

デバイス・モデルの略史, 基礎的なデバイス・モデル, モデリングの技法 Q & A など

RF半導体デバイスのモデリング入門

青木 均
Hitoshi Aoki

1 デバイス・モデリングとは

1.1 最も多く使用され続けている回路シミュレータ SPICE

皆さんが回路設計をする際、RFに限らず、コンピュータ・ソフトウェアを使って、回路のトポロジ設計、レイアウトなど、ほとんどすべてを行うと思います。とくに回路シミュレーションは、今や不可欠となっています。

回路シミュレーションを正確に行うためには、使用する回路シミュレータが高精度でなければ、使用者がどれほど注意深くシミュレーション条件を設定しても無駄になります。回路シミュレータは高速/高精度でなくてはなりません。

回路シミュレーションに使用されるソフトウェア・ツールとして、最も多く使用され続けているのが“SPICE” (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)^{スライス}(^{Berkeley}University of California) (1) で、カリフォルニア大学バークレー校(UCB)によって最初に作られました。しかし、実際には、各シミュレータ・メカにより改造され、さまざまな特徴のSPICEが販売されています。SPICEは電気信号を時間軸で計算します。本誌読者の皆様は、RF関連技術者の方が多いと思いますので、周波数軸で信号解析を行うハーモニック・バランス解

析型のシミュレータを頻繁に使用されるでしょう。そのしくみなどはここでは触れませんが、どちらのタイプでも、本稿で述べるモデルは共通に使用できます。以降では、これら二つのタイプのシミュレータを総称して“SPICE”と呼ぶことにします。

1.2 ダイオードのデバイス・モデル

SPICEにより回路シミュレーションを行う場合に、基本回路構成要素(エレメント)を実際の回路部品の動作に、いかに近づけるかが最も重要です。抵抗器、インダクタ、コンデンサなどの受動素子は、比較的容易にその値を決定できますが、バイポーラ・トランジスタ、電界効果トランジスタ(FET)、ダイオードなどの能動素子は、非線型素子のため、動作を記述する方程式(モデル式)と等価回路により、その複雑な動作を表現しています。

1.2.1 基本的なダイオード・モデル

図1は基本的なダイオード・モデルの等価回路です。アノード・カソード間にDC電圧 V_D を加えると、流れる電流 I_D は以下ようになります。

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 q : 電荷 [クーロン], k : ボルツマン定数(約 1.38×10^{-23}) [J/K], T : 絶対温度 [K]

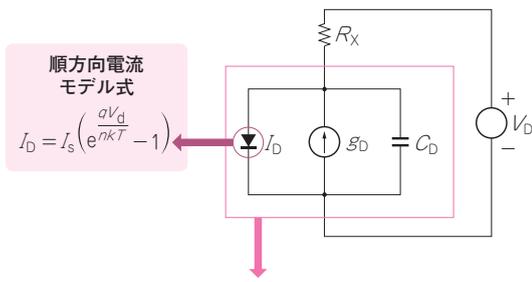
n と I_s はモデル・パラメータで、それぞれ理想ファクタと飽和電流です。

さらにSPICEでは、アドミタンス・マトリックス(Y マトリックス)によって回路を計算するので、コンダクタンスを算出する必要があります。 R_X は、接触抵抗であり外部エレメントなので、内部コンダクタンスのみのマトリックス要素は、

$$\begin{bmatrix} g_D & -g_D \\ -g_D & g_D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_D^+ \\ V_D^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{GD} \\ +I_{GD} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

と計算して Y マトリックスに代入します。交流信号動作時は複素 Y マトリックスを扱う必要があります。これを計算すると、

$$\begin{bmatrix} g_D + j\omega C_D & -g_D - j\omega C_D \\ -g_D - j\omega C_D & g_D + j\omega C_D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_D^+ \\ V_D^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_D \\ +I_D \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} g_D + sC_D & -g_D - sC_D \\ -g_D - sC_D & g_D + sC_D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_D^+ \\ V_D^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_D \\ +I_D \end{bmatrix}$$

〈図1〉 基本的なダイオード・モデルの等価回路

.....(3)
のようになります。

これがPNダイオードの「デバイス・モデル」または「コンパクト・モデル」と呼ばれます。

● 1.2.2 モデリングとは？

さて、モデルができて、PNダイオードの電気的特性は、プロセス条件によって異なります。モデルには半導体プロセスによる特性の変化に追従できるように、自由度を持たせなくてはなりません。そのために変数を設定します。この変数(モデル・パラメータ)は、それぞれ使うプロセスに応じて測定を行い、求めなければなりません。ここで挙げたPNダイオードのモデルでは、 n と I_s ですが、 R_x も等価回路の外部抵抗を表すモデル・パラメータになります。実際の集積回路では、多くのエレメントを使用するため、できるだけ正確で、しかも、シミュレーションの時間が短いモデルを使用することが重要になります。

同時に、モデル・パラメータを高確度で求める(モデル・パラメータ抽出)ことも不可欠です。このモデル作成と、モデル・パラメータ抽出を総称して「モデリング」と呼んでいます。

■ 1.3 物理的モデルと経験的モデル

モデルには大きく分けて「物理的モデル」と「経験的モデル」があります。

● 1.3.1 物理的モデル

半導体の物性をもとに方程式を導いていき、シミュレータが実行可能な演算式を使ったものです。電気的動作を記述するため、多くの場合は等価回路記述も使用されます。

物理的モデルは、その性質上、デバイスの解析や統計解析モデリングに多く使われます。モデル式が指数や対数などの演算時間がかかる関数を多く持っているため、大規模回路のシミュレーションには適しません。

● 1.3.2 経験的モデル

これはデバイスの物性よりも実際のデバイスの動作に近づけ、しかもできるだけコンピュータが計算しやすいように最適化した、いわばフィッティング・モデルといえます。コンパクト・モデルとして、完全な経験的モデルはほとんどなく、一定の解析に基づいた半経験的モデルがほとんどです。

経験的モデルは、大規模回路のシミュレーションに向いており、自由度があります。しかし、モデル・パラメータが物理的意味を持たないため、デバイスの解析には使用できません。

■ 1.4 良いモデルとは

このようにSPICEで使用されるモデルは、どちらかに重みを置いています。一般には物理的モデルと、

経験的モデル(または半経験的モデル)の合成によってできている場合がほとんどです。つまり、主要なモデル・パラメータは、デバイスの物性とプロセスに基づいた、理論的なモデル式の物理変数となります。

物理式は、ポアソン方程式や連続方程式などを物理的に立てて、正しい境界条件を与えて解いていき、できた方程式なので「1次的効果」と呼びます。

それに対して、測定した実デバイス特性がプロセス要因やばらつき要因などで違ってしまい、精度が悪くなるのを改善するために、一部または多くの変数を数学的な非線形式で置き換えなければならないことがあります。また、まだ方程式化できていない現象や指数項/対数項などを簡単な式で置き換えた方程式などがあります。その非線形で表した部分の効果を「2次的効果」と呼んでいます。

2次的効果は、半経験的で方程式をできるだけ簡略化したものを使います。モデル式は、モデル・パラメータがデバイスの特性上で、直感的にわかるように構成され、各モデル・パラメータは、個別のデバイス特性領域をカバーするように、指定されているのが望ましいといえます。

● 1.4.1 デバイス・モデルで考慮すべきこと

回路シミュレーションのためのデバイス・モデルは、各端子電圧の関数として、デバイスの端子電流と電荷を計算しています。これらの端子電流と電荷はニュートン・ラフソン法による繰り返し計算(Newton-Raphson)が収束するように、連続関数でなくてはなりません。

複雑なデバイスのモデル式を立てる場合に、動作領域を分割することを考慮する必要があります。ほとんどのFET(電界効果トランジスタ)のモデルでは、このように式が立てられています。この場合、各領域の境界において、デバイスの端子電流や電荷が、ギャップなしに接続されている必要があります。端子の容量モデル式は、どのデバイスにおいても、簡単に作成できますが、電荷との関連を考慮して行わないと、デバイスの端子における計算結果に矛盾が起こります。

複雑なモデルほど、デバイスの特性をより正確に表現できますが、そのモデル・パラメータ抽出が非常に難しくなります。モデル・パラメータがデバイスの測定データから正確に抽出されていないと、どれほど良くできたモデルであっても、実用的ではありません。

● 1.4.2 コンパクト・モデルに必要な情報

以上をまとめると、コンパクト・モデルには、次の3種類の情報が必要となります。

① 基礎的物理定数

例えば電荷やボルツマン定数などは、SPICEの中であらかじめ定義されているため、この引き数を使用します。