

集積デバイス工学(13)

デバイスのスケーリング則

VLSIセンター 藤野 毅

1

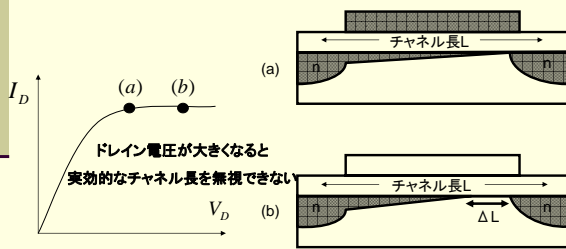
MOSFETの重要な詳細特性

- チャンネル長変調効果
 - 飽和領域でドレイン電圧が増加したときのドレイン電流の増加量
- サブスレッショルド特性
 - ゲート電圧がしきい値電圧以下でのドレイン電流

2

チャンネル長変調効果とは？

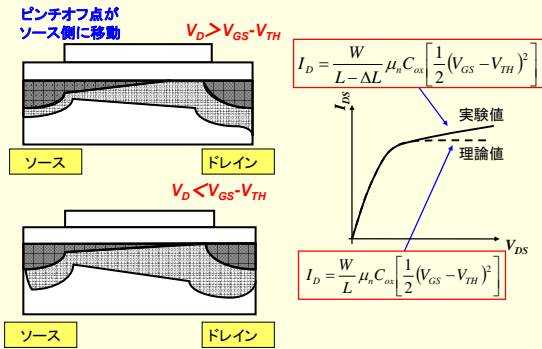
- ピンチオフ点の移動により実効チャンネル長が短縮



3

チャンネル長変調効果(1)

- ドレイン電圧によってピンチオフ点が移動する
⇒ 実効的なゲート長が短くなる ⇒ ドレイン電流増加



4

チャンネル長変調効果(2)

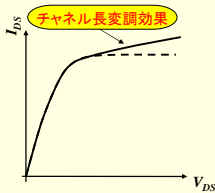
- チャンネル長変調効果の定式化

$$I_D = \frac{W}{L - \Delta L} \mu_n C_{ox} \left[\frac{1}{2} (V_G - V_T)^2 \right]$$

$$= \frac{W}{L(1 - \Delta L/L)} \mu_n C_{ox} \left[\frac{1}{2} (V_G - V_T)^2 \right]$$

$$= \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[\frac{1}{2} (V_G - V_T)^2 \right] (1 + \Delta L/L)$$

$\Delta L/L = CV_D/L = \lambda V_D$ とおけるので(Cは定数)



$$I_D = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[\frac{1}{2} (V_G - V_T)^2 \right] (1 + \lambda V_D)$$

λをチャンネル長変調効果係数とよぶ

5

チャンネル長変調効果(3)

- チャンネル長変調効果のゲート長依存性

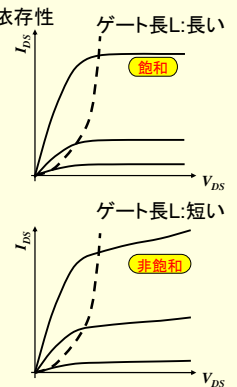
$$I_D = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[\frac{1}{2} (V_G - V_T)^2 \right] (1 + \lambda V_D)$$

において

$$\Delta L/L = CV_D/L = \lambda V_D$$

$$\lambda = C/L$$

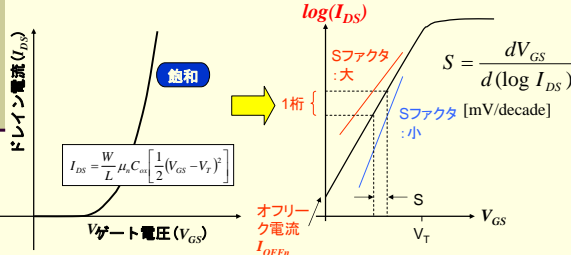
なのでチャンネル長Lが小さいほど変調効果大きい



6

サブスレッショルド特性(復習)

- 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 $70\sim 100\text{mV/decade}$ である。



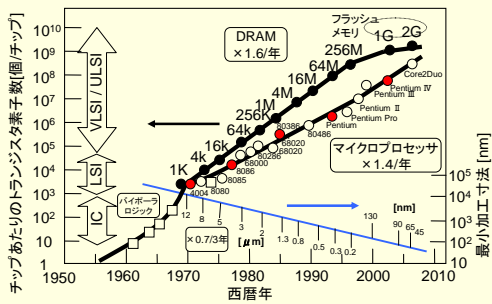
MOSFETの重要な詳細特性

- チャンネル長変調効果
 - 飽和領域でドレイン電圧が増加したときのドレイン電流の増加量
- サブスレッショルド特性
 - ゲート電圧がしきい値電圧以下でのドレイン電流
- スケーリング則
 - 微細化の法則

8

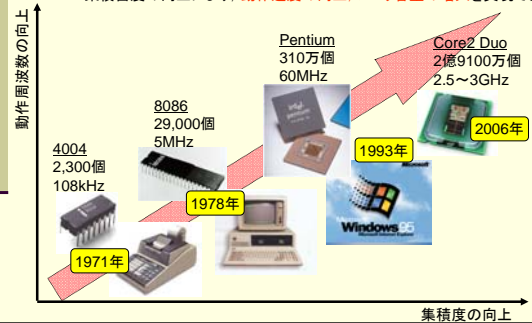
ムーアの法則

- 米Intel社の創設者の一人であるゴードン・ムーア (Gordon Moore) 氏が1965年に予測したもので、「半導体の集積度は18か月で2倍になる」という法則



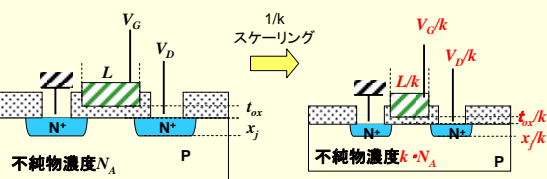
CPUに見る動作速度と容量の進歩

- ムーアの法則
 - Intel社の創設者の一人であるGordon Moore博士が1965年に経験則として提唱した、「半導体の集積度は18~24ヶ月で倍増する」という法則
 - 集積度の向上により、動作速度の向上、メモリ容量の増大を実現できた



スケーリング則(1)

- ショートチャネル効果を抑えながら、デバイスの微細化を進めていく方法としてスケーリング則がある。
- 下図がスケーリング側の概念図
 - ゲート長 L , 酸化膜厚 t_{ox} , ソースドレイン深さ x_j などを $1/k$ 倍に一律に縮小
 - 電源電圧も $1/k$ 倍に一律に縮小
 - 不純物濃度 N_A は k 倍に



スケーリング則(2)

- デバイスパラメータのスケーリング
- 下記の法則に従うと、スケーリング前のトランジスタの電流電圧特性の各軸の目盛を $1/k$ にしたものと同じ特性をもつMOSトランジスタ(寸法は $1/k$)が得られる。

パラメータ	スケーリング比
チャンネル長 L	
チャンネル幅 W	
ゲート酸化膜厚 t_{ox}	
接合深さ x_j	
基板不純物濃度 N_A	
電源電圧 V	

12

スケージング則(2)

- デバイスパラメータのスケージング
- 下記の法則に従うと、スケージング前のトランジスタの電流電圧特性の各軸の目盛を1/kにしたものと同じ特性をもつMOSTランジスタ(寸法は1/k)が得られる。

パラメータ	スケージング比
チャンネル長 L	1/k
チャンネル幅 W	1/k
ゲート酸化膜厚 t_{ox}	1/k
接合深さ x_j	1/k
基板不純物濃度 N_A	k
電源電圧 V	1/k

13

スケージング則(3)

- デバイスのスケージング

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

I (一定) $1/k$ 倍 $1/k^2$ 倍
 $C_G = \epsilon A / t_{ox}$ $1/k^2$ 倍 $1/k$ 倍

パラメータ	スケージング比
電圧 V	1/k
電流 I	1/k
ゲート容量 $C_G = \epsilon A / t_{ox}$	1/k
ゲート遅延時間 VC_G / I	
ゲート消費電力 VI	
デバイス面積 A	
消費電力密度 VI / A	
線抵抗 $R_L = \rho L / Wt$	
相対的な電圧降下 IR_L / V	
配線遅延時間 $R_L C_G$	
電流密度 I / A	
電界 E	

14

スケージング則(3)

- 回路パラメータのスケージング
- MOSTランジスタのゲート遅延時間は1/kとなり、高速化されるが、配線容量に関する遅延は1であり、相対的に、配線遅延時間の成分が大きくなる。

$$R_L = \rho L / Wt$$

k 倍 $1/k$ 倍 $1/k$ 倍

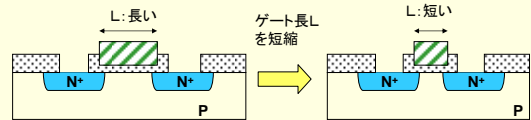
パラメータ	スケージング比
電圧 V	1/k
電流 I	1/k
ゲート容量 $C_G = \epsilon A / t_{ox}$	1/k
ゲート遅延時間 VC_G / I	1/k
ゲート消費電力 VI	1/k ²
デバイス面積 A	1/k ²
消費電力密度 VI / A	1
線抵抗 $R_L = \rho L / Wt$	k
相対的な電圧降下 IR_L / V	k
配線遅延時間 $R_L C_G$	1
電流密度 I / A	k
電界 E	1

15

短チャンネル効果とは？

- MOSFETのゲート長Lを微細化すると生じる現象

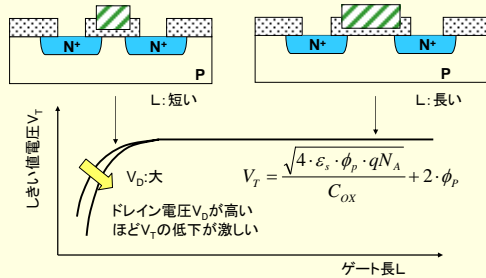
1. チャンネル長Lが短くなるとしきい値電圧 V_T が低下する
2. ドレイン電圧が高いときに電流が飽和しなくなる
3. サブスレッショルド係数Sが劣化する
4. $V_G = 0V$ でもドレイン電流が流れる(パンチスルー)



16

短チャンネル効果 —しきい値電圧(1)—

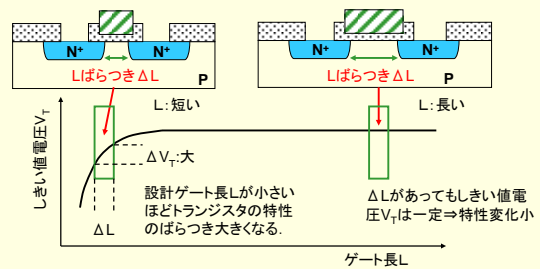
- ゲートチャンネル長Lが短くなるとしきい値電圧 (V_T) が低くなる
 - スタンバイ電流の増加
 - チャンネル長変調効果の増大



17

短チャンネル効果 —しきい値電圧(2)—

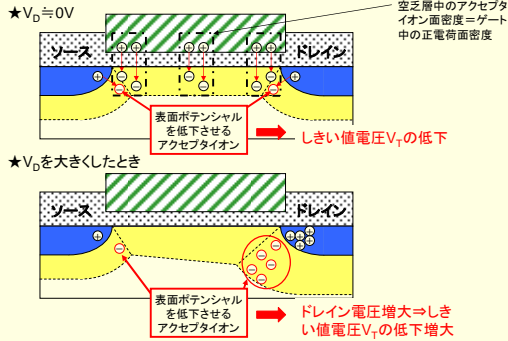
- ゲート長Lの製造ばらつきがしきい値のばらつき(例:ゲート長を $0.2 \mu m$ に仕上げようとしても実は $0.018 \mu m$ や $0.022 \mu m$ になってしまう現象をばらつきと呼ぶ)に大きく反映して回路特性を悪化させる。
 - 差動増幅回路のオフセット
 - スタンバイ電流の増加



18

短チャネル効果 —しきい値電圧(3)—

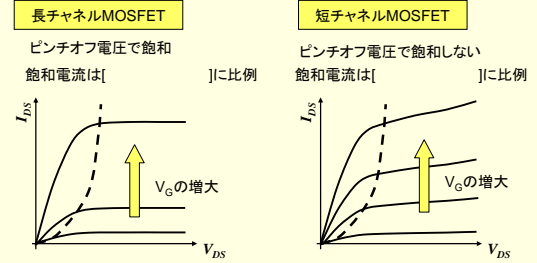
- 短チャネル効果が生じる原因
⇒ソース・ドレインの領域の空乏層の効果が無視できなくなるから



19

短チャネル効果 —電流非飽和—

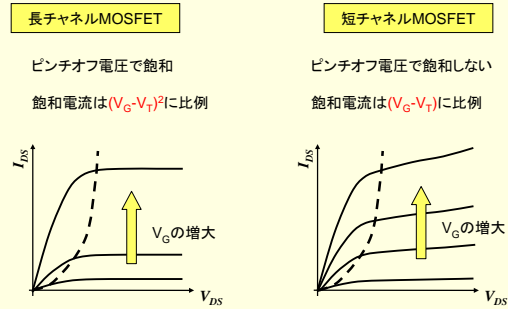
- ピンチオフ電圧以上の飽和領域で電流が飽和しない



20

短チャネル効果 —電流非飽和—

- ピンチオフ電圧以上の飽和領域で電流が飽和しない

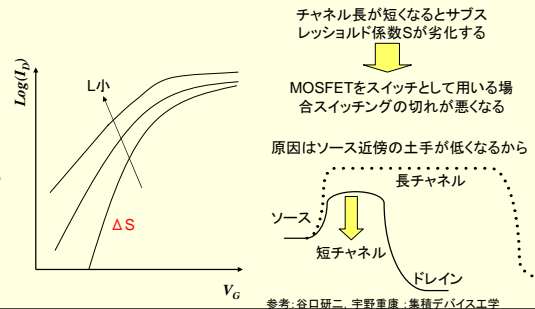


21

参考: 谷口研二, 宇野重康, 集積デバイス工学

短チャネル効果 —サブスレッシュド係数—

- サブスレッシュド係数 S (電流量が1桁増えるのに必要なゲート電圧)が劣化する

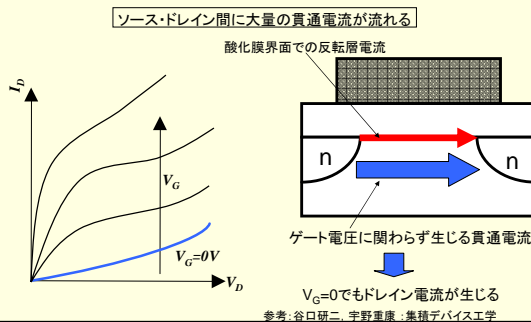


22

参考: 谷口研二, 宇野重康, 集積デバイス工学

短チャネル効果—パンチスルー—

- ゲート電圧 $V_G = 0V$ でもドレイン電圧によってドレイン電流が流れる

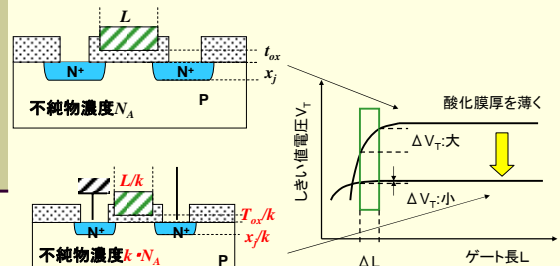


23

参考: 谷口研二, 宇野重康, 集積デバイス工学

短チャネル効果の抑制

- 短チャネル効果抑制のためには
スケールリング側にしたがってゲート酸化膜を薄くする



24

短チャネル効果—現象のまとめ—

