

集積デバイス工学(8)

スイッチング回路の特性

VLSIセンター 藤野 毅

トランジスタのON抵抗

- N型トランジスタが線形領域($V_{DS} < V_{GS} - V_{Th}$)で動作している場合(ゲート電圧 V_{GS} が高く、トランジスタがしっかりONしているので、ソース・ドレイン間電圧 V_{DS} は小さい)ではゲート電圧 V_{GS} で制御できる可変抵抗とみなせる

$$I_{DS} = \beta_n \left[(V_{GS} - V_{Th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad \xrightarrow{\text{微分}} \quad \frac{1}{R_{on}} = \frac{dI_{DS}}{dV_{DS}} \bigg|_{V_{DS}=0} = \beta_n (V_{GS} - V_{Th})$$

$$R_{on} = \frac{1}{\beta_n (V_{GS} - V_{Th})}$$

$$\beta_n = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox}$$

$$I_{DS} = \beta_n \left[\frac{1}{2} (V_{GS} - V_{Th})^2 \right] \quad \text{飽和}$$

$$I_{DS} = \beta_n \left[(V_{GS} - V_{Th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad \text{線形}$$

傾き $\frac{1}{R_{on}}$

ピンチオフ点 $V_{DS} = V_{GS} - V_{Th}$

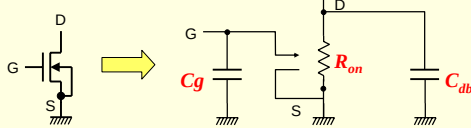
$V_{GS} > V_{Th}$

$V_{DS} \approx 0$

R_{on}

トランジスタの簡易回路モデル

- トランジスタを等価回路で表現する(教科書p.43)
 - 入力側容量 $\Rightarrow$ ゲート容量 C_g
 - 出力容量 $\Rightarrow$ ドレイン容量 C_{db}
 - 抵抗 $\Rightarrow$ トランジスタON抵抗 R_{on}



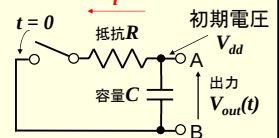
3

簡単な電気回路における過渡特性

- 右図の抵抗 R と容量 C を直列に接続した回路の過渡特性を考える。

$$\begin{cases} V_{out} = R \cdot i \\ i = -\frac{dQ}{dt} = -C \frac{dV_{out}}{dt} \end{cases}$$

$$V_{out}(t=0) = V_{dd} \quad \text{初期条件}$$



- 解くべき微分方程式は

$$\frac{V_{out}}{R} = -C \frac{dV_{out}}{dt}$$

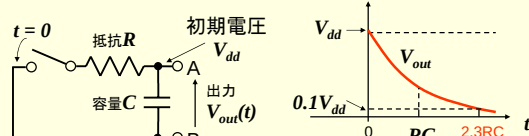
- 解は

$$V_{out} = V_{dd} \cdot e^{-\frac{t}{CR}}$$

4

簡単な電気回路における過渡特性

- 求められた解は $V_{out} = V_{dd} \cdot e^{-\frac{t}{CR}}$
- 出力 V_{out} が初期値 V_{dd} の10%になる時間(立ち下り(fall)時間 t_f と定義する)は $-\ln 0.1 = \ln 10 \approx 2.3$
 $0.1 = e^{-\frac{t_f}{CR}} \Rightarrow t_f = 2.3RC$
- 抵抗 R と負荷容量 C の積 RC を時定数という
- 出力が初期電圧の10%になるまでに、 $2.3RC$ 時間が必要

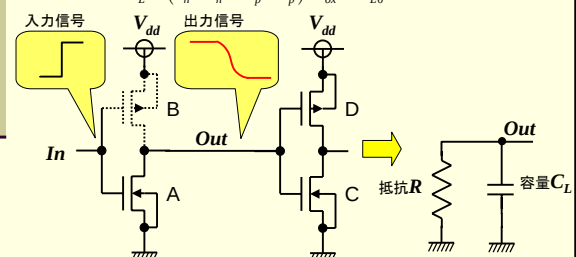


5

インバータ回路の立下り時間(1)

- インバータが信号を伝播するときには、次段のトランジスタのゲート電荷を放電/充電しなければならない。
 - NMOSトランジスタAのソース・ドレイン間抵抗 $\Rightarrow R$ (抵抗)
 - トランジスタC,Dのゲート容量およびトランジスタA,Bのドレイン容量の和 $\Rightarrow C_L$ (容量)

$$C_L = (L_n \cdot W_n + L_p \cdot W_p) \cdot C_{ox} + C_{L0}$$

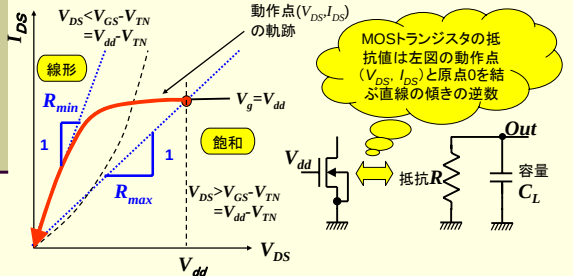


6

NMOSトランジスタの抵抗近似(1)

- たち下がり時間を例にとるとNMOS Trは

- $V_{DS} > V_{dd} - V_{TN}$: 飽和領域で動作⇒抵抗 R_{max}
- $V_{DS} < V_{dd} - V_{TN}$: 線形領域で動作⇒抵抗 R_{min}



7

NMOSトランジスタの抵抗近似(2)

- 線形領域における抵抗値 R_{min} は線形電流式

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_{GS} - V_{TN}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$\left. \frac{dI_{DS}}{dV_{DS}} \right|_{V_{GS}=V_{dd}} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{dd} - V_{TN}) = \beta_n (V_{dd} - V_{TN}) = \frac{1}{R_{min}}$$

したがって

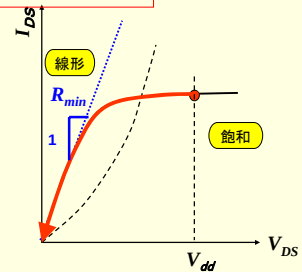
$$R_{min} = \frac{1}{\beta_n (V_{dd} - V_{TN})}$$

本抵抗はトランジスタのON抵抗 R_{on} とも呼ぶ

- 通常 $V_{TN} = 0.2V_{dd}$ 程度に設定するので

$$R_{min} = \frac{1.25}{\beta_n \cdot V_{dd}}$$

8



インバータ回路の立下り時間(2)

- ON抵抗式は通常 $V_{TN} = 0.2V_{dd}$ 程度に設定するので

$$R_{min} = \frac{1}{\beta_n (V_{dd} - V_{TN})}$$

$$R_{min} = \frac{1.25}{\beta_n \cdot V_{dd}}$$

- トランジスタを抵抗値が R_{min} の抵抗と考えると立ち下がり時間 t_f は

$$t_f = 2.3 \cdot R_{min} \cdot C_L$$

$$R_{min} = \frac{1.25}{\beta_n \cdot V_{dd}}$$

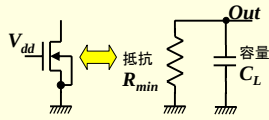
を代入すると

$$t_f = 2.88 \cdot \frac{C_L}{\beta_n \cdot V_{dd}}$$

- 実際の立下り時のトランジスタの抵抗値は $R_{min} \sim R_{max}$ の値をとるので (詳細解析は教科書に)

$$t_f \approx 4 \cdot \frac{C_L}{\beta_n \cdot V_{dd}}$$

9



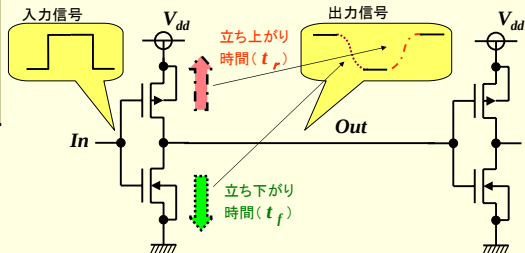
インバータ回路の立ち上がり/立下り時間

- 立ち下がり時間 (t_f) ⇒ NMOS Tr 依存

$$t_f \approx 4 \cdot \frac{C_L}{\beta_n \cdot V_{dd}}$$

- 立ち上がり時間 (t_r) ⇒ PMOS Tr 依存

$$t_r \approx 4 \cdot \frac{C_L}{\beta_p \cdot V_{dd}}$$

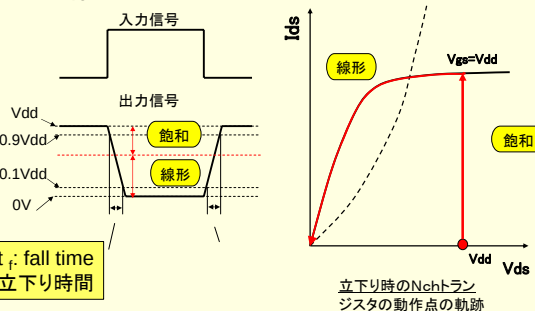


10

インバータ回路の立下り時間詳細解析(1)

- たち下がり時間を例にとるとNMOS Trは

- $V_{DS} > V_{dd} - V_{TN}$: 飽和領域で動作
- $V_{DS} < V_{dd} - V_{TN}$: 線形領域で動作



11

インバータ回路の立下り時間詳細解析(2)

- 立下り時間 t_f は、負荷容量 C_L をトランジスタの駆動電流で放電する時間として求めることができる

- 計算は、飽和電流依存時間 t_{f1} (出力電圧が $0.9V_{dd} \sim V_{dd} - V_{TN}$), 線形電流依存時間 t_{f2} (出力電圧が $V_{dd} - V_{TN} \sim 0.1V_{dd}$) の和で求める。

$$t_f = t_{f1} + t_{f2} = \frac{2C_L}{\beta_n (V_{dd} - V_{TN})} \left\{ \frac{V_{TN} - 0.1V_{dd}}{V_{dd} - V_{TN}} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{19V_{dd} - 20V_{TN}}{V_{dd}} \right) \right\}$$

- 近似式として、 $V_{TN} = 0.2V_{dd}$ とすると

$$t_f \approx 4 \times \frac{C_L}{\beta_n V_{dd}}$$

- 同様に立ち上がり時間 t_r は

$$t_r \approx 4 \times \frac{C_L}{\beta_p V_{dd}}$$

インバータのしきい値と同様

$t_r = t_f$ とするためには $\beta_n = \beta_p$ が必要

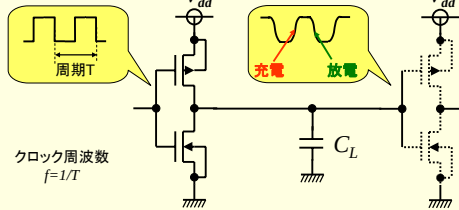
12

LSIのダイナミック消費電力

- 周期Tに1回、負荷容量が V_{dd} まで一度充電されて0Vに放電
 - 1回の充放電電荷 $Q = C_L \cdot V_{dd}$
 - 平均電力 $P = Q \cdot V_{dd} / T$
- 動作周波数 $f = 1/T$ であるから

$$P(\text{dyn}) = C_L \cdot V_{dd}^2 \cdot f$$

$$P(\text{dyn}) = \alpha \cdot C_L \cdot V_{dd}^2 \cdot f$$

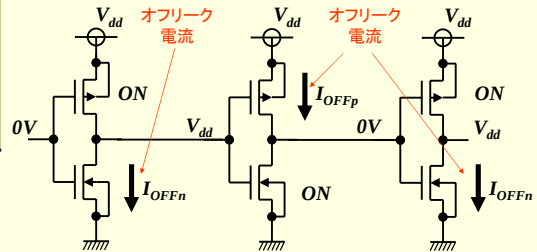


13

LSIのスタティック(静的)消費電力

- OFFしているトランジスタのオフリーク電流 I_{OFF} に異存

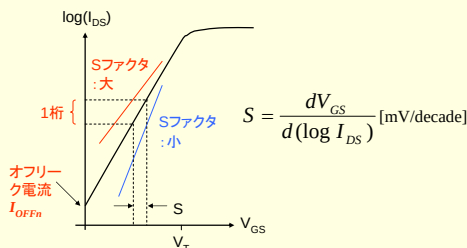
$$I_{OFFn} \propto 10^{\frac{-V_{th}}{S}}$$



14

オフリーク電流

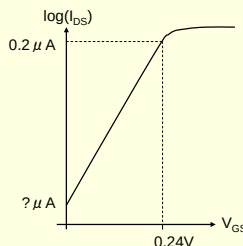
- このサブスレッショルド係数(Sファクタ)が小さいほど、
 - 電流の立ち上がりが鋭く、スイッチング特性が**良い**
 - 同じしきい値電圧のとき、オフリーク($V_G=0V$ でのみれ電流)が**小さい**
- Sファクタは、プロセスの進化(微細化、低電圧化)に関係なく 60mV/decadeが原理的な最小値であり、通常**70~100mV/decade**である。



15

オフリーク電流

- しきい値電圧以下で流れる電流の特性 **70~100mV/decade**
 - ⇒ 素子が微細化してもかわることがない
 - ⇒ 微細化とともに低電圧化(=トランジスタ電圧を低下)するとオフリーク電流は増大する



16

覚えるべき式まとめ

トランジスタの利得

$$\beta_n = \frac{W_n}{L_n} \mu_n C_{ox} \quad \beta_p = \frac{W_p}{L_p} \mu_p C_{ox}$$

インバータのしきい値

$$V_{th}(\text{inv}) = \frac{V_{dd} - |V_{TP}| + V_{TN} \sqrt{\beta_n / \beta_p}}{1 + \sqrt{\beta_n / \beta_p}}$$

インバータの立ち上り/立ち下り時間

$$t_f \approx 4 \times \frac{C_L}{\beta_n V_{dd}} \quad t_r \approx 4 \times \frac{C_L}{\beta_p V_{dd}}$$

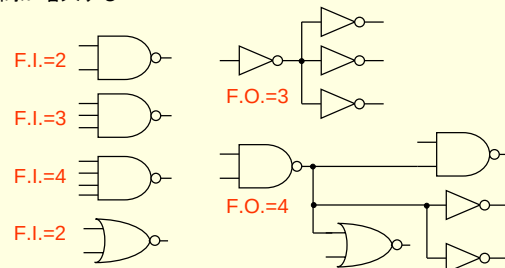
CMOS回路の動的消費電力

$$P = C_L \cdot V_{dd}^2 \cdot f$$

17

図5.6 ファンイン(Fan-In, F.I.):ひとつの論理ゲートに入力される信号本数

- ファンアウト(Fan-Out, F.O.):ひとつの論理ゲートの出力から接続されている次段の論理ゲート数
- ファンアウト数が増加すると、負荷容量 C_L が大きくなるので遅延時間が増大する



18

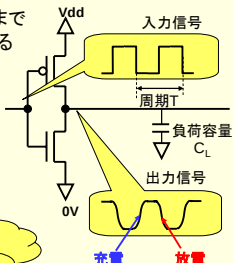
LSIの消費電力

■ 消費電力は次の2種類に分類できる

- スタティック(静的)電力消費
オフしているトランジスタの漏れ電流

● ダイナミック(動的)電力消費

- 周期Tに1回、負荷容量が V_{dd} まで一度充電されて0Vに放電される
- 1回の充放電電荷 $Q = C_L \cdot V_{dd}$
- 平均電力 $P = Q \cdot V_{dd} / T$
- 動作周波数 $f = 1/T$ であるから
 $P = C_L \cdot V_{dd}^2 \cdot f$
- ゲートの動作率を α とすると
 $P = \alpha \cdot C_L \cdot V_{dd}^2 \cdot f$



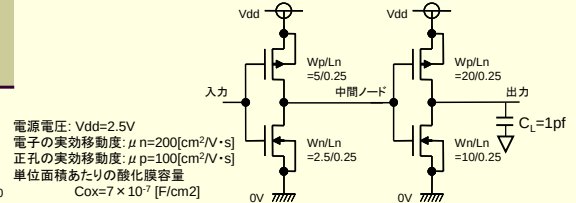
周波数に比例
電圧の2乗に比例

19

演習問題

■ 下図に示す2段のインバータが存在する

- 中間/出力ノードの立上り・立下り時間をもとめよ
- 入力に100MHzの方形波を入力したときの動作電力をもとめよ
- すべてのトランジスタのゲート幅(W)を倍としたときの中間/出力ノードの立上り・立下り時間はどうか変化するか？



20

小テスト(11/26)

■ レジュメ第6, 7回, 第7回, 第8回

■ 教科書p.32~p.83(授業で説明しなかったところは範囲外)

■ 教科書章末問題

- 第2章 (2), (7), (9), (10)
- 第3章 (1)(a)(b), (2), (4), (5) (a)(b)

■ 章末問題ミスプリント

- 第2章 (5) 電圧を0.1V以下にすると
- 第3章 (1)(b)「入力電圧と」⇒「入力電圧が論理しきい値電圧のときの」
- 第3章 (5) 「ただし電源電圧 $V_{dd}=5V$ とする」を追加

■ 関数電卓のみ持ち込み可

21