平成25年度前期東京工業大学学部講義

電子デバイス

Electron Devices

資料（５）

Kazuya Masu
Director, ICE Cube Center
Solutions Research Laboratory
Precision and Intelligence Laboratory
Dept. Electronics and Applied Physics

益　一　哉
異種機能集積研究センター
ソリューション研究機構
精密工学研究所
大学院・物理電子システム創造専攻

Tel & Fax: 045-924-5022 Email: masu@ieee.org,
http://masu-www.pi.titech.ac.jp/~masu/index-j.html

Green ICE Tokyo Tech Information Communication Energy
Semiconductor Solution Research

TOKYO TECH Pursuing Excellence

MOSFET

TOKYO TECH Pursuing Excellence

1. MIS Diode
   - Band Diagram
   - 蓄積、空乏、反転、強反転すると、それ以上ゲート電圧を加えても空乏層は拡がらない。
   - C-Vカーブ（高周波C-V特性、低周波C-V特性、測定方法）
2. MOSFET
   - 長チャネルMOSFETのID-VD特性
   - Subthreshold特性
   - Subthreshold Swing（集積回路としての電源電圧とThreshold Voltageの関係）
3. MOSFETの短チャネル効果、スケーリング則
4. MOSETの動作速度、等価回路

最大動作周波数

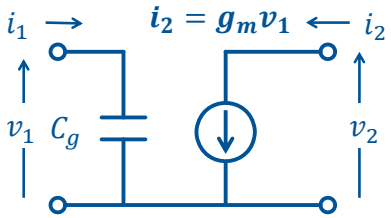
TOKYO TECH Pursuing Excellence

- チャネル走行時間
  - $\tau_{ch} = \frac{\text{Channel length } L}{\text{Drift velocity: } v_{drift}=\mu E} \leq \frac{L}{\text{Saturation velocity: } v_{sat}}$
  - $f_{ch} = \frac{1}{2\pi\tau_{ch}} \leq \frac{v_{sat}}{2\,\pi\,L}$
- 遮断周波数　f_h or f_t
  - 電流増幅率が1になる周波数で定義される。
  - $f_t = \frac{g_m}{2\pi C_{gate}}$
- 最大発振周波数　f_{max}
  - 入出力整合を取ったときに、電力増幅率が1になる周波数で定義される。
  - $f_{max} = \sqrt{\frac{f_t}{8\pi R_{gate} C_{gate}}}$

Cut off frequency f_t

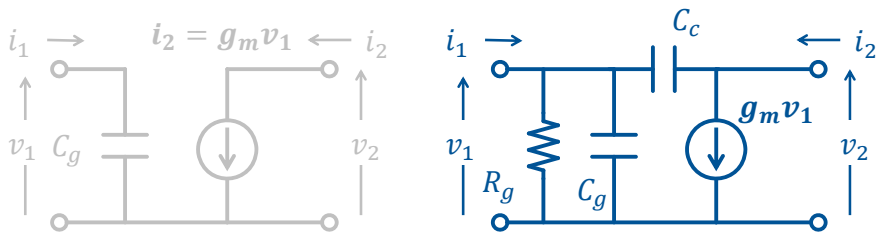
TOKYO TECH Pursuing Excellence

- $v_1 = i_1/(j\omega C_g)$
- $i_2 = g_m v_1$
- $h_{21} = \left|\frac{i_2}{i_1}\right| = \frac{g_m}{\omega C_g} = \frac{g_m}{2\pi f C_g}$
- $h_{21} = 1$　とおけば、
- $f_t = \frac{g_m}{2\pi C_{gate}}$

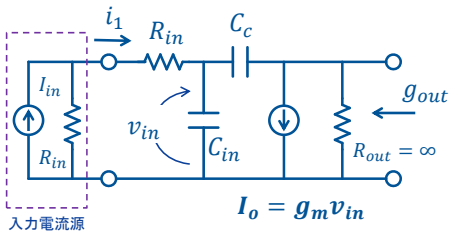


Maximum oscillation frequency f_{max}

- f_{max} は、R_g、C_cを考えて、入出力のマッチングを考えて求める。
- C_cが十分大きいという仮定を置くと比較的簡単に求めることが可能。



f_{max}を求める (1)



- 仮定 $R_{in} \gg \frac{1}{\omega C_c}$

  $\omega C_{in} \gg \omega C_c$

- 内部抵抗としてR_{in}をもつ入力電流源を仮定。(整合している)
- トランジスタに流れる電流

  $i_1 = {}^{I_{in}}/_{2}$

- トランジスタ供給している最大電力

  $P_{in} \gg \frac{{I_{in}}^2}{4{R_{in}}^2}$

- $\omega C_{in} \gg \omega C_{c\ in}$ より、$I_{C_{in}} \gg I_{C_{in}}$
- C_{in}に印加される電圧

  $v_{in} \gg \frac{I_{in}}{2}\frac{1}{j\omega C_{in}}$

- 無不可出力電流 $I_o = g_m v_{in}$

  $I_o = g_m \frac{I_{in}}{2}\frac{1}{j\omega C_{in}}$

- 出力側からみた出力コンダクタンス
  (出力電圧は、C_cとC_{in} で分圧される)

  $g_{out} = \frac{g_m\, v_{in}}{V_{out}} \approx g_m \frac{C_{in}}{C_c}$

f_{max}を求める (2)

- 取り出せる最大電力

  $P_{out} = \left|\frac{I_{out}\, g_{out}}{4}\right| = \frac{g_m\, I_{in}}{16\,\omega^2 C_{in} C_c}$

- Gainは

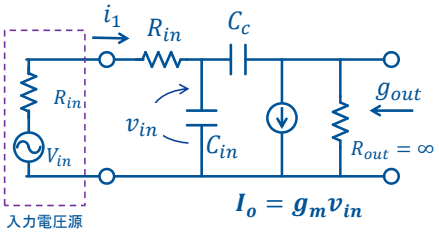
  $G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{g_m}{4\,\omega^2 R_{in} C_{in} C_c}$

- Gain=1となる周波数は

  $f_{max} = \frac{1}{4\pi}\sqrt{\frac{g_m}{R_{in} C_{in} C_c}}$

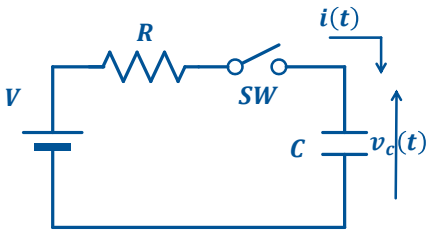
  $f_{max} = \sqrt{\frac{f_t}{8\pi\, R_{in} C_c}}$

- 回路の問題としての演習



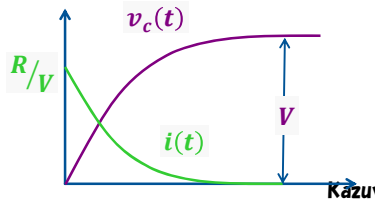
入力を上記の様な電圧源として導出せよ。

RC回路の充放電(1)

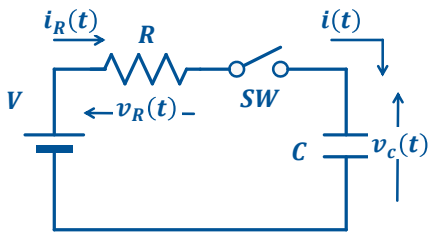


- コンデンサCに電源Vを接続したとき、コンデンサには、$Q = CV$の電荷が蓄えられる。
- また、電源Vのした仕事Wは、$W = QV$である。

- 電流、電圧は、
  - $v_c(t) = V\left(1 - e^{-t/RC}\right)$
  - $i(t) = \frac{V}{R}\, e^{-t/RC}$
- コンデンサで消費される電力、積分してエネルギー
  - $W = \int_0^\infty i(t) v_c(t) dt = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV$
- 半分？

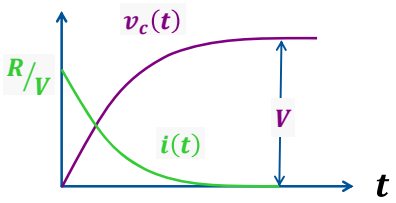


RC回路の充放電(2)



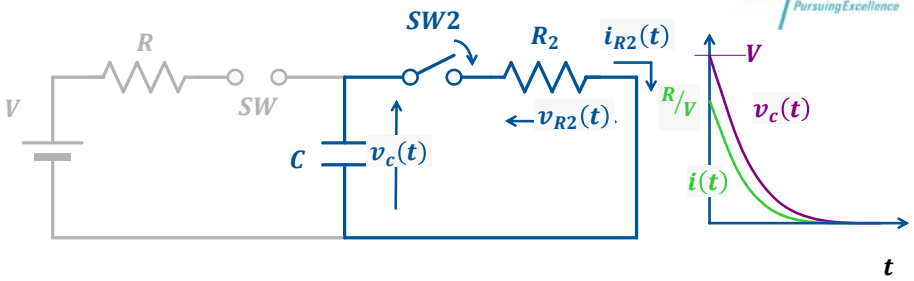
- 抵抗の電流、電圧は、
  - $v_R(t) = V - v_C(t) = V\,e^{-t/RC}$
  - $i_R(t) = \frac{V}{R}\,e^{-t/RC}$
- 抵抗で消費されるエネルギー
  - $W = \int_0^\infty i(t)v_R(t)dt$
    $= \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV$

- 電源は $W = QV$ の仕事をする。(電源から $W = QV$ のエネルギーが供給)
- 抵抗で $\frac{1}{2}CV^2\left(=\frac{1}{2}QV\right)$ が消費(ジュール熱)され、コンデンサに $\frac{1}{2}CV^2\left(=\frac{1}{2}QV\right)$ のエネルギーが蓄積される。



Kazuya Masu

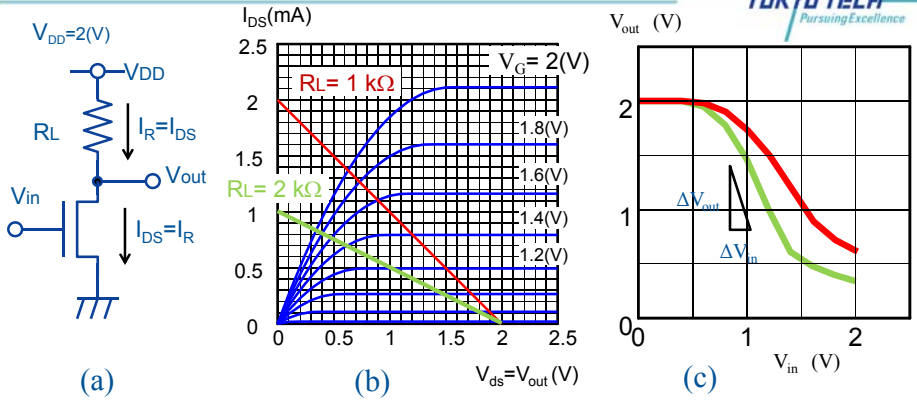
RC回路の充放電(3)



- $t < 0$ で $v_c(t) = V$。$t = 0$ で、$SW2$を閉じる。
- 抵抗の電流、電圧は、
  - $v_{R2}(t) = V\,e^{-t/R_2C}$
  - $i_{R2}(t) = \frac{V}{R_2}\,e^{-t/R_2C}$
- 抵抗で消費されるエネルギー
  - $W = \int_0^\infty i(t)v_R(t)dt = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV$
- 容量にためられたエネルギーが抵抗で消費される。

Kazuya Masu

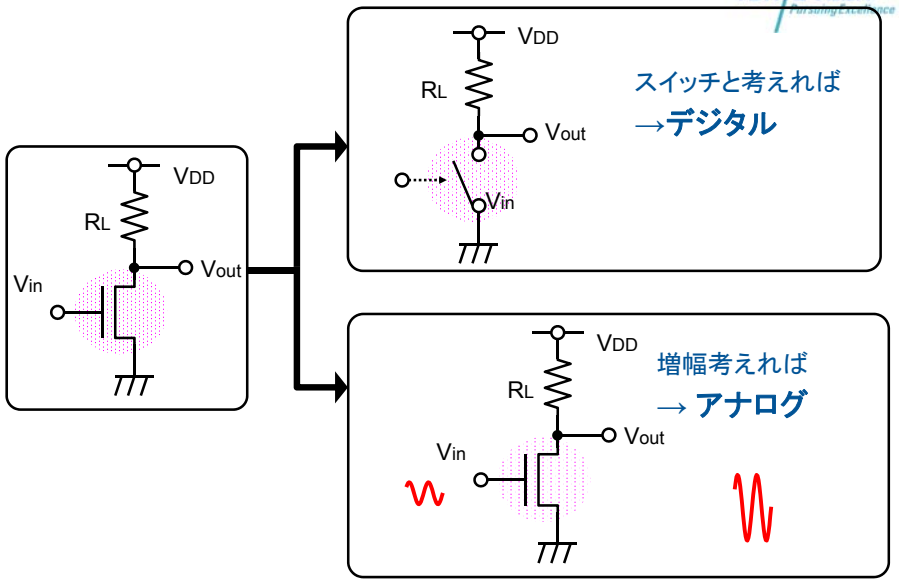
MOSFET回路



- R_L =2(kΩ)はどうなるか？
- Gain(増幅率) = $\Delta V_{out}/\Delta V_{in}$

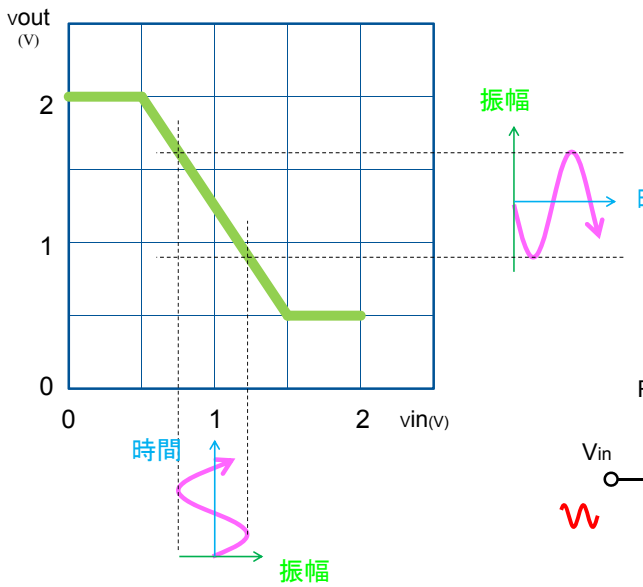
Kazuya Masu

集積回路の基礎の基礎

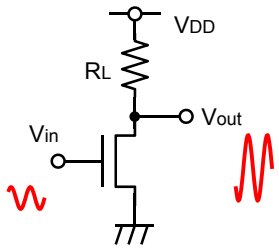


Kazuya Masu

アナログ回路（増幅器）の動作

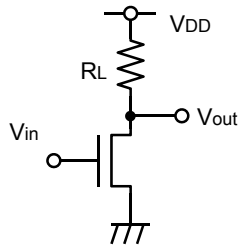


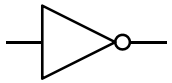
- 信号の位相は反転する。
- 増幅率（gain）は傾き。



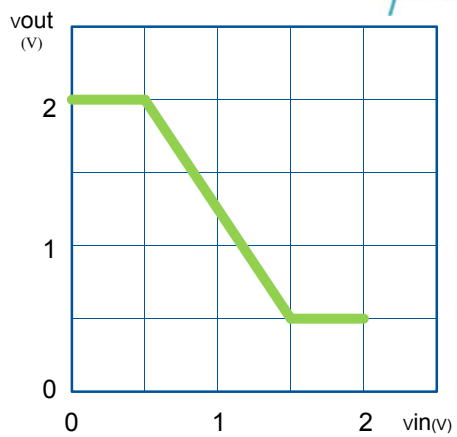
Kazuya Masu

デジタル論理回路（inverter　反転器）





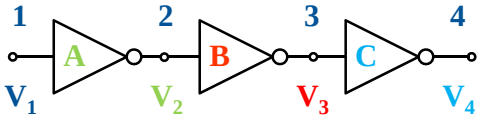
回路記号

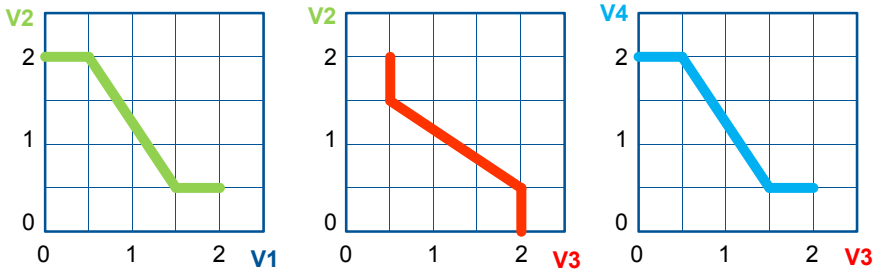


- V_{in}は、0またはV_{DD}(=2 volts)
- Voutは、V_{DD}または 0+α (今の場合、0.5volts)

Kazuya Masu

Inverter chain

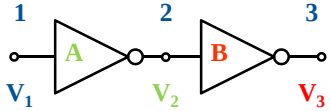




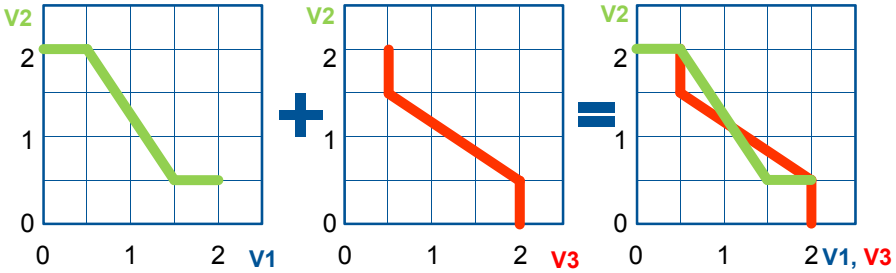
- V1=0(V)→V2=2(V) →V3=0.5(V) →V4=2(V)
- V1=2(V)→V2=0.5(V) →V3=2(V) →V4=0.5(V)
- High → Low → High → Low → High → Low → ・・・

Kazuya Masu

Inverter chain



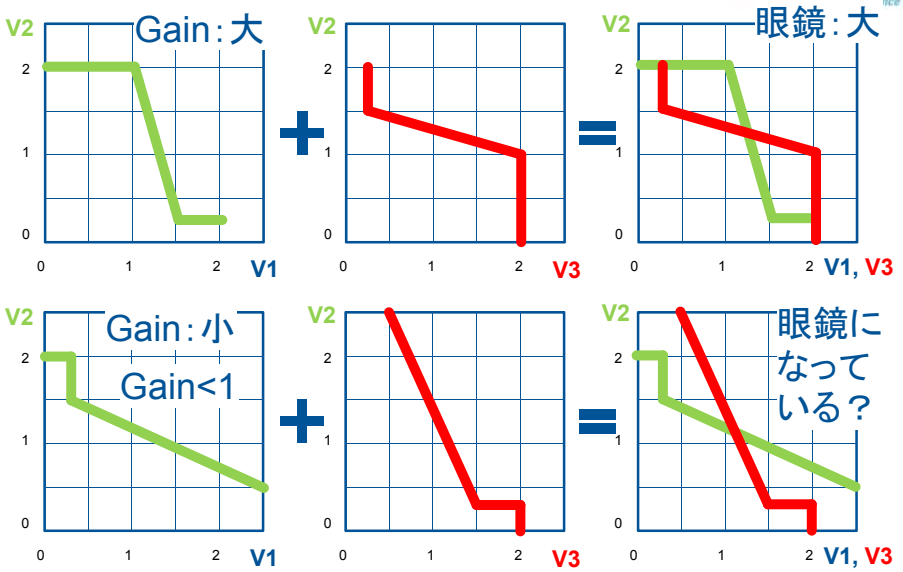
眼鏡カーブ
Butterfly curve



- 眼鏡カーブから何がわかる？

Kazuya Masu

Inverter chain



Inverter chain

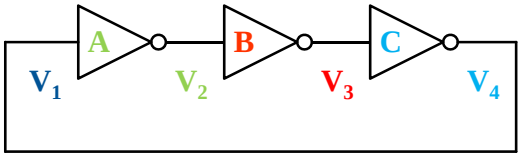
- Inverter X及びYで、inverter chainを作る。

1. 一段目に、1.75(V)の電圧を加えたときの2段目以降の出力電圧(V2,V3,V4,・・・)を求めよ。
2. Inverterがinverterとして動作するためにgainが備える条件は？

- 上記(1)(2)について電子メイルで解答を送付すること。添付ファイル不可。テキストのみで回答すること。
- 締切：平成25年6月3日（月）正午まで
- Subject欄に「★電子デバイス（b）宿題・5月27日出題」と書く。
- メイルには、学籍番号、氏名を記載のこと。

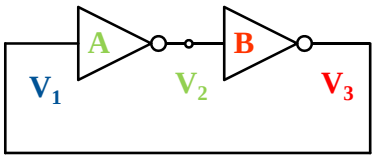
Inverter chain

- どのような動作をするだろうか？



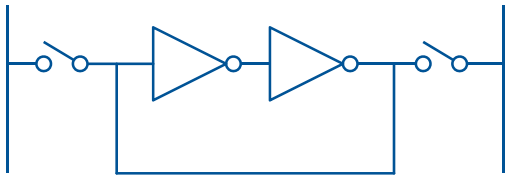
- V1がHighとする。V4はLowとなる。端子電圧は安定しない。
- リング発振器

- Ring Oscillatorは何に利用されるか？

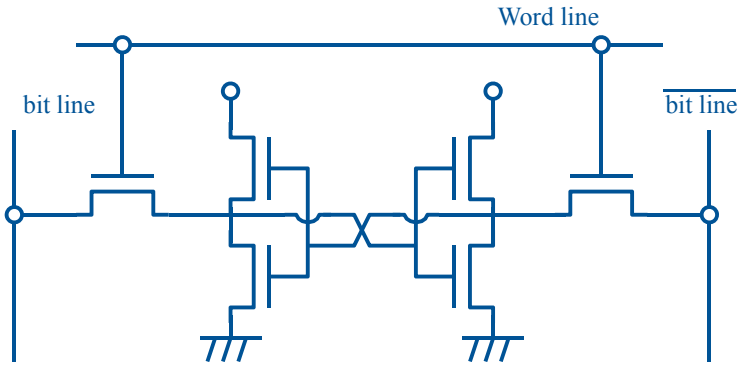


- V1（=V3）はHighまたはLowで安定する。
- SRAMに利用される。

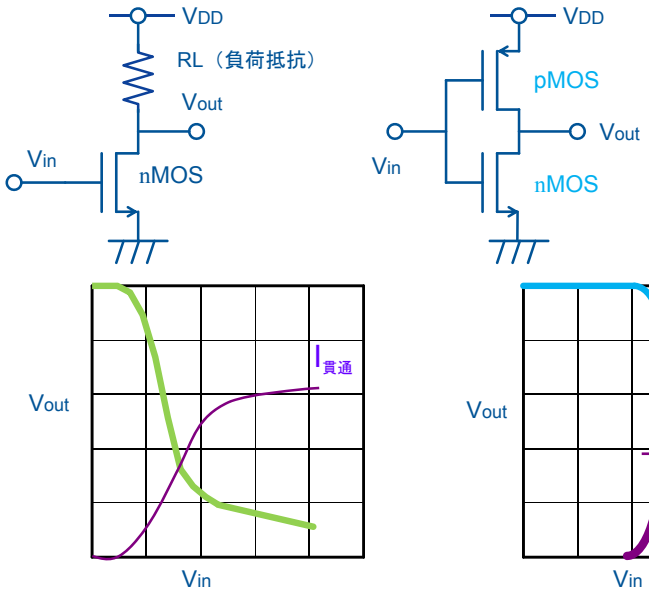
SRAM (Static Random Access Memory)



- SRAMはトランジスタのみで構成される。
- 高速動作（キャッシュ）



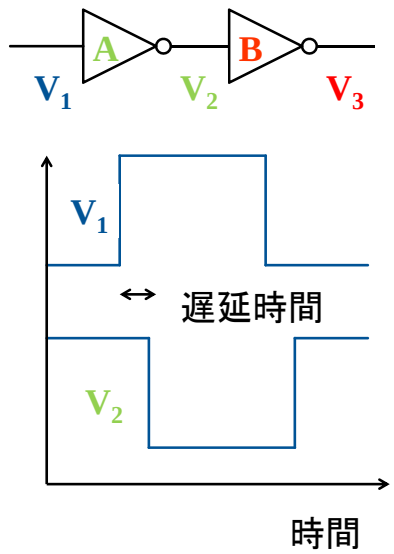
CMOS (Complementary MOS) 相補形

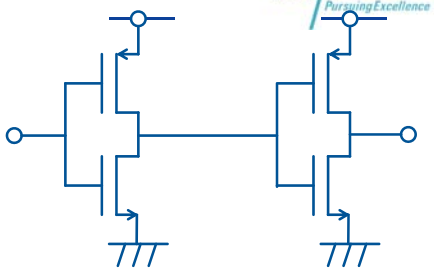


- 実質的に負荷抵抗が大きい。Gainが大きい
- 対称性が良い。
- 貫通電流が流れない。（低消費電力）

Kazuya Masu

Inverter chain



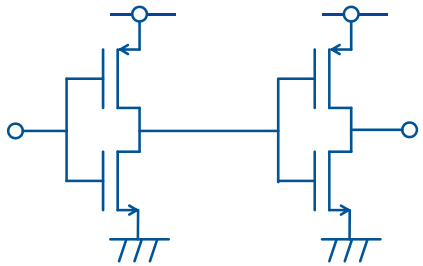


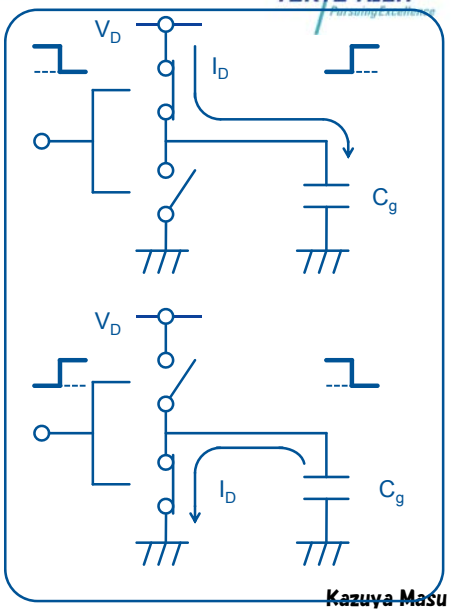
- インバータの動作では、遅延時間が生じる。
- 遅延の生じる原因は？
- インバータ動作するときの電力は？

Kazuya Masu

Inverter chain

Presentation

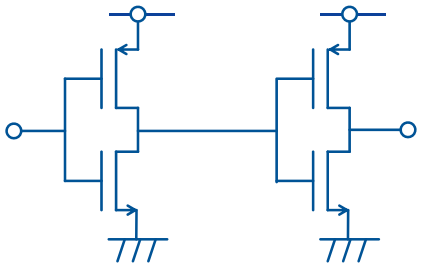




Kazuya Masu

Inverter chain

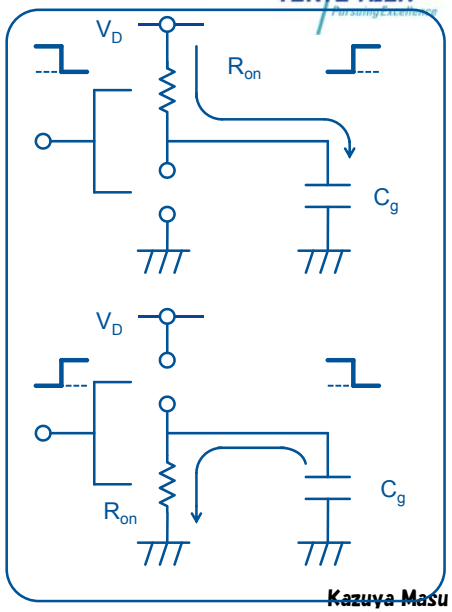
Presentation



$$R_{ON} = \frac{V_D}{I_{DS}},$$

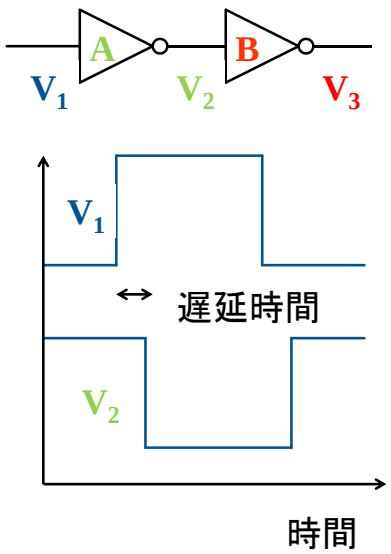
$$where, I_{DS} = \frac{1}{2}\frac{W}{L}\mu C_{ox}(V_D - V_{th})^2$$

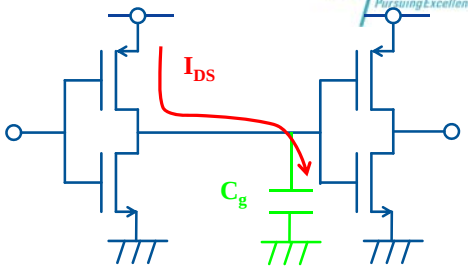
次段ゲート容量の充放電！



Kazuya Masu

Inverter chain





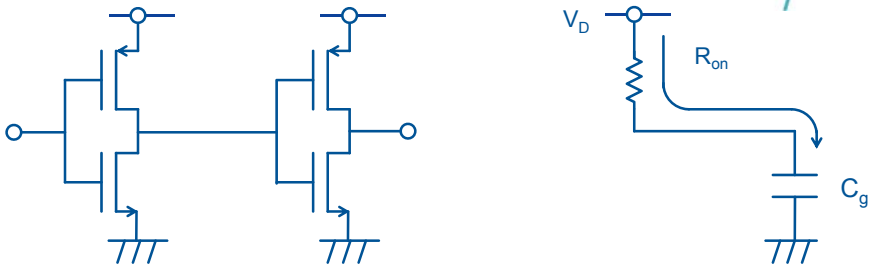
- 遅延時間：次段のゲート容量を充電（放電）する時間

$$\tau = \frac{Q}{I} = \frac{C_g V_D}{I_{DS}}$$

- 消費電力（充放電電力）

$$P_{gate} = \alpha \times \left(C_g {V_{DD}}^2\right) \times f_{clock}$$

Switching speed of CMOS circuit

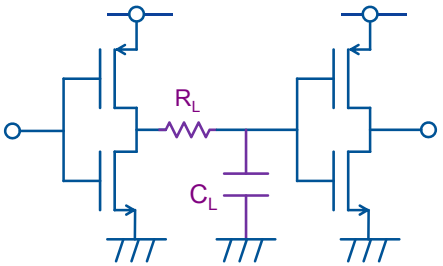


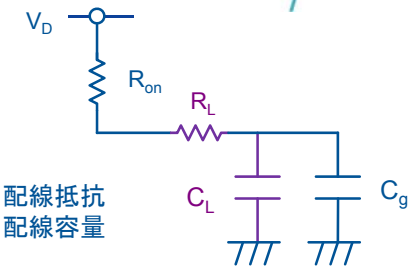
$$V = V_D\left\{1 - exp\left(-\frac{t}{R_{on}C_g}\right)\right\}$$

$\tau = R_{on}C_g = \tau_{gate}$ ゲートの遅延時間, gate delay

$R_{on} = \frac{V_d}{I_{DS}}$ として、 $\frac{C_g V_d}{I_{DS}} = \frac{CV}{I}$ Intrinsic delay

Switching speed of CMOS circuit

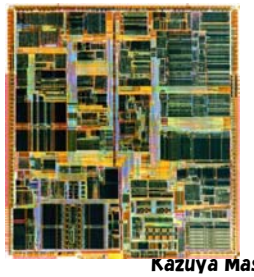




R_L: 配線抵抗
C_L: 配線容量

$$V = V_D\left\{1 - exp\left(-\frac{t}{(R_{on} + R_L)(C_g + C_L)}\right)\right\}$$

$$\tau = (R_{on} + R_L)(C_g + C_L)$$
$$\approx R_{on}C_g + R_L C_L$$
$$= \tau_{gate} + \tau_{line}$$



CMOS回路における配線抵抗、容量の影響

- 集積回路には、種々の長さの配線が存在する。
  - 配線の抵抗や容量が存在する。
- デジタル集積回路
  - 短い配線の回路：遅延時間はゲート容量と電流駆動能力で決まる。
  - 長い配線：遅延時間は配線抵抗と容量で決まる。
- アナログ集積回路（analog, and/or RF）
  - 配線にまつわる抵抗や容量を正確に見積もり、それを回路設計に反映することが重要。