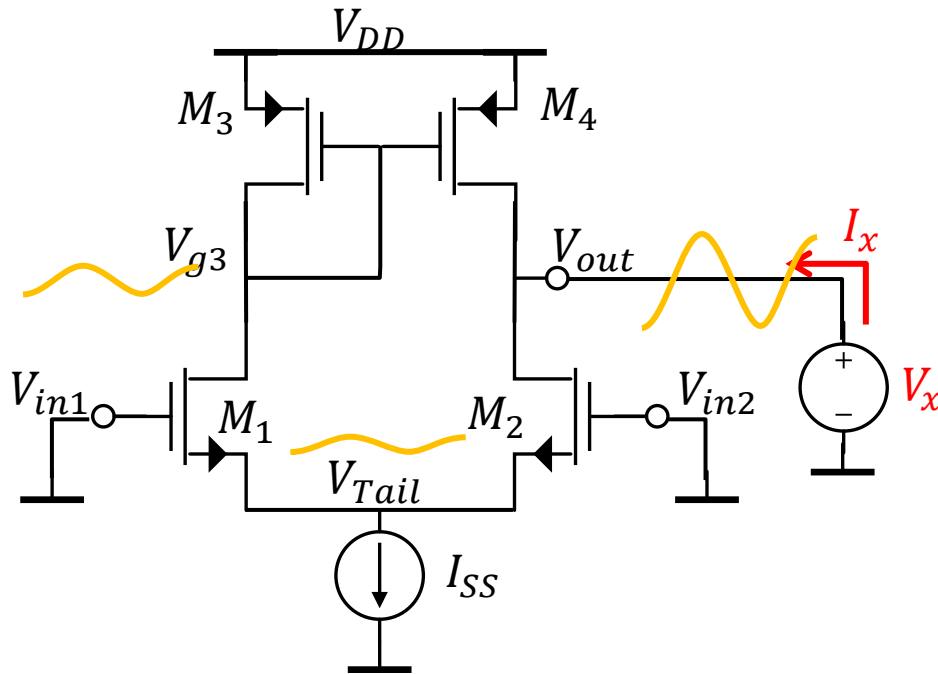
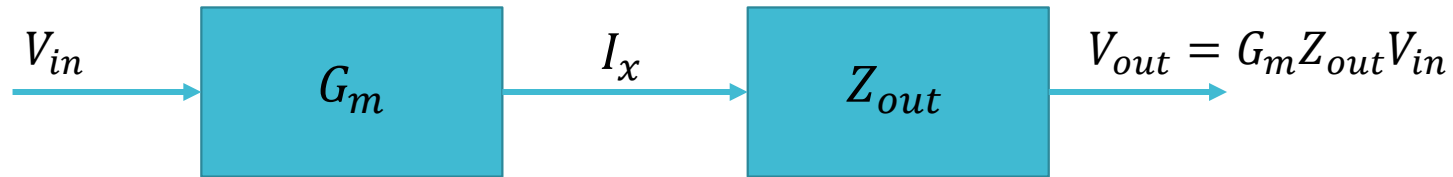


Como $V_{out} = 0V$ la aproximación $V_{Tail} \approx 0V$ (masa virtual) tiene menos error que en el análisis con un hemicircuito. Poca variación en V_{g3} y ninguna en V_{out} permiten estimar muy poca variación en V_{Tail}

- Análisis aproximado: Modo diff



- Análisis aproximado: Modo diff



$$I_x = -i_d^{M4} + i_d^{M2}$$

$$I_x = \frac{V_x}{r_o^{M4}} - i_d^{M3} + \frac{V_x}{r_d^{M2}} \rightarrow r_o \neq r_d$$

$$\rightarrow i_d^{M3} = -i_d^{M2}$$

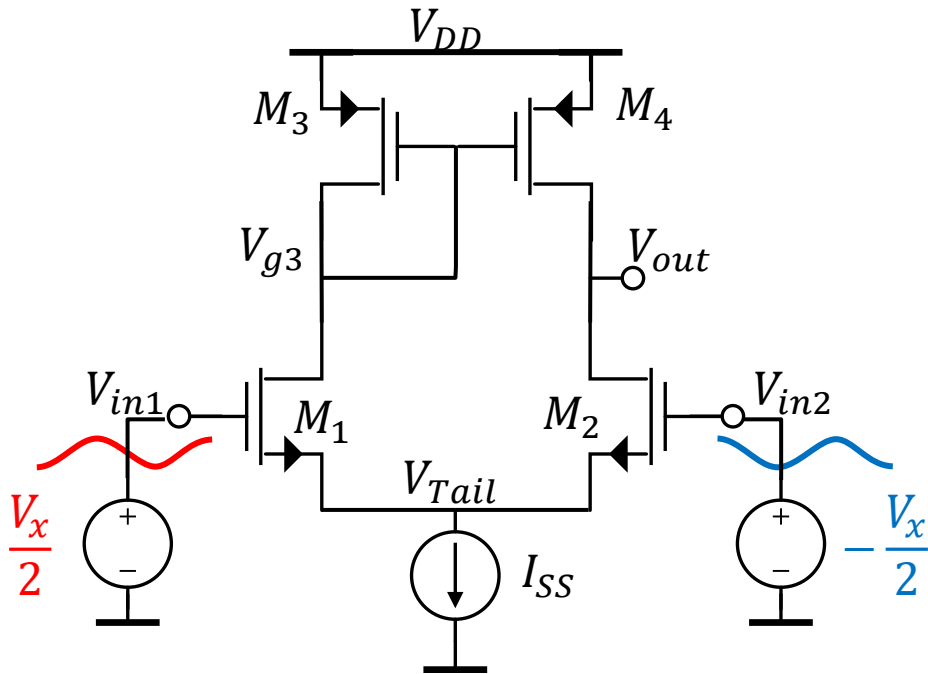
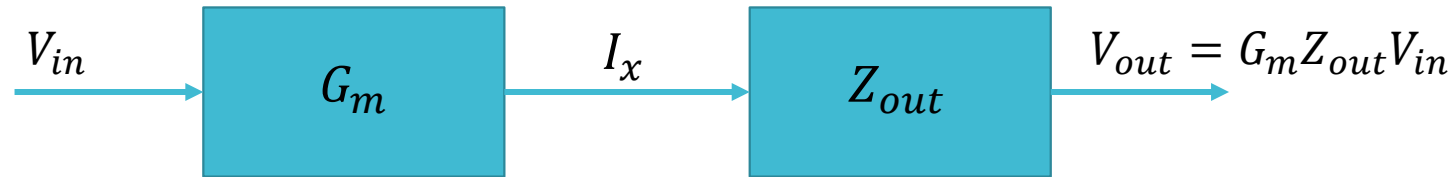
$$I_x = \frac{V_x}{r_o^{M4}} + 2 \cdot \frac{V_x}{r_d^{M2}}$$

$$\rightarrow r_d^{M2} \approx 2 \cdot r_o^{M2}$$

$$I_x = \frac{V_x}{r_o^{M4}} + \frac{V_x}{r_o^{M2}}$$

$$R_{out} = \frac{V_x}{I_x} \approx r_o^{M2} || r_o^{M4}$$

- Análisis aproximado: Modo diff



$$G_m \approx +g_m^{M1}$$

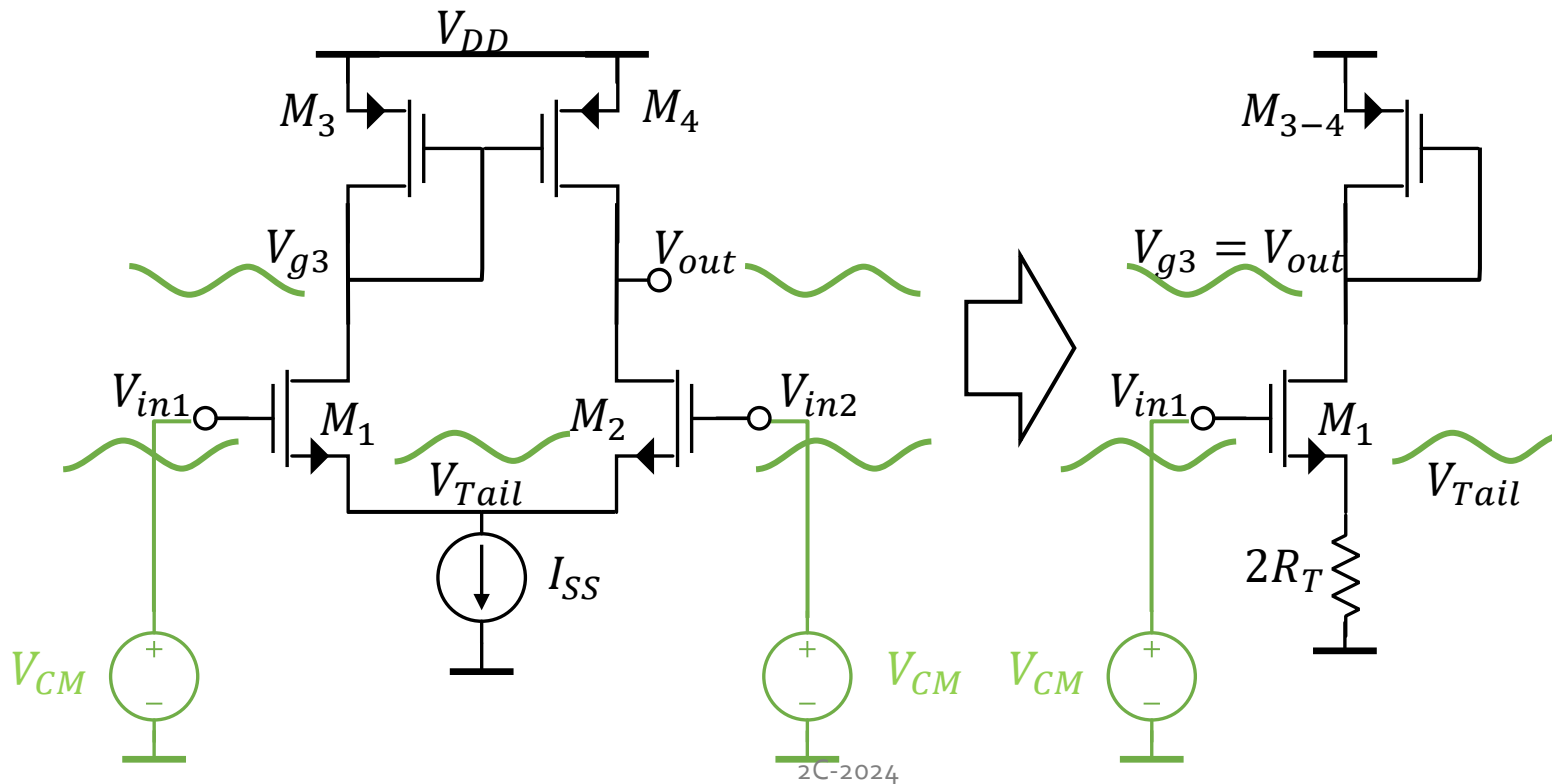
$$R_{out} \approx r_o^{M2} || r_o^{M4}$$

$$A_{vd} \approx +g_m^{M1} \cdot r_o^{M2} || r_o^{M4}$$

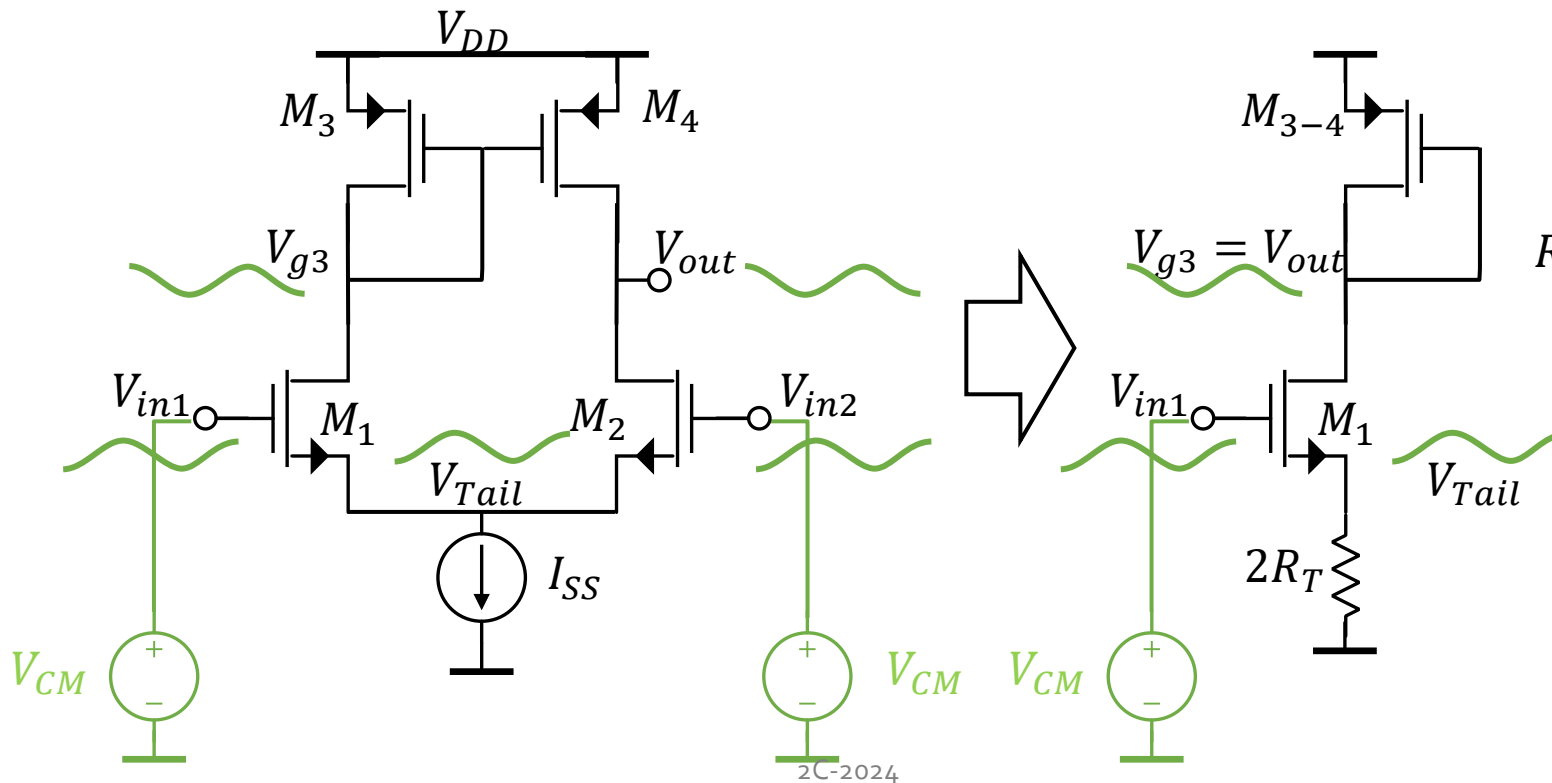
Un análisis ~~exacto~~ más preciso que no ignore la variación de V_{Tail} :

$$A_{vd} \approx +g_m^{M1} \cdot r_o^{M2} || r_o^{M4} \cdot \frac{2g_m^{M4}r_o^{M4} + 1}{2(g_m^{M4}r_o^{M4} + 1)}$$

- Análisis aproximado: Modo Común
 - El principal factor es la variación de corriente de tail
 - La simetría eléctrica que se presenta permite simplificar



- Análisis aproximado: Modo Común
 - El principal factor es la variación de corriente de tail
 - La simetría eléctrica que se presenta permite simplificar



$$G_m = \frac{g_m^{M1}}{1 + g_m^{M1} \cdot 2R_T} \approx \frac{1}{2R_T}$$

$$R_{out} = \frac{1}{g_{m3}} \parallel (r_o^{M1} + 2R_T + g_m^{M1} \cdot r_o^{M1} \cdot 2R_T)$$

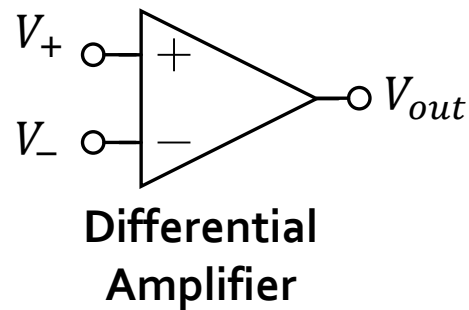
$$R_{out} \approx \frac{1}{g_{m3}}$$

$$A_{vCM} = G_m \cdot R_{out} \approx \frac{1}{2g_{m3} \cdot R_T}$$

Contenido

- Operación diferencial vs single-ended
- Definiciones de ganancias y modos
- Etapas fully-differential de baja ganancia
- Par diferencial con carga espejo (5-OTA)
 - Rango de modo común de entrada (ICMR)
 - Rango de salida (Output swing)
 - Análisis de pequeña señal
- Amplificadores operacionales
 - 2-stage OTA (7-OTA)

- ¿Cuál es la diferencia entre un amplificador diferencial y un amplificador operacional (OpAmp)?



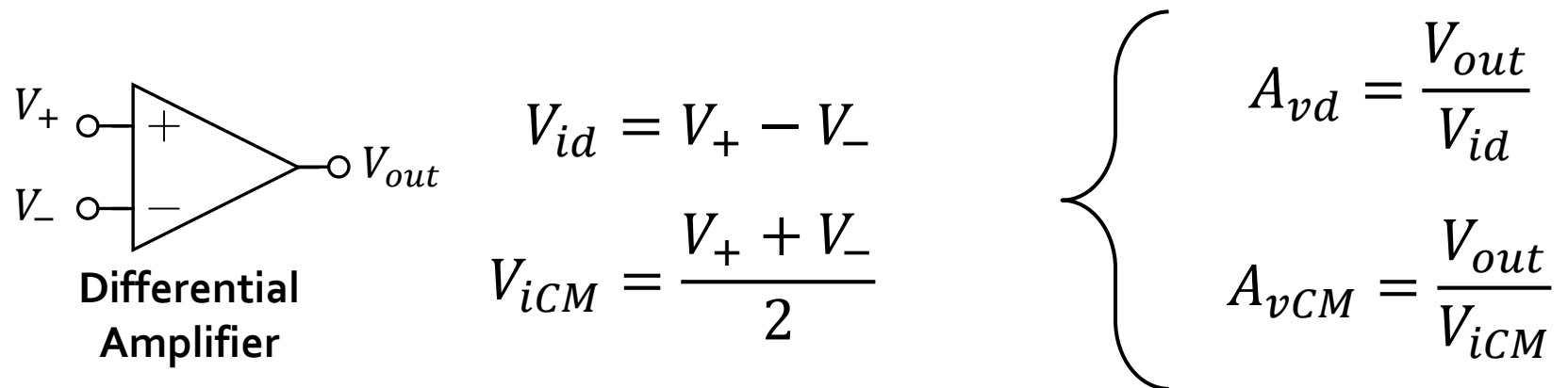
$$V_{id} = V_+ - V_-$$
$$V_{iCM} = \frac{V_+ + V_-}{2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{vd} = \frac{V_{out}}{V_{id}} \\ A_{vCM} = \frac{V_{out}}{V_{iCM}} \end{array} \right.$$

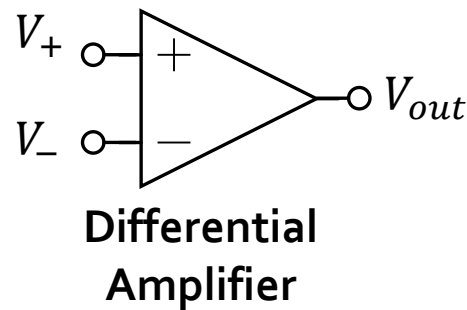
- ¿Cuál es la diferencia entre un amplificador diferencial y un amplificador operacional (OpAmp)?
- OpAmp es una variante de amplificador diferencial:

The term “operational amplifier” (op amp) was coined in the 1940s, well before the invention of the transistor and the integrated circuit. Op amps realized by vacuum tubes¹ served as the core of electronic “integrators,” “differentiators,” etc., thus forming systems whose behavior followed a given differential equation. Called “analog computers,” such circuits were used to study the stability of differential equations that arose in fields such as control or power systems. Since each op amp implemented a mathematical *operation* (e.g., integration), the term “operational amplifier” was born.

B. Razavi, Fundamentals of microelectronics, 3rd ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2021.



- ¿Cuál es la diferencia entre un amplificador diferencial y un amplificador operacional (OpAmp)?
- OpAmp:
 1. Se lo utiliza siempre realimentado → su entrada diferencial es cercana a cero (es una tierra virtual)
 2. Tiene ganancia diferencial elevada (por ejemplo >40 dB) → Difícil de lograr con una única etapa
 3. Su dinámica (polos y ceros) es muy relevante porque afecta la estabilidad del lazo de realimentación

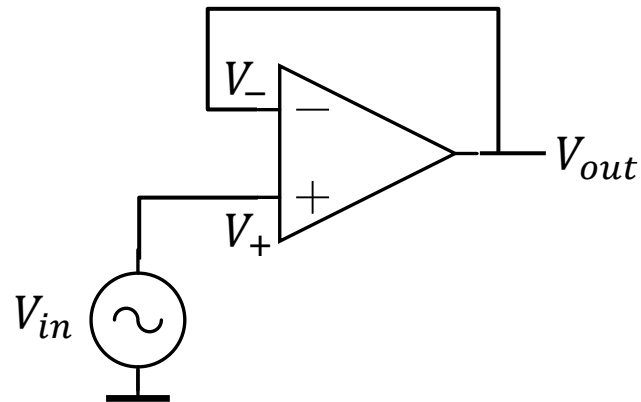


$$V_{id} = V_+ - V_-$$

$$V_{iCM} = \frac{V_+ + V_-}{2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{vd} = \frac{V_{out}}{V_{id}} \\ A_{vCM} = \frac{V_{out}}{V_{iCM}} \end{array} \right.$$

- Ejemplo: Buffer de tensión
- Calcule la transferencia en baja frecuencia $A_{vCL} = V_{out}/V_{in}$ para los casos siguientes:
 1. Realimentación ideal (ganancia infinita)
 2. Ganancia diferencial de 40 dB



**Amplificador no-inversor
de ganancia unitaria**

- Ejemplo: Buffer de tensión
- Calcule la transferencia en baja frecuencia $A_{vCL} = V_{out}/V_{in}$ para los casos siguientes:
 1. Realimentación ideal (ganancia infinita)
 2. Ganancia diferencial de 40 dB

Caso 1 $V_- = V_+ \rightarrow V_{out} = V_{in} \rightarrow A_{vCL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$

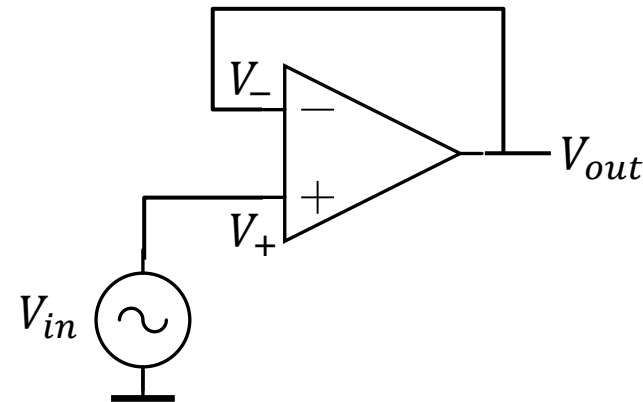
Caso 2 $V_{out} = A_{vd} \cdot (V_+ - V_-)$

$$V_{out} = A_{vd} \cdot (V_{in} - V_{out}) = A_{vd} \cdot V_{in} - A_{vd} \cdot V_{out}$$

$$V_{out} = \frac{A_{vd}}{1 + A_{vd}} \cdot V_{in} \rightarrow A_{vCL} = \frac{A_{vd}}{1 + A_{vd}}$$

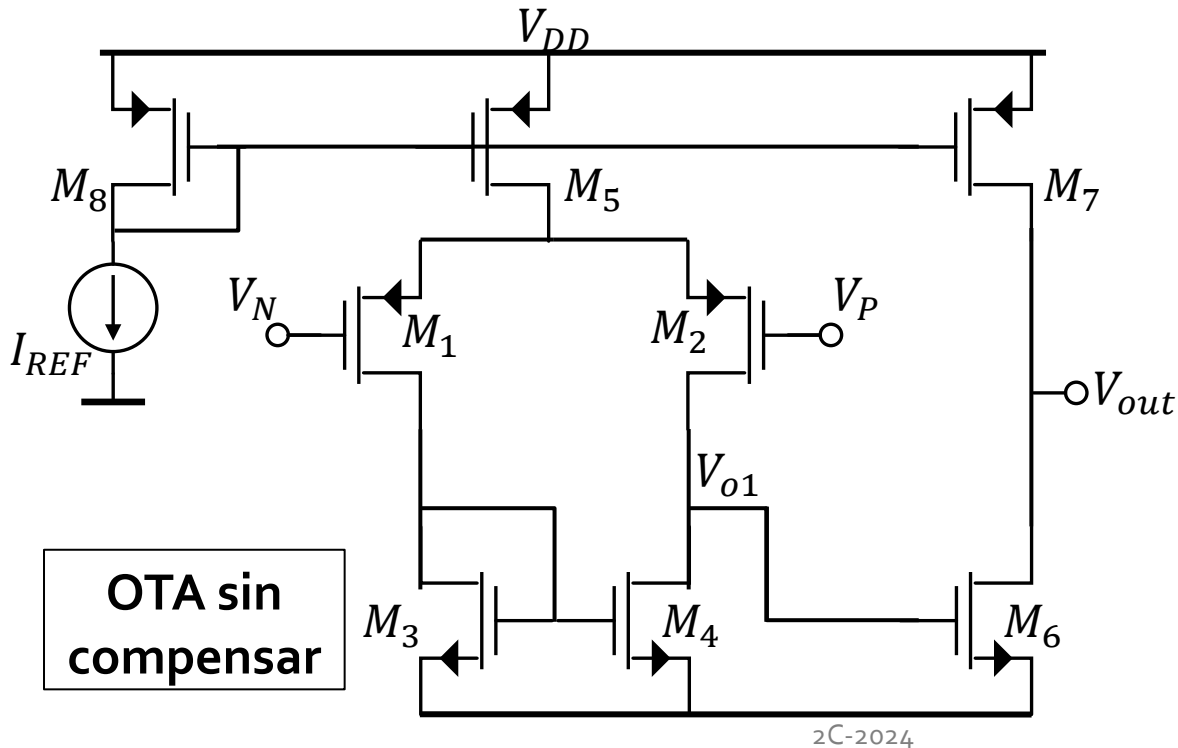
Para $A_{vd} = 40\text{dB} = 100 \text{ V/V}$ la ganancia tiene un error de 1% respecto del caso anterior:

$$A_{vCL} = \frac{A_{vd}}{1 + A_{vd}} = \frac{100 \text{ V/V}}{1 + 100 \text{ V/V}} = 0.990$$



**Amplificador no-inversor
de ganancia unitaria**

- Amplificador 2-stage OTA:
 - OTA: Operational Transconductance Amplifier → Salida de alta impedancia
 - Par diferencial con carga espejo + etapa common-source
 - Entrada diferencial con ICMR relativamente amplio: etapa diferencial con carga espejo
 - Swing de salida amplio: etapa CS
 - Alta ganancia: dos etapas de amplificación
 - Muy común dentro de ASICs cuando la carga es capacitiva

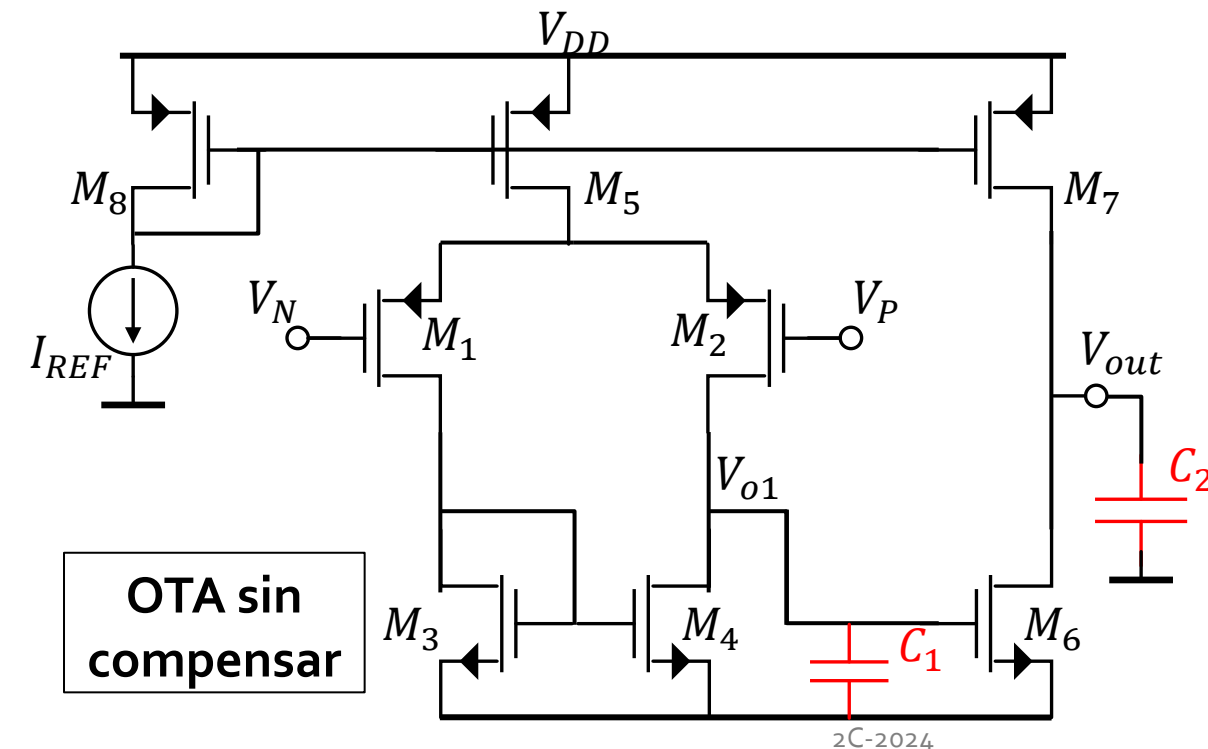
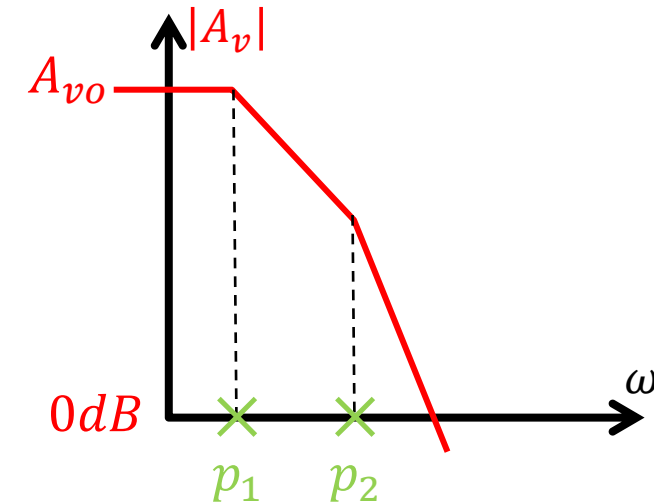


$$A_{v1} = \frac{V_{o1}}{V_{id}} = -g_m^{M1} \cdot r_{o2} || r_{o4}$$

$$A_{v2} = \frac{V_{out}}{V_{o1}} = -g_m^{M6} \cdot r_{o6} || r_{o7} || R_L$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{id}} = g_m^{M1} \cdot g_m^{M6} \cdot r_{o2} || r_{o4} \cdot r_{o6} || r_{o7} || R_L$$

- Amplificador 2-stage OTA:
 - Cada etapa de ganancia agrega al menos un polo a la transferencia
 - ¿Por qué esto es relevante?



$$A_{v1} = \frac{V_{o1}}{V_{id}} = -g_m^{M1} \cdot r_{o2} || r_{o4} \cdot \frac{1}{1 + sC_1(r_{o2} || r_{o4})}$$

$$A_{v2} = \frac{V_{out}}{V_{o1}} = -g_m^{M6} \cdot r_{o6} || r_{o7} || R_L \cdot \frac{1}{1 + sC_2(r_{o6} || r_{o7} || R_L)}$$

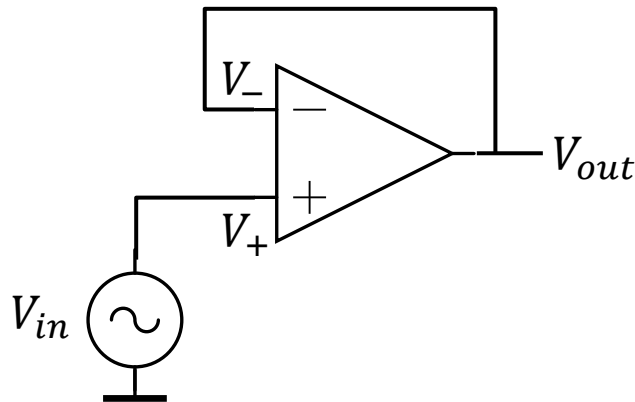
$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{id}} = \frac{g_m^{M1} \cdot g_m^{M6} \cdot r_{o2} || r_{o4} \cdot r_{o6} || r_{o7} || R_L}{[1 + sC_1(r_{o2} || r_{o4})] \cdot [1 + sC_2(r_{o6} || r_{o7} || R_L)]}$$

- Obtener la transferencia de lazo cerrado $A_{vCL} = V_{out}/V_{in}$ del siguiente sistema realimentado:

- OpAmp con 1 polo: $A_{vd} = \frac{V_{out}}{V_+ - V_-} = \frac{A_{vo}}{1 + \frac{s}{p_1}}$

- Demuestre que: $A_{vCL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_{vo}}{1 + A_{vo}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{(1 + A_{vo}) \cdot p_1}}$

- ¿Cómo compara el ancho de banda a lazo cerrado con el del amplificador de 1 polo a lazo abierto?



**Amplificador no-inversor
de ganancia unitaria**

Contenido

- Operación diferencial vs single-ended
- Definiciones de ganancias y modos
- Etapas fully-differential de baja ganancia
- Par diferencial con carga espejo (5-OTA)
 - Rango de modo común de entrada (ICMR)
 - Rango de salida (Output swing)
 - Análisis de pequeña señal
- Amplificadores operacionales
 - 2-stage OTA (7-OTA)