

CMOSプロセス、エレクトロニクス入門

2009年7月27日

エレクトロニクスDAQセミナー

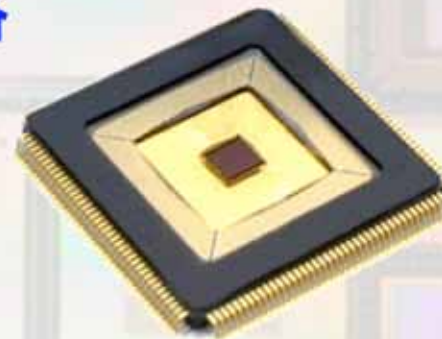
高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所

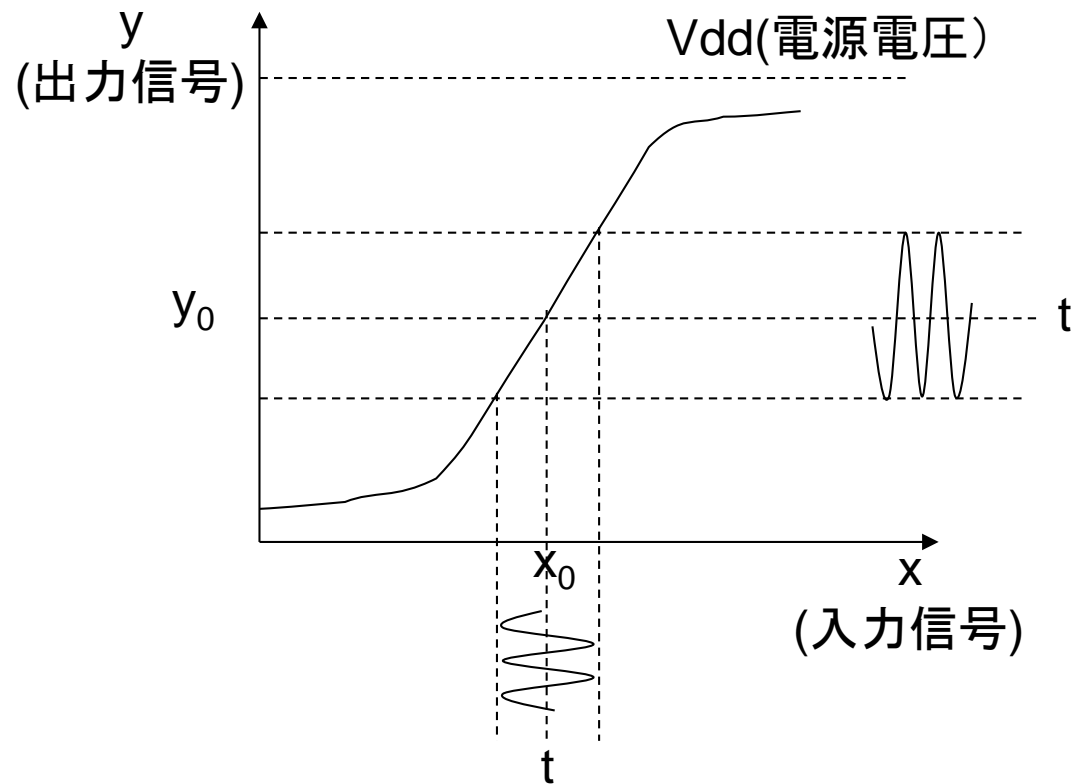
新井康夫 (yasuo.arai@kek.jp)

講義内容

- 0.はじめに
- 1. MOSTランジスターの基礎
- 2. MOSアナログ回路
- 3. CMOSデジタル回路
- 4. SOI Pixel回路



増幅回路



$$(y - y_0) = \alpha * (x - x_0)$$

a : 増幅度
 x_0 : 入力オフセット
 y_0 : 出力オフセット

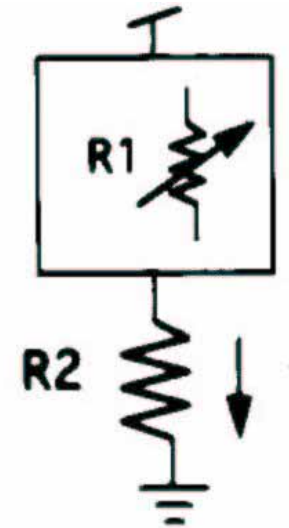
バイアスの設定が重要

定電流源 (Current Source/Sink)

最も簡単な定電流源

-> 抵抗

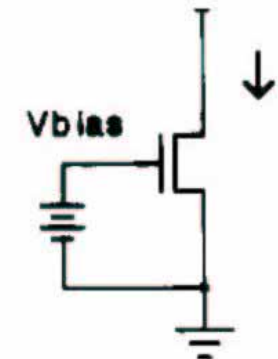
If $R1 < R2$ ならば $R1$ が変化しても
 $I \sim \text{constant}$



MOSを使った定電流源

$$I_d = \beta \frac{(V_{gs} - V_t)^2}{2}$$

V_{ds} の値によらず一定

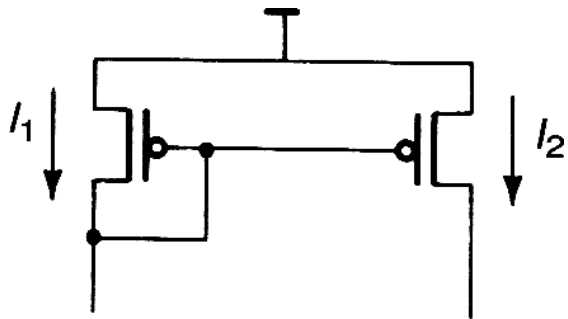


飽和領域

Current Mirror

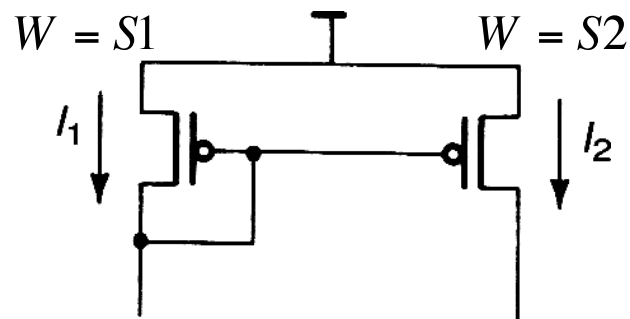
回路設計の第一は、外部電圧、温度、製品のバラツキ等によらない基準電圧／電流を得ること！

Current Mirrorは最も良く使用される基本回路。



$$I_1 = \frac{\beta}{2} (V_{gs} - V_t)^2 = I_2$$

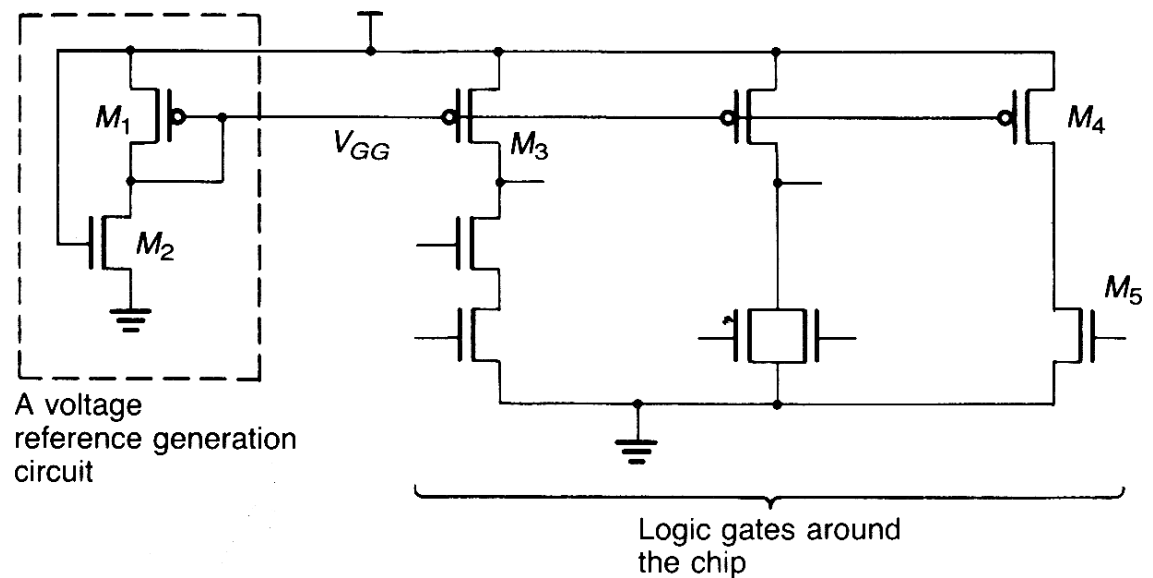
Saturation RegionではVdsによらず Idが一定。



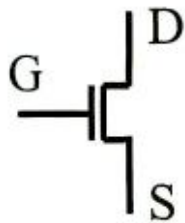
$$I_2 = \frac{S2}{S1} I_1$$

トランジスタのサイズの変更で任意の電流値が得られる。

プロセスが変化しても、回路への影響を小さく出来る。



MOS 1段増幅回路の種類



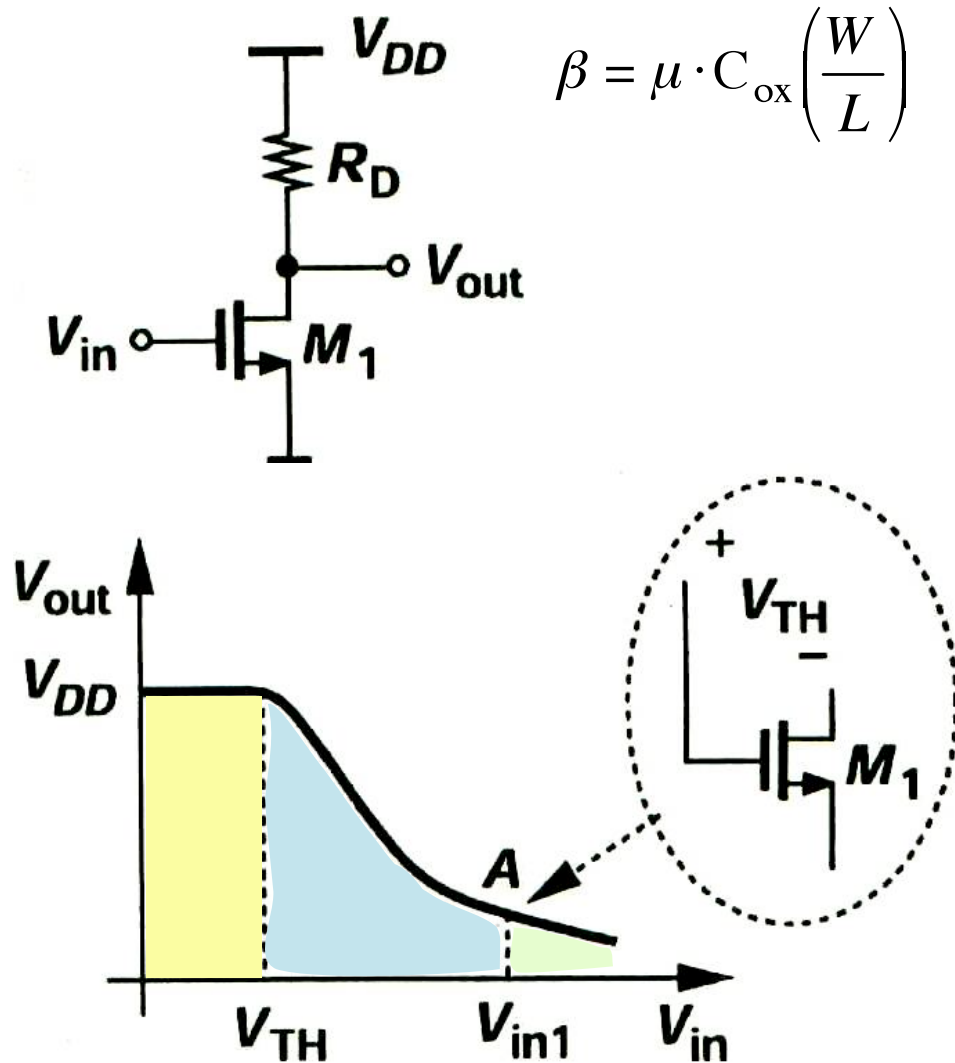
3端子素子

- ・入力端子
- ・出力端子
- ・接地端子

接地端子	用途
ソース接地	電圧－電流増幅
ドレイン接地	低出力インピーダンス 電圧レベルシフト
ゲート接地	電流－電圧増幅 低入力インピーダンス

cf. 「CMOSアナログ回路設計口座」大阪大学工学部 谷口研二
<http://www6.eie.eng.osaka-u.ac.jp/>

ソース接地増幅段 (Common Source Stage)



$V_{in} < V_{th}$ (Cut Off)

$$I_{ds} = 0 \Rightarrow V_{out} = V_{DD}$$

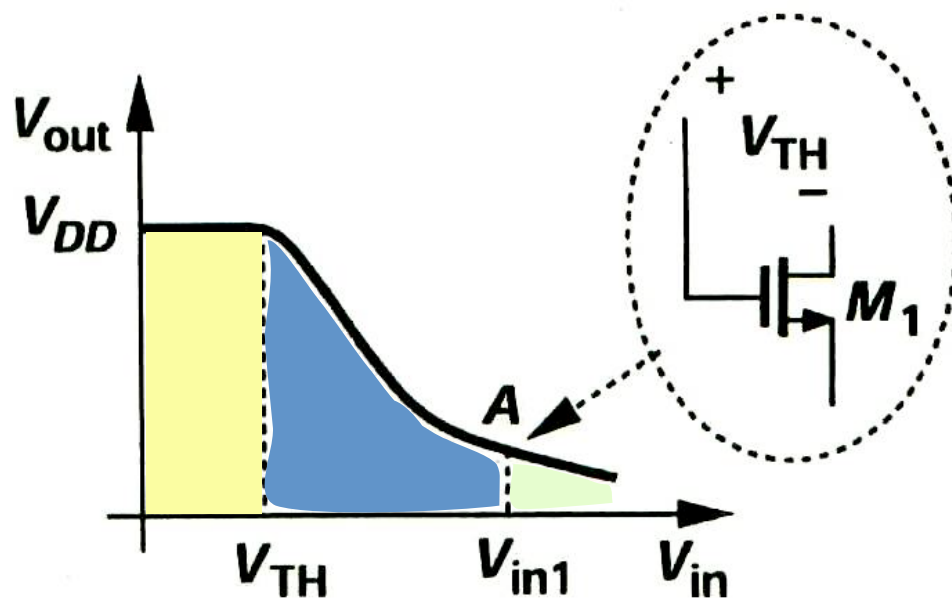
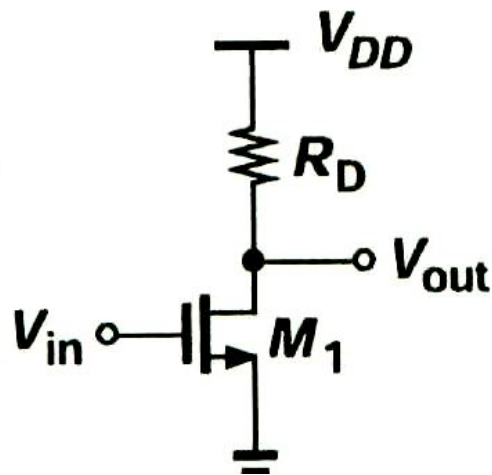
$V_{th} < V_{in} < V_{in1}$ (Saturation)

$$I_{ds} = \beta \frac{(V_{gs} - V_{th})^2}{2}$$

$$V_{out} = V_{DD} - R_D I_{ds}$$

$$= V_{DD} - R_D \cdot \beta \frac{(V_{in} - V_{th})^2}{2}$$

ソース接地増幅段 (続き)



$V_{in1} < V_{in}$ (Linear)

$$I_{ds} = \beta \left[(V_{gs} - V_{th}) V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right]$$

$$V_{out} = V_{DD} - R_D \cdot \beta \left[(V_{in} - V_{th}) V_{out} - \frac{V_{out}^2}{2} \right]$$

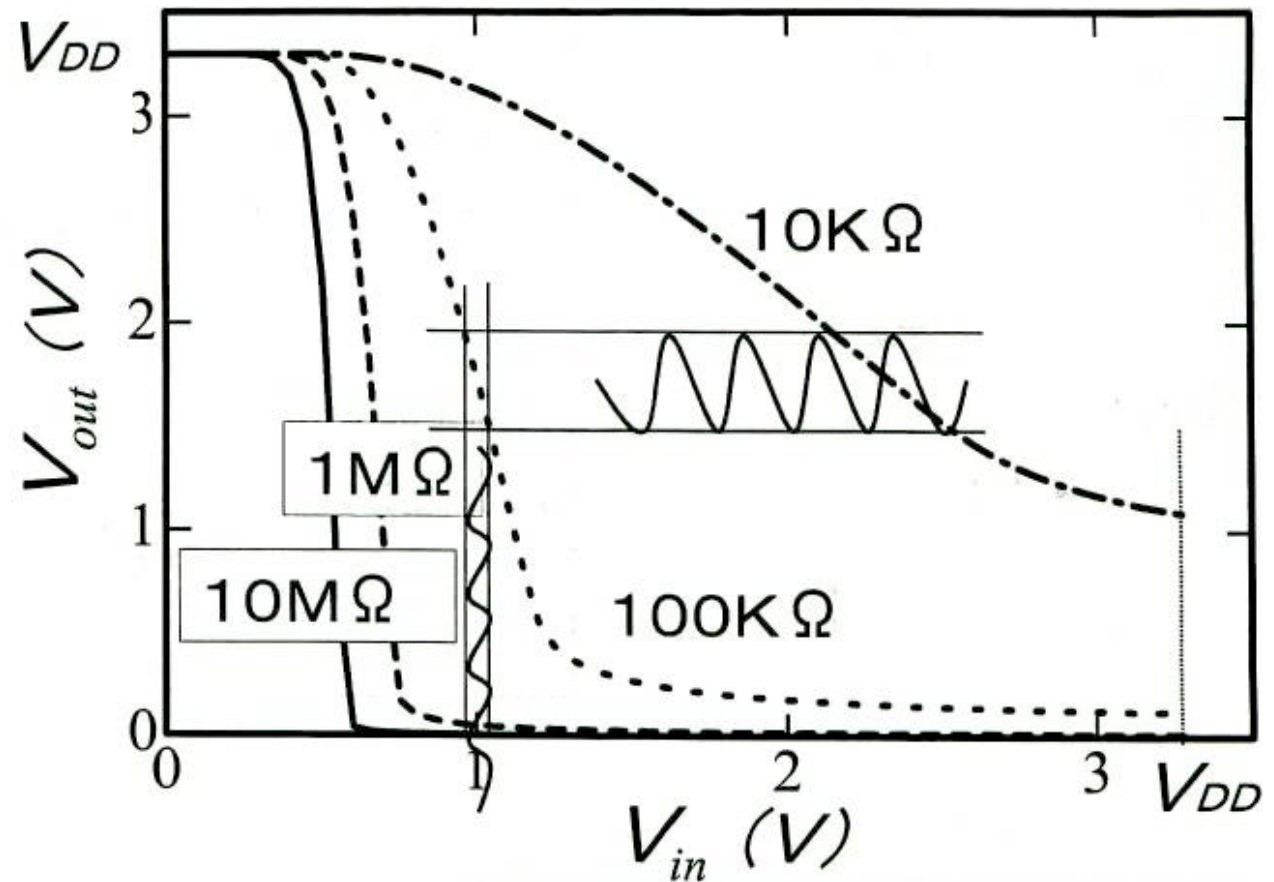
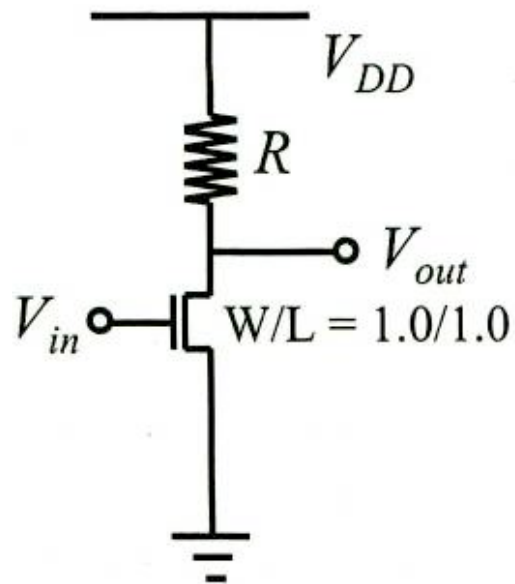
Voutが小さければ最後の項を無視して

$$V_{out} = V_{DD} - R_D \cdot \beta [(V_{in} - V_{th}) V_{out}]$$

$$V_{out} = \frac{V_{DD}}{1 + R_D \cdot \beta (V_{in} - V_{th})}$$

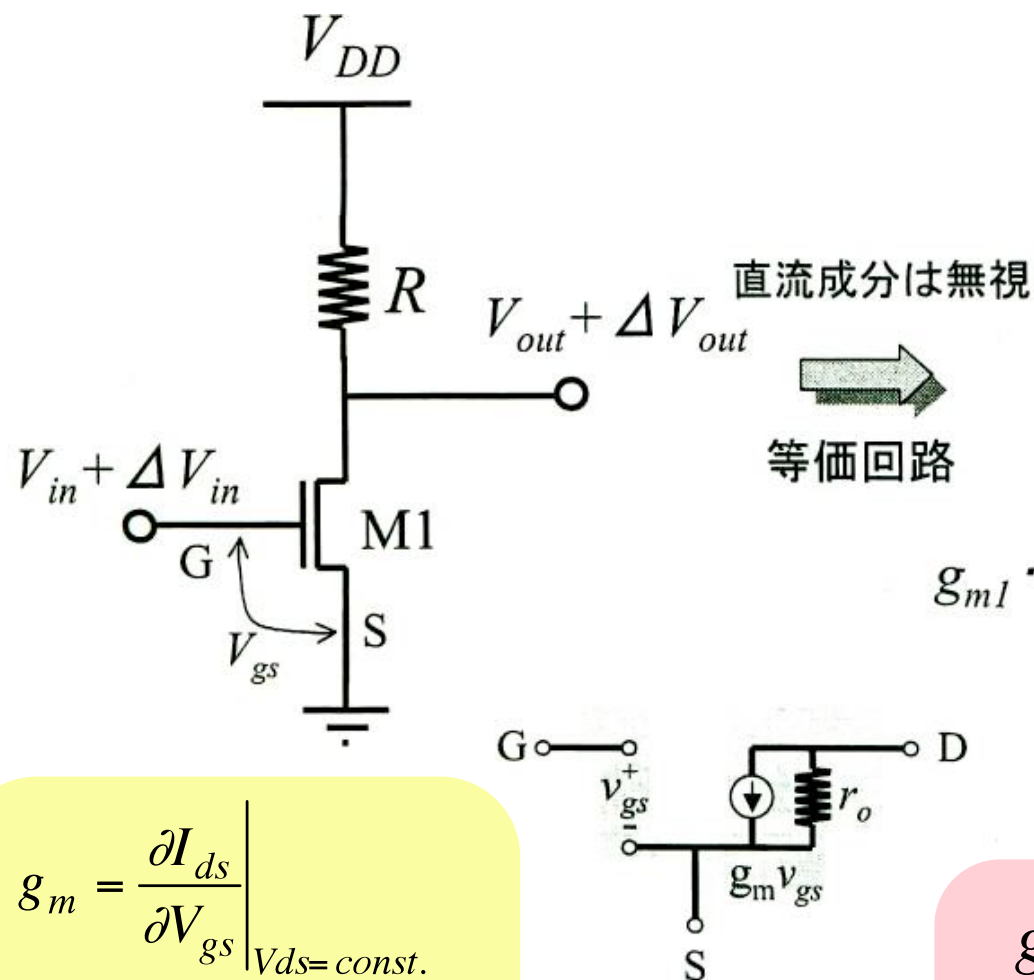
増幅回路

→ 適切なバイアスを与えることが重要



実は適切なバイアスを安定的に与える事は難しい。
→ フィードバック回路

ソース接地（等価回路）

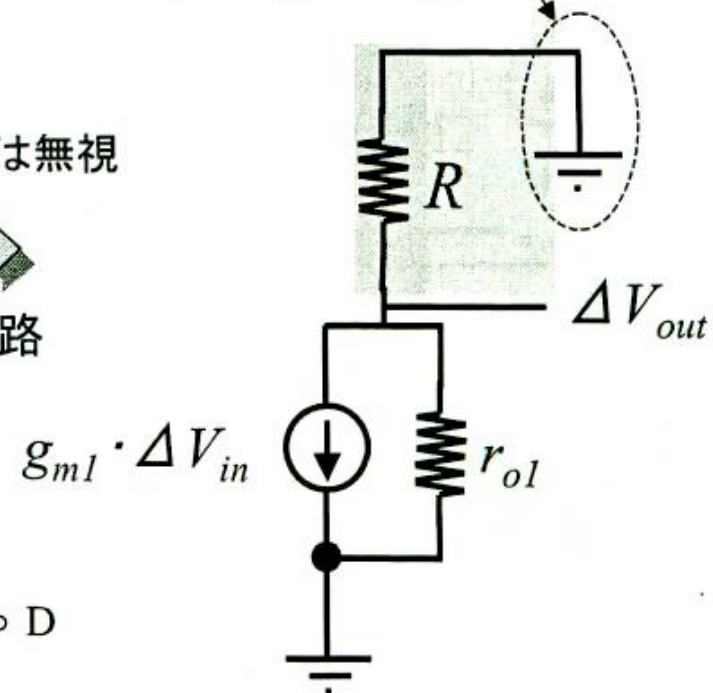


$$g_m = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds} = \text{const.}}$$

$$= \beta (V_{gs} - V_{th})$$

$$\beta = \frac{W}{L} \mu C_{ox}$$

定電圧(V_{DD})は交流的には接地と等価



$$g_{m1} \Delta V_{in} + \frac{\Delta V_{out}}{r_{o1} // R} = 0$$

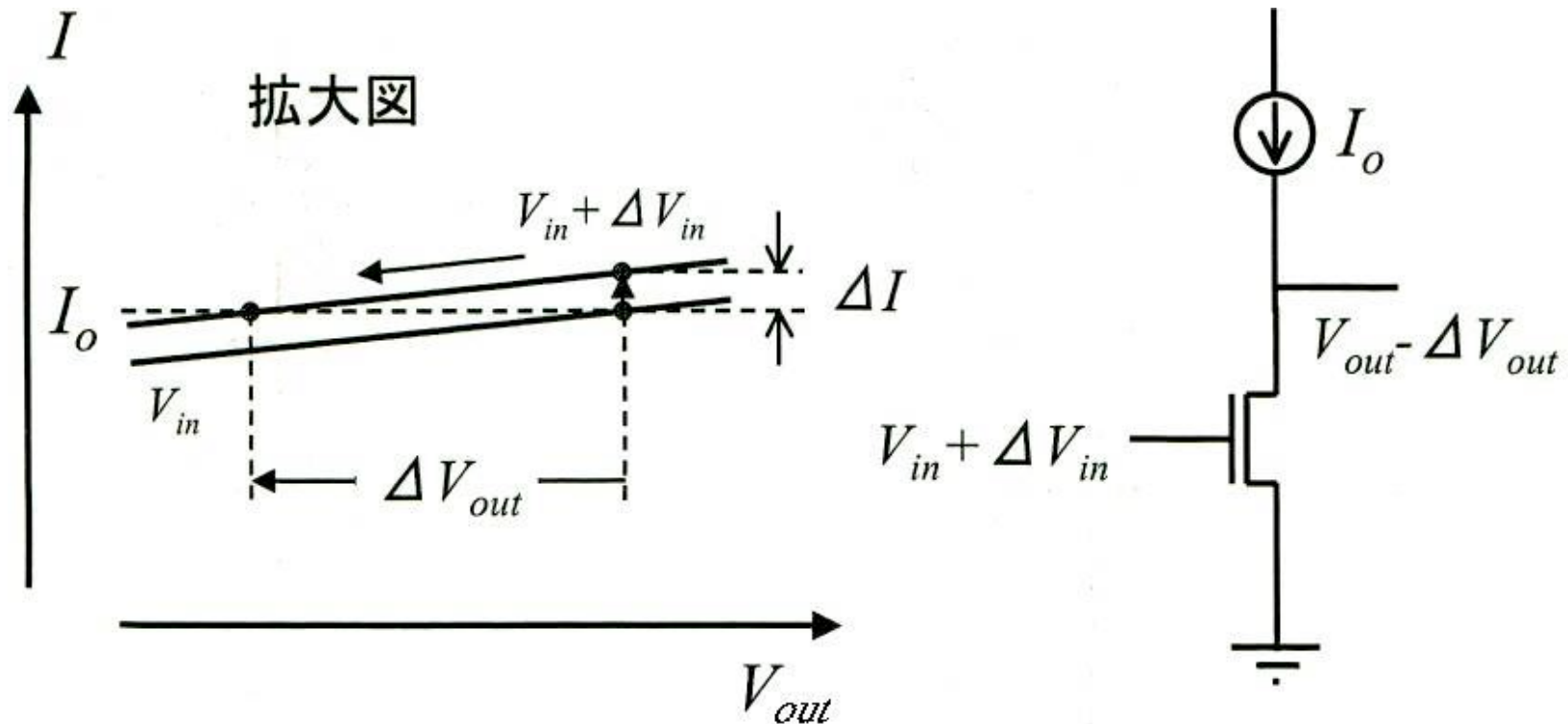
$$A_v = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = -g_{m1} (r_{o1} // R)$$

電流源負荷ソース接地

$A_v = -g_m (r_o // R_D)$ から電圧利得を上げるには、 R_D を増加させたい。

そこで、負荷を電流源で置き換える。

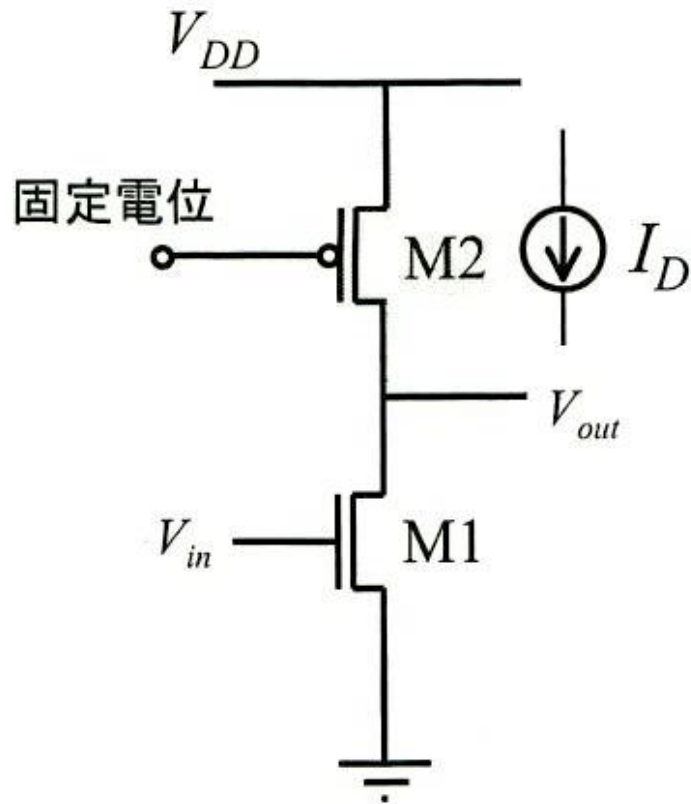
電流源のインピーダンスは無限大なので利得は $A_v = -g_m \cdot r_o$ となる。



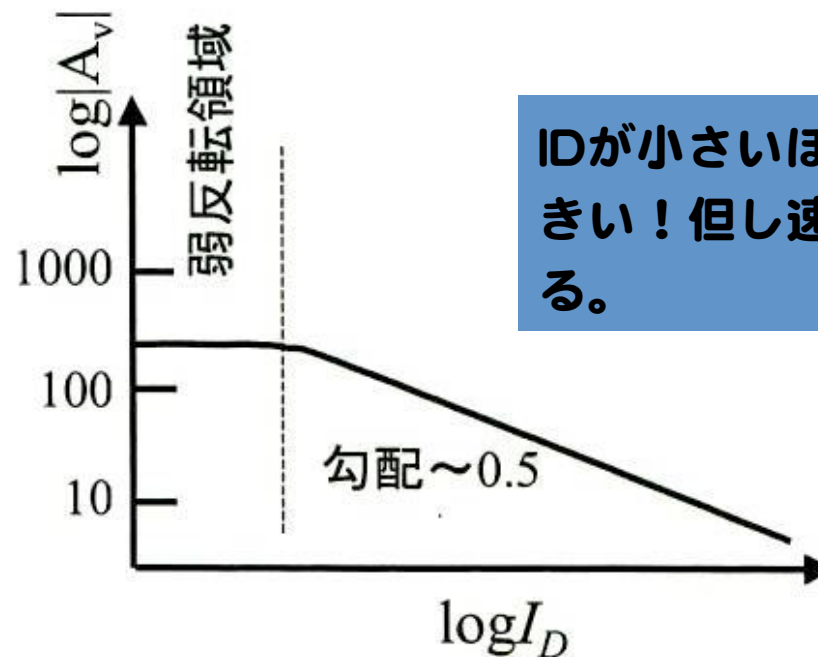
電流源負荷ソース接地（続き）

実際の回路は下図のようになり、

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D}$$
$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$

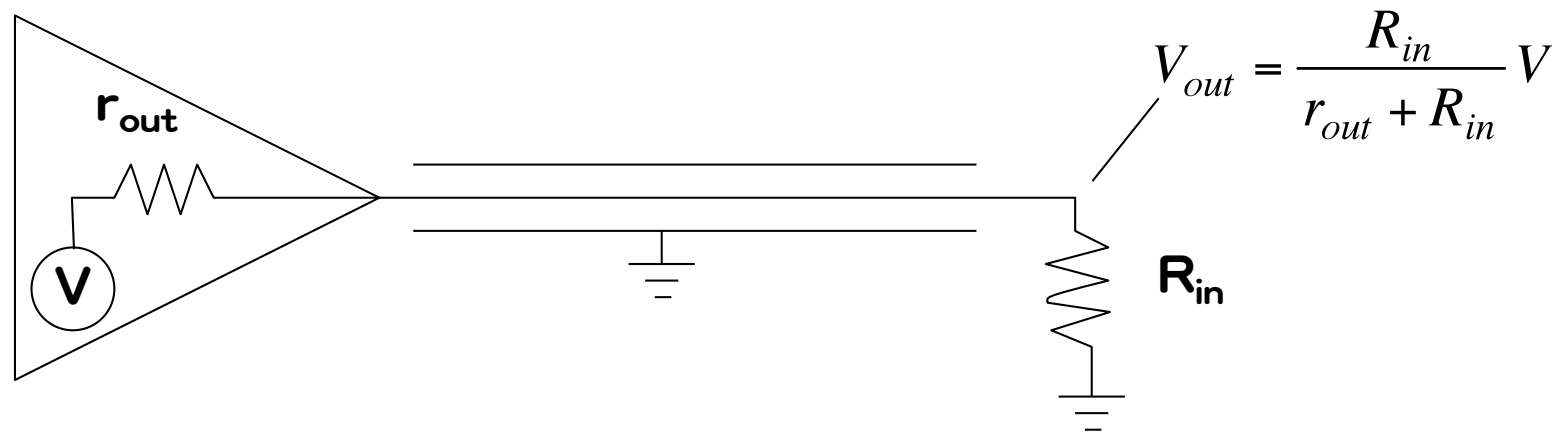


$$A_v = -g_m (r_{o1} \parallel r_{o2})$$
$$= -\frac{\sqrt{2\beta_1 I_D}}{I_D (\lambda_1 + \lambda_2)} = -\frac{\sqrt{2\beta_1}}{(\lambda_1 + \lambda_2) \sqrt{I_D}}$$



I_D が小さいほど利得は大きい！但し速度は遅くなる。

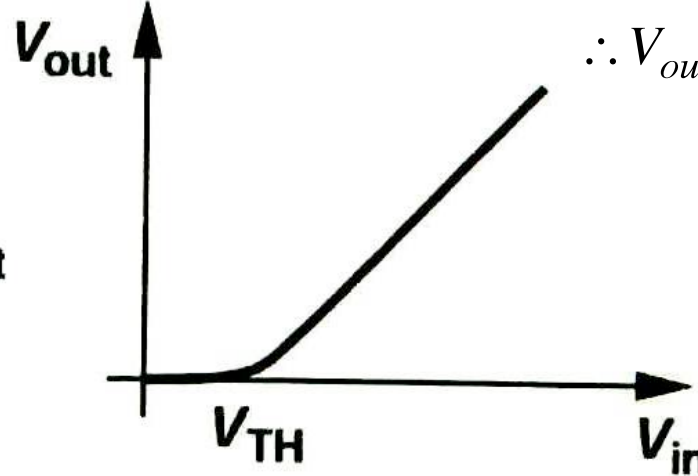
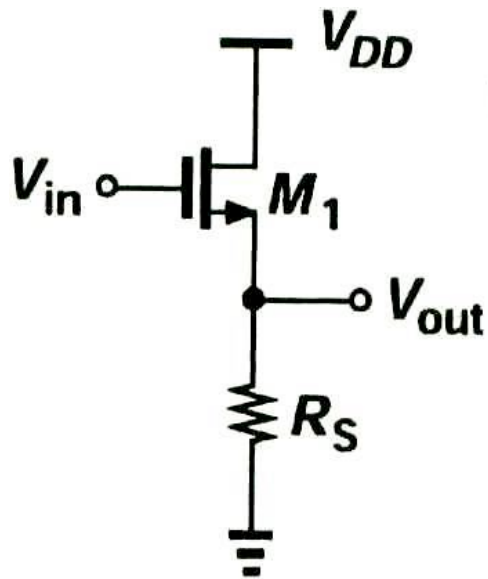
ドレイン接地 (SourceFollower)



ソース接地では利得を上げるには、出力抵抗を高くした方が良かったが、この出力を低インピーダンスの回路（例えば同軸ケーブル）に繋ぐと、信号は小さくなってしまう。

最も簡単な低出力インピーダンス回路がソースフォロワー。

ドレイン接地 (SourceFollower)



$$I = \frac{\beta}{2} (V_{in} - V_{out} - V_{th})^2$$

$$\therefore V_{out} = V_{in} - V_{th} - \sqrt{\frac{2I}{\beta}} = V_{in} - \text{const.}$$

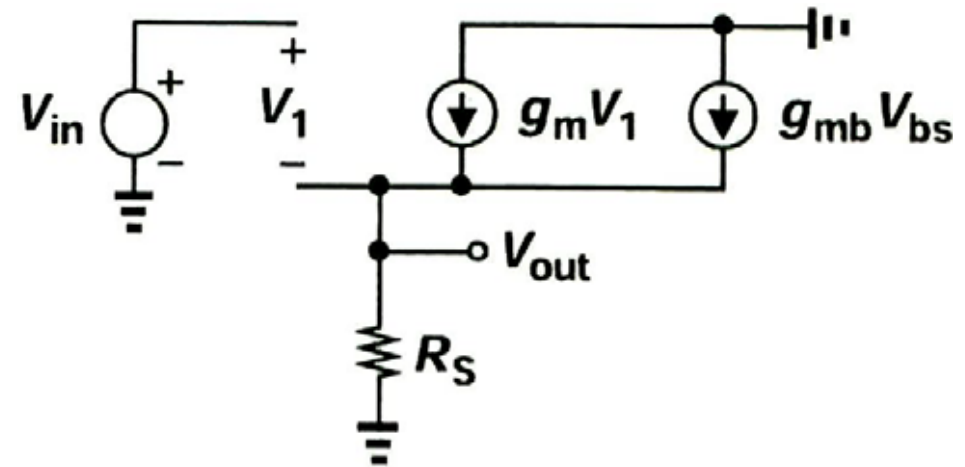
Vout は Vin にほぼ追従。
一定電圧だけシフト

$$A_v = \frac{g_m R_s}{1 + (g_m + g_{mb}) R_s}$$

$$\Rightarrow \frac{g_m R_s}{(g_m + g_{mb}) R_s} = \frac{1}{1 + \eta} \approx 1$$

($\eta \sim 0.2$)

利得はほぼ1。



ゲート接地増幅回路 (Common Gate Stage)

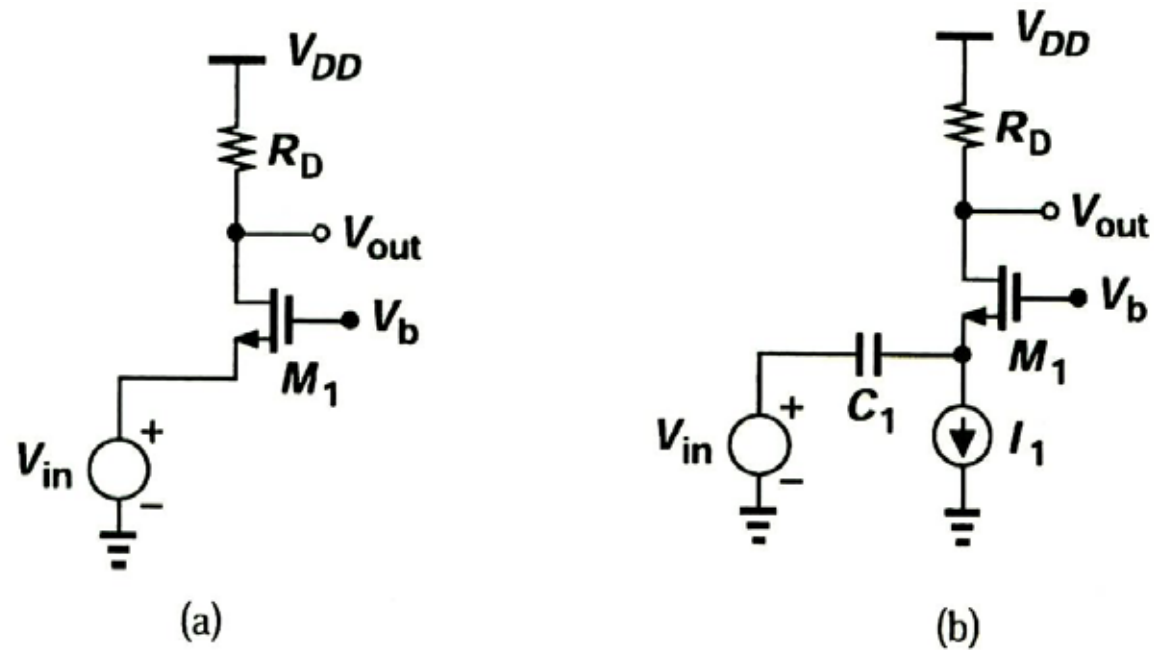
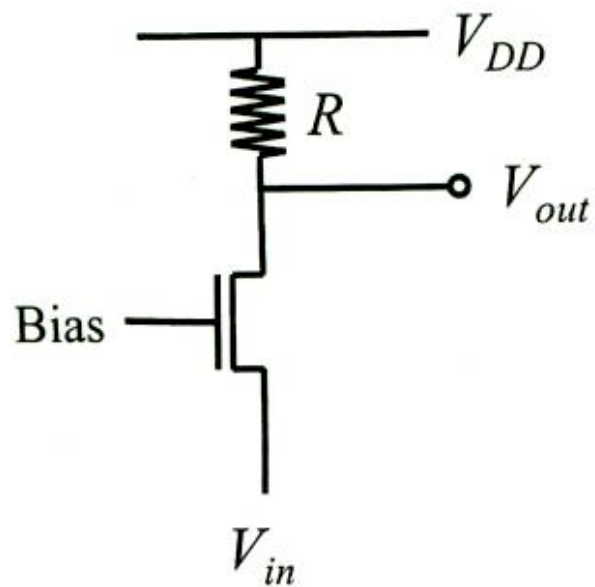


図3.40 (a) 入力が直接結合されたゲート接地増幅段,
(b) 入力容量結合されたゲート接地増幅段.

バイアス電流が信号源を流れるので、これが嫌な場合(b)のようにする。

ゲート接地増幅回路 (Common Gate Stage)



$$\Delta I_{out} = g_m \Delta V_{in}$$

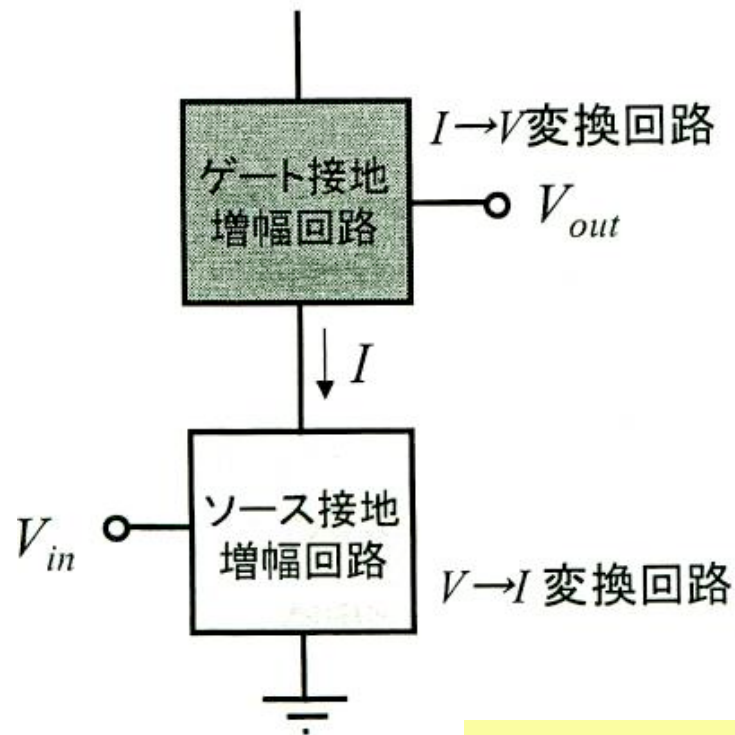
$$\Delta I_{out} = \frac{\Delta V_{out}}{r_o \parallel R}$$

$$A_V \equiv \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{r_o \parallel R}{\frac{1}{g_m}} = g_m (r_o \parallel R)$$

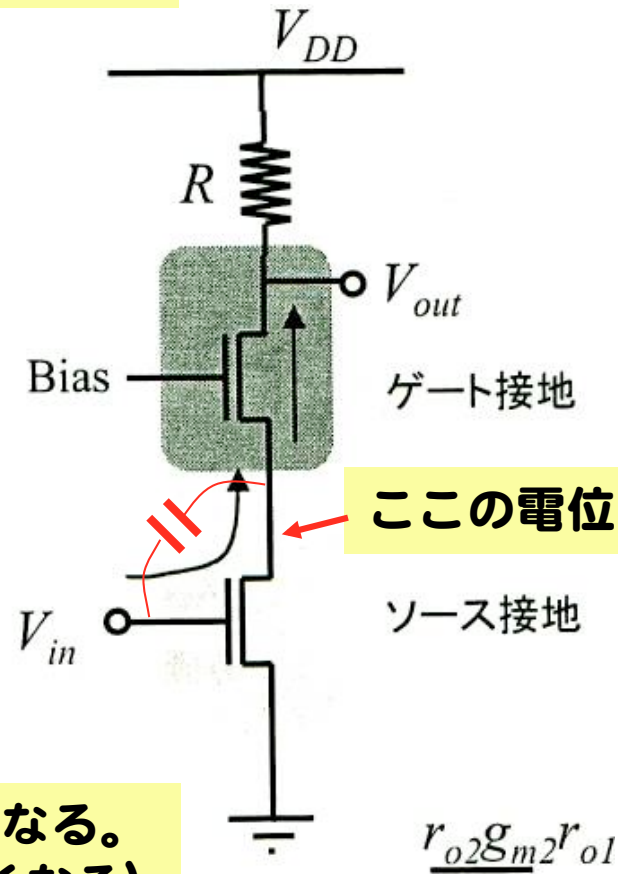
電流－電圧変換
低入力インピーダンス
カスコード回路

カスコード(cascode)増幅回路

出力抵抗が大きくなり増幅率が上がる。



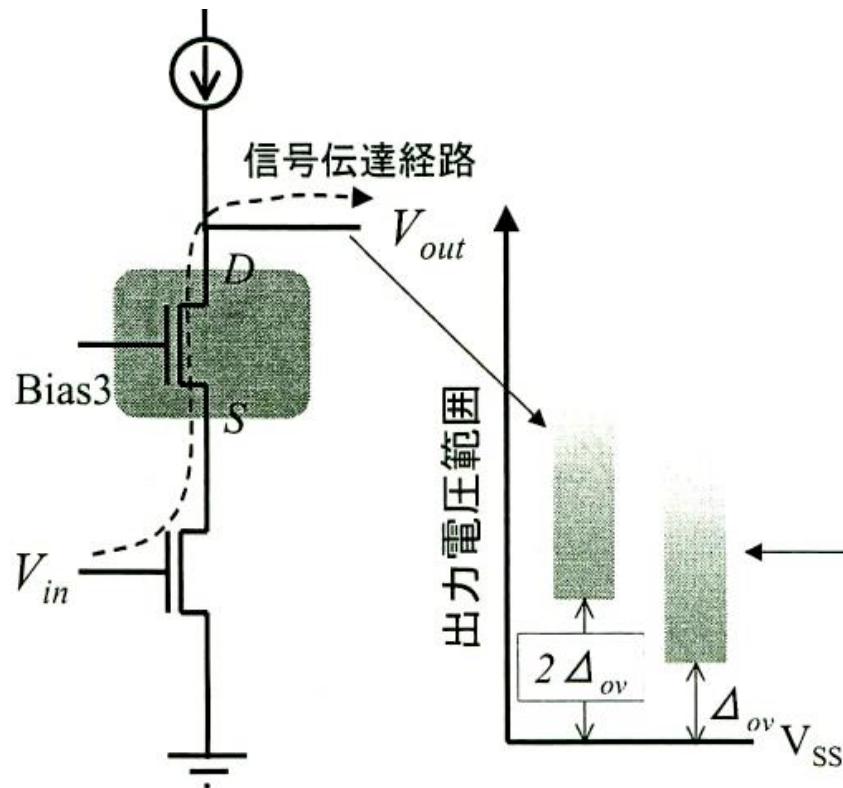
入力容量が小さくなる。
(高周波特性が良くなる)



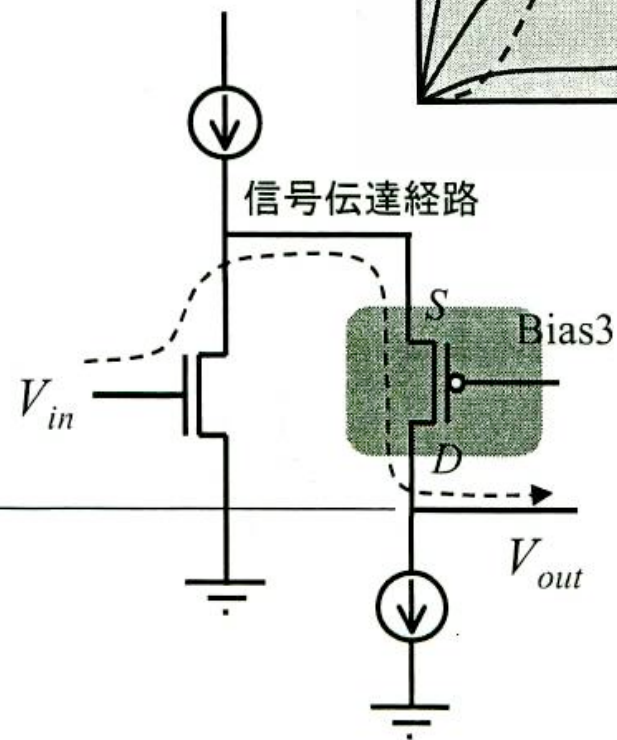
この電位が固定される。

出力電圧幅を広げる

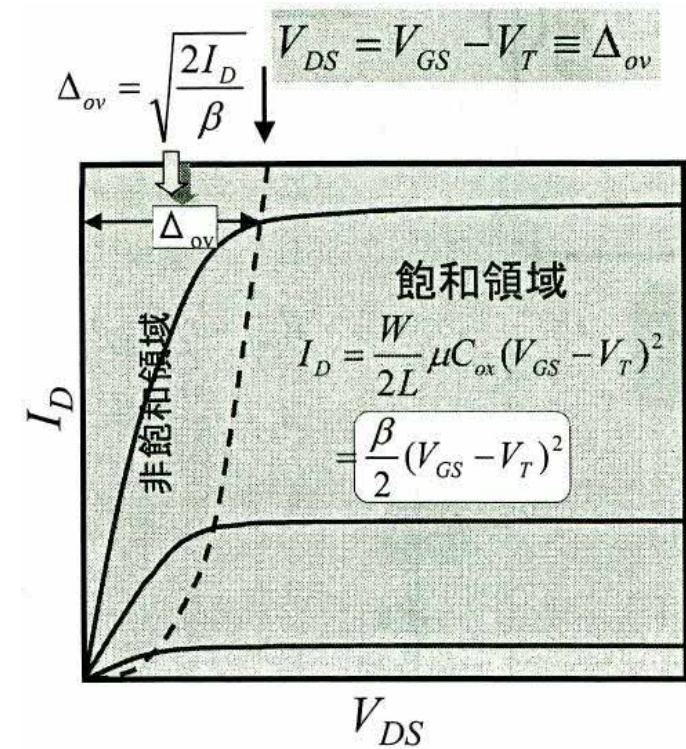
(フォールディッド・カスコード)



縦積みカスコード増幅器



折り返しカスコード増幅器



MOS 1段増幅回路まとめ

信号伝達経路



接地端子	用途
ソース接地	電圧－電流増幅
ドレイン接地	低出力インピーダンス 電圧レベルシフト
ゲート接地	電流－電圧増幅 低入力インピーダンス

カスコード回路(ソース接地＋ゲート接地)
高利得、高速増幅器