

IGBT の静特性における複数のプロセス・デバイス特性を考慮した 高精度マクロモデルの研究

香積 正基* 青木 均 新井 薫子 Khatami Ramin
轟 俊一郎 戸塚 拓也 安部 文隆 小林 春夫 (群馬大学)

A Study of High Precision IGBT Macro-Model Considering in Static Characteristic
With Different Process Devices

Masaki Kazumi*, Hitoshi Aoki, Yukiko Arai, Khatami Ramin,
Shunichiro Todoroki, Takuya Tostuka, Fumitaka Abe, Haruo Kobayashi (Gunma University)

In this study, a novel SPICE model of an Insulated-Gate-Bipolar-Transistor of (IGBT), which is often used to handle high power signals in automotive electronic circuits, has been developed. The model consists of basic SPICE elements, and hence it can be used in any SPICE-compatible simulators without any source code modifications. This paper reports the results of these drain current characteristics with two different process devices by using the proposed IGBT macro-model. The model parameters are carefully extracted and optimized with measured data on datasheets of IGBT manufacturers.

キーワード : 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ, IGBT, モデリング, マクロモデル, SPICE
(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT, Modeling, Macro-model, SPICE)

1. はじめに

絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)は, MOSFET のオン抵抗が高いという欠点とバイポーラトランジスタのベース電流が大きいという欠点を補完するために作られたデバイスであり, 高耐圧・大電流に適したパワー半導体である. 絶縁ゲートによる電圧制御型であるため, 車載用高耐圧素子や鉄道車両制御など高電力を扱う場合に多く用いられる. このような IGBT を用いた回路シミュレーションのための IGBT モデルは SPICE の標準ライブラリにも実装されている. しかし, IGBT を用いて回路シミュレーションを行う場合, 従来の SPICE モデルでは実測との差が大きいという問題点があり, 事前解析における高精度化が重要視されている.

本研究では, この IGBT の SPICE のソースコードを改造する事なく, 多くの SPICE 系シミュレータで使用可能にするため, SPICE 用モデルを SPICE の基本エレメントを組み合わせることで開発する. 今回はデバイス・プロセス特性を考慮するため, 2 種類のプロセスによるデスクリートデバイスモジュールの測定データからパラメータ抽出を行い, それぞれのシミュレーションで良好な結果を得たので報告する.

本論文の構成は以下のとおりである. 2 章で IGBT の基本

原理について説明する. 3 章で今回作成したマクロモデルの説明を行い, 4 章にてそのシミュレーション結果を示す. 最後に 5 章で結論を述べる.

2. IGBT の基本原理

〈2・1〉 IGBT の構造 IGBT はパワー MOSFET(DMOS トランジスタ)の構造に拡散レートの高い p 層がチャネルドープとして付け加えられたものである. IGBT のデバイス構造を図 1 [1]に示す. アノード・カソード間を順方向バイアス下でゲートに十分な電圧をかけると, ゲート電極近傍の p 層に反転層が形成される. この反転層を通過して電子電流が n 層に向かってホールが注入される. このホールはドリフト層である n 層を拡散によって移動し, その一部が反転層を通過してきた電子と再結合する. 残りのホールは接合部を通過して p 層に流れ込む. つまりアノード・カソード間が導通した事になる.

これは p⁺をホールのエミッタ(アノード), n⁻をベース(ゲート), p 層をコレクタ(カソード)とする pnp トランジスタのオン状態とみることができる.

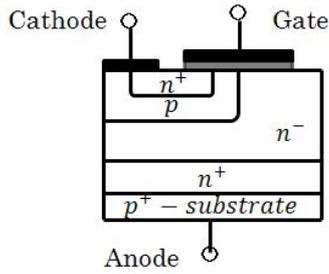


図1 IGBTの簡易構造図
Fig. 1. Simplified structure of IGBT

〈2・1〉 IGBTの静特性 IGBTの静特性を図2[1]に示す。

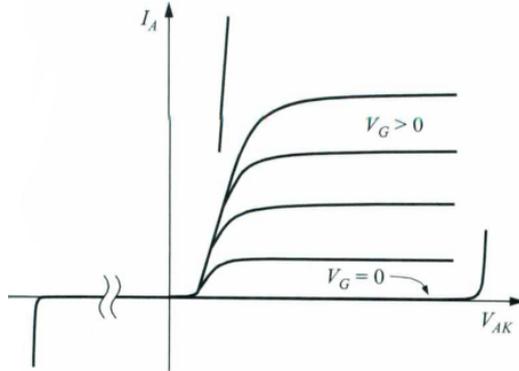


図2 IGBTの出力電流・電圧特性
Fig. 2. Static DC output characteristics of IGBT

$V_{AK} < 0.7\text{ V}$ のとき、IGBTの等価回路は図3(a)に示すようにDMOSトランジスタにp-i-nダイオードを直列に接続したものである。この回路のDMOSトランジスタにわずかな電圧がかかると、p-i-nダイオードは順方向バイアス下で、伝導電流がn領域の過剰な電子、ホール再結合によって流れる。

$V_{AK} > 0.7\text{ V}$ のとき、アノード接続からの過剰なホール注入を完全に吸収することができない。それらは中央のp領域にこぼれ、そしてpnpバイポーラの電流に寄与する。このときの等価回路は図3(b)に示される。DMOSのドレイン電流 I_{MOS} はベース電流になり、そしてアノード電流はエミッタ電流である。このときの電流の方程式は以下のように表される：

$$I_A \approx (1 + \beta_{pnp}) I_{MOS} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2)$$

$$\alpha \approx \alpha_T \approx \frac{1}{\text{csch}(x_{nn}/L_n)} \quad (3)$$

ここで α_T はベースのトランスポート係数、 x_{nn} は中性ベースである。

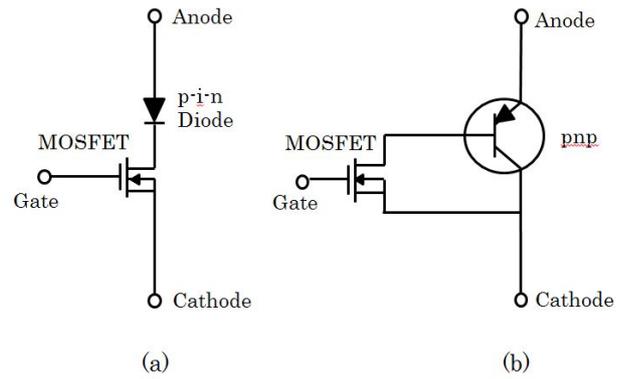


図3 IGBTの等価回路
(a) $V_{AK} < 0.7\text{ V}$ の時 (b) $V_{AK} > 0.7\text{ V}$ の時
Fig.3 Equivalent circuits of an IGBT.

(a) In case $V_{AK} < 0.7\text{ V}$. (b) In case $V_{AK} > 0.7\text{ V}$.

〈2・3〉 IGBTのマクロモデル マクロモデルを使用する最大の特徴として、SPICEのソースコードを改造する必要なく、等価回路を作成できる点である。また、多くのSPICE系シミュレータで使用可能のため、汎用性が高い。

従来のIGBTのマクロモデル [2] を図4に示す。このマクロモデルでは、MOSFETにUCB MOSモデル level 3を用い、pnpバイポーラトランジスタにGummel-Poonモデル、さらにMOSFETのドレインとなるn⁻エピ層に、ゲート・ソース電圧によって制御される電流源(VCCS)により可変抵抗を表現している。このようなマクロモデルでは、

- (i) n層を流れるドリフト電流のモデル化ができない
 - (ii) DMOS出力抵抗が一定になってしまう
 - (iii) フリーホイールダイオードのシミュレーションができない
- などの欠点がある。

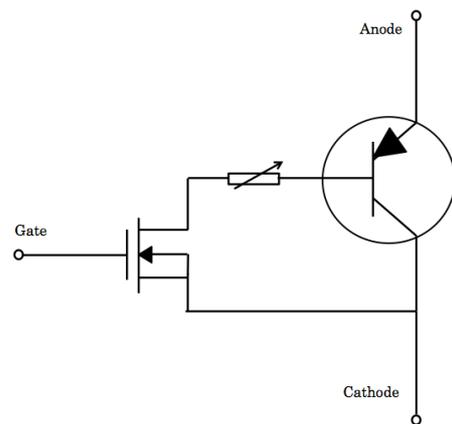


図4 従来のIGBTのマクロモデル
Fig.4 Macro model of conventional IGBT.

従来のマクロモデル [3] のシミュレーション結果を図5に示す。

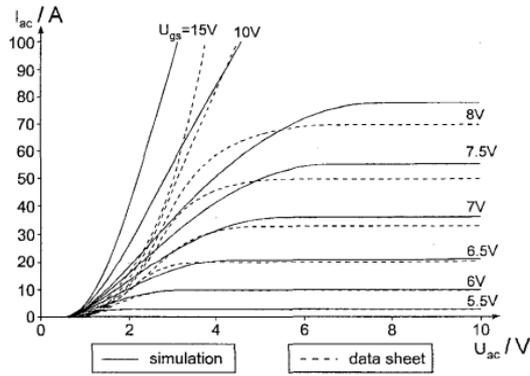


図5 従来のIGBTの静特性と測定データの比較
Fig.5 Comparison of static characteristic of conventional IGBT by simulation and measurement

この結果から IGBT の静特性を正確に表現できていないことがわかる。シミュレーション精度を向上させるためにフリーホイールダイオードを含む独自のマクロモデル (A-IGBT model) を提案する。

3. マクロモデルの作成

今回提案する IGBT のマクロモデル (A-IGBT model) を図 6 に示す。従来の等価回路構成に加えて、並列にダイオードを 2 つ接続した。これらは n-層の逆方向 Breakdown 電圧をコントロールする役割と、フリーホイールダイオードの順方向電流特性のシミュレーションを行う役割がある。加えて、接合容量により過渡シミュレーション時のターンオフを表現するためにも使用した。2つの PN 接合ダイオードモデルを並列に接続することで、それぞれのダイオードにおけるモデルパラメータを独立に変化させて、電流・電圧特性カーブにおいて傾きの自由度を上げている。

また、DMOS のモデルは BSIM3 モデルを使用する。BSIM3におけるUCB MOS モデル level 3 とは異なる点として、キャリア移動度と出力抵抗が挙げられる。キャリア移動度はUCB MOS モデル level 3 ではキャリア移動度のパラメータ数は一つであったが、BSIM3 ではモデルパラメータ数が多く、物理効果が考慮されているためドリフト電流モデルをより正確に表現できている。また BSIM3 では飽和領域における出力抵抗をチャンネル長変調効果、DIBL(Drain Induced Barrier Lowering)効果、ホットエレクトロン効果の三つの領域に分類し、モデルを表現する事でUCB MOS モデル level 3 より正確に表現できるようにした。このように A-IGBT モデルは回路構成として、非常にシンプルでありながら IGBT の動作メカニズムに合っている。

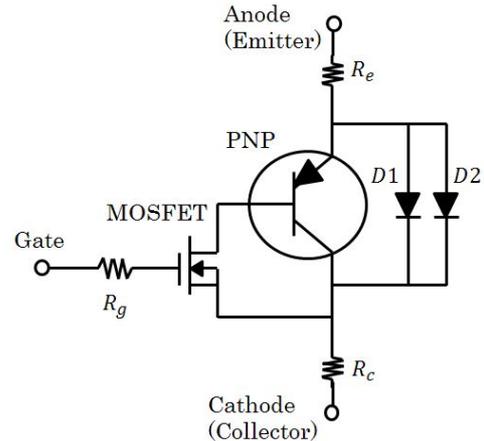


図6 提案するIGBTのマクロモデル (A-IGBT)
Fig.6 Proposed IGBT macro model (A-IGBT).

4. モデルパラメータ抽出・最適化とシミュレーション

日立製 IGBT MODULE である MBN1200E33E のデータシートより直流電流・電圧特性を数値化し、測定データとした。図 7 に日立製 IGBT モジュールの回路図を示す。本デバイスは、3つの IGBT を並列に接続し高電流を得られるように開発されている。ここでゲート-エミッタ電圧(V_{CES})は 3,300V であり、ゲート-エミッタ電圧(V_{GES})は $\pm 20V$ である。コレクタ電流(I_c)は 1,200A であり、フォワード電流(I_F)は 1,200A である。

今回提案した IGBT のマクロモデルを SPICE に実装し、測定データを使用して、BSIM4 モデル、Gummel-Poon モデル、PN ダイオードモデルのパラメータを抽出し、汎用最適化プログラムを用いてチューニングを行った。各デバイスモデルのモデルパラメータは主に物理パラメータを測定データから抽出・最適化し、2次効果を表すフィッティングパラメータは初期値のまま使用した [3]。

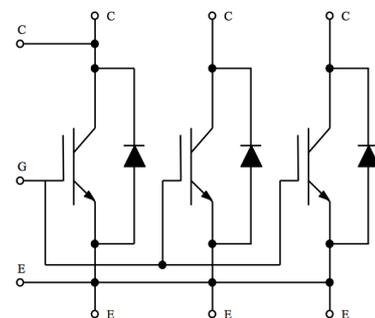


図7 日立製 IGBT モジュールの回路ダイアグラム
Fig. 7. Circuit diagram of Hitachi IGBT MODULE

パラメータ抽出結果から A-IGBT モデルでシミュレートした電流・電圧特性と測定データを比較した結果を図 8 に示す。ここで、測定データは 2,000A まで取得可能なため、

シミュレーションのみ 3,000A まで行った。

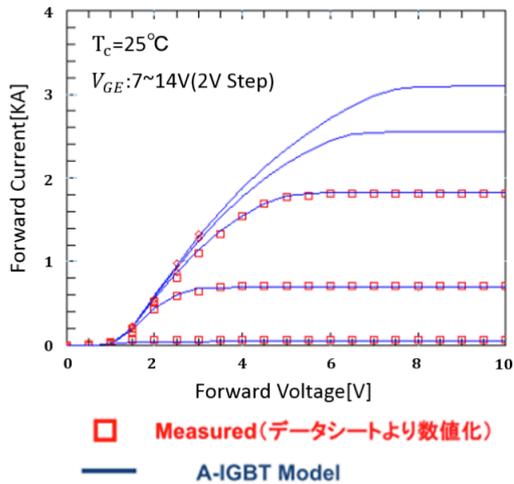


図 8 提案した A-IGBT モデルと日立製 IGBT の Datasheet のコレクタ・エミッタ電流・電圧特性での比較
Fig.8 Comparison between Hitachi IGBT measured and simulated collector-emitter current of A-IGBT.

図 8 から A-IGBT モデルはコレクタ電流特性を正確に表現できていることがわかる。特に V_{GE} が高くなるにつれ、ゲート抵抗の影響により、ドレイン電流が圧縮されたようなカーブになる様子が正確にシミュレートできている。

図 9 にフリーホイールダイオードのフォワード電流・電圧特性の同様な比較を示す。フリーホイールダイオードは IGBT の重要な内蔵エレメントであり、高電流回路で使用されるコイル負荷に起きる起電力を放出させる役割がある。同時に過渡現象においては、本ダイオードの空乏層容量がターンオフ特性に影響するため、正確にモデリングする必要がある。

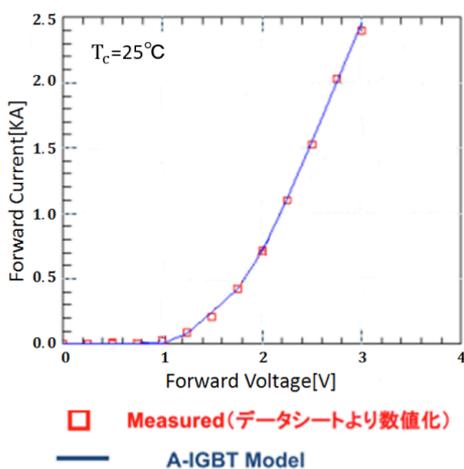


図 9 日立製 IGBT の Datasheet フリーホイールダイオードの順方向電流・電圧特性におけるシミュレーションと測定値との比較

Fig.9 Hitachi IGBT measurement and simulation results of forward current of free wheel diode.

図 9 からこの特性も A-IGBT モデルで正確に表現できていることがわかる。ここでは、ダイオードの抵抗が小信号の pn 接合ダイオードに比べて大きく、中から高注入領域におけるカーブが緩やかになっている。

同様にして、富士電機製 IGBT MODULE である 1MBH75D-060S のデータシートより直流電流・電圧特性を数値化し、測定データとした。富士電機製 IGBT モジュールの回路ダイアグラムを図 10 に示す。日立製デバイスとは異なり、単一 IGBT 構造であるため電流も比較的小さくなっている。ここでゲート-エミッタ電圧 (V_{CES}) は 600V であり、ゲート-エミッタ電圧 (V_{GES}) は $\pm 30V$ 、コレクタ電流 (I_C) は 82A である。データシートでは 150A までだがシミュレーションは 350A まで行った。より小さな電流を表現するために、使用している MOS モデル、トランジスタモデルのプロセスパラメータを変更した。これによって様々な効果の影響が大きくなり、IGBT の特性を表現する際に考慮しなければならないパラメータが多くなる。またパラメータ変更による影響が大きくなるため、モデリングをするのは困難になる。今回行ったパラメータ抽出結果から A-IGBT モデルでシミュレートした電流・電圧特性と測定データを比較した結果を図 11 に示す。

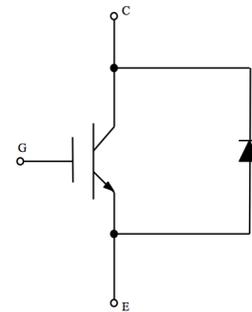


図 10 富士電機製 IGBT モジュールの回路ダイアグラム
Fig. 10. Circuit diagram of Fuji IGBT MODULE

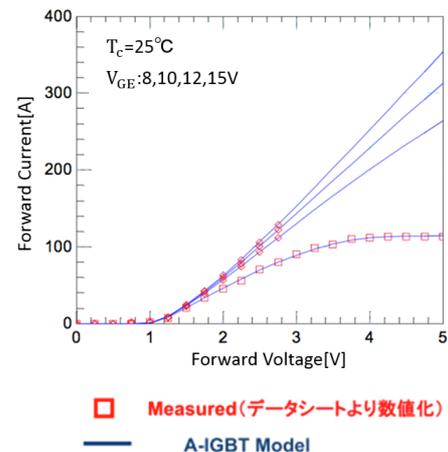


図 11 提案した A-IGBT モデルと富士電機製 IGBT のデータシートのコレクタ・エミッタ電流・電圧特性での比較
Fig.11 Comparison between Fuji Datasheet and simulated collector-emitter current of A-IGBT.

図 11 からこのプロセスによるデスクリートデバイスモジュールでも A-IGBT モデルはコレクタ電流特性を正確に表現できていることがわかる。日立製デスクリートモデルと比較すると小電流であるが、比較的小さい電流仕様のデバイスでも正確に表現できている事が分かる。

同様にしてフリーホイールダイオードのフォワード電流・電圧特性の比較を図 12 に示す。

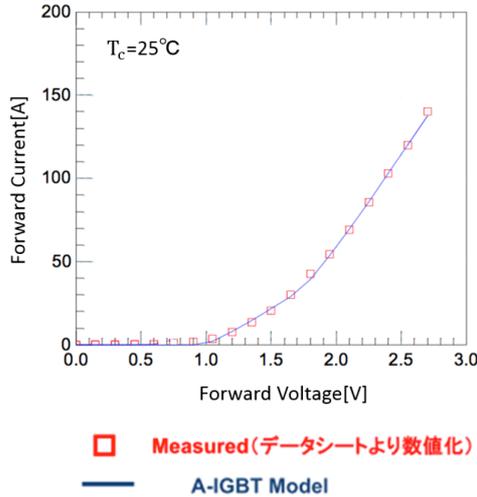


図 12 富士電機製 IGBT の Datasheet フリーホイールダイオードの順方向電流・電圧特性におけるシミュレーションと測定値との比較

Fig.12 Fuji IGBT measurement and simulation results of forward current of free wheel diode.

図 12 からこの特性も A-IGBT モデルで正確に表現できていることがわかる。

5. まとめ

本論文では、SPICE シミュレータ用の IGBT のマクロモデルを提案し、I-V 特性測定値を使用して、モデルパラメータを高精度に抽出した。従来のマクロモデルでは DMOS のモデルがドリフト電流を正確に表現できていなかったため、これを BSIM3 に変更し、IGBT の特性を表現した。提案したマクロモデルでチューニングを行い、シミュレートした結果、IGBT の静特性を表現できた。よって IGBT の静特性の高精度マクロモデルが作成できたと言える。デバイス・プロセス特性を考慮するため、異なるプロセスによるデスクリートデバイスモジュールの測定データからパラメータ抽出を行い、同様にシミュレーションを行い、同様の結果を得られた。このことからプロセス・デバイス特性を考慮したマクロモデルであるといえる。

今後の研究として、容量特性をマクロモデルで正確に表現し、IGBT のスイッチング特性のシミュレートを実現していきたい。

- (1) S. M. Sze, "Physics of Semiconductor", 2nd, Wiley Inter-science, 1981.
- (2) O. Apeldoorn, S. Schmitt, and R.W. De Doncker: "An Electrical Model of a NPT-IGBT Including Transient Temperature Effects Realized with PSpice Device Equations Modeling", IEEE Catalog, No. 97TH8280 pp.223-228 (1997)
- (3) 青木均, 島末政憲, 川原康雄: "CMOS モデリング技術", 丸善出版, 2006
- (4) 香積正基, 青木均, 新井薫子, Ramin Khatami, 轟俊一郎, 戸塚拓也, 安部文隆, 小林春夫 "IGBT の高精度マクロモデルの研究", IEEJ Technical Meeting in Tochigi, Gunma Area, Kiryu (Feb.2014)