วงจรขยายพื้นฐาน (Basic CMOS amplifiers)

ชนิดของวงจรขยายสัญญาณ

1.) Large signal static characterization:
- Plot of output versus input (transfer curve)
- Large signal gain
- Output and input swing limits

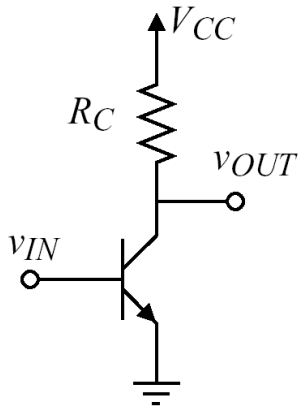
2.) Small signal static characterization:
- AC gain
- AC input resistance
- AC output resistance

3.) Small signal dynamic characterization:
- Bandwidth
- Noise
- Power supply rejection

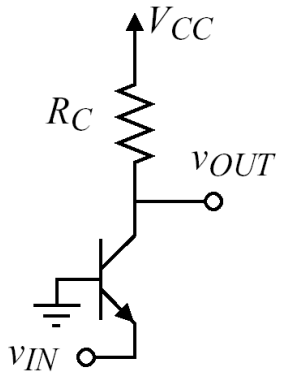
4.) Large signal dynamic characterization:
- Slew rate
- Nonlinearity

Type of Amplifier	$\text{Gain} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$	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

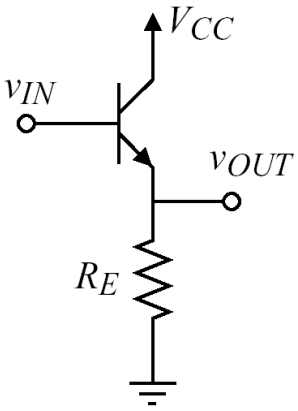
วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์หนึ่งตัว (single-transistor amplifiers)



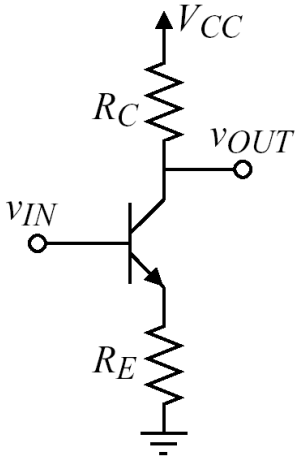
Common Emitter



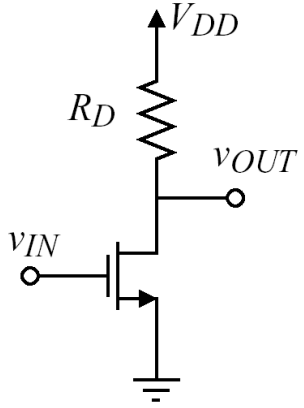
Common Base



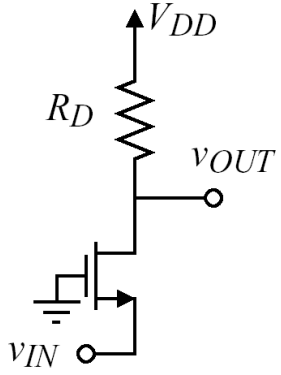
Common Collector



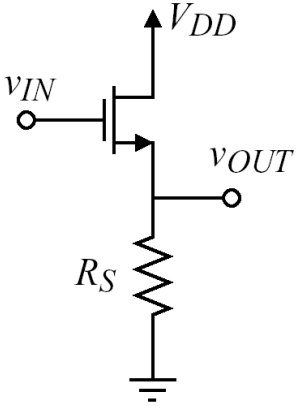
Emitter Degeneration



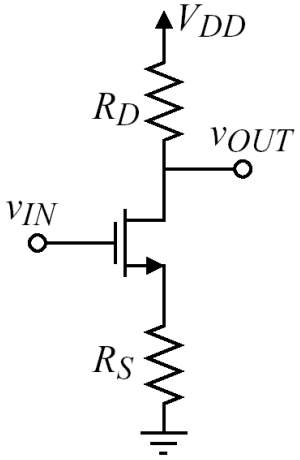
Common Source



Common Gate

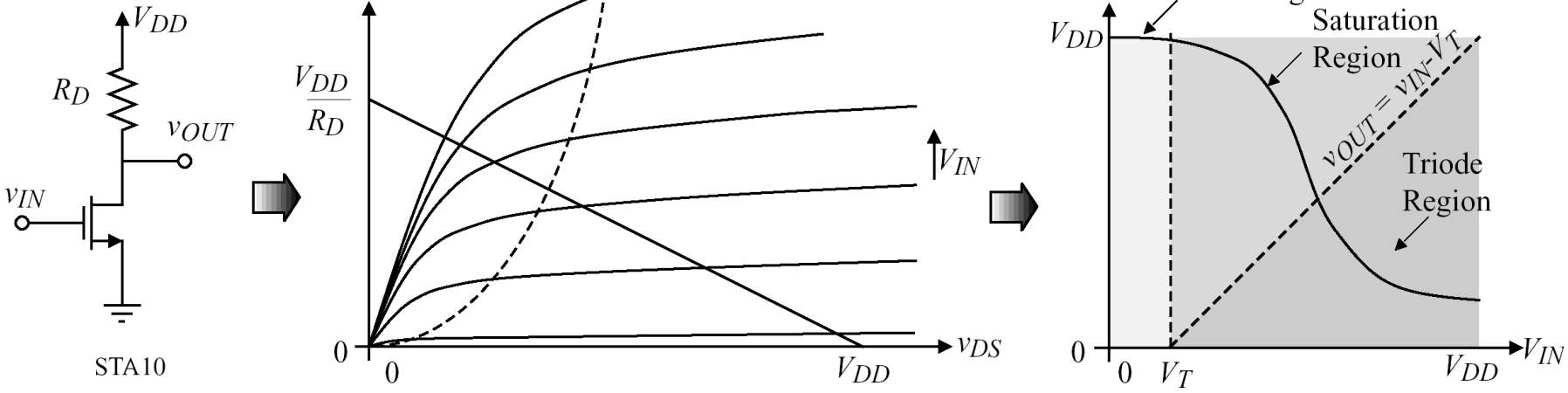


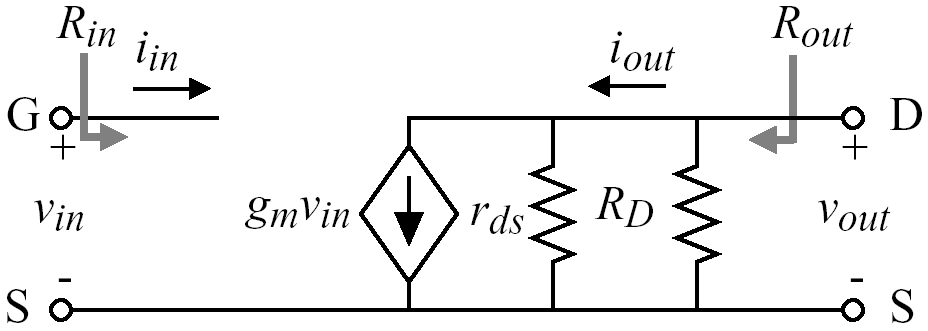
Common Drain



Source Degeneration

วงจรขยายซอร์สร่วม (common-source amplifier)





$$R_{in} = \infty \qquad R_{out} = \frac{r_{ds} R_D}{r_{ds} + R_D}$$

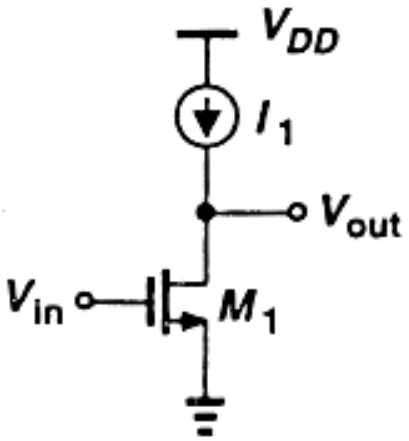
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_m \cdot r_{ds} \cdot R_D}{r_{ds} + R_D}$$

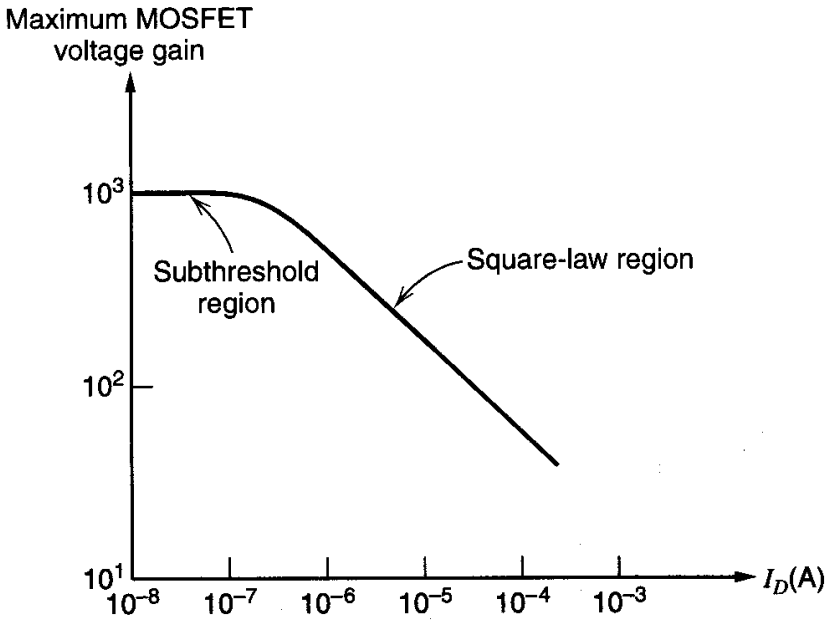
อัตราขยายแรงดันสูงสุดของวงจรขยายซอร์สร่วม

- R_D มีค่าเป็นอนันต์

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

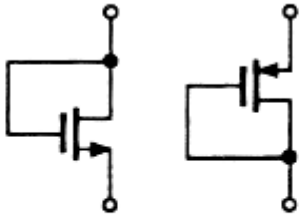
$$= -\frac{1}{\lambda}\sqrt{\frac{2\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}{I_D}} = -\frac{2}{\lambda\left(V_{GS}-V_{TH}\right)}$$

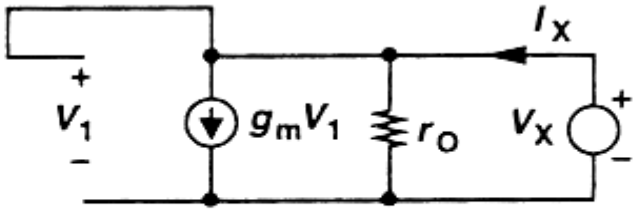




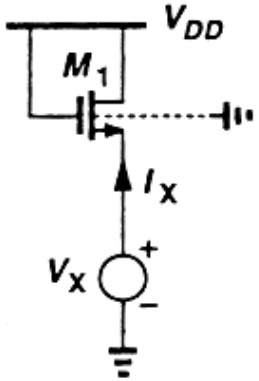
ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ MOSFET ทำงานในย่าน weak-inversion

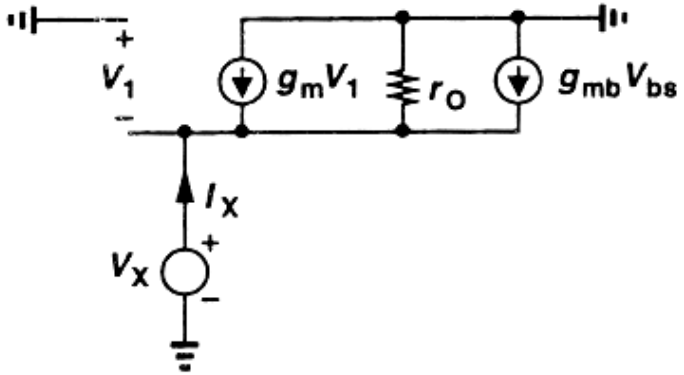
แอกทีฟโหลด





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





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

$$; \; \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

วงจรขยาย CS ที่มีโหลดทรานซิสเตอร์ต่อแบบไดโอด

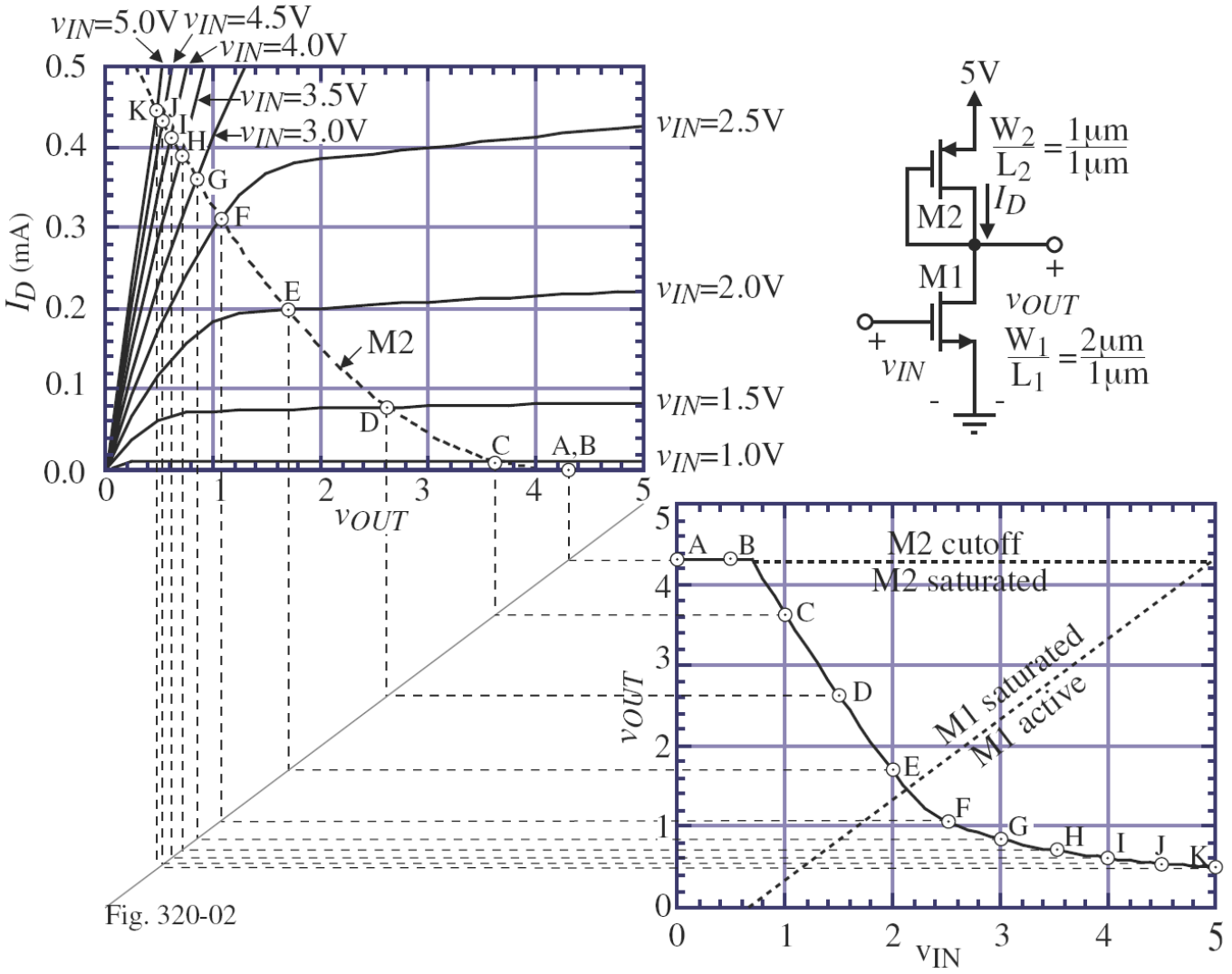


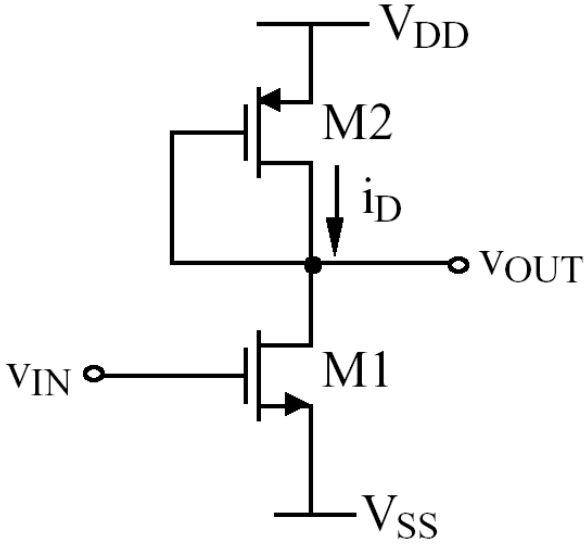
Fig. 320-02

การแกว่งของแรงดันเอาท์พุท (output voltage swing)

- แรงดันเอาท์พุทแกว่งขึ้นได้สูงสุดเมื่อ M2 หยุดนำกระแส

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

- แรงดันเอาท์พุทแกว่งลงได้ต่ำสุดเมื่อแรงดันอินพุทมีค่าสูงสุดซึ่ง M1 อยู่ในย่าน triode หยุดนำกระแส

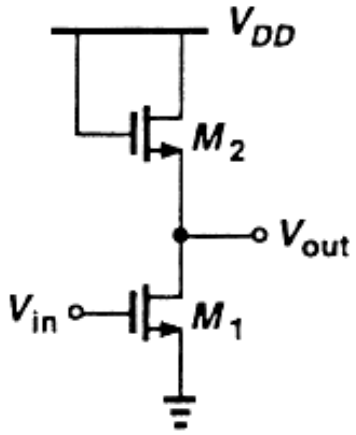


$$i_D = \beta_1\left((v_{GS1} - V_T)v_{DS1} - \frac{v_{DS1}^2}{2}\right) = \beta_1\left((V_{DD} - V_T)(v_{OUT}) - \frac{(v_{OUT})^2}{2}\right)$$

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

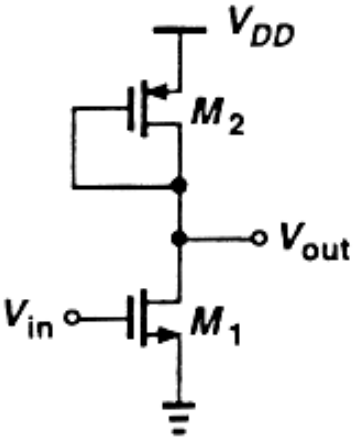
$$v_{OUT}(\text{min.}) = V_{DD} - V_T - \frac{V_{DD} - V_{SS} - V_T}{\sqrt{1 + \beta_2/\beta_1}}$$

วงจรขยาย CS ที่มีโหลดทรานซิสเตอร์ต่อแบบไดโอด



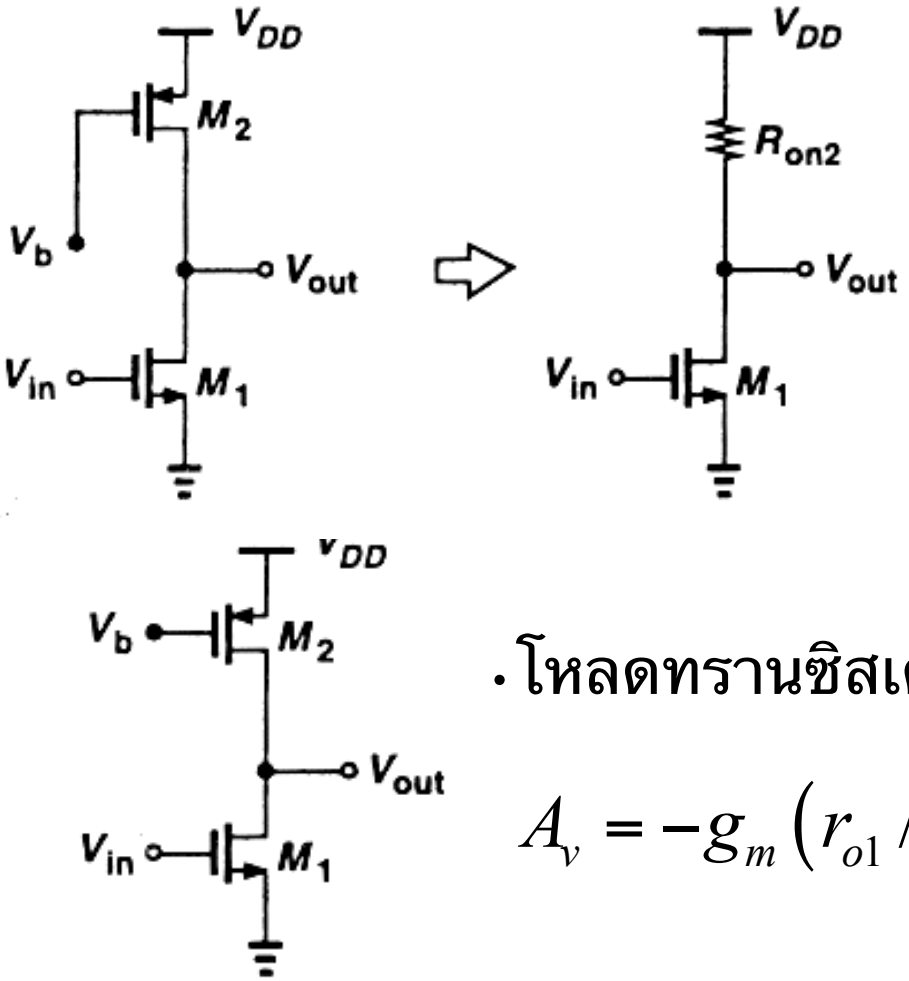
ignal $A_v = -g_{m1}\dfrac{1}{g_{m2}+g_{mb2}}$

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



$$= -\frac{\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_1}}{\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_2}}\frac{1}{1+\eta}$$

วงจรขยาย CS กับแอกทีฟโหลด



- โหลดทรานซิสเตอร์ในช่วง triode

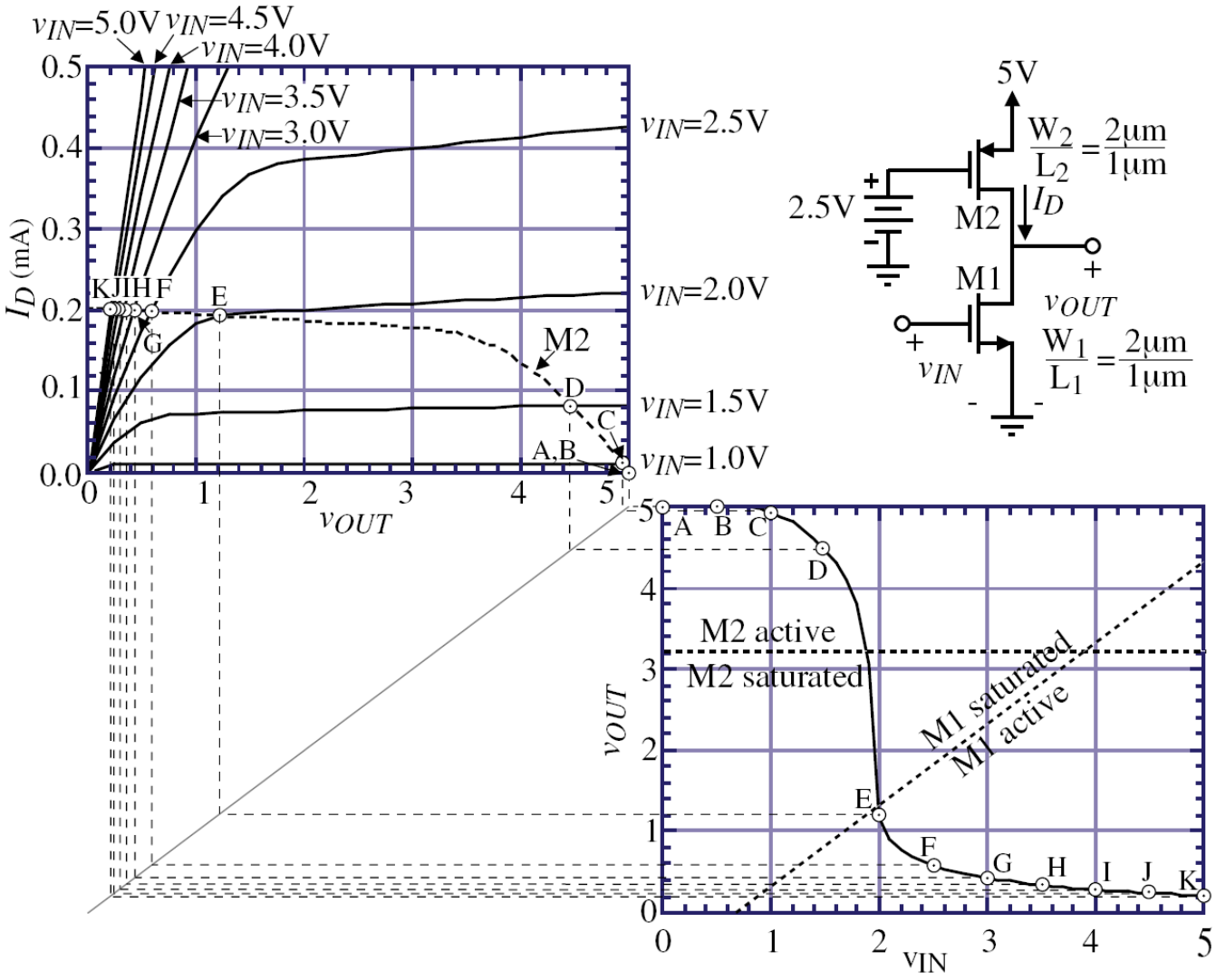
$$A_v = -g_{m1}\left(r_{o1} \,//\, R_{on2}\right)$$

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

- โหลดทรานซิสเตอร์ในช่วงอิ่มตัว

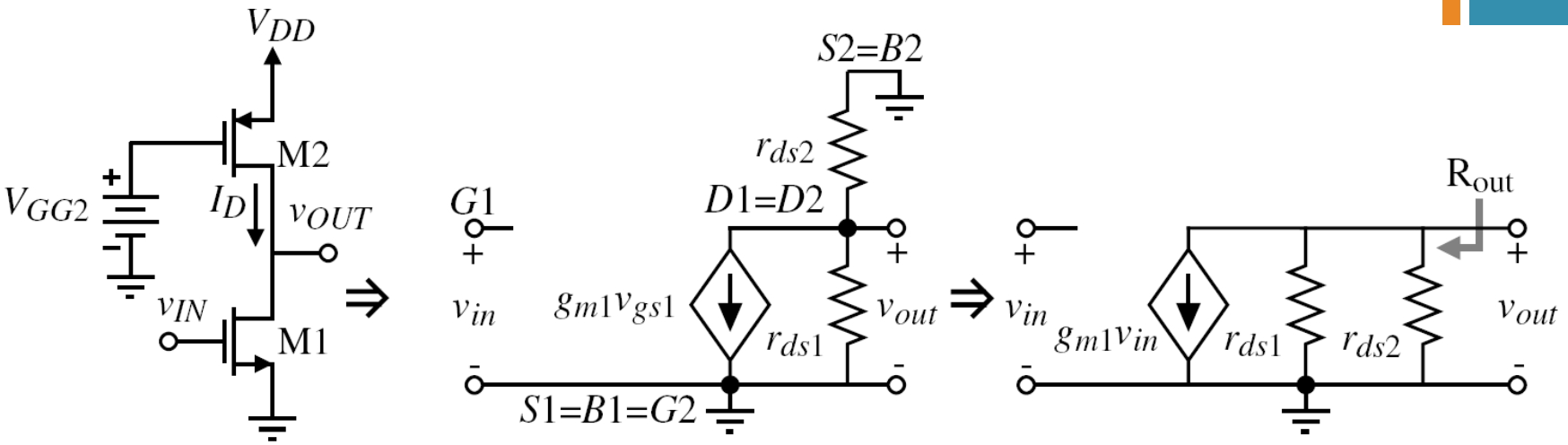
$$A_v = -g_m\left(r_{o1} \,//\, r_{o2}\right)$$

วงจรขยาย CS กับโหลดแหล่งจ่ายกระแส



- M2 เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ซึ่งเป็นแอกทีฟให้กับ M1

วงจรขยาย CS กับโหลดแหล่งจ่ายกระแส

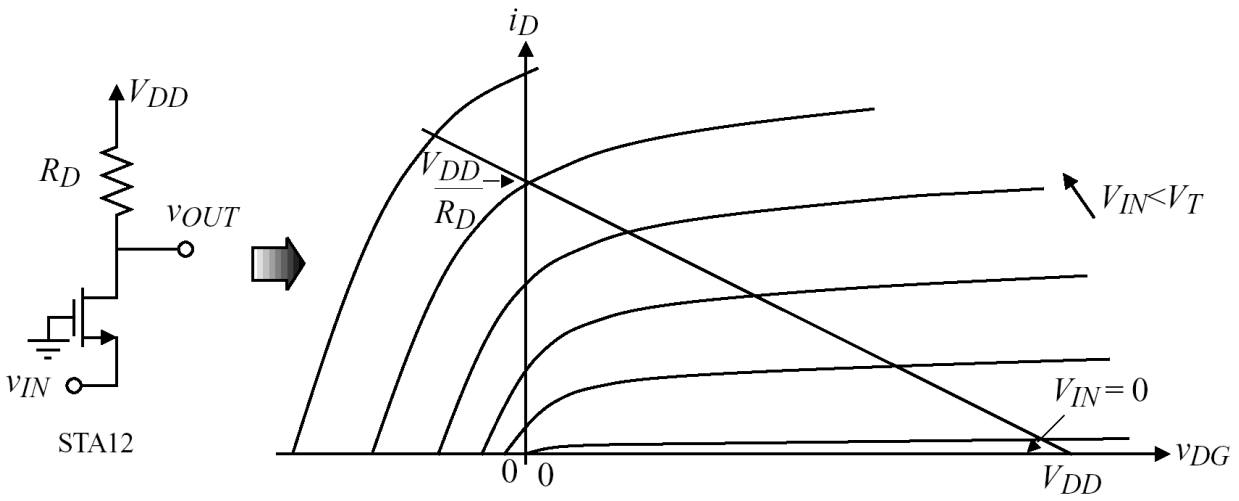


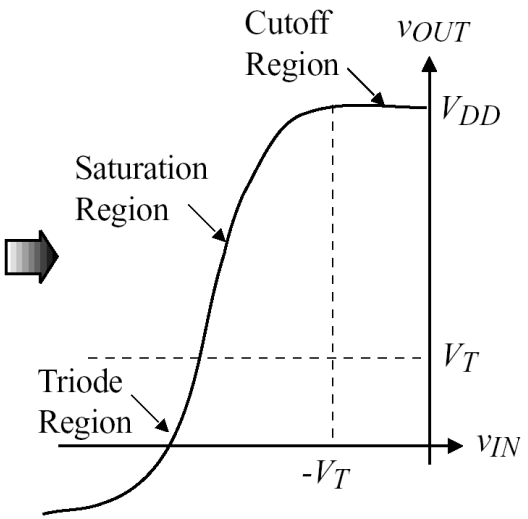
- อัตราขยายแรงดัน

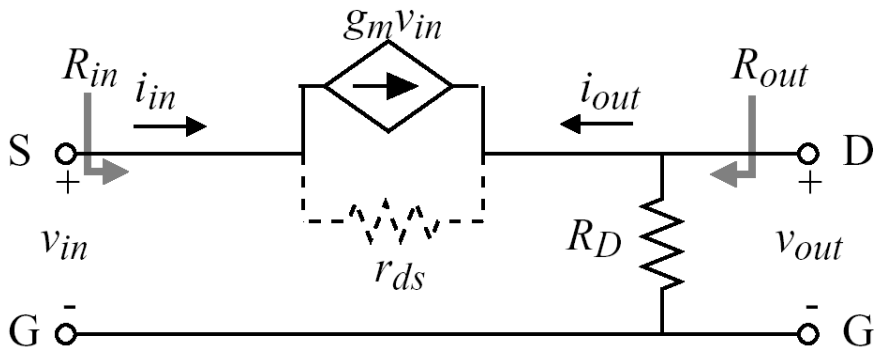
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_{m1}}{g_{ds1} + g_{ds2}} = \left(\frac{2K'_N W_1}{L_1 I_D}\right)^{1/2} \left(\frac{-1}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \propto \frac{1}{\sqrt{I_D}}$$

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

วงจรขยายเกทร่วม (common-gate amplifier)





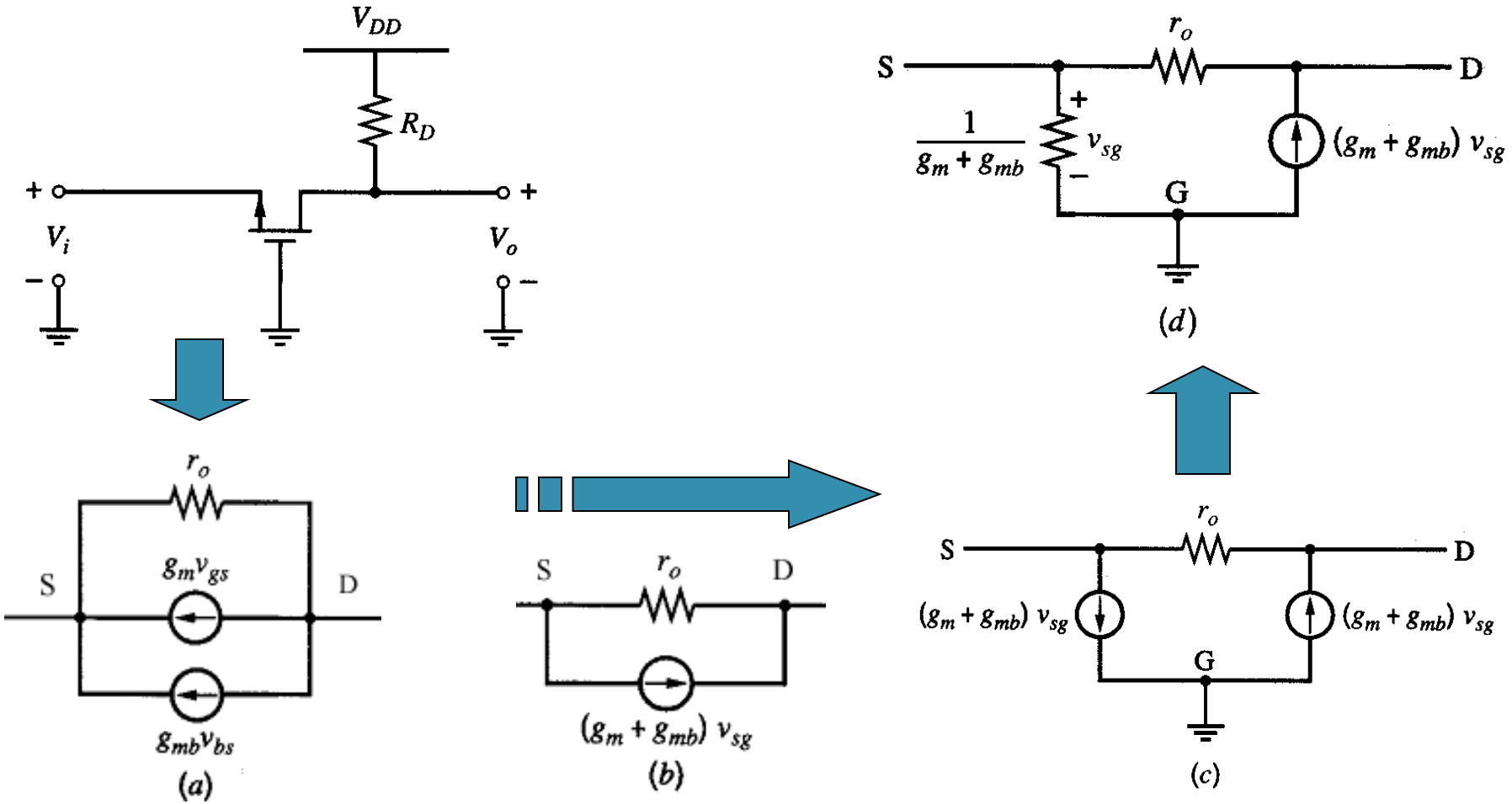


$$R_{in} = \approx \frac{1}{g_m} \qquad R_{out} \approx R_D$$

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

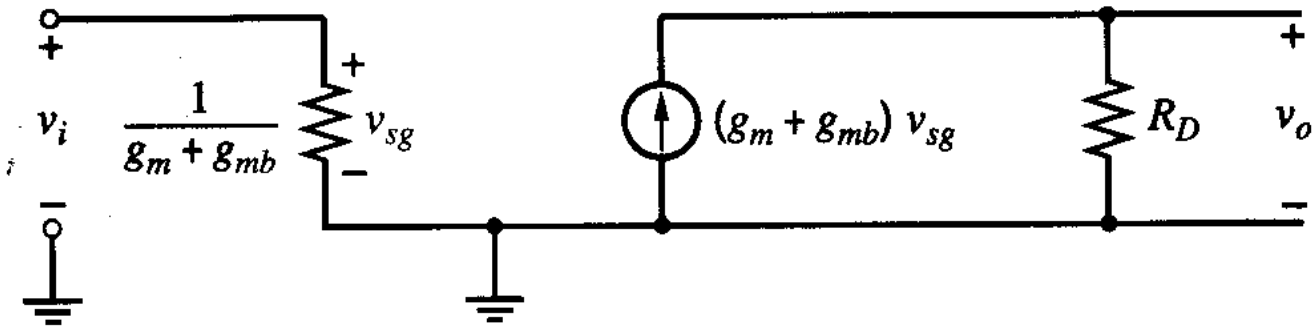
วงจรขยาย common-gate (CG)

- มีการป้อนกลับผ่าน r_o ทำให้เป็นวงจรขยาย bilateral



วงจรขยาย common-gate (CG)

- ถ้า



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

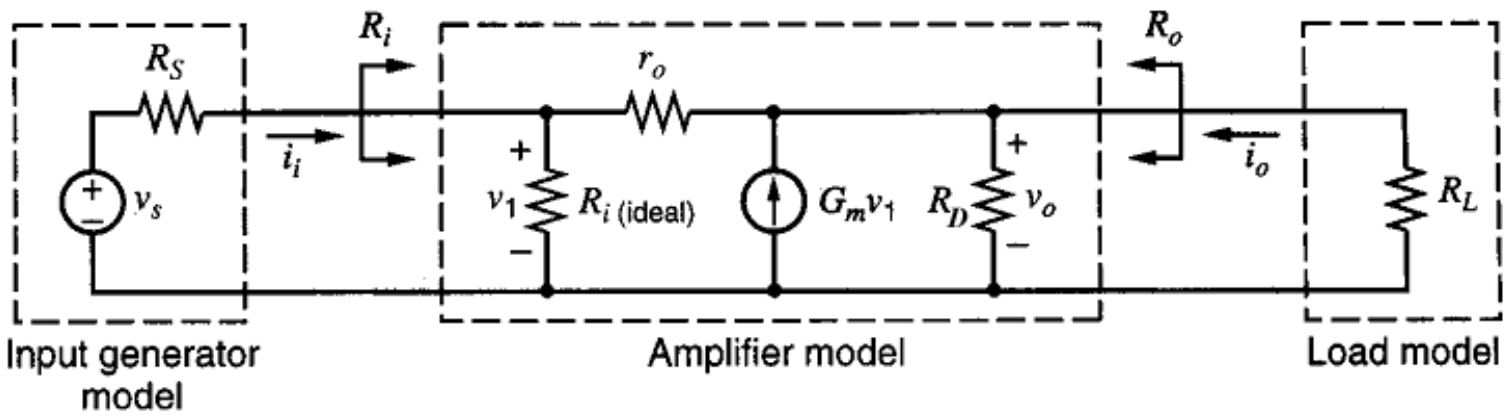
$$R_i = \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

$$R_o = R_D$$

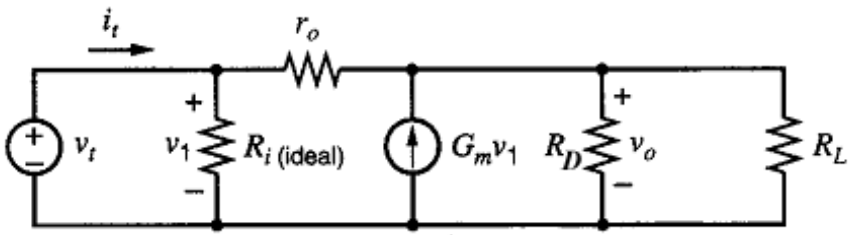
$$A_v = G_m R_o = \left(g_m + g_{mb}\right) R_D$$

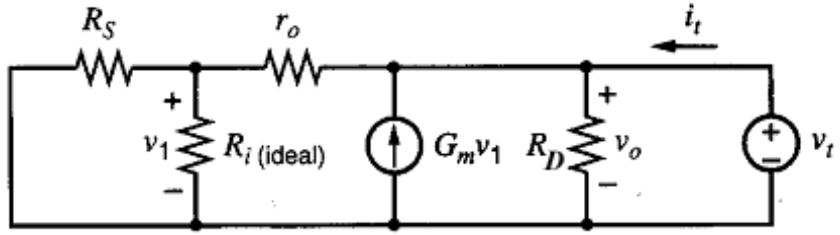
$$A_i = G_m R_i = 1$$

วงจรขยาย CG เมื่อ r_o น้อยกว่าอนันต์



วงจรขยาย CG เมื่อ r_o น้อยกว่าอนันต์





$$R_i = \frac{v_t}{i_t} = \frac{r_o + \left(R_D \,||\, R_L\right)}{1 + \left(g_m + g_{mb}\right) r_o}$$

$$; \quad \frac{1}{g_m + g_{mb}} + \frac{\left(R_D \,||\, R_L\right)}{\left(g_m + g_{mb}\right) r_o}$$

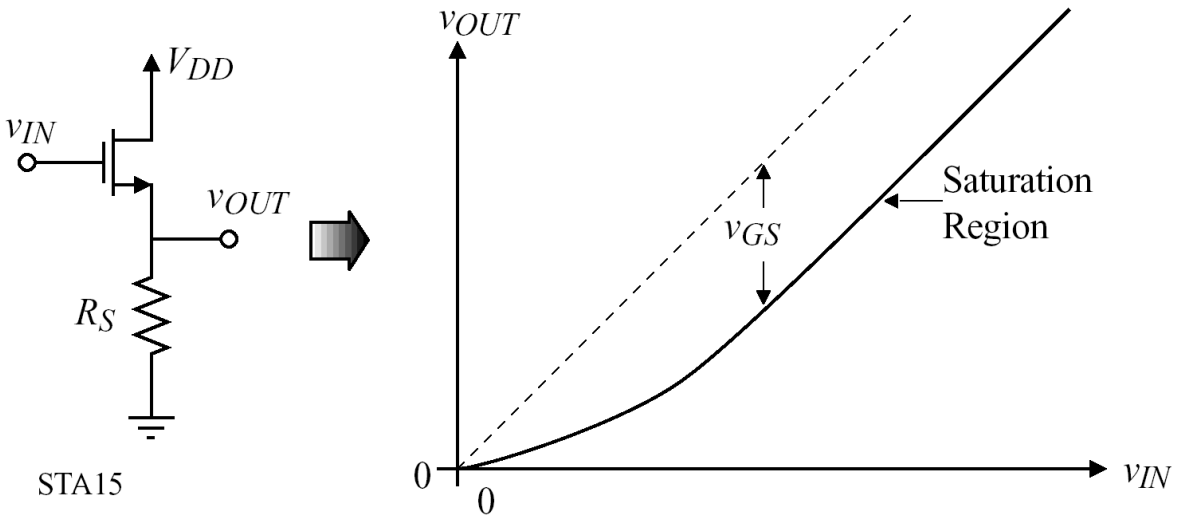
$$R_o = \frac{v_t}{i_t}$$

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

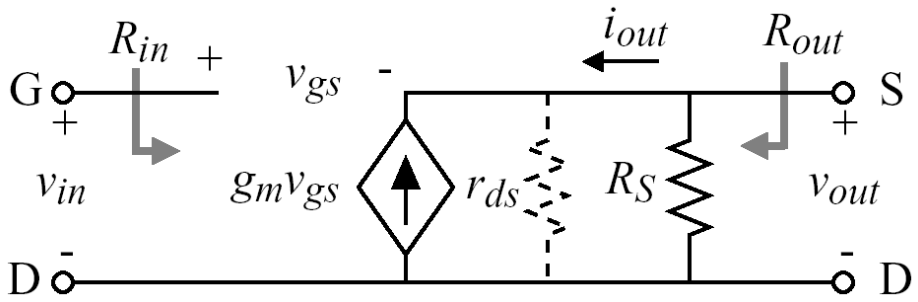
$$\cong R_D \,||\, \left[R_S \left(g_m + g_{mb} \right) r_o \right]$$

วงจรขยายเดรนร่วม (common-drain amplifier)

- วงจรขยายเดรนร่วมมีอัตราขยายน้อยกว่าหนึ่ง มักใช้เป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดันและวงจรบัฟเฟอร์



$$R_{in} = \infty$$



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

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

วงจรขยาย CD ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

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

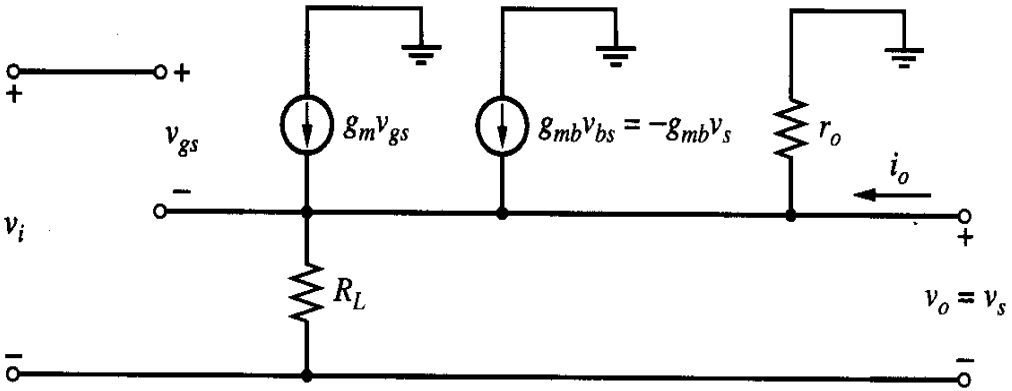
$$v_{out} = v_{in} - v_1$$

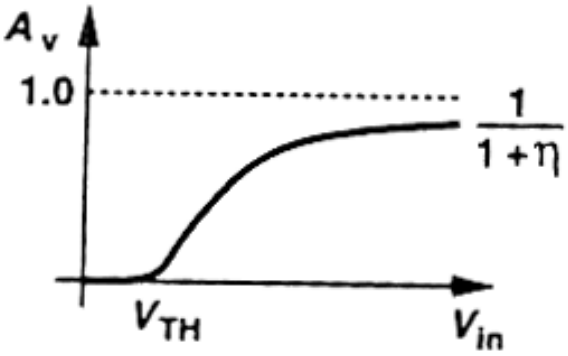
$$v_{bs} = -v_{out}$$

$$\frac{v_{out}}{R_L} = g_m v_1 - g_{mb} v_{out} - \frac{v_{out}}{r_o}$$

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

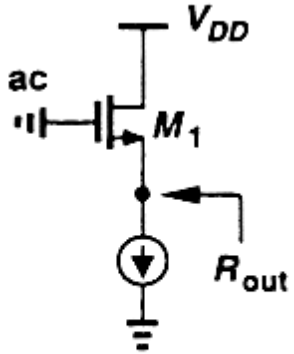
$$\cong \frac{g_m R_L}{1 + (g_m + g_{mb}) R_L} \leq 1$$



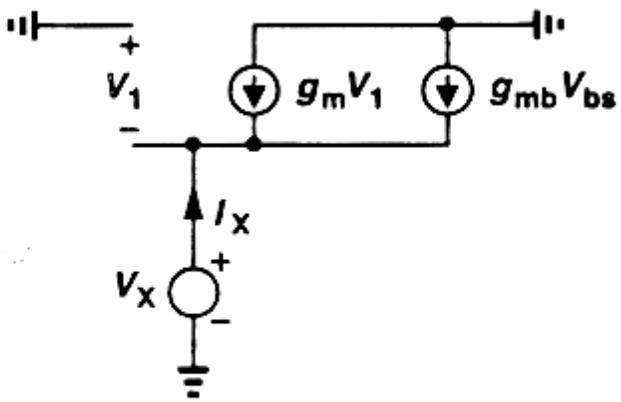


วงจรขยาย CD ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

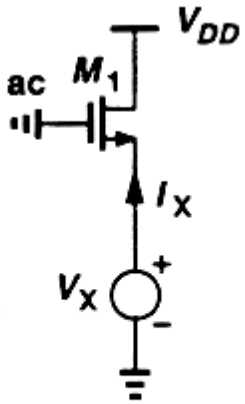
- ความต้



(a)



(b)



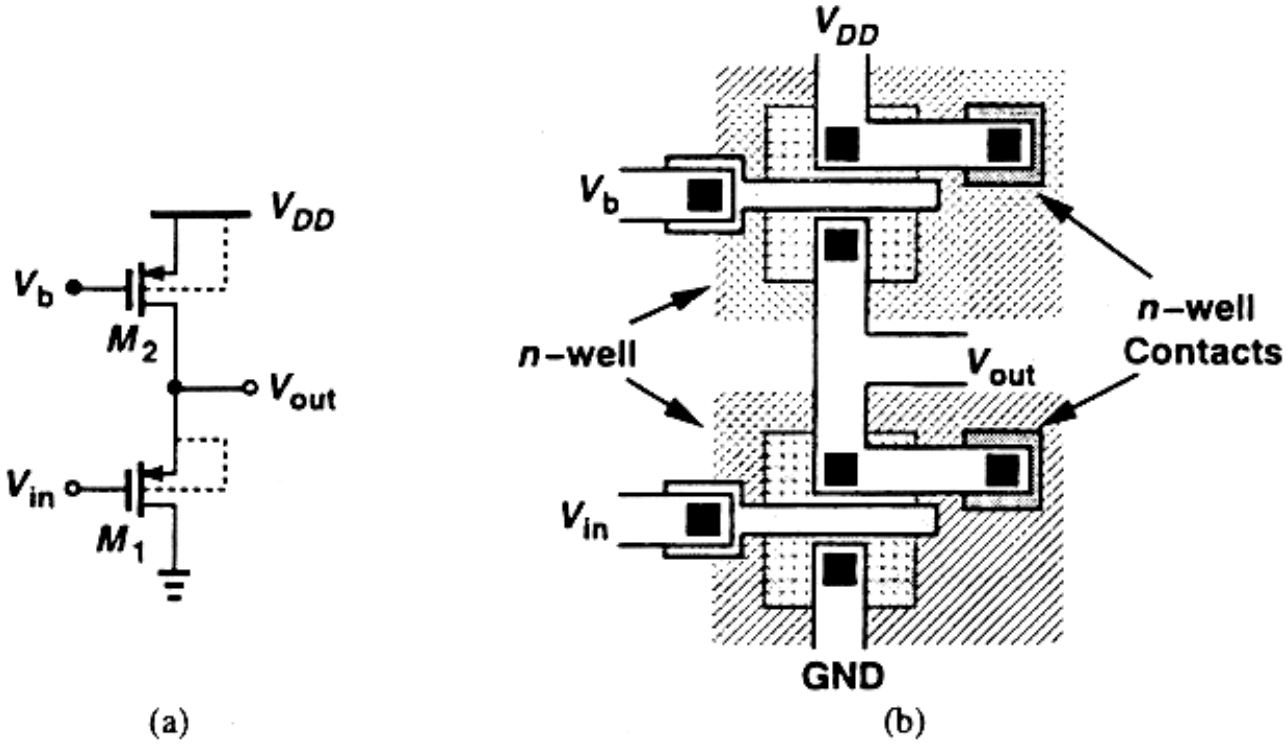
(c)

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

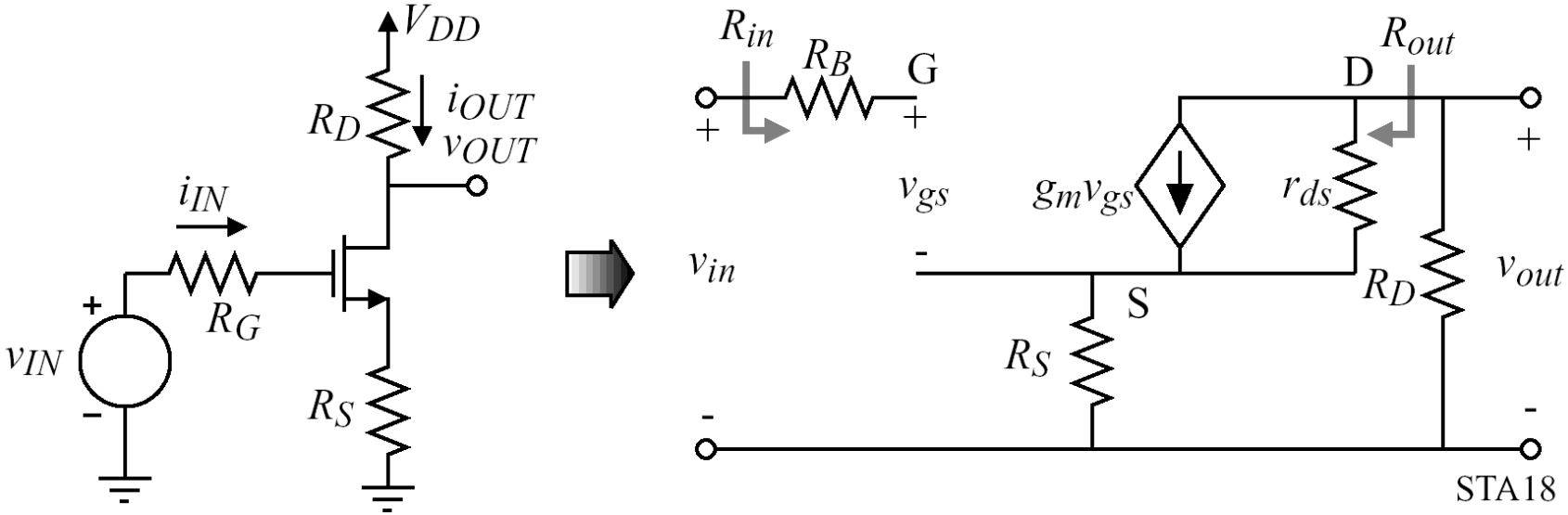
- ผลของ body ทำให้อัตราขยายเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณ=> เกิดความไม่เป็นเชิงเส้น

การกำจัดผลของ body ในวงจรขยาย CD

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



วงจรขยายซอร์สร่วมที่มี source degeneration



$$R_{in} = \infty$$

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

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

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:

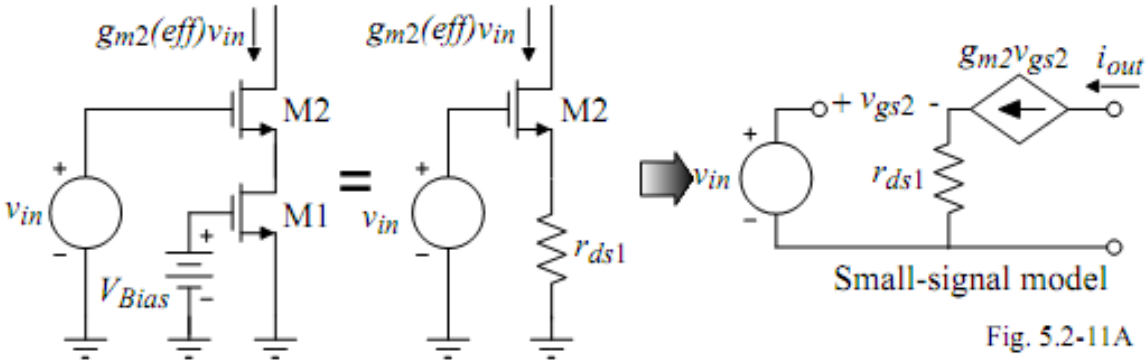
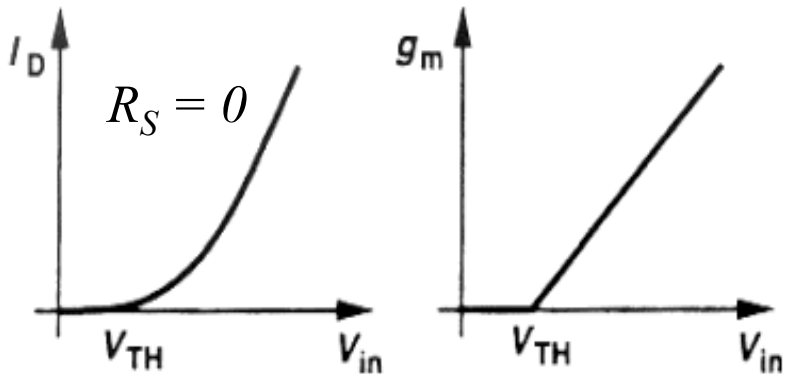


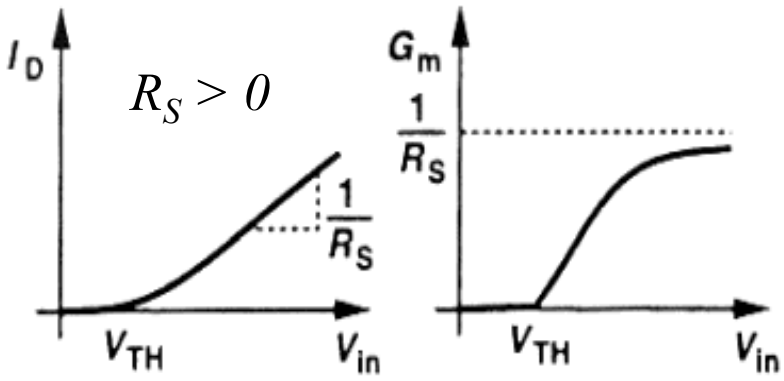
Fig. 5.2-11A

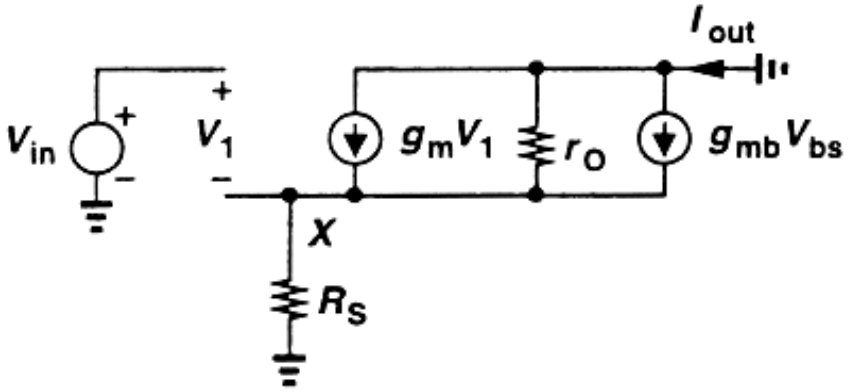
$$\therefore \quad v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = v_{in} - (g_{m2} r_{ds1}) v_{gs2} \quad \Rightarrow \quad v_{gs2} = \frac{v_{in}}{1+g_{m2} r_{ds1}}$$

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

วงจรขยายซอร์สร่วมที่มี source degeneration







ของ body

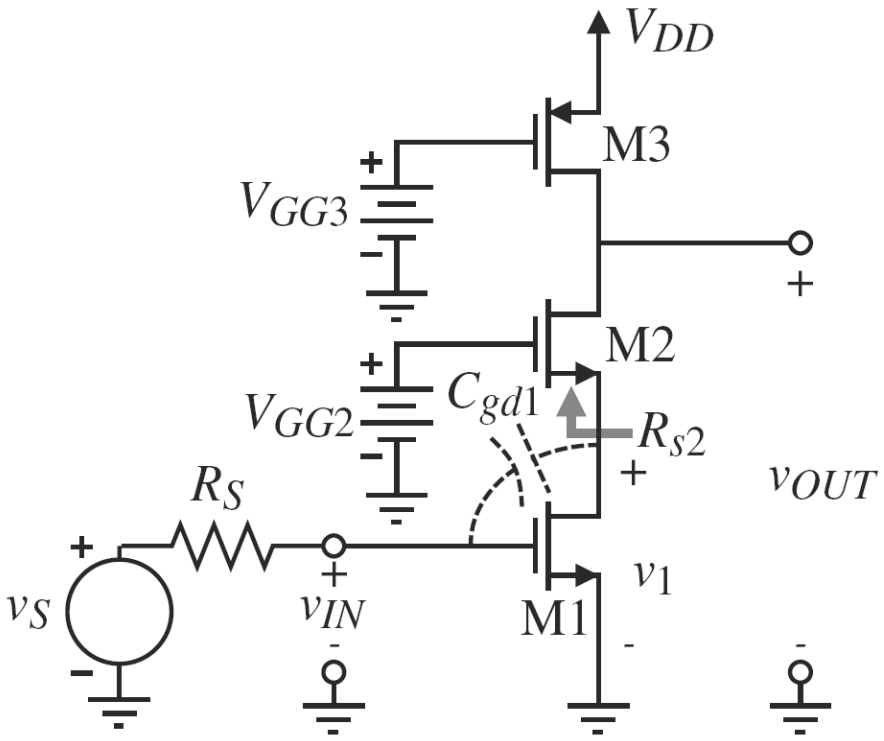
$$G_m = \frac{g_m r_o}{R_S + \left[1 + \left(g_m + g_{mb}\right) R_S\right] r_o}$$

สรุปคุณลักษณะของวงจรขยายร่วมต่างๆ

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	$\frac{-g_m \cdot r_{ds} \cdot R_D}{r_{ds}+R_D}$	$g_m R_D$	0.8
Current Gain	∞	-1	∞

วงจรขยายคาสโคด

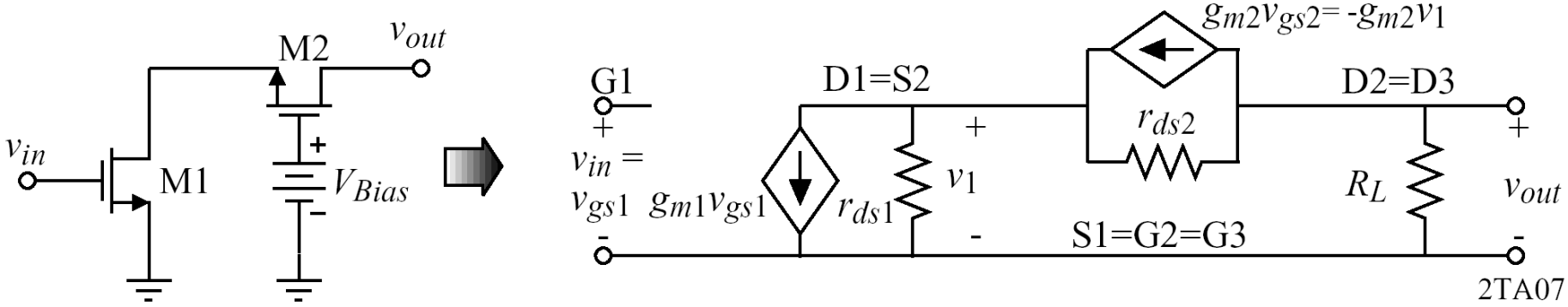
- คาสโคดทรานซิสเตอร์ (M_2) เพิ่มความต้านทานเอาท์พุท และถ้าใช้โหลดความต้านทานสูง จะทำให้อัตราขยายของวงจรสูงขึ้น
- ลดผลของ Miller ที่เกิดจาก C_{gd1}



- 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 อยู่ในย่านอิมตัว
  - แรงดันเอาท์พุทแกว่งได้สูงสุด $V_{out}(max) = V_{DD} - V_{SD3}(sat)$
  - แรงดันเอาท์พุทแกว่งได้ ต่ำสุด $V_{out}(min)=V_{DS1}(sat)+V_{DS2}(sat)$

วงจรขยายคาสโคด CMOS

- คาสโคดทรานซิสเตอร์ (M2) เพิ่มความต้านทานเอาท์พุท และถ้าใช้

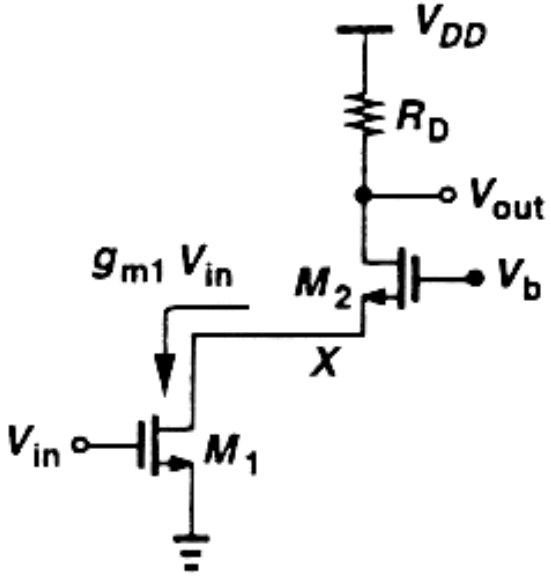


$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_{m1}(g_{ds2}+g_{m2})}{g_{ds1}g_{ds2}+g_{ds1}G_L+g_{ds2}G_L+G_Lg_{m2}} \cong \frac{-g_{m1}}{G_L} = -g_{m1}R_L$$

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

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

Gm ของวงจรขยายคาสโคด



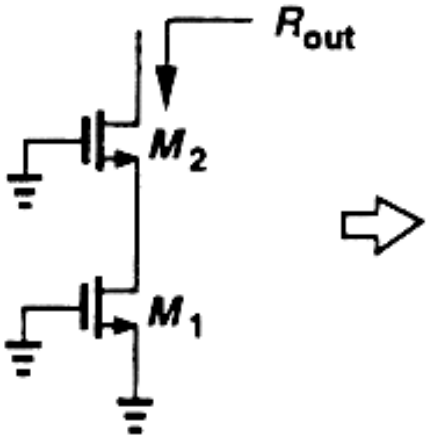
$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -G_m \left(R_{out} // R_D \right)$$

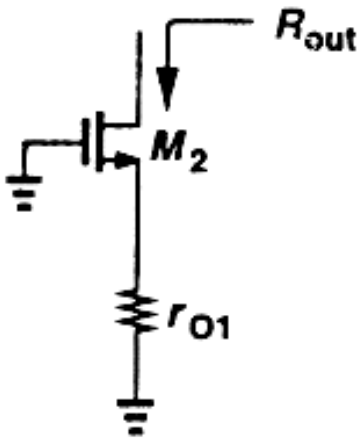
$$I_{out} = g_{m1} V_{in} \frac{r_{O1}}{r_{O1} + \dfrac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} // r_{O2}}$$

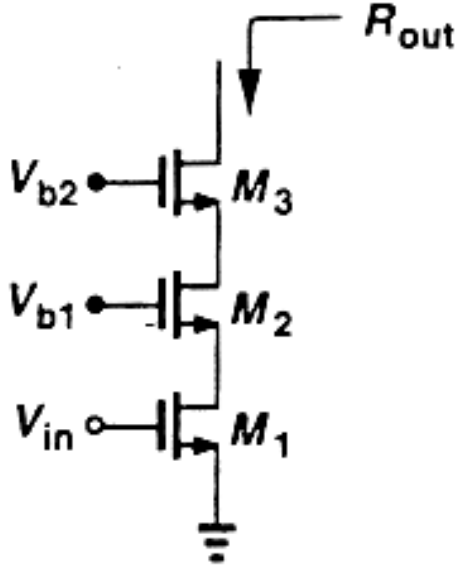
$$G_m = \left. \frac{I_{out}}{V_{in}} \right|_{V_{out}=0} = g_{m1} \frac{r_{O1}}{r_{O1} + \dfrac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} // r_{O2}}$$

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

R_{out} ของวงจรขยายคาสโคด







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

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

R_{out} ; ?

อัตราขยายแรงดันของวงจรขยายคาสโคด

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

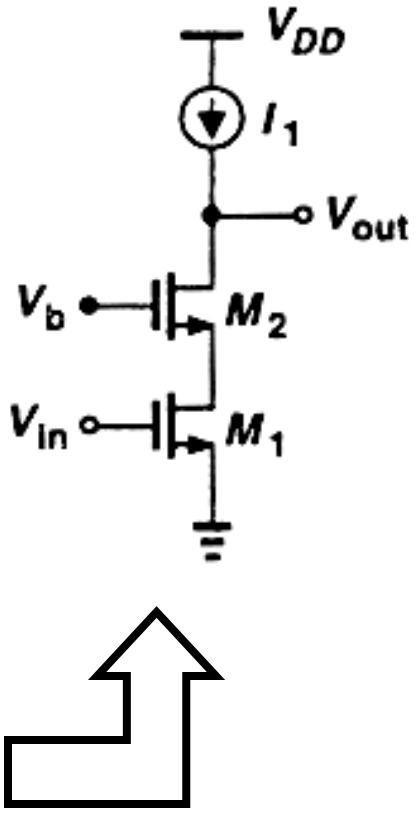
$$\cong -g_{m1}\left[\left(g_{m2}+g_{mb2}\right)r_{o2}r_{o1} \,//\, R_D\right]$$

(i) ถ้า $\left(g_{m2}+g_{mb2}\right)r_{o2}r_{o1} \;?\; R_D$

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

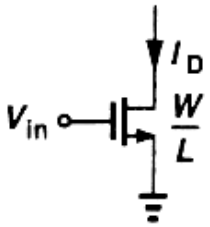
(ii) ถ้า $\left(g_{m2}+g_{mb2}\right)r_{o2}r_{o1} = R_D$

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

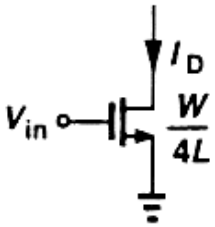


เปรียบเทียบวงจรขยาย CS และ cascode

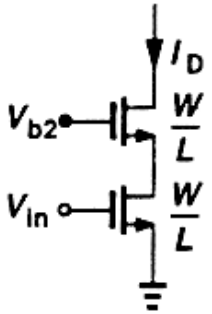
- เปรียบเทียบที่ I_D เท่ากัน
- วงจรขยาย CS



(a)



(b)



(c)

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

$$\lambda \propto \frac{1}{L}$$

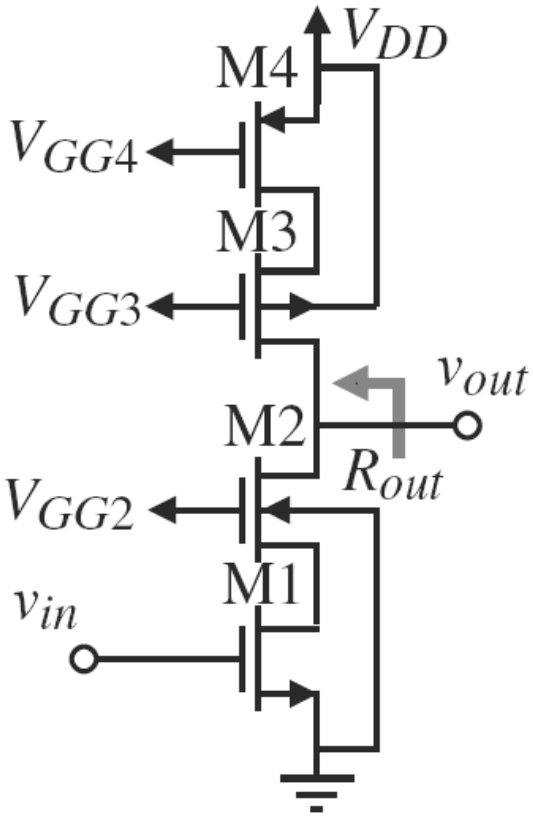
- ถ้าเพิ่ม L เป็น 4 เท่า => A_V และ V_{DSAT} จะเพิ่มขึ้น 2 เท่า และ g_m ลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

- วงจรขยาย Cascode

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

วงจรขยายคาสโคดที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสคาสโคด

- วงจรขยายคาสโคดที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสคาสโคดเป็นโหลดจะให้ความ
  ราขยายที่สูงขึ้น



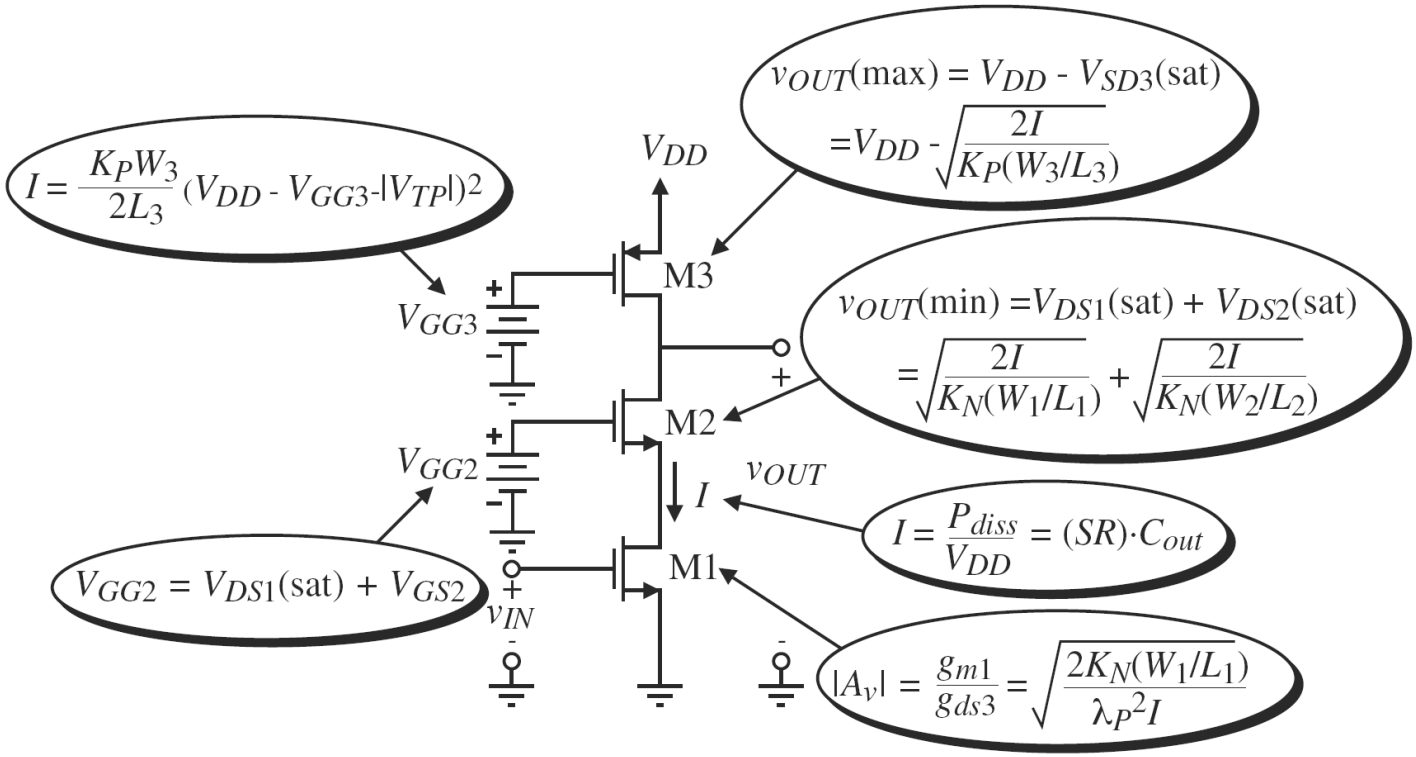
$$A_v = -g_{m1}R_{out}$$

$$\cong -g_{m1}\left[\left(g_{m2}r_{o2}r_{o1}\right)//\left(g_{m3}r_{o3}r_{o4}\right)\right]$$

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

การออกแบบวงจรขยายคาสโคด

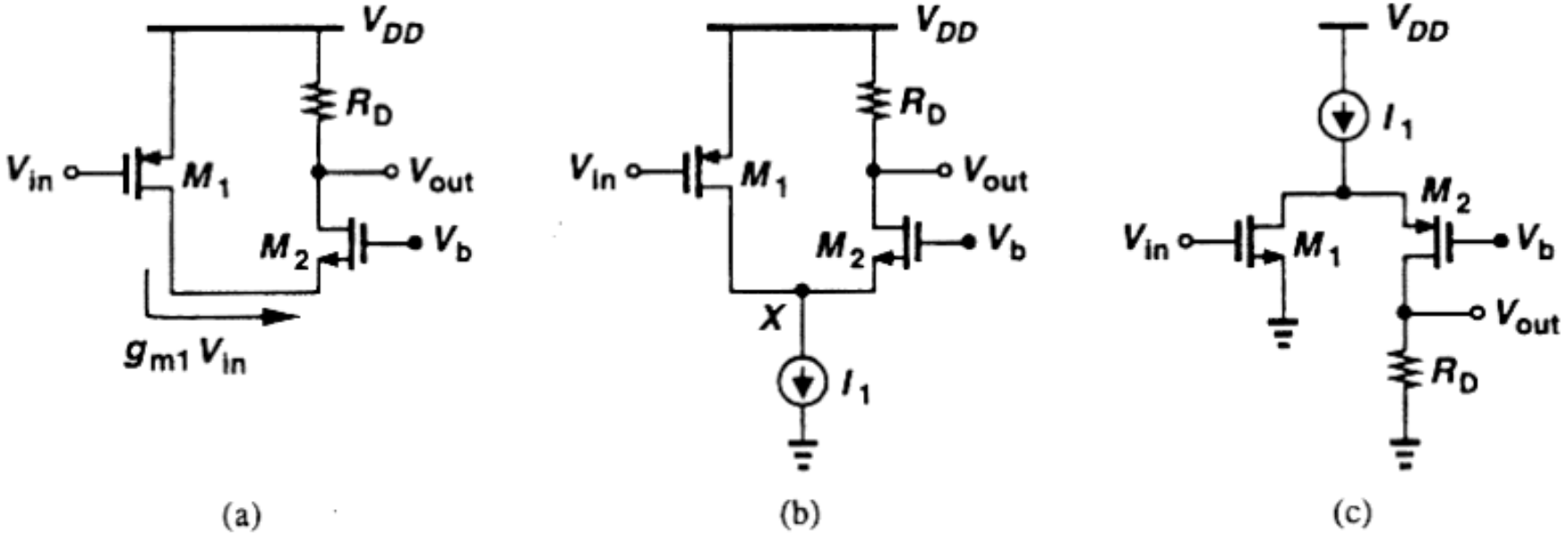
- สม



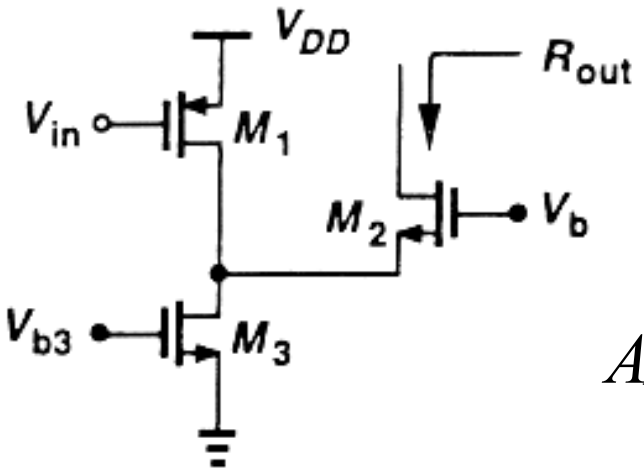
- ตัวอย่าง: จงออกแบบวงจรให้มีอัตราขยาย 30 dB โดยมี $V_{out}(max)=4V$, $V_{out}(min)=1.5V$, $V_{DD}=5V$, $P_{diss}<1mW$

วงจรขยายคาสโคดแบบพับ (Folded cascode amplifier)

- คาสโคดทรานซิสเตอร์ (M2) สามารถเป็นทรานซิสเตอร์คนละชนิดกับ M1 ได้ ซึ่งจะได้วงจรขยายคาสโคดแบบพับ
- วงจรขยายคาสโคดแบบพับ สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่าวงจรขยายคาสโคด



อัตราขยายของวงจรขยายคาสโคดแบบ



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

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

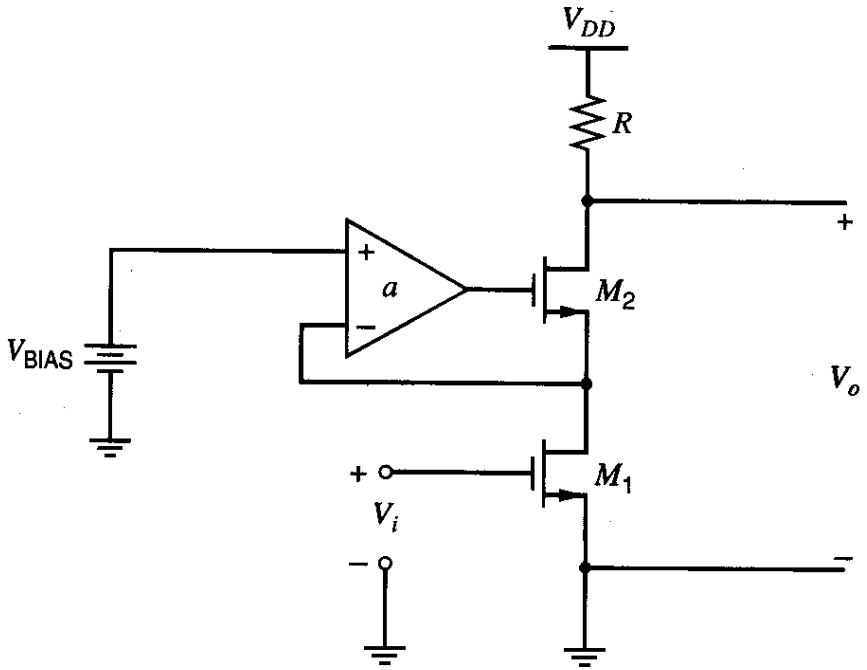
$$\cong -g_{m1}\left[\left(g_{m2} + g_{mb2}\right) r_{o2}\left(r_{o1} // r_{o3}\right) // R_D\right]$$

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

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

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

วงจรขยาย regulated cascode



- ใช้วงจรขยายและการป้อนกลับแบบลบเพื่อทำให้ V_{DS1} มีค่าคงที่ (= V_{BIAS} เมื่อ $A = \infty$)
- ทำให้การเปลี่ยนแปลงของ V_{out} ไม่มีผลต่อ I_{out} => R_{out} มีค่าสูง => A_V มีค่าสูง

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

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

$$G_m = g_{m1}\frac{r_{O1}}{r_{O1} + \dfrac{1}{g_{m2}\left(a+1\right)+g_{mb2}} // r_{O2}}$$

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

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