

# パワー半導体素子のモデル化と動作特性解析

富永真志\* 木ノ内伸一\*\*  
堀口剛司\*\* 大井健史\*\*  
漆畑廣明\*

Modeling and Characteristics Analysis of Power Semiconductor Devices

Shinji Tominaga, Takeshi Horiguchi, Hiroaki Urushibata, Shinichi Kinouchi, Takeshi Oi

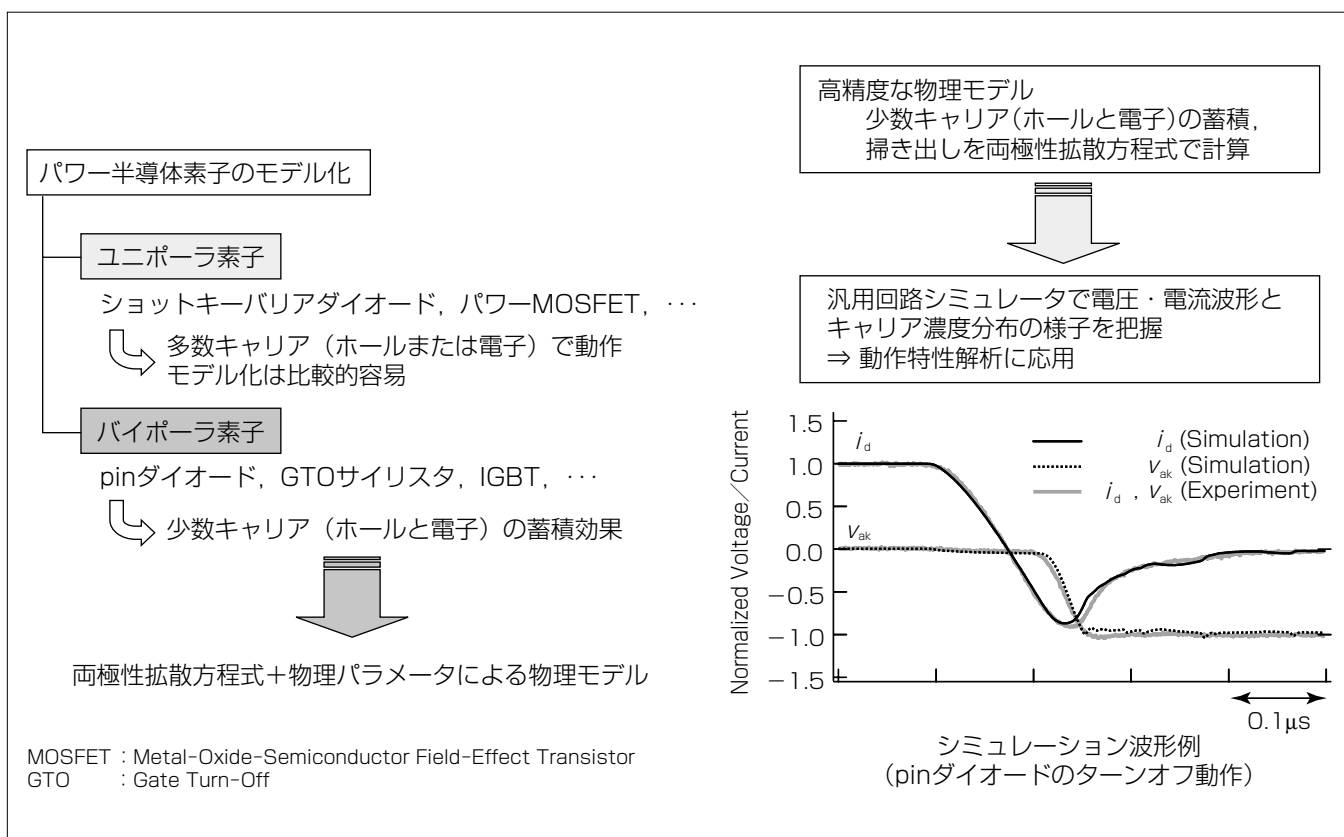
## 要旨

近年の環境問題への関心の高まりなどを背景として、パワーエレクトロニクス機器に対する普及の期待とともに小型化、高効率化、低コスト化、品質向上が求められるなか、機器の設計段階におけるシミュレーション技術が重要な役割を果たしている。パワーエレクトロニクス機器の基幹部品であるパワー半導体素子は、シミュレーションでもその素子モデルが重要である。すなわち、パワー半導体素子モデルの精度がシミュレーション結果を左右する。

パワー半導体素子のうち、pinダイオードやIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)などに代表されるバイポーラ素子は、電流が主としてホールと電子という少数キャリアの拡散電流であるため、少数キャリアの挙動を表す両極性拡散方程式を適用した物理モデルとすることで、

その素子モデルの高精度化が実現できる。さらにこの素子モデルは、通常は計測することができないパワー半導体素子内部におけるキャリア濃度分布の様子を把握できるという特長を持つ。

例として、バイポーラ素子の中で最も基本的な構造を持つpinダイオードの素子モデルを用いて、その特徴的なターンオフ動作が高精度で模擬できることを示した。また、並列接続したpinダイオードのターンオフ動作を汎用回路シミュレータで解析し、複雑に変化するリカバリー電流の波形をキャリア濃度分布の変化で説明できることを明らかにした。このように、高精度な物理モデルが設計段階でのスイッチング波形解析や損失評価に有効であることを示した。



## パワー半導体素子のモデル化とpinダイオードモデルによるシミュレーション解析

パワー半導体素子のうちユニポーラ素子はホールまたは電子のどちらか一方の多数キャリアで動作するため、比較的容易に高精度な素子モデルが得られる。一方、pinダイオードを初めとするバイポーラ素子には少数キャリアの蓄積効果という動作上の特徴があり、モデル化には少数キャリアの物理的挙動を把握することが重要である。両極性拡散方程式を適用したpinダイオードの物理モデルと適切なモデルパラメータの設定によって、実測波形とよく一致したシミュレーション結果が得られている。

1. ま え が き

近年、環境問題への関心の高まりやパワー半導体の性能向上によって、パワーエレクトロニクス機器の普及が進んでいる。これに伴って機器の小型化、高効率化、低コスト化、品質向上がより強く求められており、機器の設計段階におけるシミュレーション技術が重要な役割を果たしている。パワーエレクトロニクス機器の基幹部品であるパワー半導体素子は、シミュレーションでもその素子モデルが重要である。すなわち、パワー半導体素子モデルの精度がシミュレーション結果を大きく左右する。

本稿ではパワー半導体素子の高精度なモデル化と、これを用いたパワー半導体素子の動作特性解析例について述べる。

2. パワー半導体素子のシミュレーションモデル

2.1 パワー半導体素子のモデル化

パワー半導体素子のスイッチング動作における電圧、電流の過渡応答は素子の発熱(損失)やノイズの発生と深い関係があり、パワーエレクトロニクス機器の重要な設計ポイントとなっている。特に素子自身の発熱による温度上昇で動作特性が刻々と変化していくため、素子の温度特性の正確な模擬が素子モデルの精度向上に不可欠である。

従来、半導体素子の設計を目的とした動作解析には、素子の断面構造または三次元構造と物性値等を必要とするデバイスシミュレータが用いられている。これは温度特性を含めて半導体素子の挙動を高精度に模擬できるものの、計算負荷が大きく、素子を含む電気回路モデルと機器の冷却機構を考慮した熱解析モデルを連携させる連成解析への適用が難しい。そのため、汎用の回路シミュレータ上で扱えるパワー半導体素子モデルが求められている。

汎用回路シミュレータの1つで電子回路のアナログ動作解析を行うSPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)は、集積回路などの低圧小電力用途向けに開発されたSPICEモデルと呼ばれる独自の素子モデルを標準で実装している。しかし、パワーエレクトロニクス機器で用いられるパワーMOSFETやpinダイオードといった高耐圧、大電流用途のパワー半導体素子は物理的な構造や動作原理が異なるため、モデルパラメータの調整だけではパワー半導体素子の特性のすべてを模擬できず、素子モデルを再構築又は新たにモデルを構築する必要がある。

パワーMOSFETについては、MOSFETのSPICEモデルをベースとして精度を改善した素子モデルが比較的容易に得られている。これは、MOSFETがホールまたは電子のどちらか一方の多数キャリアで動作するユニポーラ素子であり、ホールと電子の両方で動作するバイポーラ素子に見られる少数キャリアの蓄積効果がないためである。一方、pinダイオードやGTOサイリスタ、IGBT等はバイポーラ

素子であり、少数キャリアの注入による伝導度変調効果を利用して、オフ時の高耐圧、オン時の低抵抗を実現している。この少数キャリアの注入、蓄積、掃き出し、消滅といった動作が過渡特性に大きな影響を与えているが、SPICEモデルではこれを正確に模擬する機能を備えていない。このように、少数キャリアの物理的挙動を把握することが、pinダイオードを初めとするバイポーラ素子のモデル化の要点である。バイポーラ素子の中で最も基本的な構造を持つpinダイオードのモデル化について2.2節に述べる。

2.2 pinダイオードのモデル化

pinダイオードは、p形半導体の層(p<sup>+</sup>層)とn形半導体の層(n<sup>+</sup>層)の間に、n形半導体の不純物濃度を低くして真性半導体に近付けたn<sup>-</sup>層を設けている。このようなpin構造によって、オフ時に空乏化した際の空間電荷密度が小さく、n<sup>-</sup>層にかかる電界強度を構造的に低減できるため、より高い耐圧が得られる。また、オン時には伝導度変調または高注入状態というホールと電子が高密度で共存するプラズマ状態となるため、n<sup>-</sup>層の抵抗成分を低減できる。pinダイオードの動作特性で最も特徴的かつ重要なのは、この低オン抵抗の状態からオフ状態への過渡的な動作(ターンオフ動作)に現れるリカバリー特性(逆回復特性)である。

図1にpinダイオードのターンオフ動作を示す。順方向に定電流I<sub>F</sub>が流れる状態では、n<sup>-</sup>層に図1(b)の時刻t<sub>1</sub>で示すようなキャリア濃度p(x, t)が分布している。時刻t<sub>1</sub>からターンオフ動作が始まって順方向電流が0まで減少しても、キャリアがすぐには消滅せずに電流は更に逆方向へ流れる。この逆方向電流(リカバリー電流)によってn<sup>-</sup>層のホールはp<sup>+</sup>層へ、電子はn<sup>+</sup>層へと掃き出され、キャリアの減少に伴ってn<sup>-</sup>層の抵抗は増大する。図1(b)でキャリ

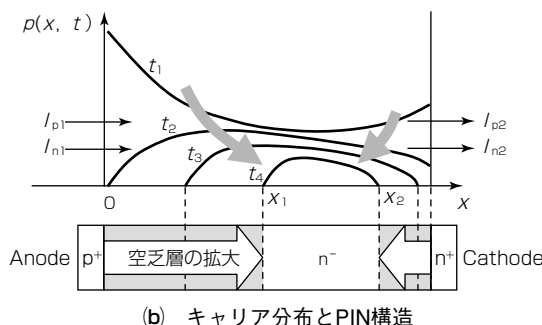
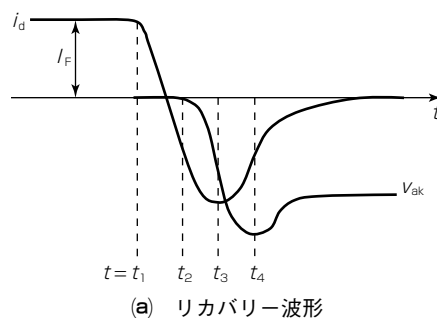


図1. pinダイオードのターンオフ動作

アの蓄積領域を位置座標 $x_1, x_2$ で表すように、時刻 $t_2$ 以降は $x_1, x_2$ が移動して空乏層が拡大するとともにダイオードの端子電圧 $v_{ak}$ が上昇し、キャリアの蓄積量も少なくなつて逆方向電流は減少する。

pinダイオードの $n^-$ 層でキャリアの移動は一次元方向のみと仮定し、ホールと電子の濃度が等しい高注入状態の条件下ではキャリアの挙動を1つの式で近似的に表すことができ、そのキャリア濃度分布 $p(x, t)$ は式(1)に示す一次元両極性拡散方程式で表される。

$$D \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \frac{p(x,t)}{\tau} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

ここで $D$ は両極性拡散定数、 $\tau$ はキャリアのライフタイムである。両極性拡散方程式の境界条件として、キャリア蓄積領域の両端におけるキャリア濃度勾配を用いる。 $p(x, t)$ は式(1)から解析的に解けないため、シミュレーション中に数値解析で求める。このようにして得られたキャリア濃度分布から蓄積領域と空乏層のそれぞれにかかる電圧を計算し、さらに接合部の電圧を加算してpinダイオード端子間の電圧 $v_{ak}$ を求める。これらの計算には電荷素量や半導体(シリコン)の誘電率などの物理定数のほか、チップ面積やpin構造各層の幅、ライフタイムや不純物濃度などのようにモデル化の対象としたpinダイオードの内部構造や物性に基づく物理パラメータを用いている。

高精度な素子モデルの実現には、モデルを構成する方程式に適切なモデルパラメータを適用することも必要である。先に述べた物理パラメータの具体的な数値は、市販の素子ではほとんど公表されておらず、実際にモデルを扱う回路設計者がそれらの値を直接計測することも極めて困難である。そのため、データシートや実測した静特性、スイッチング波形を参考に各種モデルパラメータの抽出、最適化を行う<sup>(1)</sup>。

図2にpinダイオードモデルによるシミュレーション波形と実測波形を比較した例を示す。実測波形を目標にモデルパラメータを調整、最適化したことによって、精度よく模擬できている。ここでは複数の動作条件を参考にした平均的なパラメータを抽出、設定しており、モデル化における仮定や近似に起因する誤差は残るものの、電圧、電流、温度などの条件による波形の変化にも精度よく対応できる。これはキャリアの移動度やライフタイムに温度依存性がある

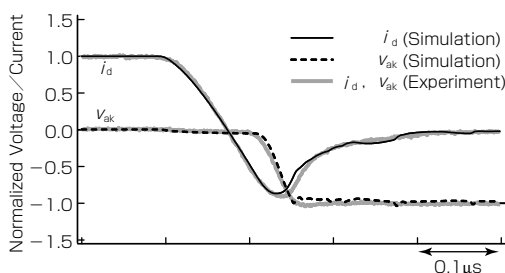


図2. シミュレーション波形 (pinダイオードターンオフ)

り、式(1)からキャリアの挙動を温度に応じて物理的に模擬できるためである。

### 3. 並列接続pinダイオードの動作特性解析

素子モデルを用いた動作特性解析の例として、パワー半導体素子を並列接続する場合を想定し、配線インダクタンスが異なるpinダイオードのターンオフ動作の解析について述べる<sup>(2)</sup>。

#### 3.1 並列接続pinダイオードのシミュレーション

図3にリカバリー特性の評価試験回路を示す。試験条件は直流電圧 $V_{DC}=300V$ 、ゲート抵抗 $R_g=51\Omega$ 、温度を25℃(室温)とし、負荷インダクタンス $L_L$ に100Aの電流が流れるようにパワーMOSFETをスイッチングさせた。2個のpinダイオード $D_1, D_2$ を並列に接続し、 $D_1$ の配線長を $D_2$ よりも短くして配線インダクタンス $L_1, L_2$ に差を与えた。

配線インダクタンス $L_1, L_2$ は実測波形から求め、それぞれ10.7nH, 18.5nHをpinダイオードモデルに設定した。これと同じオーダーの回路定数も無視できないため、回路モデルには寄生インダクタンス $L_s$ 、寄生抵抗 $R_s$ も考慮した。また、パワーMOSFETにはSPICEモデルをベースに端子間容量の電圧依存性を考慮して、pinダイオードモデルと同水準まで精度を向上した素子モデルを用いた。

図4にターンオフ動作のシミュレーション結果を示す。また、表1にリカバリー損失(ターンオフ時のリカバリー電流×電圧の積分で表されるスイッチング損失)の比較を示す。 $D_1$ と $D_2$ は並列接続であるため、電圧波形は同一である。リカバリー電流波形はそれぞれ複雑に変化しているが、ともに実測波形とよく一致しており、リカバリー損失の誤差も10%前後で精度よく模擬できている。

#### 3.2 ターンオフ動作の解析

シミュレーションで得られたキャリア濃度分布を利用して、リカバリー電流波形の複雑な変化を物理的に解析する。図5にリカバリー電流波形の比較を、図6に $n^-$ 層内のキャリア濃度分布を示す。リカバリー電流波形に記載してい

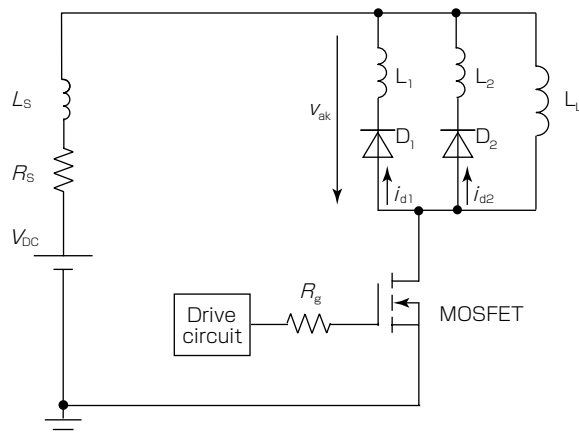
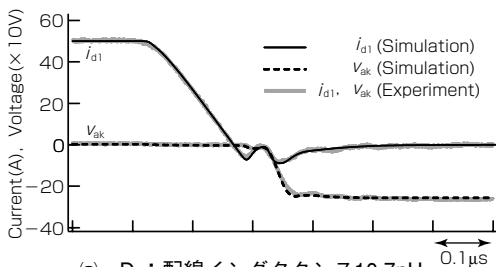
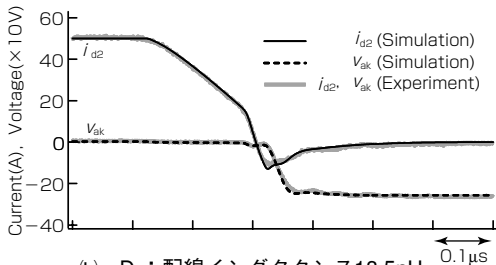


図3. リカバリー特性の評価試験回路



(a) D<sub>1</sub>: 配線インダクタンス10.7nH



(b) D<sub>2</sub>: 配線インダクタンス18.5nH

図4. ターンオフ動作のシミュレーション結果

表1. リカバリー損失の比較

	D <sub>1</sub> : 10.7nH	D <sub>2</sub> : 18.5nH
シミュレーション	146.8μJ	173.8μJ
実測値	129.9μJ	161.6μJ
誤差	13.0%	7.5%

る時刻  $t_a$ ,  $t_b$ ,  $t_c$ ,  $t_d$  は、キャリア分布の各時刻と対応する。

時刻  $t_a$  までの順方向電流はそれぞれ一定値50Aで等しく、定常状態の電流値が等しいためにキャリア濃度分布も等しい。ターンオフ動作が始まると、配線インダクタンスが小さい  $D_1$  は電流の減少率  $di/dt$  が大きく、電流の減少速度に応じてキャリア濃度も速く下降する。 $D_1$  は時刻  $t_b$  で  $p^+$  層側のキャリア濃度が先に0となり、時刻  $t_b$  以降は  $p^+$  層側から空乏層が形成され始める。そのため、 $D_1$  には電流が流れにくくなり、時刻  $t_b$  から逆電流が減少する一方で、 $D_2$  に流れる電流が増加して波形の傾きが大きくなっている。 $D_2$  は時刻  $t_c$  で  $p^+$  層側のキャリア濃度が0となり、 $p^+$  層側から空乏層が形成され始めて電流が流れにくくなる。その結果、 $D_2$  の逆電流が減少し、 $D_1$  の逆電流が再び増加している。最後に電流が0に近付くと蓄積領域や接合部の電圧も0に近付き、ダイオード電圧のほとんどが空乏層にかかる。電圧は空乏層幅の2乗に比例し、電圧が等しい  $D_1$ ,  $D_2$  の空乏層幅  $x_1$  も等しくなっている。このように、空乏層を形成する時期の差によってリカバリー電流が変化することを確認できた。

この例では配線インダクタンスが大きい  $D_2$  のリカバリー損失が大きいので、スイッチングを繰り返すと  $D_1$  より  $D_2$  の温度が高くなっていく。この時、pinダイオードの温度特性から  $D_2$  へより多くの順方向電流が流れるためにリカバリー電流も増大し、リカバリー損失が増えてさらに温度差が拡大することがわかる。このような解析でどこにど

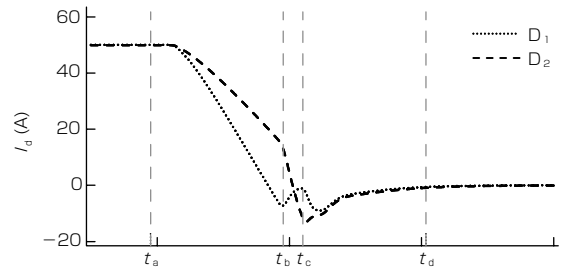
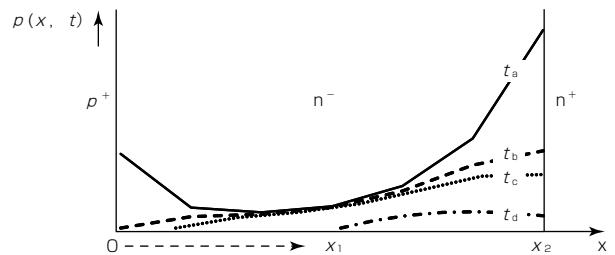
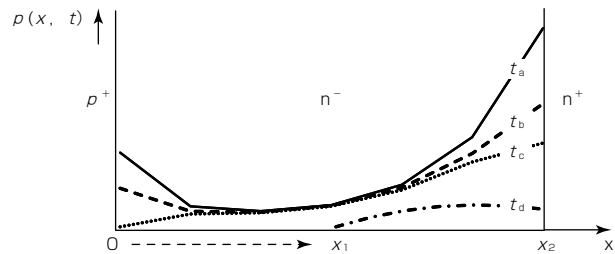


図5. リカバリー電流波形の比較



(a) D<sub>1</sub>: 配線インダクタンス10.7nH



(b) D<sub>2</sub>: 配線インダクタンス18.5nH

図6. キャリア濃度分布

れだけの冷却が必要かわかるため、最適な冷却機構の設計が可能となる。

#### 4. む す び

本稿ではパワー半導体素子、特にpinダイオードなどのバイポーラ素子の物理モデルについて述べた。半導体内部におけるキャリアの挙動といった物理現象をモデル化することによって、高精度な素子モデルが得られることを示した。また、物理モデルを用いた動作特性の解析例を紹介し、高精度な物理モデルが設計段階でのスイッチング波形解析、損失評価に有効であることを示した。

#### 参考文献

- (1) 遠山 喬, ほか: 静特性と動特性の統合評価に基づくパラメータ抽出手法—pinダイオードモデルへの応用—, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-10-015 (2010)
- (2) 杉本貴之, ほか: デバイスモデルを用いた並列接続pinダイオードの動作特性—キャリアの挙動によるリカバリー特性の解析—, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-11-017 (2011)