

SiCパワーデバイスに向けた新しい解析モデル、シミュレーション精度の大幅改善で普及を後押し

SiC(炭化ケイ素)パワーデバイスを搭載する用途が着実に増えている。既に太陽光発電用パワーコンディショナや産業用インバータなどで採用が始まっており、今後は電気自動車やプラグインハイブリッド車に向けたインバータや車載充電器などでも使われる見込みだ。

順調に歩みを進めるSiCパワーデバイス。しかし、その未来にも課題はある。その一つが「SiCパワーデバイスが持つ性能を最大限引き出す電源回路の設計には高いノウハウを必要とする」ことだ。

一般にSiCパワーデバイスは、既存のSiパワーデバイスに比べると、変換効率を高められる、高周波/高速動作が可能のため電源回路を小型化できる、という2つのメリットがある(図1)。ところが、SiパワーデバイスをSiCパワーデバイスに置き換えただけでは、これらのメリットは享受できない。SiCパワーデバイスの特性を考慮して回路設計しなければ、性能を十分に引き出せないからだ。SiCパワーデバイスを採用したものの、得られる性能はSiパワーデバイスと同程度。これでは、まさに「宝の持ち腐れ」だ。

解析モデルの高速スイッチング特性が課題

この技術課題を解決する方策の1つに、シミュレーション技術の活用がある。開発段階で、設計した電源回路の動作をコンピュータ上で解析し、その結果に応じて改善する。これを繰り返すことで、電源回路の最適設計が可能となり、SiCパワーデバイスの性能を引き出せるようになる。

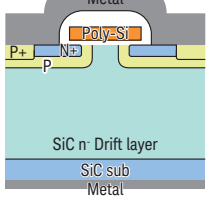
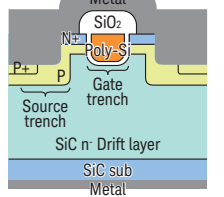
ただし、この方策を使うにも従来は課題があった。それは、SiCパワーデバイスの高精度な解析モデルが存在しないことだ。高精度な解析モデルを使わなければ、正確なシミュレーション結果は得られない。従って、電源回路設計の改善は望むべくもない。SiCパワーデバイスのユーザーから、解析結果と実測値が合わないという声が実際に上がっていた。

パラメータ導出に関する3つの工夫

SiC MOSFETの新しい解析モデルの開発の出発点は「Angelovモデル」である。これは高周波デバイスの動作を記述する多項式モデルだ。これをベースにSiC MOSFETの特性に合うように修正を加えて、多項式の変数(パラメータ)を合わせ込んだ。ここでのポイントはパラメータの導出方法だ。今回は、3つの工夫を施すことで解析モデルの精度を高めた。

1つ目は、I-V(電流-電圧)特性の導出だ。従来、SiC MOSFETのI-V特性は大電流で低電圧な領域と、高電圧で小電流の領域しか測定していなかった。大電流で高電圧の飽和領域で測定していなかったのは、デバイスが発熱してしまうためだ。もちろん、Siパワーデバイスでも測定できないが、「飽和領域では電流値はほぼ一定」という特性が知られていたため、大電流で低電圧な領域と高電圧で小電流の領域の測定結果から、飽和領域の特性を高い

図1 低オン抵抗が特徴

| Generation | 2 nd generation SiC-MOSFET | 3 rd generation SiC-MOSFET |
|------------|--|---|
| Structure | Planner gate (DMOS)  | Trench gate (UMOS)  |
| RonA 1200V | 8.5 mΩcm ² | 4.1 mΩcm ² |
| RonA 650V | 6.5 mΩcm ² | 3.1 mΩcm ² |

現在ロームは、トレンチ・ゲート構造を採用した第3世代品を製品化している。オン抵抗は、第2世代品の約半分と低い。

従来、SiCパワーデバイスの解析にはSPICEモデルを使っていた。これは既に広く普及しており、Siパワーデバイスでは高い精度が得られていた。しかし、SiCパワーデバイスでは実測値と合わない。具体的には、スイッチング特性が合わないのだ。最大の理由は、高速なスイッチング波形に含まれる高周波成分に対する、SiCパワーデバイス特有の特性やパッケージの寄生素子などの影響を十分に考慮していなかった点にある。

この問題を解決すべく、ロームは高周波分野での測定やシミュレーションに長年の経験があるキーサイト・テクノロジーに解析モデルの相談をした。なお、モデル化の対象は同社のSiC MOSFET「SCT2080KE」である。

精度で見積もれた。

SiC MOSFETでも、これまではSiパワーデバイスと同様に見積もることで飽和領域の特性を求めていた。しかし、それでは解析結果と実測値が合わない。そこで、飽和領域のI-V特性を測定してパラメータの導出を試みた。

いかにして測定するのか。ロームはスイッチング波形から正確にI-Vカーブを導出する手法を開発した。従来は、矩形波状の電圧/電流波形を印加していたため、大きな熱が発生していた。スイッチング波形ならば、高電圧と大電流が同時に印加される期間は極めて短い。このため発熱量を抑えられる。

具体的な導出方法を図2に示す。ドレイン電圧V_{ds}を印加した状態で、ゲート電圧V_{gs}がしきい値を超える(A点)と、ドレイン電流I_d

が増え始める。そしてB点に達するとドレイン電流 I_d の増加は止まり、ゲート電圧 V_{gs} は一般に「プラトー電圧」と呼ばれる V_p の地点で保持され、ドレイン電圧 V_{ds} はC点を目掛けて減少していく。

ここで重要なのはB点だ。B点では、ドレイン電圧 V_{ds} を印加した（飽和した）状態でドレイン電流 I_d が流れている。つまり、高電圧で大電流の飽和領域と同じ状態と言える。従って、B点で V_{ds} や I_d 、 V_{gs} を測定すれば、飽和領域のI-V特性を測定できる。実際の測定では、 V_{ds} と I_d を設定し、その条件下で V_{gs} を測定する。 V_{gs} は、比較的長い期間一定になるプラトー電圧を使うことで高精度での測定が可能になった。こうして求めたパラメータを使うことで、ターンオン波形の解析結果と実測値を一致させることに成功した(図3(a))。

ただし図3(a)を見ると、ターンオフ波形の解析結果と実測値はズレている。これを解決するのが2つ目の工夫だ。

従来は、SiC MOSFETがオフ時の静電容量だけを測定し、解析モデルに適用していた。しかし、ターンオフ波形が合わない。そこでSiC MOSFETのスイッチング特性を決める帰還容量 C_{gd} のオンからオフに変化する際の値と、オフ時の値が違うのではないかと考え、オフ時に加えてオン時の容量も測定することにした。実際には、SiC MOSFETを順方向にバイアスした際のSパラメータをネットワークアナライザで測定し、この結果からオン時の容量を求めた。こうして求めた解析モデルでシミュレーションした結果、ターンオフ波形も実測値と一致させることが可能になった(図3(b))。

3つ目は、SiC MOSFETのパッケージや、それを実装するプリント基板の解析モデルを作成したことである。SiC MOSFETはスイッチング速度が速いので、パッケージやプリント基板の寄生インダクタンスや浮遊容量の影響が大きいからだ。パッケージは、キーサイト・テクノロジーの3次元電磁界シミュレータ「EMPro」を使って等価回路のパラメータを抽出。プリント基板については、同社の電磁界シミュレータ「ADS Momentum」でSパラメータを求めた。

SiCパワーデバイスの普及を後押し

ロームは、SiC MOSFET用の評価ボード(DC-DCコンバータ回路)を使って、開発した解析モデルの精度を検証済みである(図4)。具体的には、高周波回路シミュレータ「ADS」にSiC MOSFETの解析モデルとパッケージの等価回路モデル、プリント基板のSパラメータを入力して、シミュレーションを実行した。その結果、実

測値とほぼ一致する結果が得られた。つまり、SiCパワーデバイスの普及を阻害する技術課題を高精度のSiCモデルと高周波特性を考慮することにより解決することに成功したことになる。今回の解析モデルの開発は、SiCパワーデバイスの普及を後押しすることになるだろう。このSiCモデルは「ADS2017」に搭載済みだ。モデルパラメータはロームのWebサイトからダウンロードできる。

図4 SiC MOSFET搭載の評価ボード



同社の「SCT2080KE」で構成したハーフブリッジ回路評価基板。ダブルパルス試験やDC-DCコンバータにおけるデバイス評価が可能だ。

図2 飽和領域のI-V特性を導出

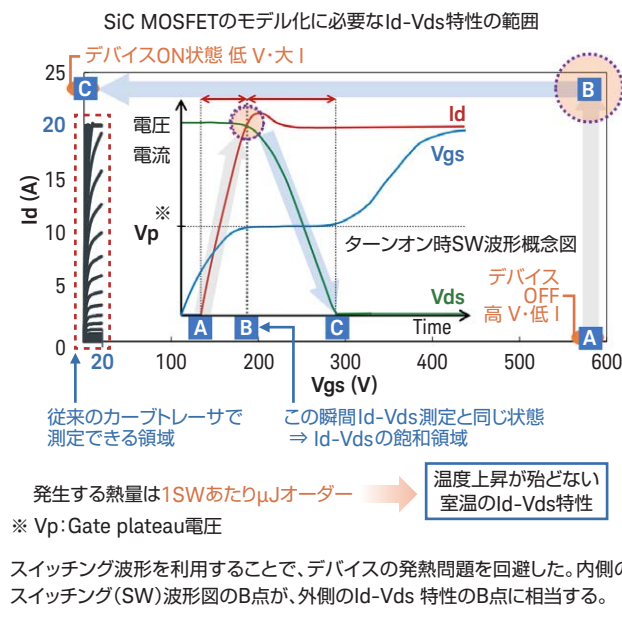
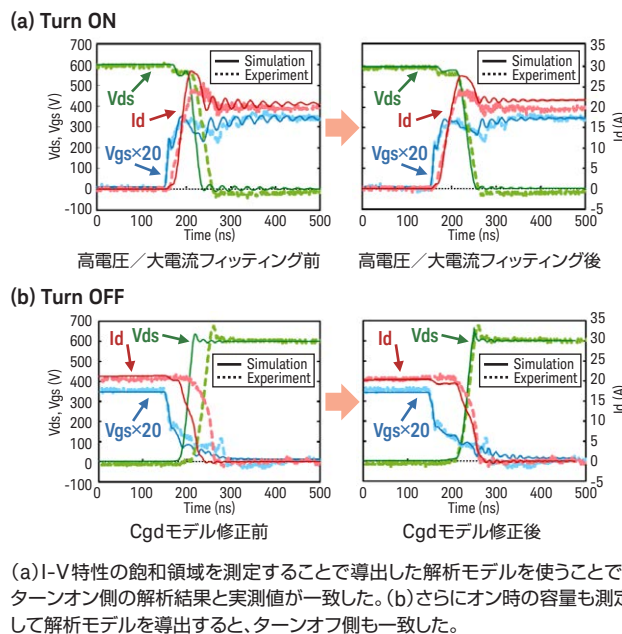


図3 実測のSW波形を高精度に再現



ローム株式会社

〒615-8585 京都市右京区西院溝崎町21
TEL : 075-311-2121 (大代表)
<https://www.rohm.co.jp/>

キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1
TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)
Email contact_japan@keysight.com
ホームページ www.keysight.co.jp