

วงจรมายพื้นฐาน (Basic CMOS amplifiers)

ชนิดของวงจขยายสัญญาณ

1.) Large signal static characterization:

- Plot of output versus input (transfer curve)
- Large signal gain
- Output and input swing limits

2.) Small signal static characterization:

- AC gain
- AC input resistance
- AC output resistance

3.) Small signal dynamic characterization:

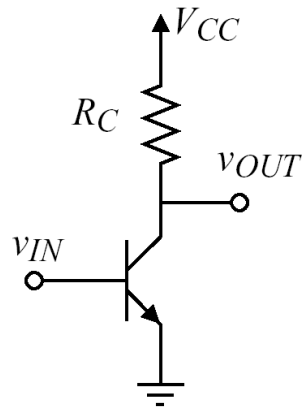
- Bandwidth
- Noise
- Power supply rejection

4.) Large signal dynamic characterization:

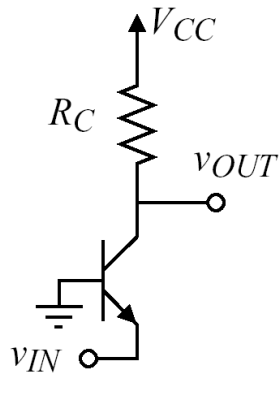
- Slew rate
- Nonlinearity

Type of Amplifier	Gain = $\frac{\text{Output}}{\text{Input}}$	Ideal Input Resistance	Ideal Output Resistance
Voltage	$A_v = \frac{\text{Output Voltage}}{\text{Input Voltage}}$	Infinite	Zero
Current	$A_i = \frac{\text{Output Current}}{\text{Input Current}}$	Zero	Infinite
Transconductance	$G_m = \frac{\text{Output Current}}{\text{Input Voltage}}$	Infinite	Infinite
Transresistance	$R_m = \frac{\text{Output Voltage}}{\text{Input Current}}$	Zero	Zero

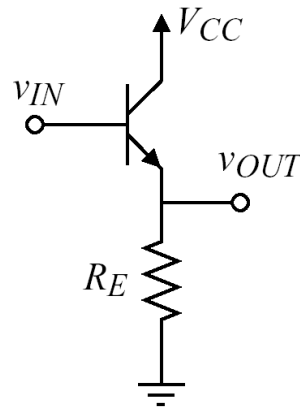
วงจรถยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์หนึ่งตัว (single-transistor amplifiers)



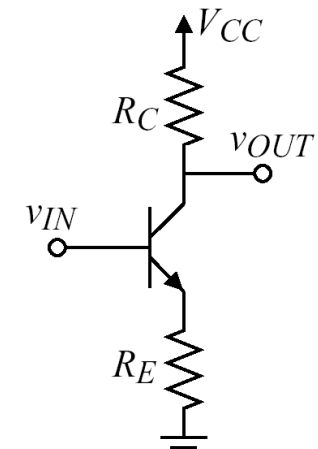
Common Emitter



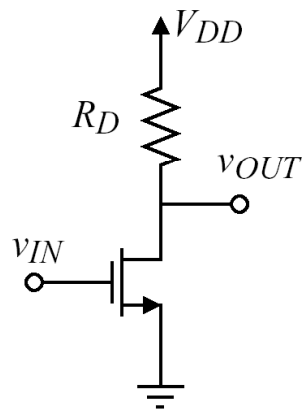
Common Base



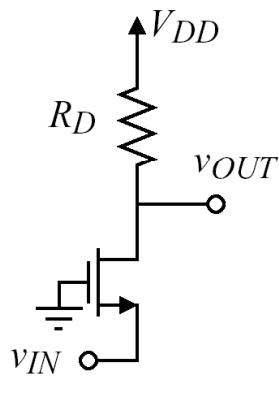
Common Collector



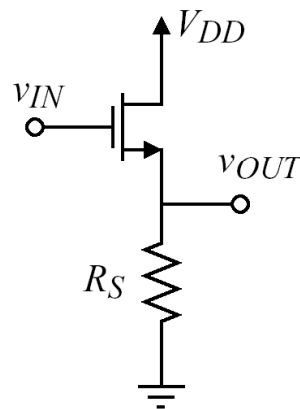
Emitter Degeneration



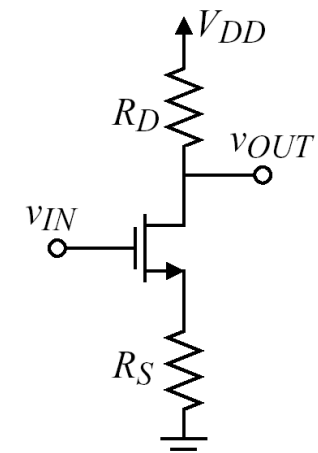
Common Source



Common Gate

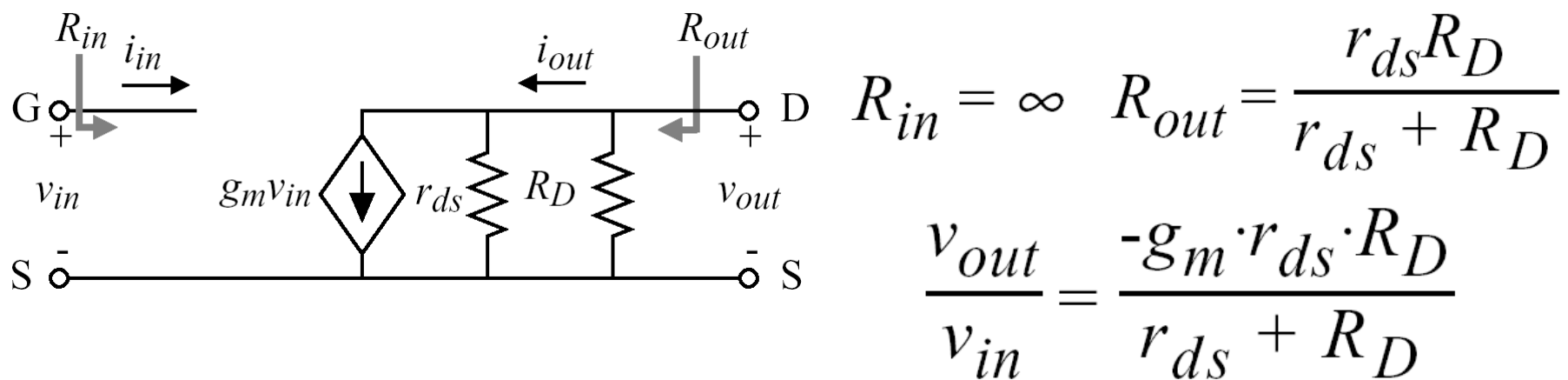
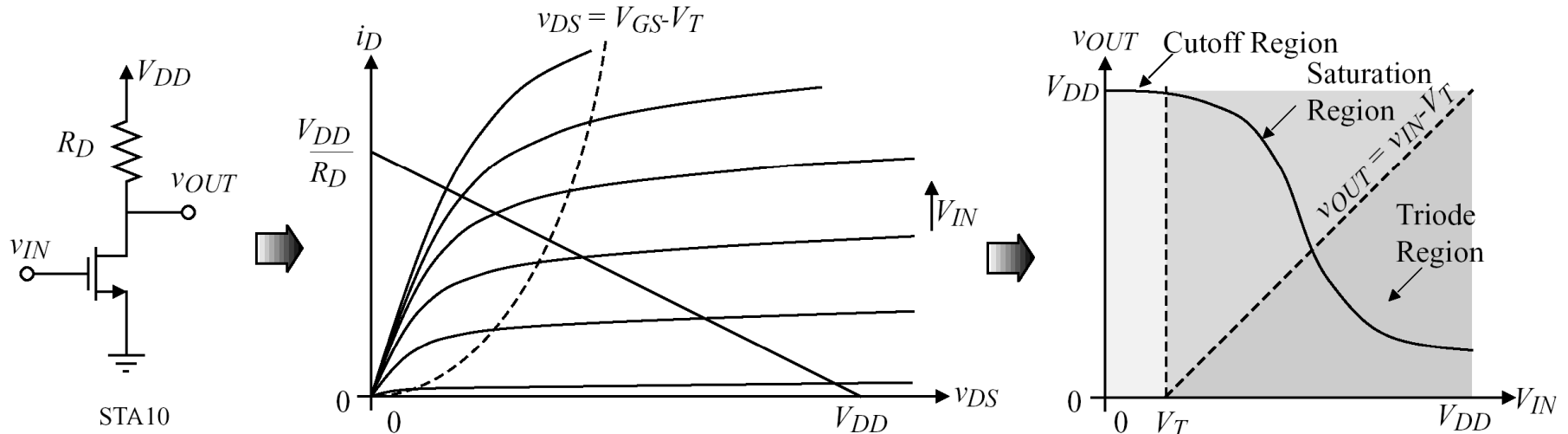


Common Drain



Source Degeneration

วงจรขยายซอร์สร่วม (common-source amplifier)



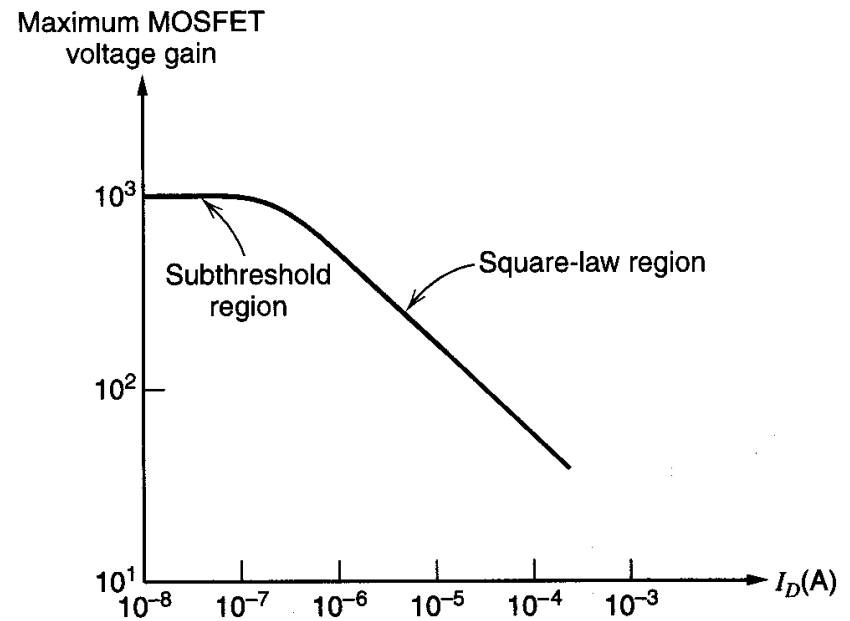
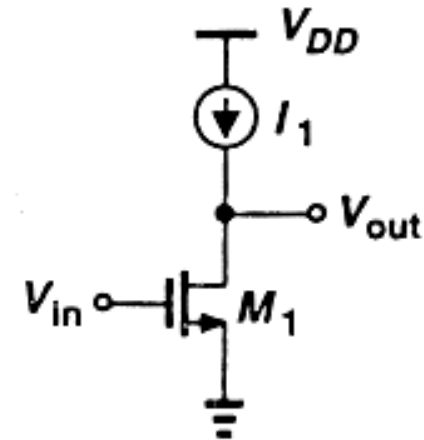
อัตราขยายแรงดันสูงสุดของวงจรมายชอร์สร่วม

▶ R_D มีค่าเป็นอนันต์

$$A_v = -g_m r_o = -\frac{\sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D}}{\lambda I_D}$$

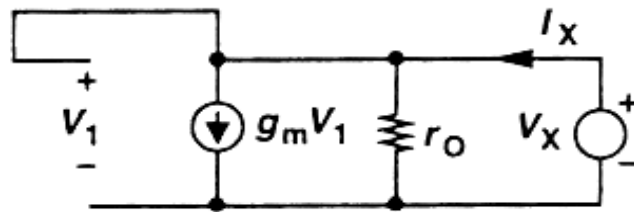
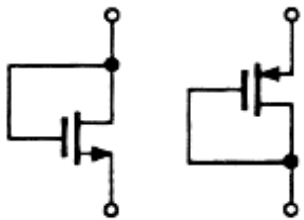
$$= -\frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}{I_D}} = -\frac{2}{\lambda (V_{GS} - V_{TH})}$$

ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ MOSFET ทำงานในย่าน **weak-inversion**



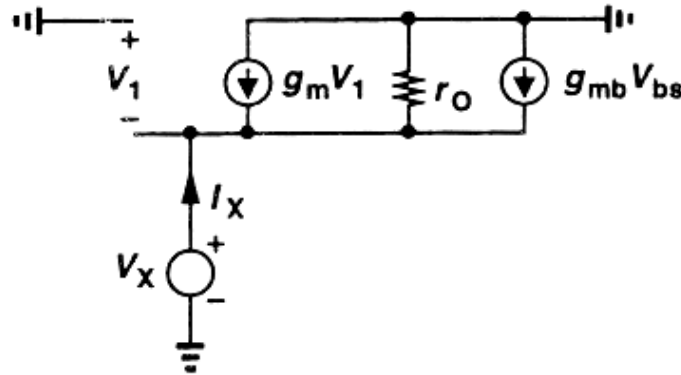
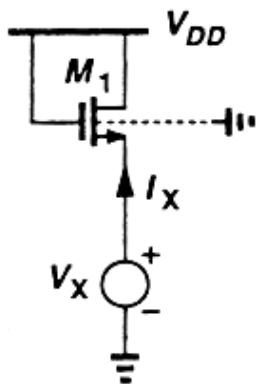
แอกทีฟโหลด

▶ MOSFET ที่ต่อแบบไดโอด



$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{1}{g_m} // r_o \quad \square \quad \frac{1}{g_m}$$

▶ คิรวมผลของ body



$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{1}{g_m + g_{mb}} // r_o$$

$$\square \quad \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

วงจรรขยาย CS ที่มีโหลดทรานซิสเตอร์ต่อแบบไดโอด

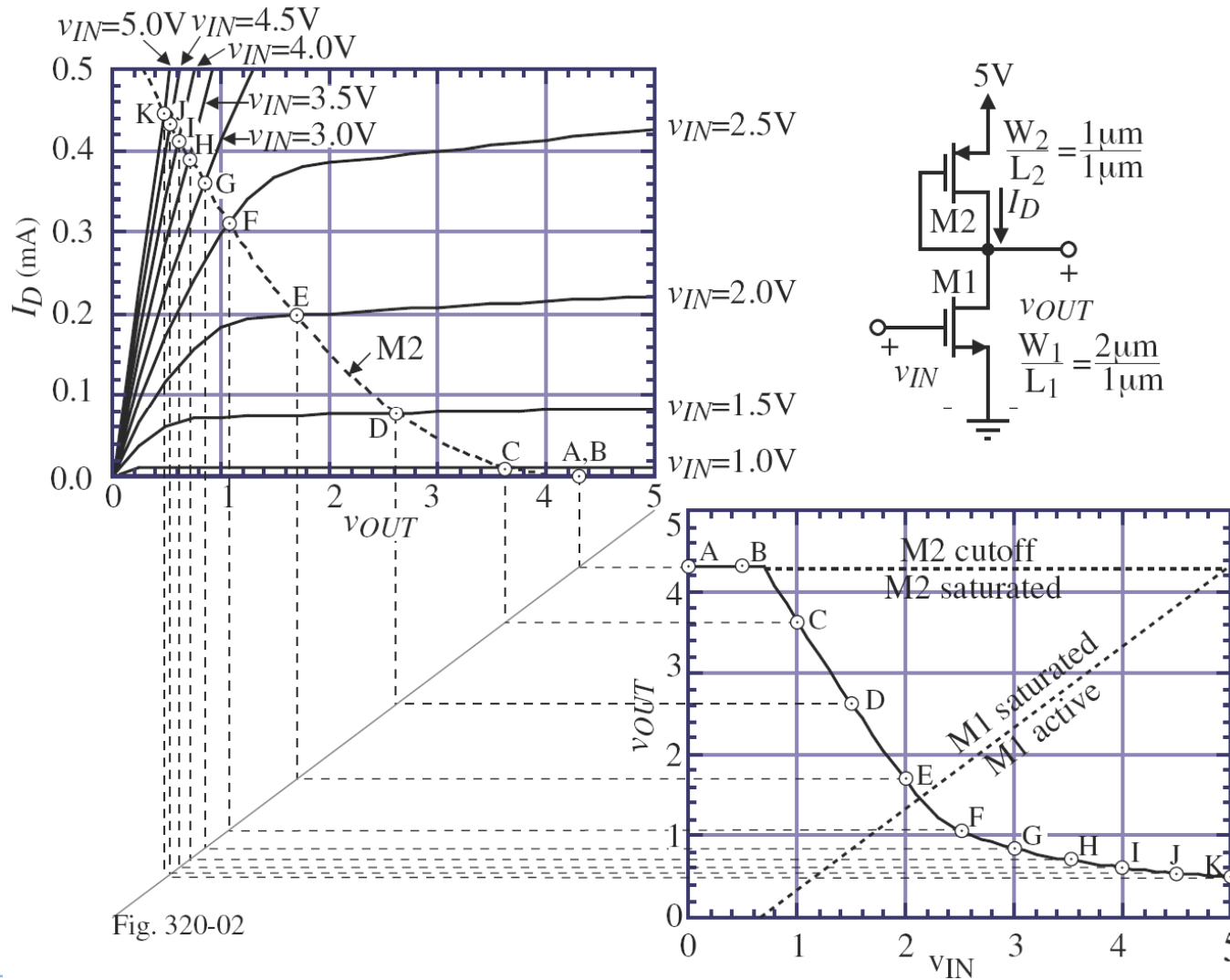


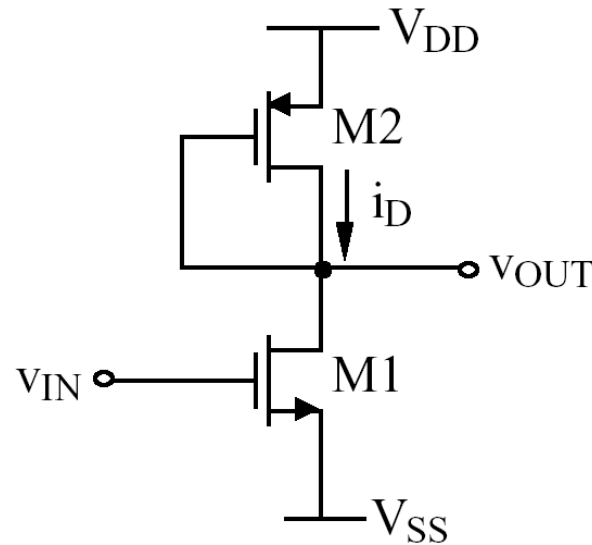
Fig. 320-02

การแกว่งของแรงดันเอาต์พุต (output voltage swing)

- ▶ แรงดันเอาต์พุตแกว่งขึ้นได้สูงสุดเมื่อ **M2** หยุดนำกระแส

$$v_{OUT(max)} \approx V_{DD} - |V_{TP}|$$

- ▶ แรงดันเอาต์พุตแกว่งลงได้ต่ำสุดเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าสูงสุดซึ่ง **M1** อยู่ในย่าน **triode** หยุดนำกระแส



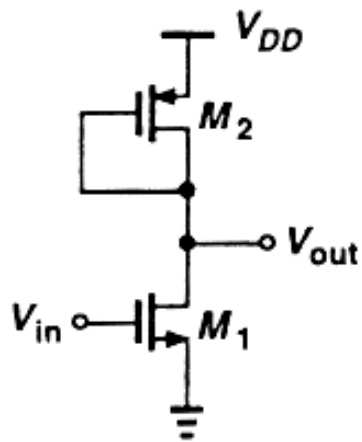
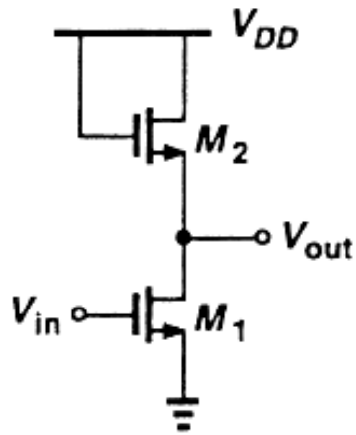
$$i_D = \beta_1 \left((v_{GS1} - V_T)v_{DS1} - \frac{v_{DS1}^2}{2} \right) = \beta_1 \left((V_{DD} - V_T)(v_{OUT}) - \frac{(v_{OUT})^2}{2} \right)$$

$$i_D = \frac{\beta_2}{2} (v_{SG2} - V_T)^2 = \frac{\beta_2}{2} (V_{DD} - v_{OUT} - V_T)^2 = \frac{\beta_2}{2} (v_{OUT} + V_T - V_{DD})^2$$

$$v_{OUT(min.)} = V_{DD} - V_T - \frac{V_{DD} - V_{SS} - V_T}{\sqrt{1 + \beta_2/\beta_1}}$$

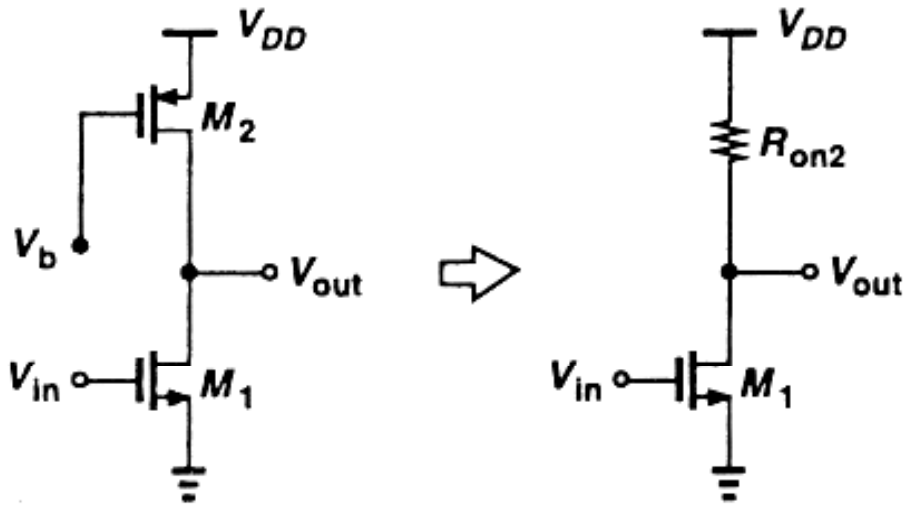
วงจรรขยาย CS ที่มีโหลดทรานซิสเตอร์ต่อแบบไดโอด

▶ อัตรารขยาย small-signal



$$\begin{aligned}
 A_v &= -g_{m1} \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} \\
 &= -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \frac{1}{1+\eta} = -\frac{\sqrt{2\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_1 I_{D1}}}{\sqrt{2\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_2 I_{D2}}} \frac{1}{1+\eta} \\
 &= -\frac{\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_1}}{\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_2}} \frac{1}{1+\eta}
 \end{aligned}$$

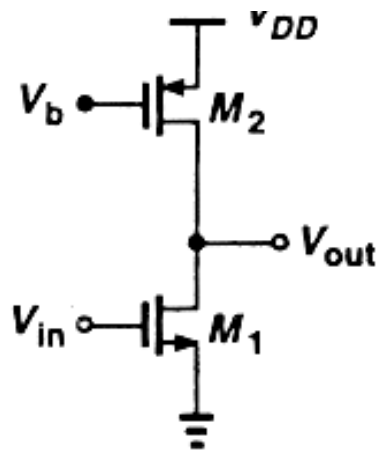
วงจรขยาย CS กับแอกทีฟโหลด



• โหลดทรานซิสเตอร์ในช่วง triode

$$A_v = -g_{m1} (r_{o1} // R_{on2})$$

$$R_{on2} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{DD} - V_b - |V_{TP}|)}$$

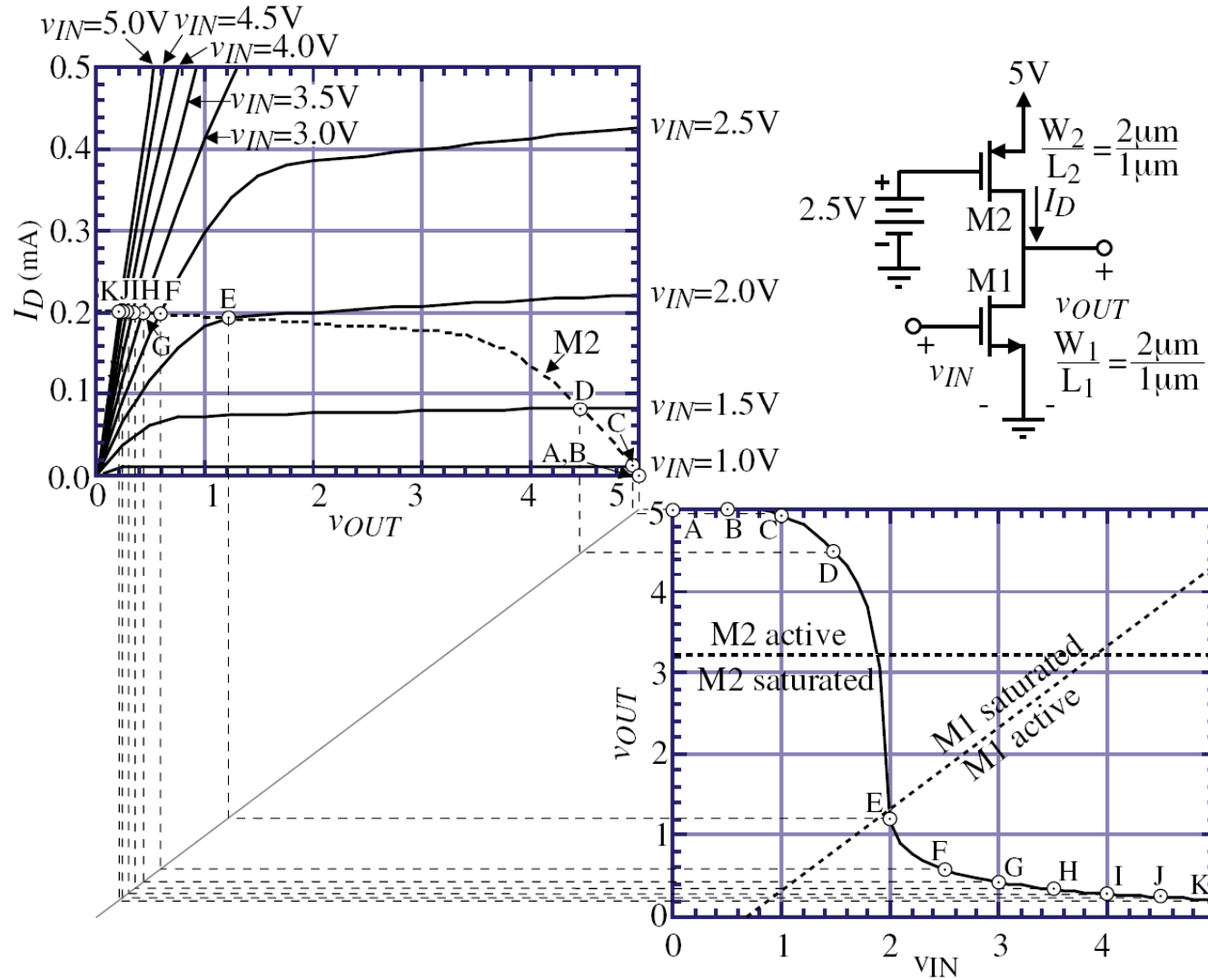


• โหลดทรานซิสเตอร์ในช่วงอิ่มตัว

$$A_v = -g_m (r_{o1} // r_{o2})$$

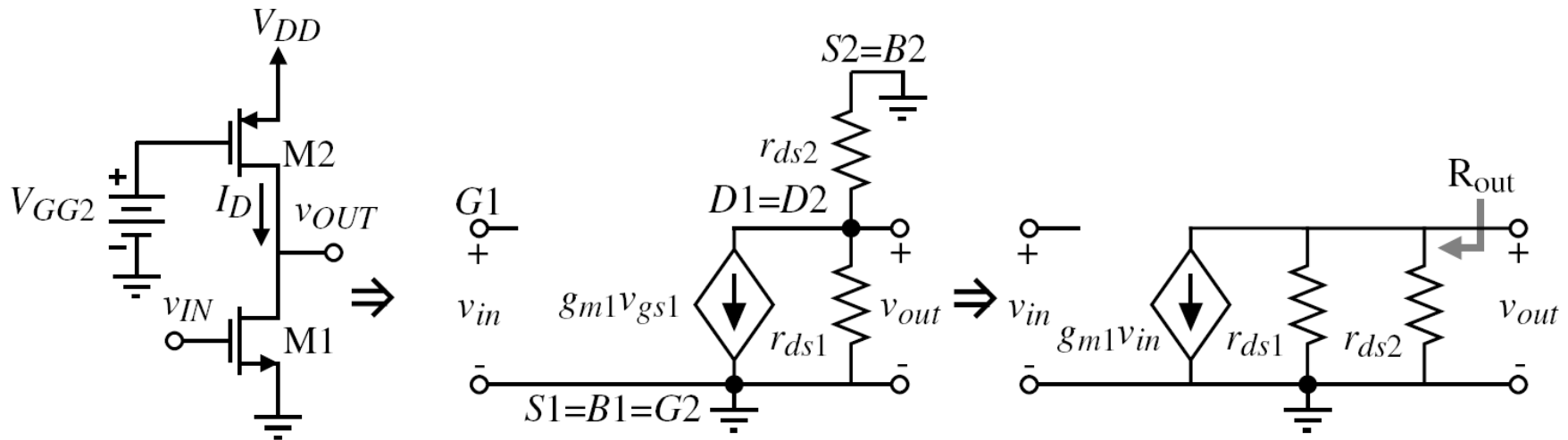


วงจรรขยาย CS กับโหลดแหล่งจ่ายกระแส



- ▶ **M2** เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ซึ่งเป็นแอกทีฟให้กับ **M1**

วงจรถยาย CS กับโหลดแหล่งจ่ายกระแส



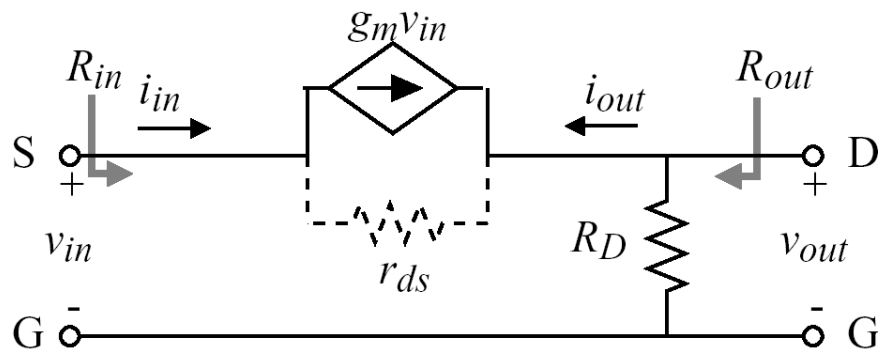
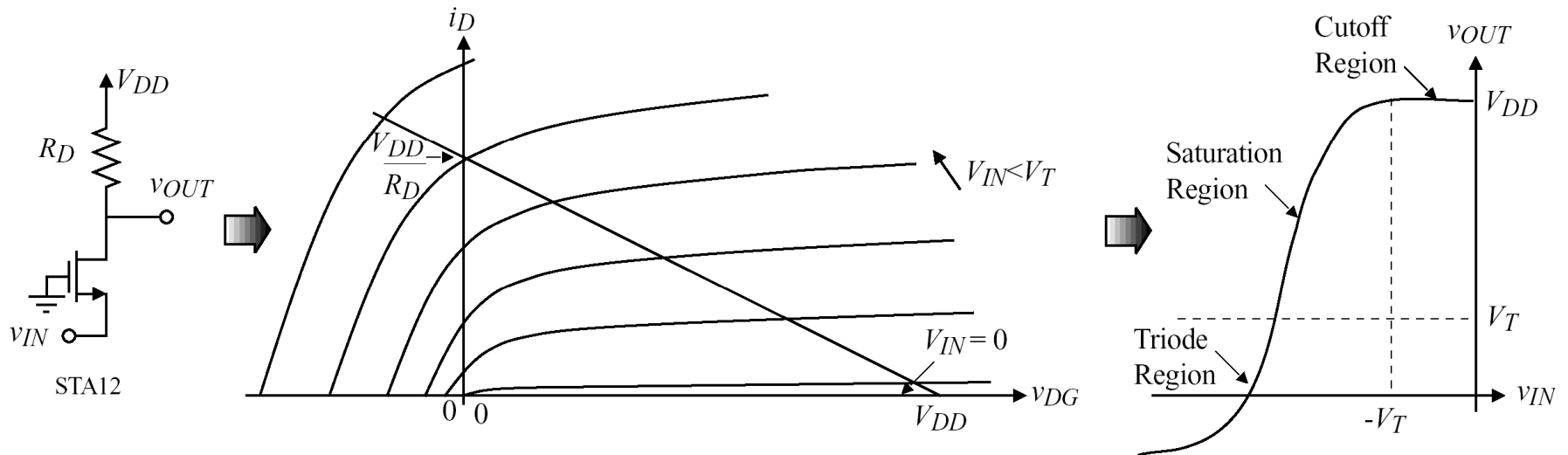
▶ อัตราขยายแรงดัน

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_{m1}}{g_{ds1} + g_{ds2}} = \left(\frac{2K'_N W_1}{L_1 I_D} \right)^{1/2} \left(\frac{-1}{\lambda_1 + \lambda_2} \right) \propto \frac{1}{\sqrt{I_D}}$$

$$R_{out} = \frac{1}{g_{ds1} + g_{ds2}} \cong \frac{1}{I_D(\lambda_1 + \lambda_2)}$$

วงจรรขยายเกทร่วม (common-gate amplifier)

- ▶ วงจรรขยายเกทร่วมเป็นวงจรรขยายไม่กลับเฟสและมีความต้านทานอินพุตต่ำ

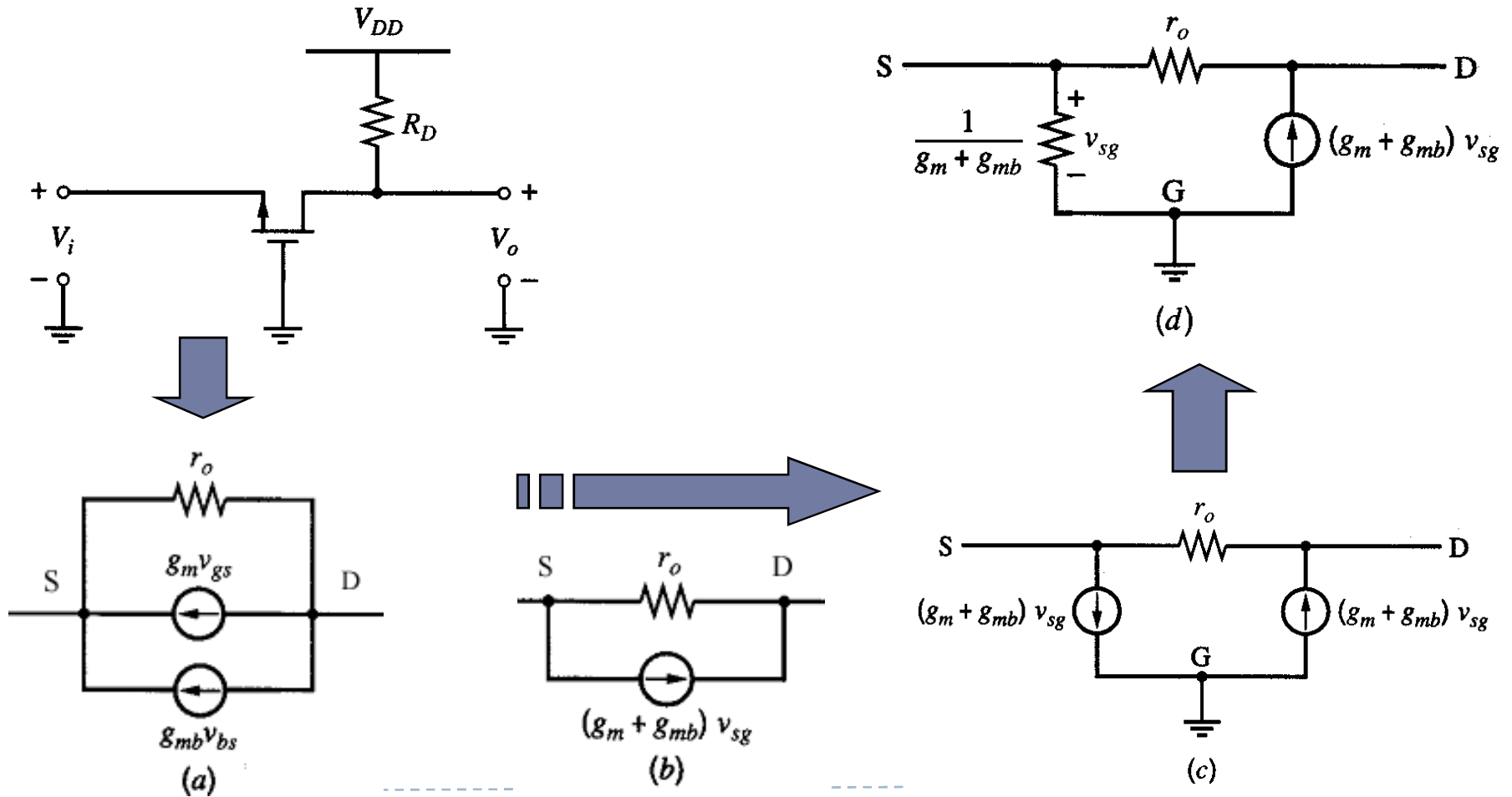


$$R_{in} \approx \frac{1}{g_m} \quad R_{out} \approx R_D$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} \approx g_m R_D \quad \frac{i_{out}}{i_{in}} = -1$$

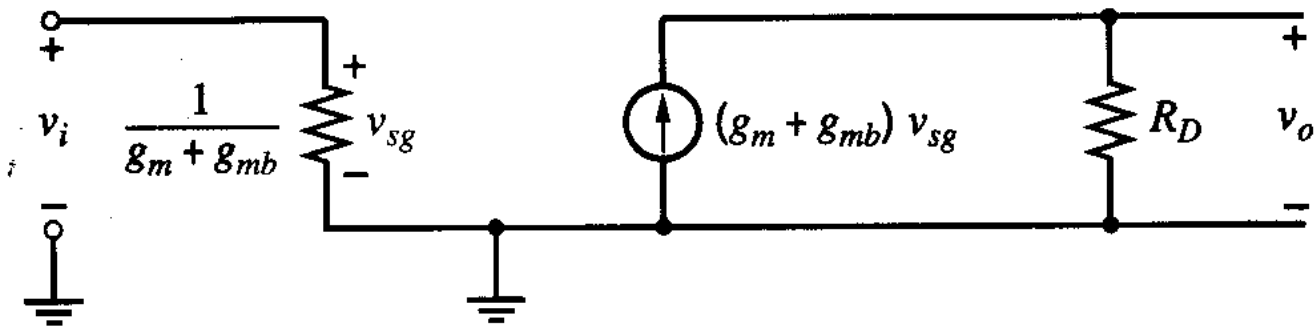
วงจรขยาย common-gate (CG)

- มีการป้อนกลับผ่าน r_o ทำให้เป็นวงจรขยาย bilateral



วงจรขยาย common-gate (CG)

- ▶ ถ้า r_o เป็นอนันต์ วงจรจะเป็น unilateral



$$G_m = g_m + g_{mb}$$

$$R_i = \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

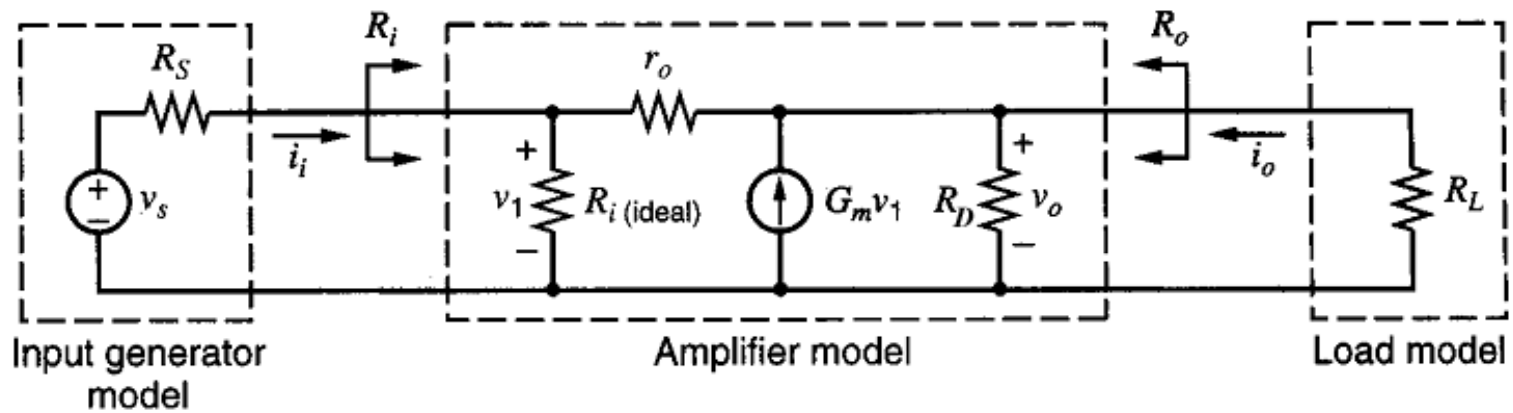
$$R_o = R_D$$

$$A_v = G_m R_o = (g_m + g_{mb}) R_D$$

$$A_i = G_m R_i = 1$$

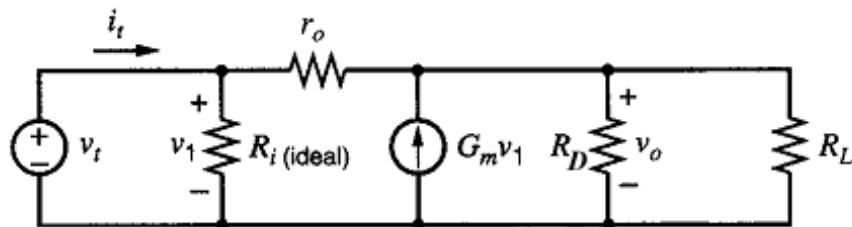
วงจรถยาย CG เมื่อ r_o น้อยกว่าอนันต์

- ▶ R_i จะขึ้นกับ R_L ส่วน R_o จะขึ้นกับ R_S



วงจรรขยาย CG เมื่อ r_o น้อยกว่าอนันต์

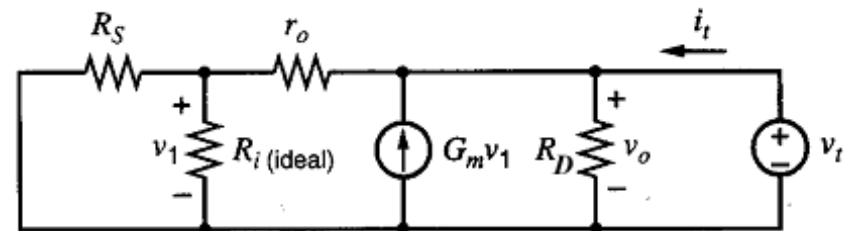
▶ ความต้านทานอินพุท



$$R_i = \frac{v_t}{i_t} = \frac{r_o + (R_D \parallel R_L)}{1 + (g_m + g_{mb})r_o}$$

$$\square \frac{1}{g_m + g_{mb}} + \frac{(R_D \parallel R_L)}{(g_m + g_{mb})r_o}$$

▶ ความต้านทานเอาต์พุท



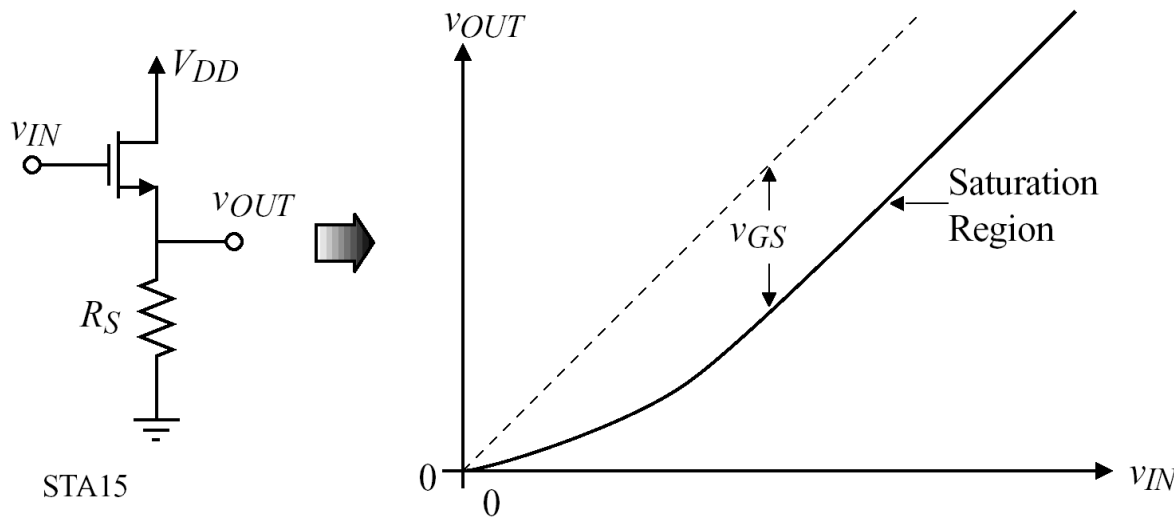
$$R_o = \frac{v_t}{i_t}$$

$$= R_D \parallel \left[r_o + R_S \left(1 + (g_m + g_{mb})r_o \right) \right]$$

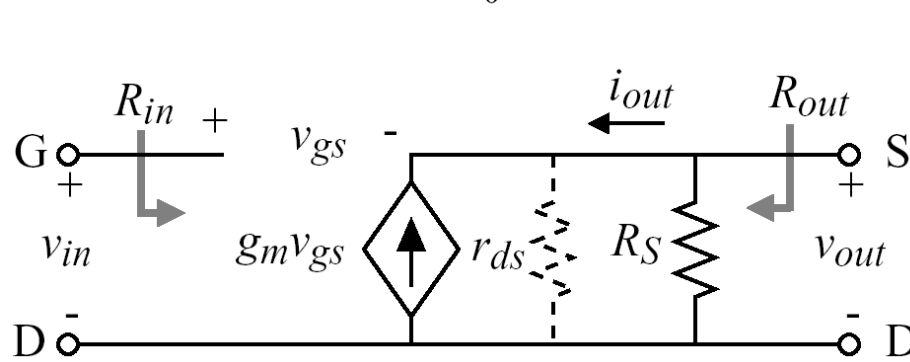
$$\cong R_D \parallel \left[R_S (g_m + g_{mb})r_o \right]$$

วงจรขยายเดรนร่วม (common-drain amplifier)

- ▶ วงจรขยายเดรนร่วมมีอัตราขยายน้อยกว่าหนึ่ง มักใช้เป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดัน และวงจรบัฟเฟอร์



$$R_{in} = \infty$$



$$R_{out} = R_S \parallel (1/g_m) = \frac{R_S}{1 + g_m R_S}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} < 1$$

วงจรรขยาย CD ที่มีโหนดเป็นตัวต้านทาน

- ▶ เนื่องจากขา **Bulk** ของ **NMOS** จะต้องถูกต่อลงกราวนด์ (สำหรับเทคโนโลยี **n-well**) จึงทำให้มีผลของ **body**

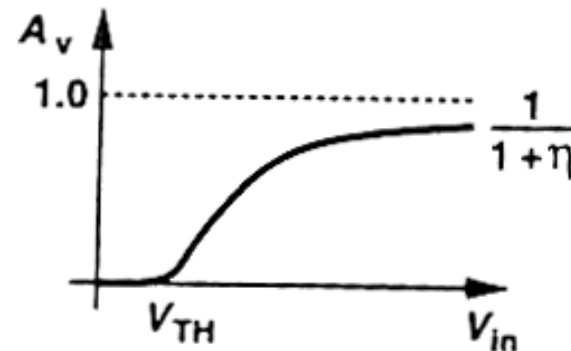
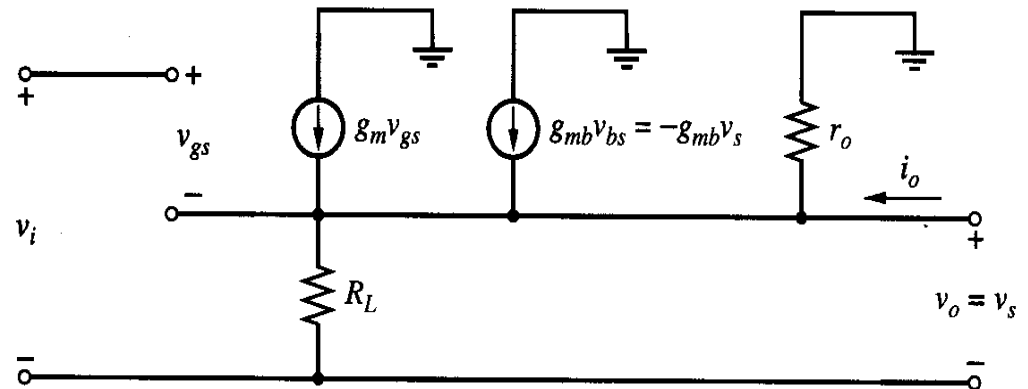
$$V_{out} = V_{in} - V_1$$

$$V_{bs} = -V_{out}$$

$$\frac{V_{out}}{R_L} = g_m V_1 - g_{mb} V_{out} - \frac{V_{out}}{r_o}$$

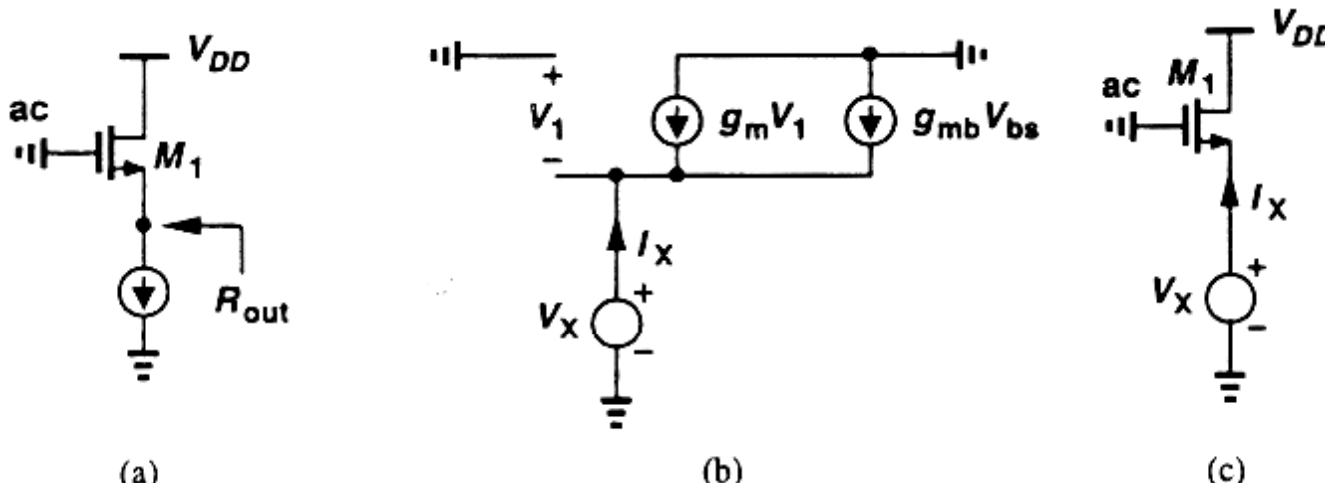
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \equiv A_v = \frac{g_m}{g_m + \frac{1}{r_o} + \frac{1}{R_L} + g_{mb}}$$

$$\approx \frac{g_m R_L}{1 + (g_m + g_{mb}) R_L} \leq 1$$



วงจรรขยาย CD ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

▶ ความต้านทานขาออก

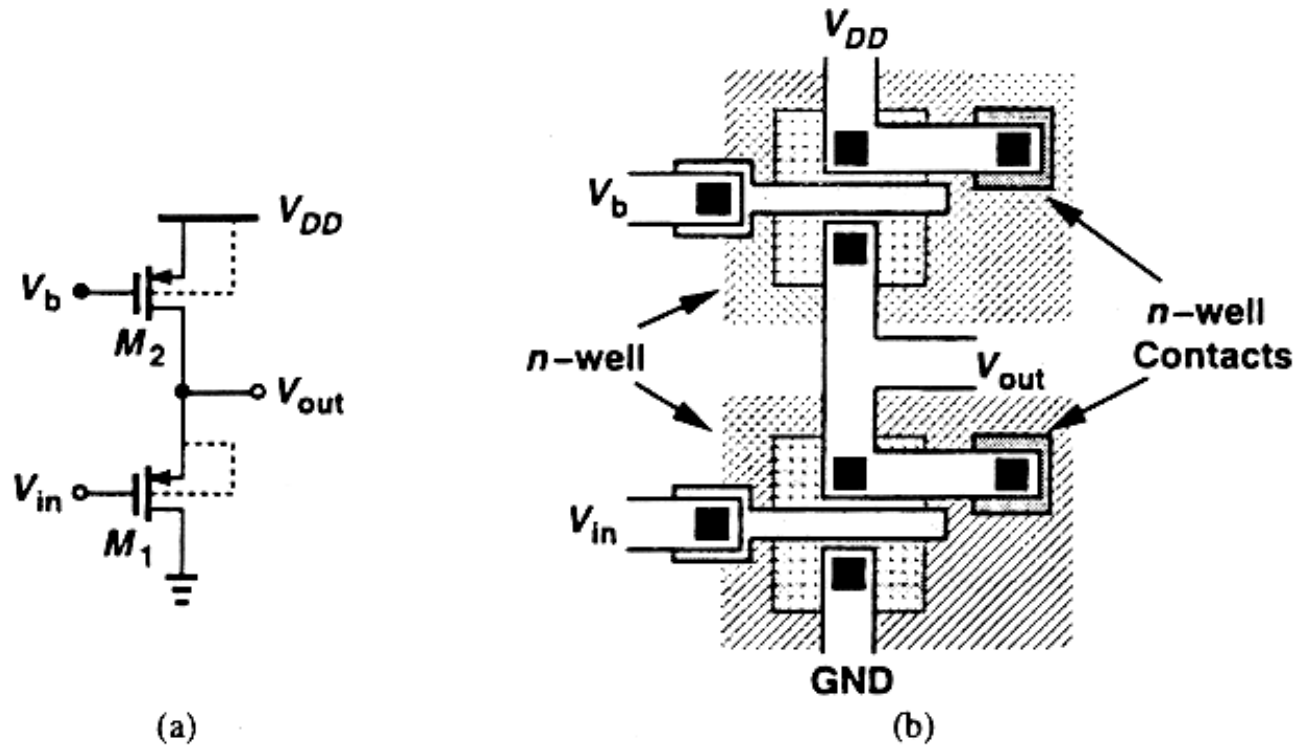


$$\frac{V_x}{I_x} \equiv R_{out} = \frac{1}{g_m + g_{mb}} \quad \Rightarrow \quad A_V \equiv G_m R_{out} = \frac{g_m}{g_m + g_{mb}}$$

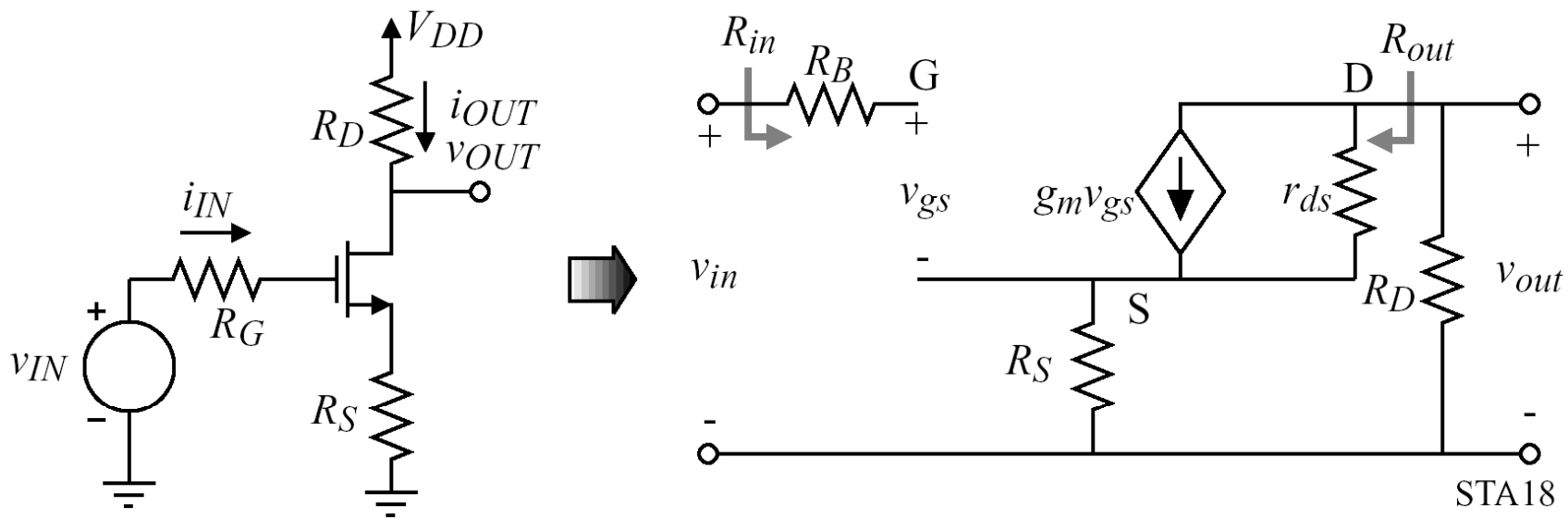
▶ ผลของ **body** ทำให้อัตราขยายเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณ=> เกิดความไม่เป็นเชิงเส้น

การกำจัดผลของ **body** ในวงจรมหา CD

- ▶ ต่อขา **source** เข้ากับขา **body**
 - ▶ ในเทคโนโลยี n-well ใช้ p-channel MOSFET



วงจรขยายซอร์สร่วมที่มี source degeneration



$$R_{in} = \infty$$

$$R_{out} = r_{ds}[1 + (g_m + g_{mbs})R_S] + R_S \approx r_{ds}g_m R_S$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} \approx -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} \rightarrow -\frac{R_D}{R_S} \quad | \quad \text{max. gain}$$

Intuitive analysis

1.) Approximate the output resistance of any cascode circuit as

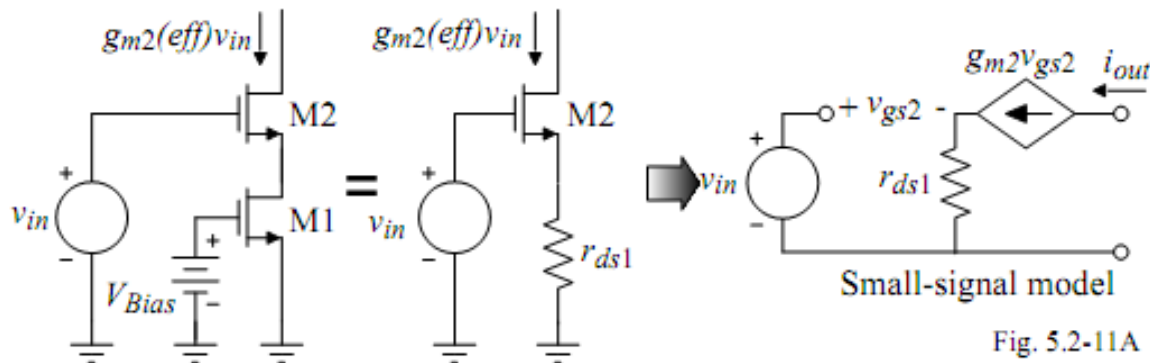
$$R_{out} \approx (g_{m2}r_{ds2})r_{ds1}$$

where M1 is a transistor cascoded by M2.

2.) If there is a resistance, R , in series with the source of the transconductance transistor, let the effective transconductance be

$$g_{m(eff)} = \frac{g_m}{1+g_m R}$$

Proof:

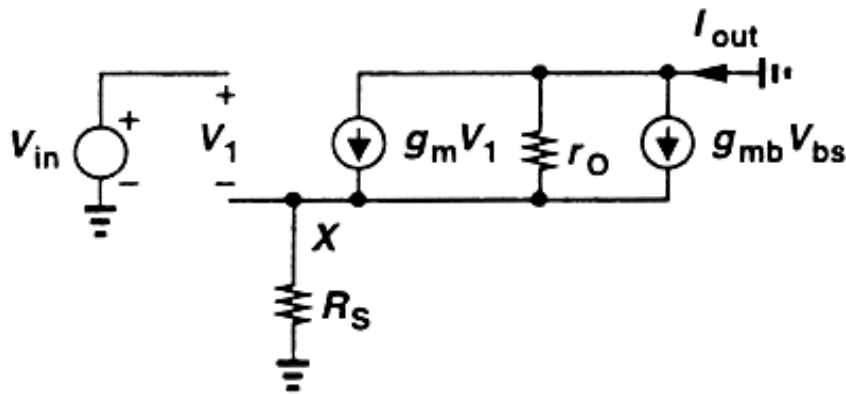
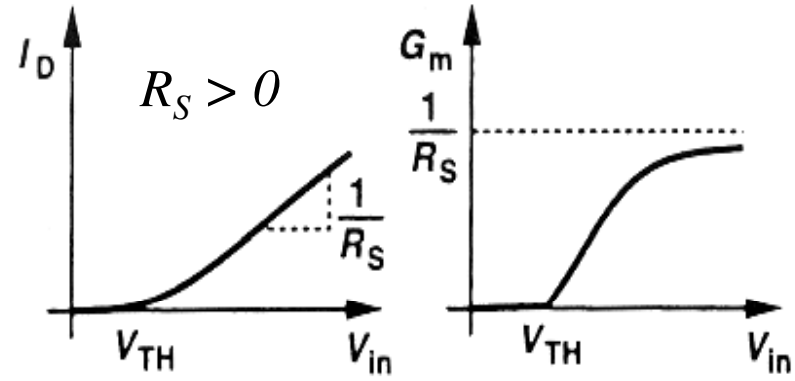
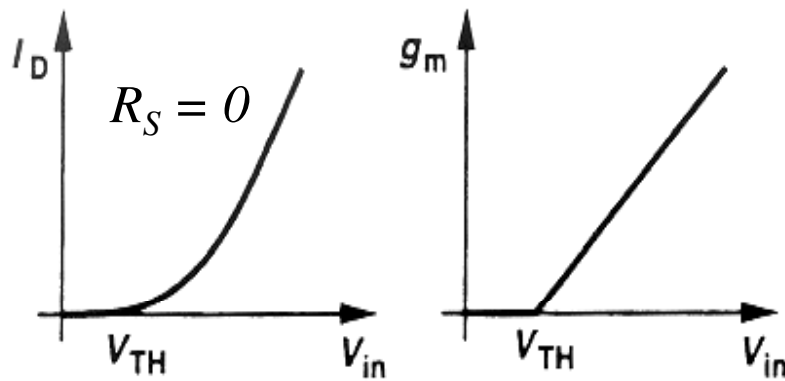


$$\therefore v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = v_{in} - (g_{m2}r_{ds1})v_{gs2} \Rightarrow v_{gs2} = \frac{v_{in}}{1+g_{m2}r_{ds1}}$$

$$\text{Thus, } i_{out} = \frac{g_{m2}v_{in}}{1+g_{m2}r_{ds1}} = g_{m2(eff)} v_{in}$$

วงจรมอดูเลชันร่วมที่มี source degeneration

- ▶ เทคนิค degeneration ทำให้ G_m มีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น



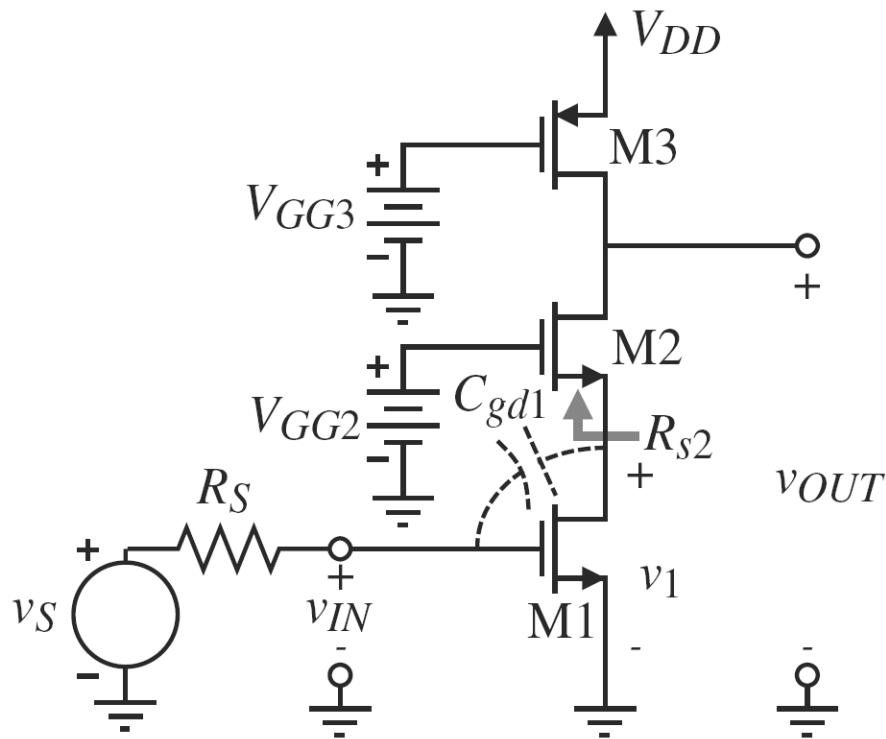
$$G_m = \frac{g_m r_o}{R_S + [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] r_o}$$

สรุปคุณลักษณะของวงจรขยายร่วมต่าง ๆ

Small-Signal Performance	Common Source	Common Gate	Common Drain
Input Resistance	∞	$\frac{r_{ds} + R_D}{1 + g_m r_{ds}}$	∞
Output Resistance	$\frac{r_{ds} R_D}{r_{ds} + R_D}$	$\frac{r_{ds} R_D}{r_{ds} + R_D}$	$\frac{R_S}{1 + g_m R_S}$
Voltage Gain	$\frac{-g_m r_{ds} R_D}{r_{ds} + R_D}$	$g_m R_D$	0.8
Current Gain	∞	-1	∞

วงจรรขยายคาสโคด

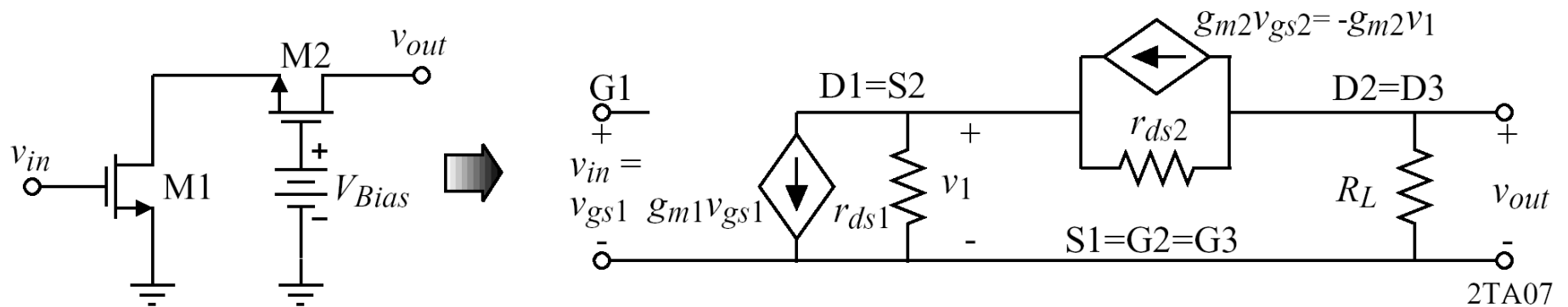
- ▶ คาสโคดทรานซิสเตอร์ (M_2) เพิ่มความต้านทานเอาต์พุต และถ้าใช้โหลดความต้านทานสูง จะทำให้อัตราขยายของวงจรสูงขึ้น
- ▶ ลดผลของ Miller ที่เกิดจาก C_{gd1}



- M_1 อยู่ในย่านอิ่มตัวเมื่อ
 - $V_{GG2} - V_{GS2} \geq V_{GS1} - V_{T1}$
 - $\Rightarrow V_{in} \leq V_{GG2} - V_{GS2} + V_{T1}$
- M_2 อยู่ในย่านอิ่มตัวเมื่อ
 - $V_{DS2} \geq V_{GS2} - V_{T2}$
 - $\Rightarrow V_{out} \geq V_{GG2} + V_{T2}$
- ▶ เพื่อให้ $M_1 - M_2$ อยู่ในย่านอิ่มตัว
 - ▶ แรงดันเอาต์พุตแกว่งได้สูงสุด $V_{out(max)} = V_{DD} - V_{SD3(sat)}$
 - ▶ แรงดันเอาต์พุตแกว่งได้ต่ำสุด $V_{out(min)} = V_{DS1(sat)} + V_{DS2(sat)}$

วงจรรขยายคาสโคด CMOS

- ▶ คาสโคดทรานซิสเตอร์ (M2) เพิ่มความต้านทานเอาต์พุต และถ้าใช้โหลดความต้านทานสูง จะทำให้อัตราขยายของวงจรสูงขึ้น

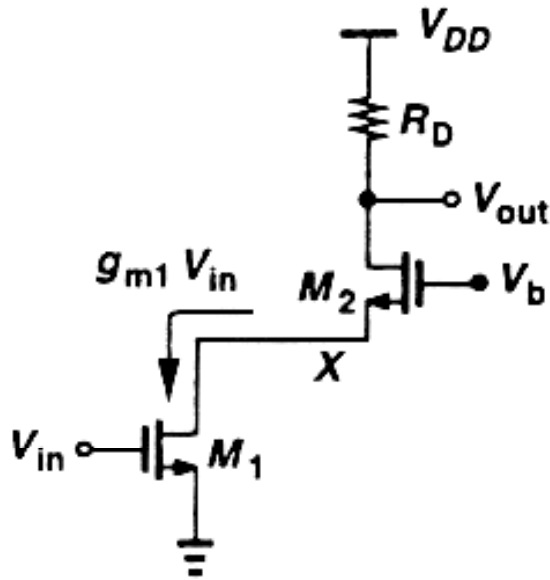


$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_{m1}(g_{ds2} + g_{m2})}{g_{ds1}g_{ds2} + g_{ds1}G_L + g_{ds2}G_L + G_Lg_{m2}} \cong \frac{-g_{m1}}{G_L} = -g_{m1}R_L$$

$$\frac{v_1}{v_{in}} = -g_{m2} \left[r_{ds2} \parallel \left(\frac{r_{ds2} + R_L}{1 + g_{m2}r_{ds2}} \right) \right] \approx -\frac{r_{ds2} + R_L}{r_{ds2}} = -\left(1 + \frac{R_L}{r_{ds2}} \right)$$

$$r_{out} = [r_{ds1} + r_{ds2} + g_{m2}r_{ds1}r_{ds2}] \parallel R_L \cong R_L$$

Gm ของวงจรขยายคาสโคด (Cascode)



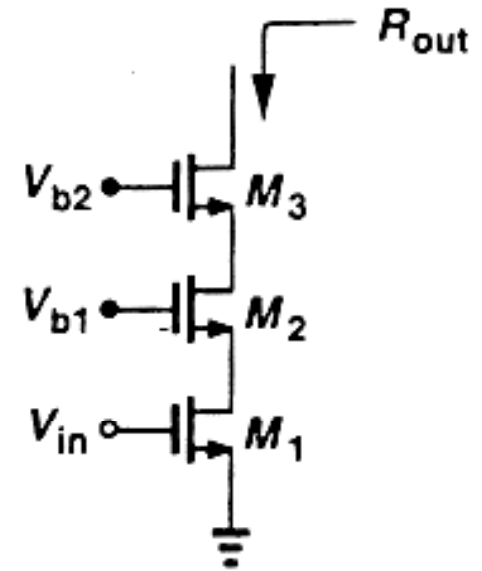
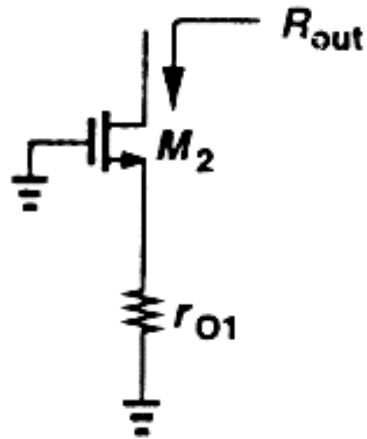
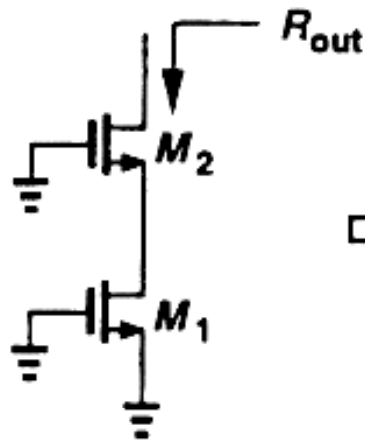
$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -G_m (R_{out} // R_D)$$

$$I_{out} = g_{m1} V_{in} \frac{r_{O1}}{r_{O1} + \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} // r_{O2}}$$

$$G_m = \left. \frac{I_{out}}{V_{in}} \right|_{V_{out}=0} = g_{m1} \frac{r_{O1}}{r_{O1} + \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} // r_{O2}}$$

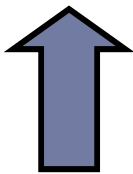
$$\therefore G_m \square g_{m1}$$

R_{out} ของวงจรขยายคาสโค้ด



$$R_{out} = \left. \frac{V_{out}}{I_{out}} \right|_{V_{in}=0} = \left[1 + (g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} \right] r_{o1} + r_{o2}$$

$$\therefore R_{out} \cong A_{vo2} r_{o1} + r_{o2} \cong A_{vo2} r_{o1}$$


 $R_{out} \square ?$

อัตราขยายแรงดันของวงจรขยายคาสโค้ด

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -G_m (R_{out} // R_D)$$

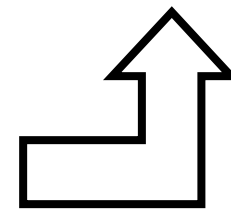
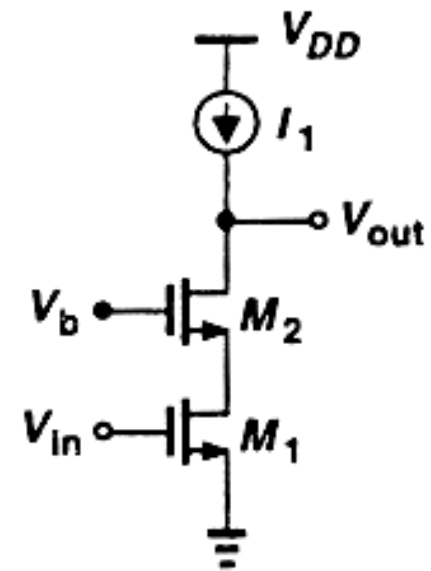
$$\cong -g_{m1} \left[(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} r_{o1} // R_D \right]$$

(i) ถ้า $(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} r_{o1} \ll R_D$

$$A_v = -g_{m1} R_D$$

(ii) ถ้า $(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} r_{o1} \gg R_D$

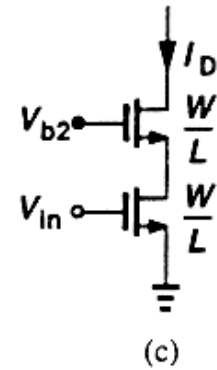
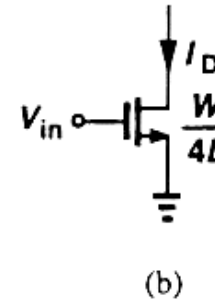
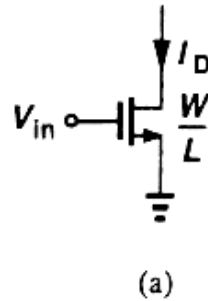
$$A_v \cong -g_{m1} (g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} r_{o1} \cong -(g_m r_o)^2$$



เปรียบเทียบวงจรรขยาย CS และ cascode

- ▶ เปรียบเทียบที่ I_D เท่ากัน
- ▶ วงจรรขยาย CS

$$A_v = -g_m r_o = -\frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}{I_D}}$$



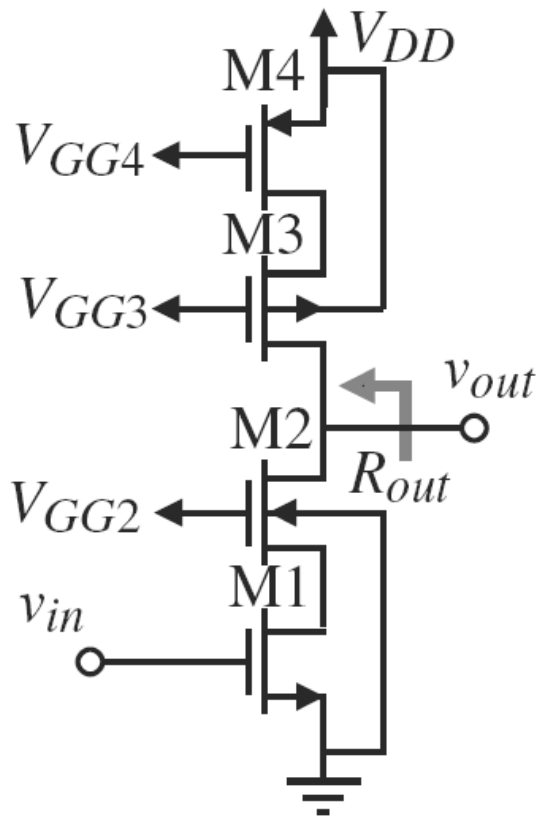
$\lambda \propto \frac{1}{L}$ • ถ้าเพิ่ม L เป็น 4 เท่า $\Rightarrow A_v$ และ V_{DSAT} จะเพิ่มขึ้น 2 เท่า
และ g_m ลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

- ▶ วงจรรขยาย Cascode

$$A_v \cong -(g_m r_o)^2$$

วงจรรขยายคาสโคดที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสคาสโคด

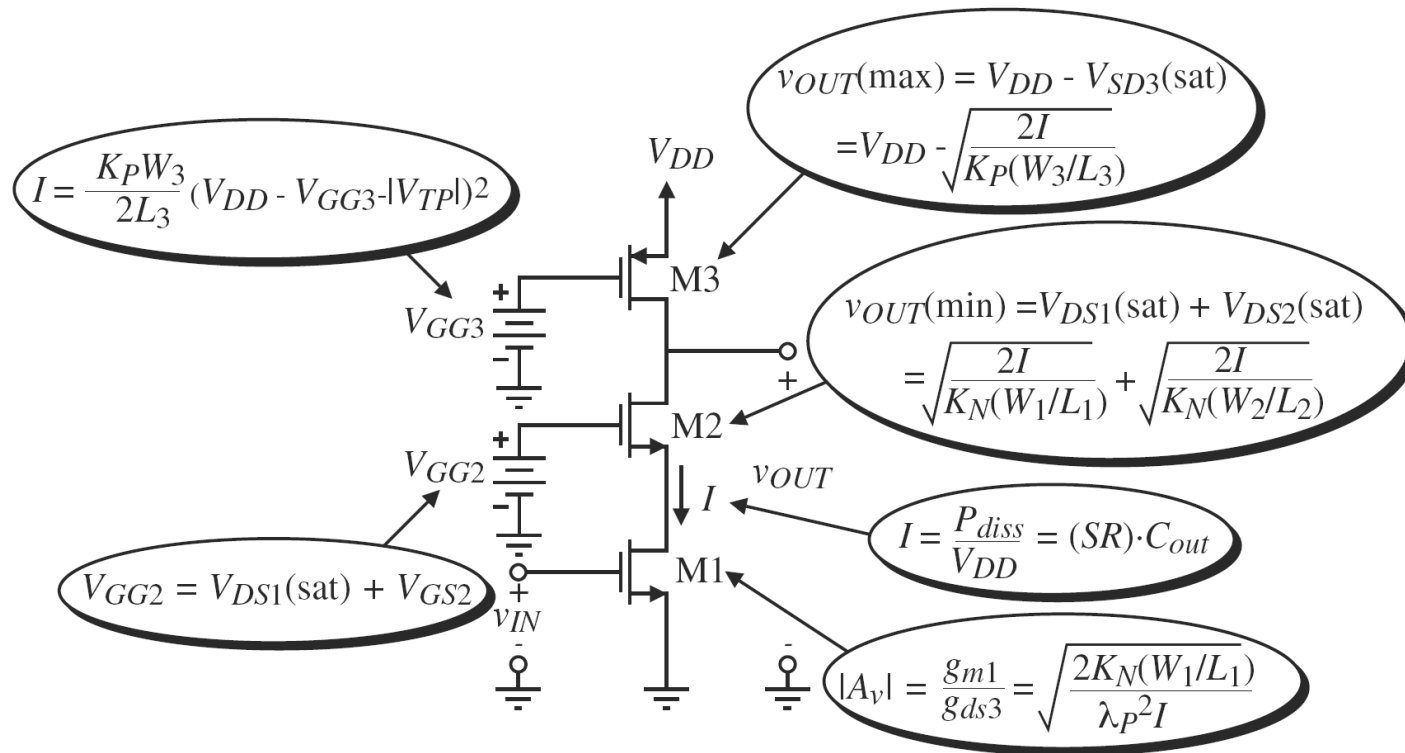
- ▶ วงจรรขยายคาสโคดที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสคาสโคดเป็นโหนดจะให้ความต้านทานเอาต์พุตและอัตราขยายที่สูงขึ้น



$$\begin{aligned} A_v &= -g_{m1} R_{out} \\ &\cong -g_{m1} \left[(g_{m2} r_{o2} r_{o1}) \parallel (g_{m3} r_{o3} r_{o4}) \right] \\ &\cong -\frac{(g_m r_o)^2}{2} \end{aligned}$$

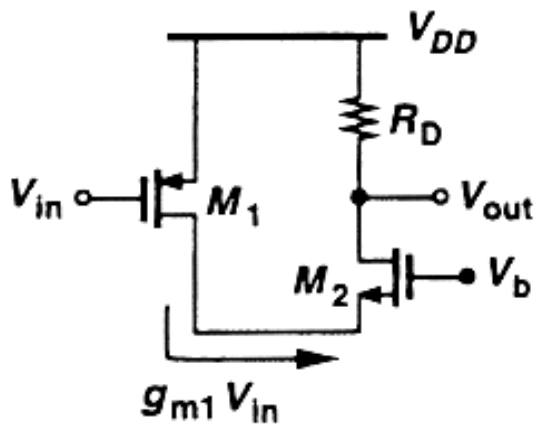
การออกแบบวงจรขยายคาสโคด

- ▶ สมการความสัมพันธ์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

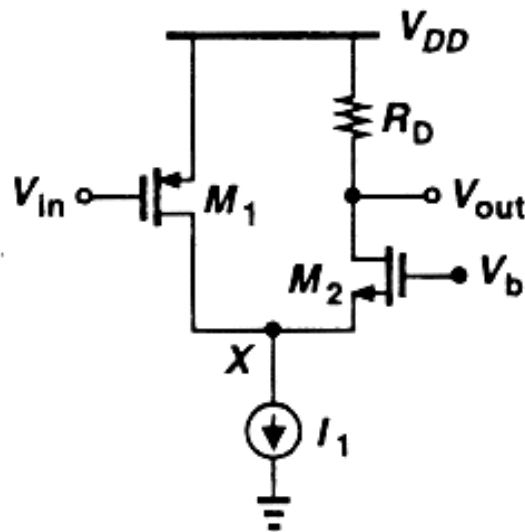


วงจรรขยายคาสโคดแบบพับ (Folded cascode amplifier)

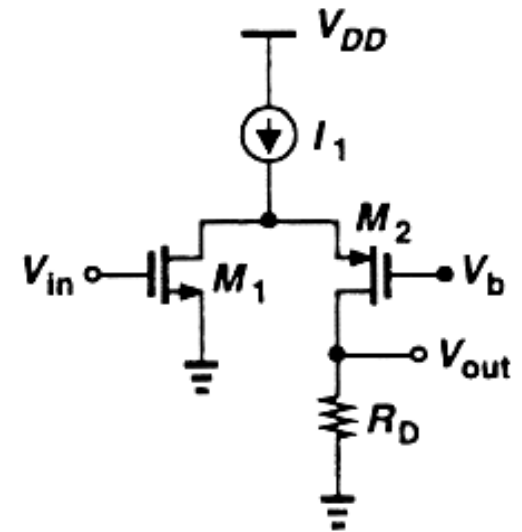
- ▶ คาสโคดทรานซิสเตอร์ (M2) สามารถเป็นทรานซิสเตอร์คนละชนิดกับ M1 ได้ ซึ่งจะ
ได้วงจรรขยายคาสโคดแบบพับ
- ▶ วงจรรขยายคาสโคดแบบพับ สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่าวงจรรขยายคาสโคด



(a)

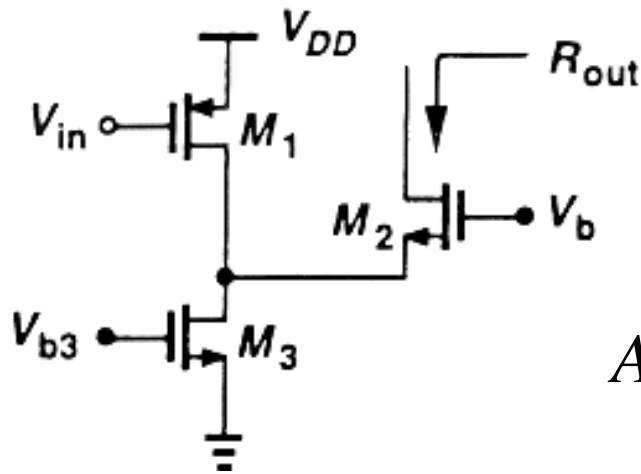


(b)



(c)

อัตราขยายของวงจรมายาคาสโคดแบบพับ



$$R_{out} = \left[1 + (g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} \right] (r_{o1} // r_{o3}) + r_{o2}$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -G_m (R_{out} // R_D)$$

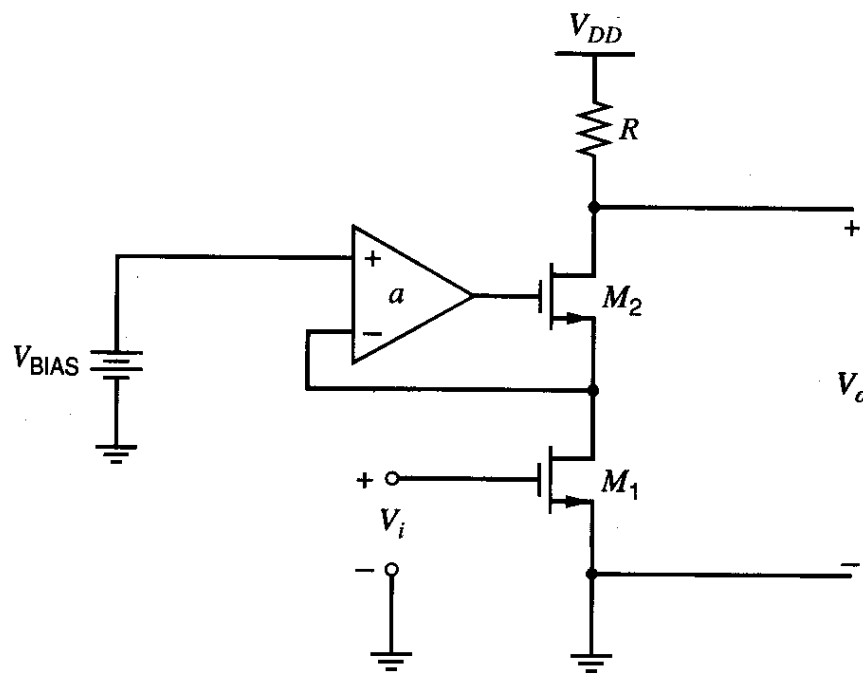
$$\cong -g_{m1} \left[(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} (r_{o1} // r_{o3}) // R_D \right]$$

- ถ้า $(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} (r_{o1} // r_{o3}) \square R_D$

$$A_v \cong -g_{m1} \left[(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} (r_{o1} // r_{o3}) \right]$$

$$\cong -\frac{(g_m r_o)^2}{2}$$

วงจรถยาย regulated cascode



- ▶ ใช้วงจรถยายและการป้อนกลับแบบลบ เพื่อให้ V_{DS1} มีค่าคงที่ ($= V_{BIAS}$ เมื่อ $A = \infty$)
- ▶ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของ V_{out} ไม่มีผลต่อ $I_{out} \Rightarrow R_{out}$ มีค่าสูง $\Rightarrow A_V$ มีค่าสูง

$$v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = v_{g2} - v_{ds1}$$

$$= -av_{ds1} - v_{ds1} = -(a+1)v_{ds1}$$

$$G_m = g_{m1} \frac{r_{o1}}{r_{o1} + \frac{1}{g_{m2}(a+1) + g_{mb2}} // r_{o2}}$$

$$R_{out} = r_{o1} + r_{o2} + [g_{m2}(a+1) + g_{mb2}]r_{o1}r_{o2}$$

$$\cong [g_{m2}(a+1) + g_{mb2}]r_{o1}r_{o2}$$