Your Best Partner for Semiconductor Device Modeling

第203回 (2)-1
群馬大学アナログ集積回路研究会−青木

RFアナログ集積回路のためのMOSFETモデリング技術

概要

本講演では，主にアナログ回路設計研究関連の大学院生を対象に，SPICE用MOSFETコンパクトモデルの解説とその効果的な使用方法について紹介します．最初に基礎的なMOSFETデバイスの物性とそのモデル化を解説し，徐々に先端的なモデリングの内容に入っていきます．最後にはDFM（製造を考慮した回路設計）に重要な統計モデリングについても紹介します．なお聴講者の理解度，希望によりその後お話しする対象デバイスを選択していきます．

アナログ回路設計者にとってシミュレーション精度は大変重要で，特に非線形デバイスのモデリング精度が支配的なため，できるだけ実際のアナログ回路シミュレーションで役立つ内容にしたいと考えています．

アウトライン

1. MOSFETの物性とモデル化の基礎
2. ~~回路設計者が使用するMOSFETコンパクトモデルの種類と特長~~（岡部先生が話されたと思うので中止）
3. RFアナログCMOSモデリング技術
4. 高耐圧MOSFETのモデル（オプション）
5. Nanometer CMOSモデリング紹介
6. 低電圧駆動回路設計のためのMOSFETモデル開発（オプション）
7. RF対応CMOS統計解析モデリング（オプション）

MOSFETの物性とモデル化の基礎

- デバイス・モデルとは
- SPICEモデルの種類
- モデル作成の流れ
- 半経験的なモデルの要素
- モデル式の導出
- MOSFETの基本物理モデル
  - ドレイン電流
  - 容量
  - ノイズ
  - 等価回路のY-Matrix化
  - MOSFETの複素Y-Matrix?

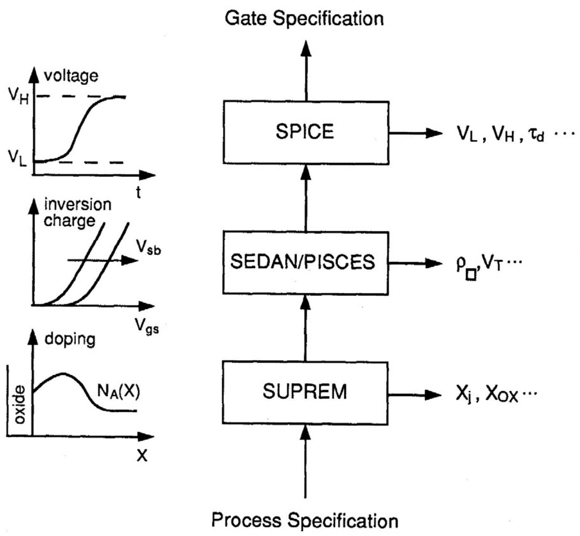
1. MOSFETの物性とモデル化の基礎

青木　均

デバイス・モデルとは

- デバイス・シミュレータのモデル
- 回路シミュレータSPICEのデバイス・モデル（コンパクト・モデル）

半導体デザインのT-CADツール



SPICEモデルの種類

- 物理的なモデル
- 経験的なモデル
- **半経験的な解析モデル**
- CADモデル（ファンクションモデル）
- マクロモデル
- Table-lookupモデル（表参照型）

モデル作成の流れ（物理的モデル）

1. そのデバイスの物性を理論的に解析し、式を導く。

2. プロセス モデルから一貫したモデルになるように心がける（できれば、モデル パラメータはプロセス パラメータから算出可能であることが望ましい）。

3. コンピュータの演算時間を最小限に保つため、簡略化をする。

4. 使用されるモデル パラメータは、デバイスの電気的特性に直感的に対応しているようにする（例えば、FETのしきい値電圧Vthなどのように作成）。

モデル作成の流れ（経験的モデル）

1. そのデバイスをシミュレーションするアプリケーション、ドメイン、最終目標確度を設定する。

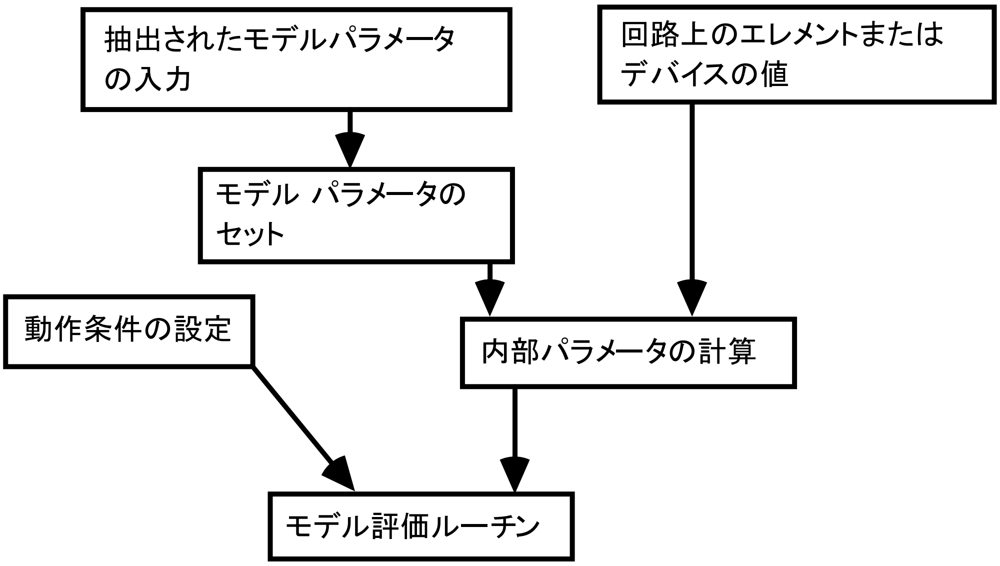
2. 1で設定した仕様に基づいてそのすべてのドメイン（DC電流電圧特性、容量対バイアス特性、AC周波数特性、トランジェント特性など）で、できるだけ多くの対象となるデバイスの測定

3. 測定したデータから、直接表を作成して各条件でのシミュレーション結果を計算する（表参照型モデル）。

3. 代表的な特性を持つデバイスの測定データをもとに、代数式などを用い、非線型の近似を行うことなどで、モデル式を当てはめていく（関数モデル）。

4. 指数関数などは、テーラー展開を用いてできるだけ単純な式にし、ときには等価回路に置き換える。

SPICE内でのモデル評価



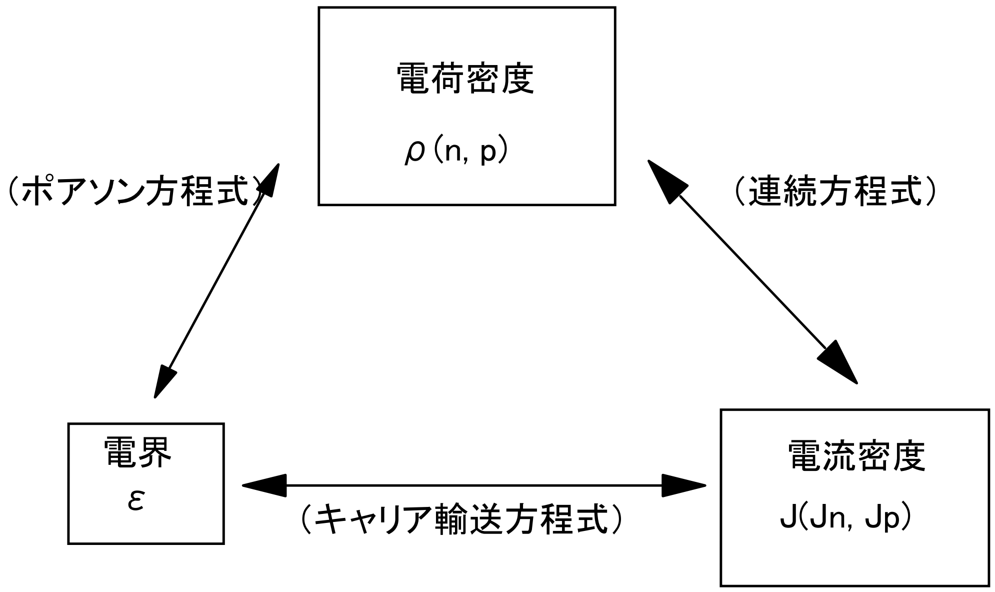
半経験的なモデルの要素

- **物理式に基づいた方程式**
  - 指数項、対数項が少ない
  - 微分方程式は境界条件を与える必要あり
  - 不連続点が出にくい
- **等価回路のY-Matrix**
  - どのデバイス・ノードを基準に作成するか
  - 対称型の方が収束有利
- （データベース・モデルは、回路設計用途のみに可能）

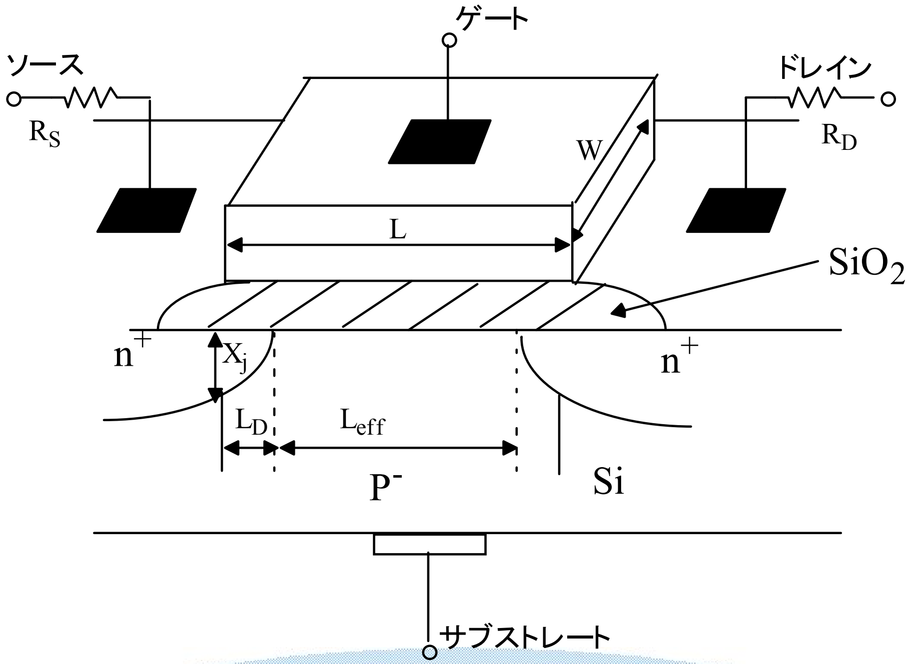
モデル式の導出

- デバイス構造、物性などから物理式を導出
- 多くのプロセスデバイスの測定データを元に、二次効果などを加える（不確定項はモデル・パラメータとする）
- シミュレーション確度にあまり影響しない、方程式の項を定数化
- 関数を簡略化（Polynominal近似、テーラー展開など ）
- モデルパラメータを、測定データから抽出・最適化してシミュレーション結果を測定と比較

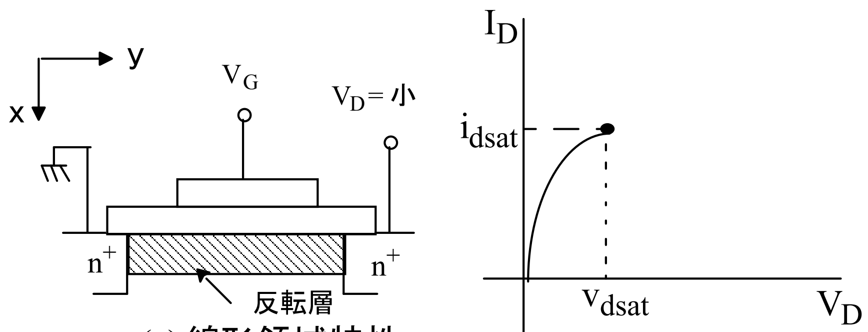
半導体方程式の関係



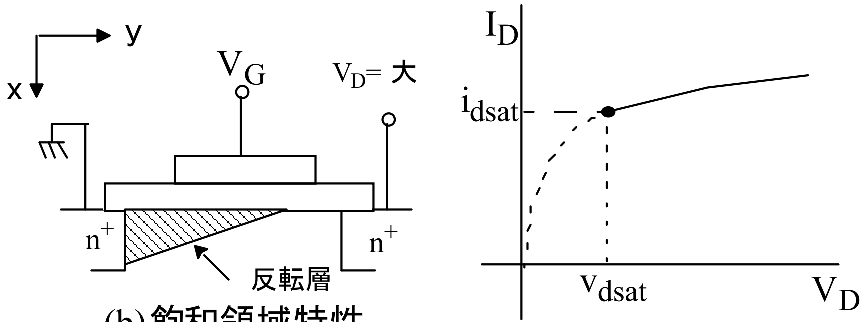
古いMOSFETの断面図



MOSFETの2つの領域動作



(a) 線形領域特性

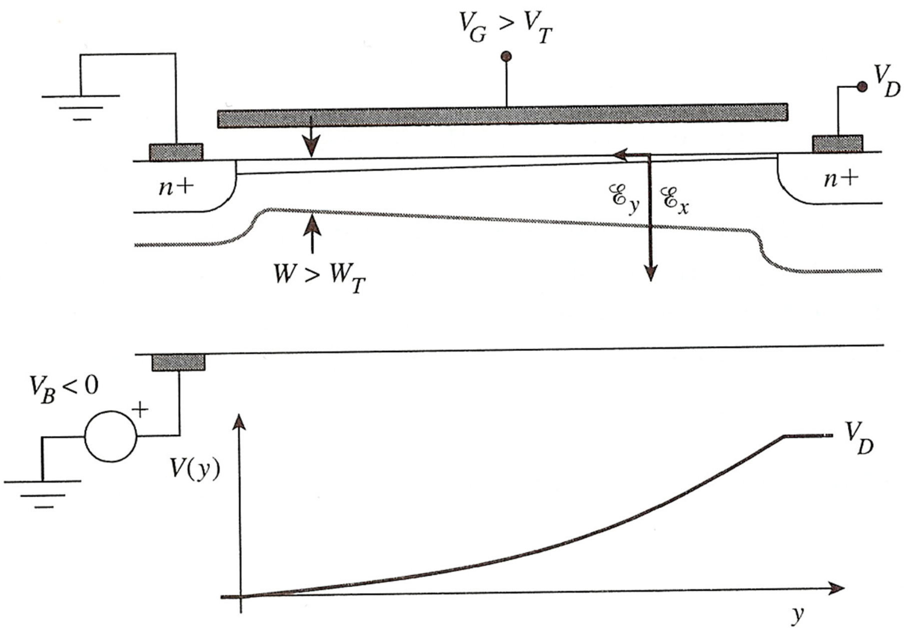


(b) 飽和領域特性

MOSFETの基本物理モデル

- 長チャネル（L_{mask} > 10μm）
- 電流密度方程式による解法

NチャネルMOSFETのチャネルピンチオフ状態での断面図



逐次チャネル近似

チャネルが十分に長い
場合，　　　　　　　　　$\xi_x \gg \xi_y$

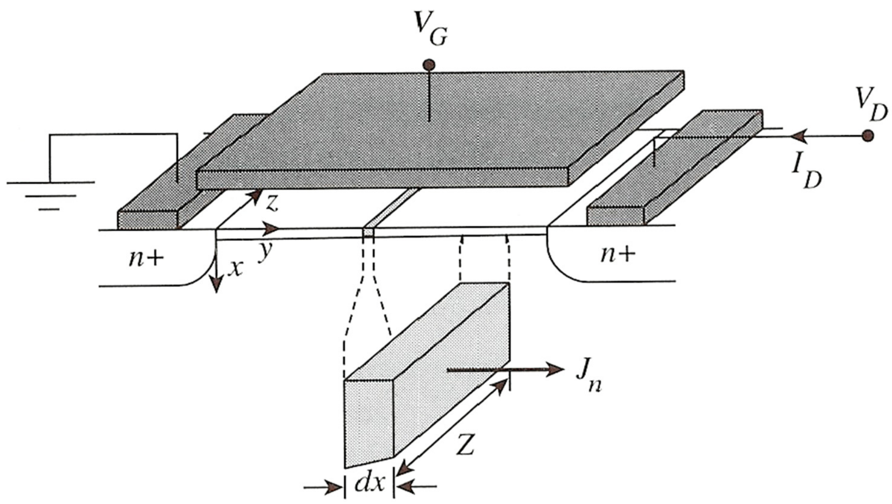
チャネル長方向の微少部分dxに着目してみる．チャネル内の電子密度を $n\ (x,y)$とすると
ドリフトによる電流密度は以下のように与えられる．

$$J_n = q\mu_n n(x,y)\xi = -q\mu_n n(x,y)\frac{dV}{dy}$$

ドレイン電流をJ_nについてチャネルの境界面積で積分すれば，

$$I_D = -\int_0^Z dz \int_0^W J_n dx$$

微少領域dxでの電流密度概念図



ドレイン電流密度からの電流導出

積分はチャネルZの幅と，空乏領域の厚さに対して
行っている．

$$I_D = -Z \frac{dV}{dy} \int_0^W \left[-q\mu_n n(x,y) \right] dx$$

μ_nは局部ドーピング濃度，電子密度とその他の効果（後で様々なモデルにおいて逐次解説していく）によって表される．これらの効果を1つの変数実行移動度μ_{neff}でまとめてみる．すると以下のようになる．

$$I_D = -Z\mu_{neff} \frac{dV}{dy} \int_0^W \left[-qn(x,y) \right] dx = -Z\mu_{neff} \frac{dV}{dy} Q_n(y)$$

チャネル電荷とドレイン電流

両辺をチャネルの全長で積分してみる．すると，

$$\int_0^L I_D dy = -Z\mu_{neff} \int_0^L \frac{dV}{dy} Q_n(y) dy$$

電流は全チャネル長さ方向に一定でなくてはならないので，

$$I_D = -\frac{Z}{L}\mu_{neff} \int_0^{V_D} Q_n(V) dV$$

ここで$Q_n(y)$は，チャネルに沿った方向の反転層における電荷であった．
$Q_n(y)$に，表面空乏層における電荷$Q_{sc}(y)$を考慮して表すと以下のようになる．

$$Q_n(y) = -C_{ox}(V_G - V_T - \phi) - Q_{sc}(y)$$

$Q_{sc}(y)$はポアソン方程式を用いて解くが複雑なので省略すると，

$$Q_{sc}(y) = -q \cdot N_a \cdot W_{\max} = -\sqrt{2\varepsilon_s \cdot q \cdot N_a \left[V(y) + 2\phi_B \right]}$$

線形領域ドレイン電流式の完成

整理すると，

$$I_{DS}=\frac{W}{L}\cdot\mu_n\cdot C_{ox}\left\{\left[V_G-V_T-\frac{V_D}{2}\right]V_D-\frac{2}{3}\frac{\sqrt{2\cdot\varepsilon_s\cdot q\cdot N_a}}{C_{ox}}\left[\left(V_D+2\phi_B\right)^{\frac{3}{2}}-\left(2\phi_B\right)^{\frac{3}{2}}\right]\right\}$$

実効チャネル長Lは，

$$L=L_O-2\bullet L_D$$

実効チャネル幅Wは，

$$W=W_O-2\bullet W_D$$

ここでL_D, W_Dはそれぞれチャネルの拡散長・幅，L_O, W_Oはそれぞれマスク長・幅を示す．
さらに基板にも電圧V_{BS}がかけられると，基板の電位も変化するので，

$$I_{DS}=\frac{W}{L}\cdot\mu_n\cdot C_{ox}\cdot\left\{\left[V_{GS}-V_T-\frac{V_{DS}}{2}\right]V_{DS}-\frac{2}{3}\frac{\sqrt{2\cdot\varepsilon_s\cdot q\cdot N_a}}{C_{ox}}\left[\left(V_{DS}+2\phi_B-V_{BS}\right)^{\frac{3}{2}}-\left(2\phi_B-V_{BS}\right)^{\frac{3}{2}}\right]\right\}$$

飽和領域ドレイン電流式

(2.24)

飽和領域では，$X=L'$のドレイン端での電荷は大体ゼロである．つまり，

$$Q_n(L')=\left(V_{GS}-V_{DSAT}-2\phi_B-V_{FB}\right)C_{ox}-\gamma\cdot C_{ox}\sqrt{V_{DSAT}-V_{BS}+2\phi_B}\doteq 0$$

これをV_{DSAT}について整理すると，

$$V_{DSAT}=V_{GS}-V_{FB}-2\phi_B+\gamma^2\left[1-\sqrt{1+\frac{2}{\gamma^2}\left(V_{GS}-V_{FB}-V_{BS}\right)}\right]$$

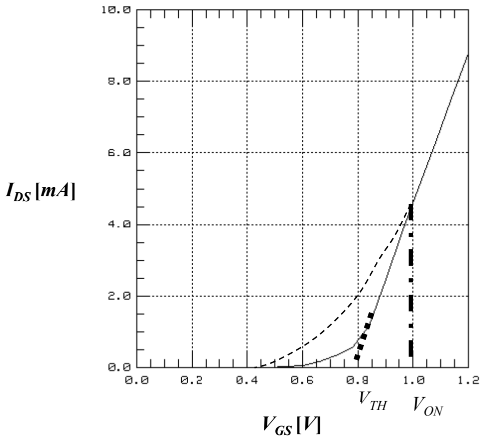
チャネル長変調によってLはΔLだけ短くなるので，

$$\frac{W}{L-\Delta L}=\frac{W}{L\cdot\left(1-\lambda\cdot V_{DS}\right)}\qquad\lambda=\frac{\Delta L}{L\cdot V_{DS}}$$

飽和領域のドレイン電流は，

$$I_{DS}=I_{DSAT}\frac{1}{1-\lambda V_{DS}}$$

弱反転領域でのドレイン電流



$$V_{ON} = V_T + \frac{nkT}{q}$$

$$n = 1 + \frac{C_{FS}}{C_{ox}} + \frac{C_D}{C_{ox}}$$

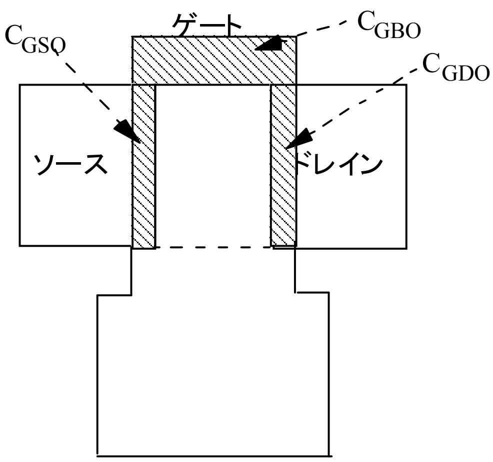
$$C_{FS} = q \times N_{FS}$$

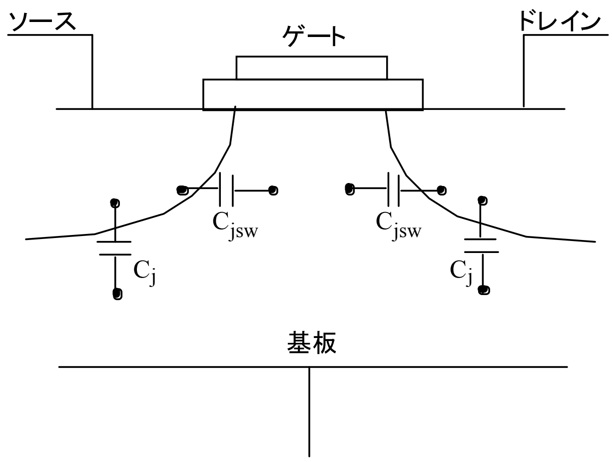
$$C_D = \frac{\partial Q_B}{\partial V_{BS}}$$

N_{FS}は物理的な意味はなく，フィッティング・パラメータである．
弱反転領域での電流式は，$V_{GS} < V_{ON}$の条件下で，

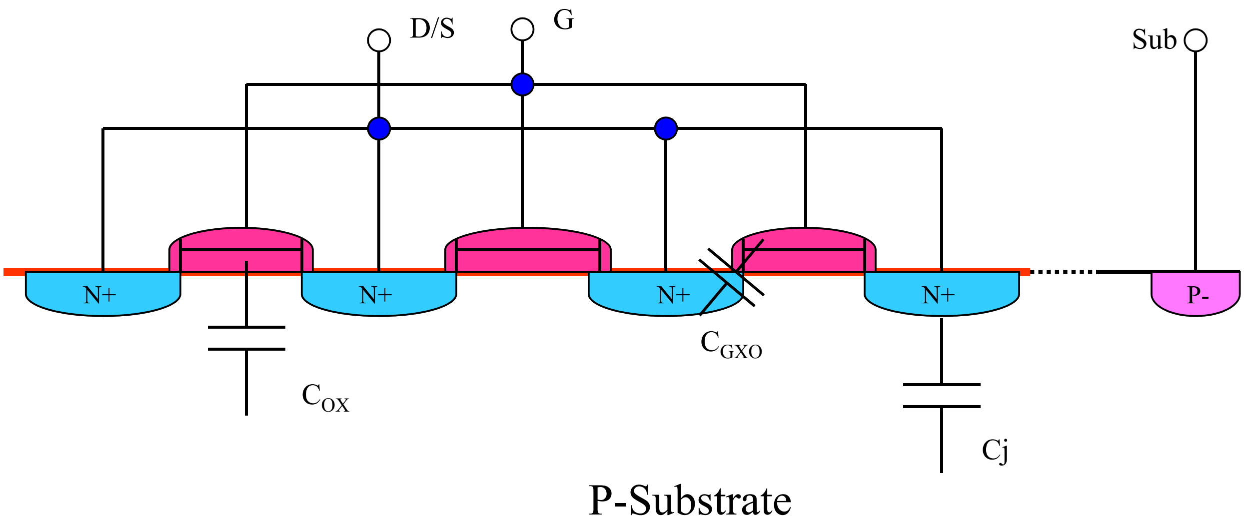
$$I_{DS} = \mu_S \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L}\left\{\left(V_{ON} - V_T - \frac{\eta V_{DS}}{2}\right)\cdot V_{DS} - \frac{2}{3}\gamma_S\left[\left(2\phi_B - V_{BS} + V_{DS}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(2\phi_B - V_{BS}\right)^{\frac{3}{2}}\right]\right\} \times$$
$$e^{\frac{q}{nkT}\left(V_{GS} - V_{ON}\right)}$$

MOSFETの容量





実際の容量測定



アクティブなゲート容量

チャネル電荷は電荷保存則より

$Q_c = -\left(Q_G + Q_B\right)$　　または　　$Q_C = Q_S + Q_D$　　$Q_B = -Q_G$

として表せる．反転層の電荷をQ_nとすると，Q_SとQ_Dはそれぞれ，

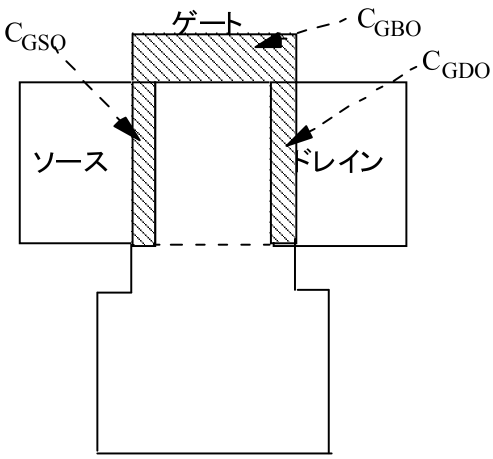
$$Q_S = -W\int_0^L \left(1 - \frac{y}{L}\right) Q_n dy$$

$$Q_D = -W\int_0^L \frac{y}{L} Q_n dy$$

以上の関係式から各容量が導ける．例えば，

$$C_{GS} = \frac{\delta Q_G}{\delta V_S} \qquad C_{GB} = \frac{\delta Q_G}{\delta V_B}$$

オーバーラップ容量



チャネル外容量のために**基本的には**固定容量.
フリンジング容量と分割不可能.

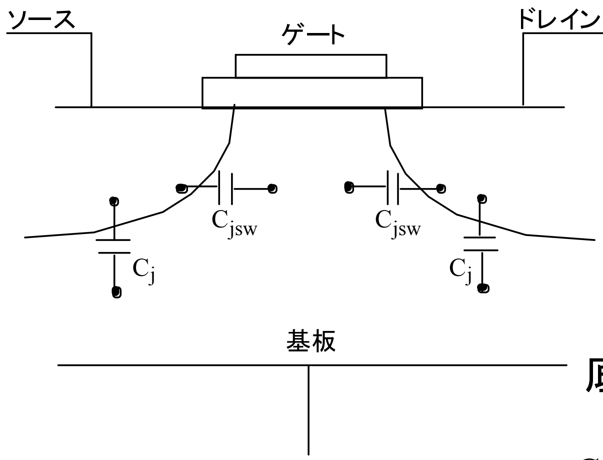
例えば線形領域（$V_{GS} > V_{on} + V_{DS}$）では,

$$C_{GB} = C_{GBO} \cdot L$$

$$C_{GS} = C_0 \left\{ 1 - \left[\frac{V_{GS} - V_{DS} - V_{on}}{2\left(V_{GS} - V_{on}\right) - V_{DS}} \right]^2 \right\} + C_{GSO} \cdot W$$

$$C_{GD} = C_0 \left\{ 1 - \left[\frac{V_{GS} - V_{on}}{2\left(V_{GS} - V_{on}\right) - V_{DS}} \right]^2 \right\} + C_{GDO} \cdot W$$

接合容量

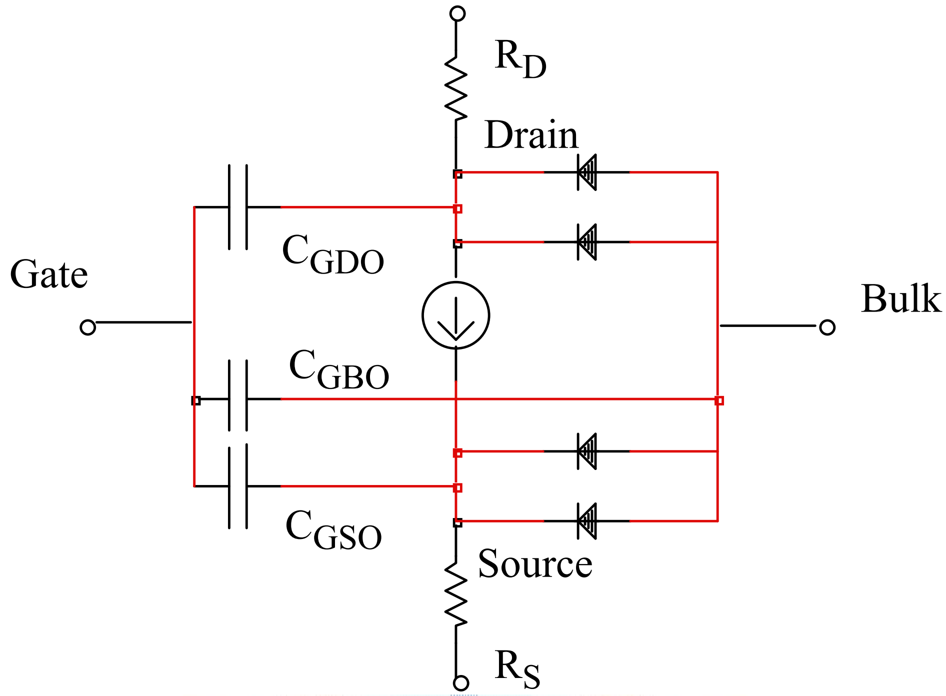


底部の面積容量と周囲長容量の和

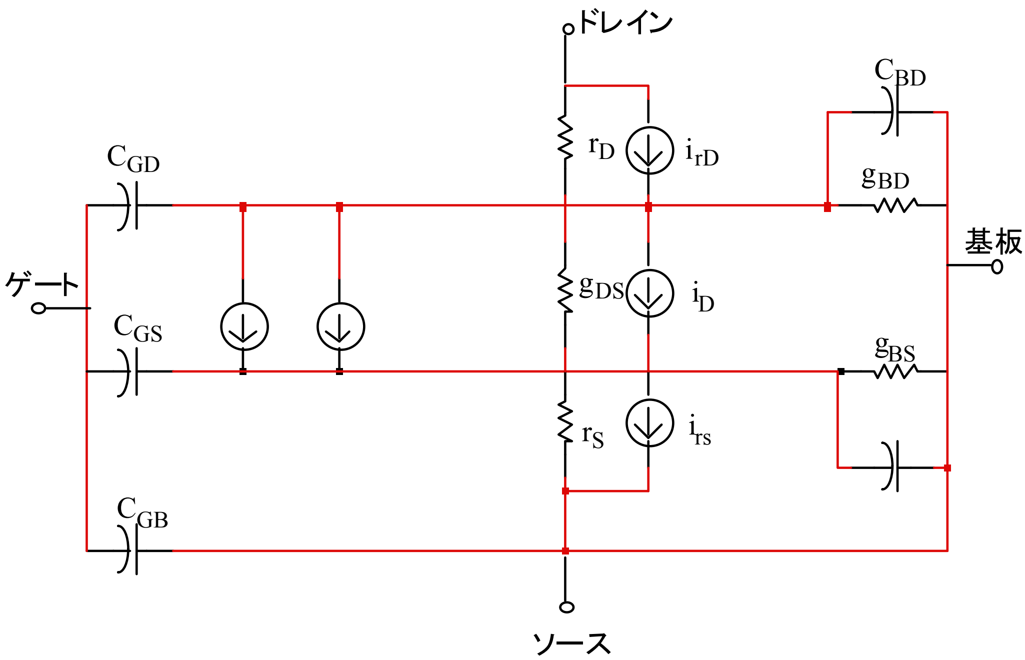
$$C_{BS} = \frac{C_j \cdot A_S}{\left(1 - V_{BS} / \ P_B\right)^{M_j}} + \frac{C_{jSW} \cdot P_S}{\left(1 - V_{BS} / \ P_B\right)^{M_{jSW}}}$$

$$C_{BD} = \frac{C_j \cdot A_D}{\left(1 - V_{BD} / \ P_B\right)^{M_j}} + \frac{C_{jSW} \cdot P_D}{\left(1 - V_{BD} / \ P_B\right)^{M_{jSW}}}$$

MOSFETの等価回路



MOSFETのノイズ源モデル



等価回路のY-Matrix化

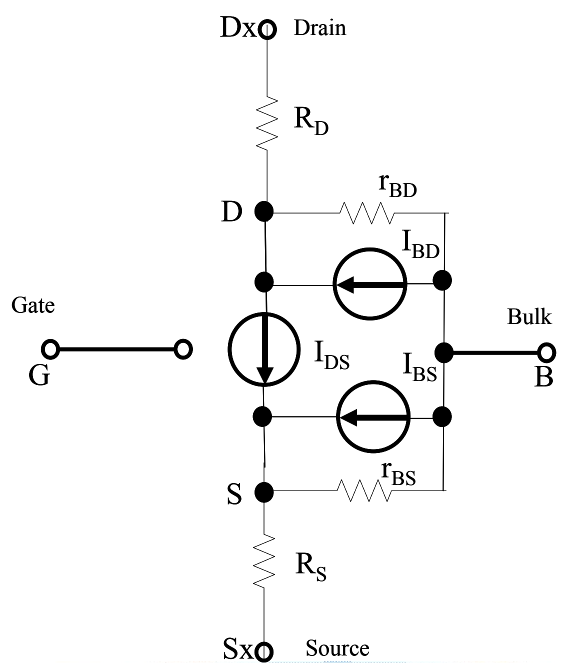
MoDeCH

- ここでは、簡単のため三端子MOSFETで考察
- 交流特性シミュレーションのための複素Y-Matrixを作成

33

MOSFETの直流等価回路

MoDeCH



34

ドレイン・ソース電流に関する マトリックス

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{cccc} \quad D \quad & \quad G \quad & \qquad S \qquad & \quad B \quad \end{array} \\ \begin{array}{c} D \\ G \\ S \\ B \end{array} & \begin{bmatrix} g_{ds} & 0 & -g_{ds} & 0 \\ 0 & g_m & -g_m & 0 \\ -g_{ds} & -g_m & g_m + g_{mbs} + g_{ds} & -g_{mbs} \\ 0 & 0 & -g_{mbs} & g_{mbs} \end{bmatrix} \end{array} \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{DS} \\ \\ +I_{DS} \\ \\ \end{bmatrix}$$

接合ダイオードに関するマトリックス

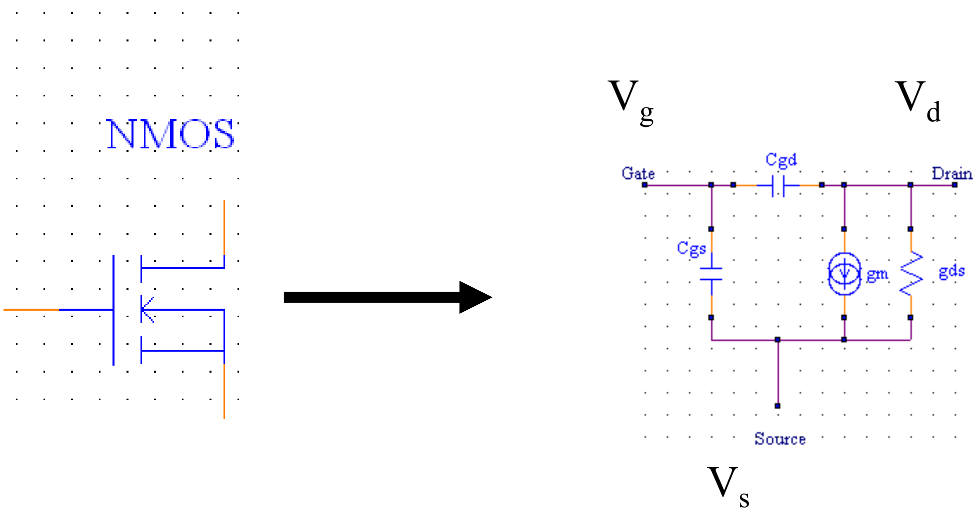
$$\begin{bmatrix} g_{bd} & -g_{bd} \\ -g_{bd} & g_{bd} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{BD} + \\ V_{BD} - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{BD} \\ +I_{BD} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} g_{bs} & -g_{bs} \\ -g_{bs} & g_{bs} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{BS} + \\ V_{BS} - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{BS} \\ +I_{BS} \end{bmatrix}$$

MOSFETの直流Yマトリックス

$$
\begin{array}{c|cccccc}
 & Dx & Sx & D & G & S & B \\
\hline
Dx & \frac{1}{R_D} & 0 & -\frac{1}{R_D} & 0 & 0 & 0 \\
Sx & 0 & \frac{1}{R_S} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_S} & 0 \\
D & -\frac{1}{R_D} & 0 & \frac{1}{R_D}+\frac{1}{r_{BD}}+g_{ds} & 0 & -g_m-g_{mbs}-g_{ds} & -\frac{1}{r_{BD}}-g_{bd}+g_{mbs} \\
G & 0 & 0 & 0 & g_m & -g_m & 0 \\
S & 0 & -\frac{1}{R_S} & -g_{ds} & -g_m & g_m+g_{mbs}+g_{ds} & -\frac{1}{r_{BS}}-g_{bs}-g_{mbs} \\
B & 0 & 0 & -\frac{1}{r_{BD}}-g_{bd} & 0 & -\frac{1}{r_{BS}}-g_{mbs}-g_{bs} & \frac{1}{r_{BD}}+\frac{1}{r_{BS}}+g_{mbs}+g_{bd}+g_{bs}
\end{array}
$$

MOSFETの交流等価回路



MOSFETの複素Y-Matrix?

$$\begin{array}{l} \\ \text{Gate} \\ \text{Drain} \\ \text{Source} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} \text{Gate} & \text{Drain} & \text{Source} \end{array} \\ \begin{bmatrix} ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \end{bmatrix} \end{array} * \begin{bmatrix} V_g \\ V_d \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ? \\ ? \\ ? \end{bmatrix}$$