

SiC-MOSFET を用いたモジュール製品の検討

User Friendly Design for SiC-MOSFET Module

佐藤 嘉洋*
Yoshihiro Sato

横川 浩史*
Hiroshi Yokokawa

概要 エコ・省エネの志向が益々強くなっている。市場では、再生可能エネルギーを利用するインバータやモータなどの電気機器が急増している。これらシステムでは、高効率・低損失に寄与する半導体デバイス製品を強く求めている。この要求に対して、我々は化合物半導体であるSiC-MOSFETの開発に取り組み、高電圧化、大電流化、高周波化の要求を満足するパワーデバイス製品を市場へ拡販する活動を進めている。今回SiC-MOSFETをモジュールパッケージに搭載する試作を実施し、その試作品の評価結果を得たので報告する。

1. まえがき

近年、省エネルギー化を進めるため、高効率パワーデバイスが求められている。高効率パワーデバイスを実現する素材としてSiより優れた物性を持つワイドバンドギャップ半導体に注目が集まっている。

SiCはワイドバンドギャップ半導体の一つであり、Siデバイスより容易に高耐圧対応でき、高温領域で安定動作可能で、低損失なデバイスが実現できる。当社では1200V耐圧・SiC-MOSFETの開発に取り組み、トレンチゲート構造を採用することで良好なデバイス特性を得ている⁽¹⁾。

また近年増加する車載、白物家電を代表とする市場では、エコ・省エネ実現のため、システム全体の小型化が加速しており、その進化に必要なインバータやモータを制御するためのパワーデバイスには、高効率・低損失なパワーデバイスが不可欠である。

我々は上述の市場動向から今後の三相負荷システムで必要となる製品機能を挙げ、その特徴を実現するためのパワーデバイスを提案する。本稿では開発中のSiC-MOSFETを搭載したモジュールパッケージ(以下SiC-IPM)を検討し、提案するSiC-MOSFETの有効性を示す。

2. SiC-IPMのコンセプト

- 三相負荷駆動で要求される主要な特徴を下記に示す。
- ・三相負荷制御に適した小型製品 (SiC-MOS, IC 他, 搭載)
 - ・大電流駆動可能な製品 (I_o : 20A (MAX))
 - ・高周波 PWM 制御可能な製品 ($f_c > 20\text{kHz}$, 40kHz (MAX))
 - ・高温動作可能な製品 ($T_j > 175^\circ\text{C}$, 200°C (MAX))
- 上記特性をIPM製品で得るため、必要となるパワーデバイスに関する結果を以下に報告する。

3. 試作品の概要

今回検討したSiC-IPMの内部構成図を図1に、回路ブロック図を図2に示す。SiC-IPMの上述コンセプトを確認するため、①、②以外は、既存品(以下IGBT-IPM)と

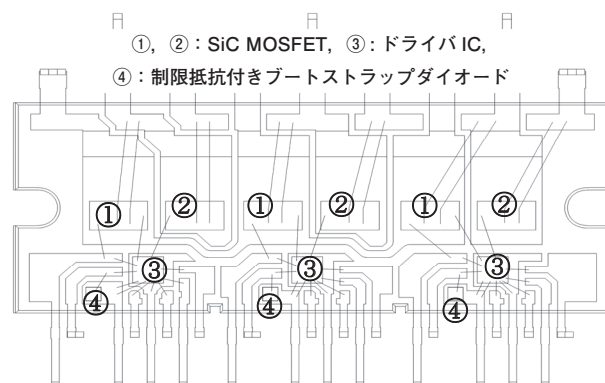


図1 試作品内部構成図

* デバイス事業本部 技術本部 マーケティング統括部
SiC 技術部開発2 課

同一の部品を使用して試作した。①、②のデバイスは、650V耐圧のIGBT-IPMで搭載されるIGBTと同一チップサイズである。また、IGBT+FRDで構成する機能は、1200V耐圧のSiC-MOSFETのみで実現する。パッケージは部品搭載が可能であり、175°C/30A評価できるパッケージを活用した。

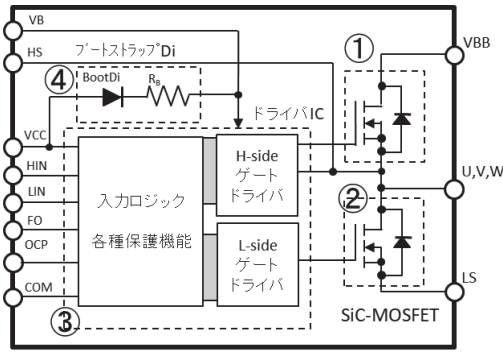


図2 ブロック図 (1/3回路)

4. 試作品の特性

A. 導通損失の確認 (ON 電圧, ダイオード順方向電圧)

図3, 図4に各IPMのケース温度 $T_c = 25^\circ\text{C}$, 150°C におけるオン電圧-オン電流特性を示す。

$T_c = 25^\circ\text{C}$, オン電流 $I_D, I_C = 20\text{A}$ では、SiC-IPMの損失はIGBT-IPMと比較し、損失が52%低減する。また $T_c = 150^\circ\text{C}$ では損失が14%低減することを確認した。

本特性から出力電流20AのSiC-IPMでは、さらにチップサイズを小さく設計することが可能である。

図5に $T_c = 150^\circ\text{C}$ でのダイオード順方向電圧-ダイオード電流特性を示す。試作品の搭載チップ構成からSiC-IPMでは、SiC-MOSFETのボディダイオードの特性を示す。

またIGBT-IPMでは再生用ダイオードとして用意したパワーデバイスFRDの特性を示す。

全温度範囲でIGBT-IPMの順方向電圧が低いことを確認した。本特性の違いは、Siに対してSiCのバンドギャップが広いことに起因する。ただし本特性は、インバータやモータの制御方法により、動作時間を最小化しON電圧に依存した制御が可能であるため、システムの消費電力低減が可能である。

B. スイッチング損失の確認 (ターンオン, ターンオフ)

各IPMのスイッチング損失をIPM出力端子へインダクタ負荷を接続して評価をおこなった。

表1に各IPMに対するターンオン, ターンオフの波形を示す。上記波形は下記の条件で確認した。

条件: インバータ電圧 $V_{BB} = 300\text{V}$

制御電圧 $V_{CC} = 20\text{V}$, 出力電流 $I_O \sim 30\text{A}$

ケース温度 $T_c = 150^\circ\text{C}$, 誘導負荷 $L = 5\text{mH}$

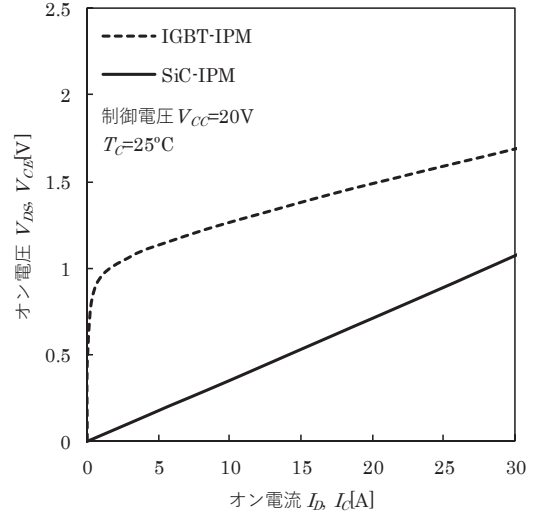


図3 オン電圧特性 ($T_c = 25^\circ\text{C}$)

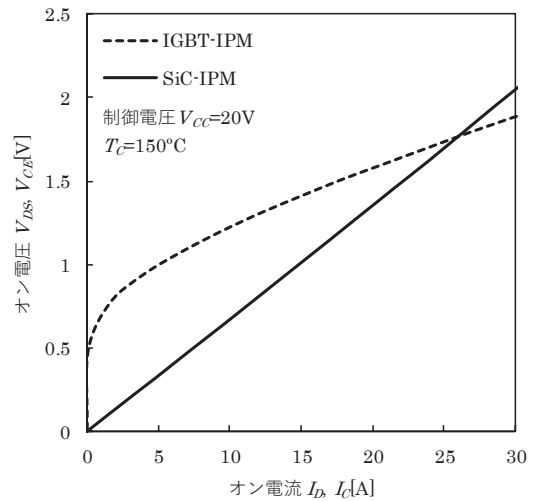


図4 オン電圧特性 ($T_c = 150^\circ\text{C}$)

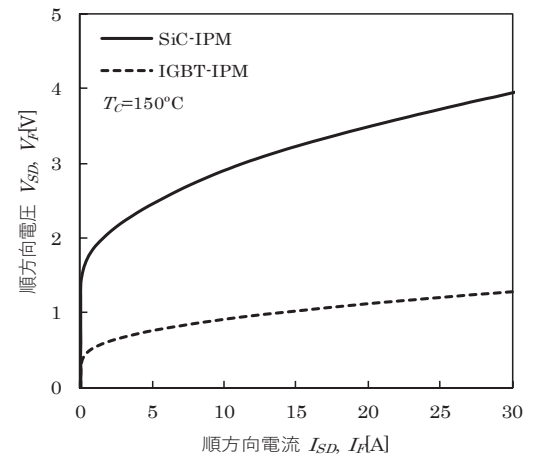


図5 順方向電圧特性

表1 スイッチング波形

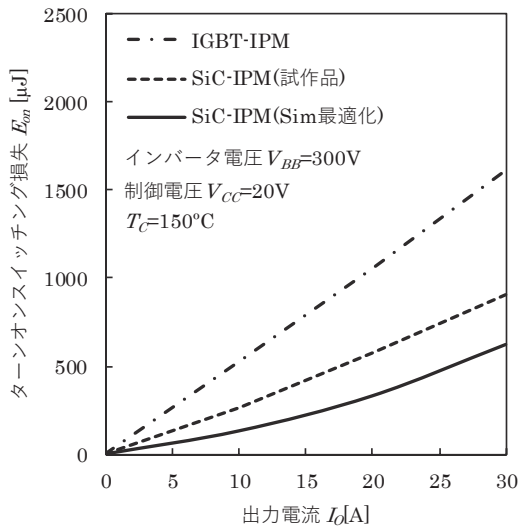
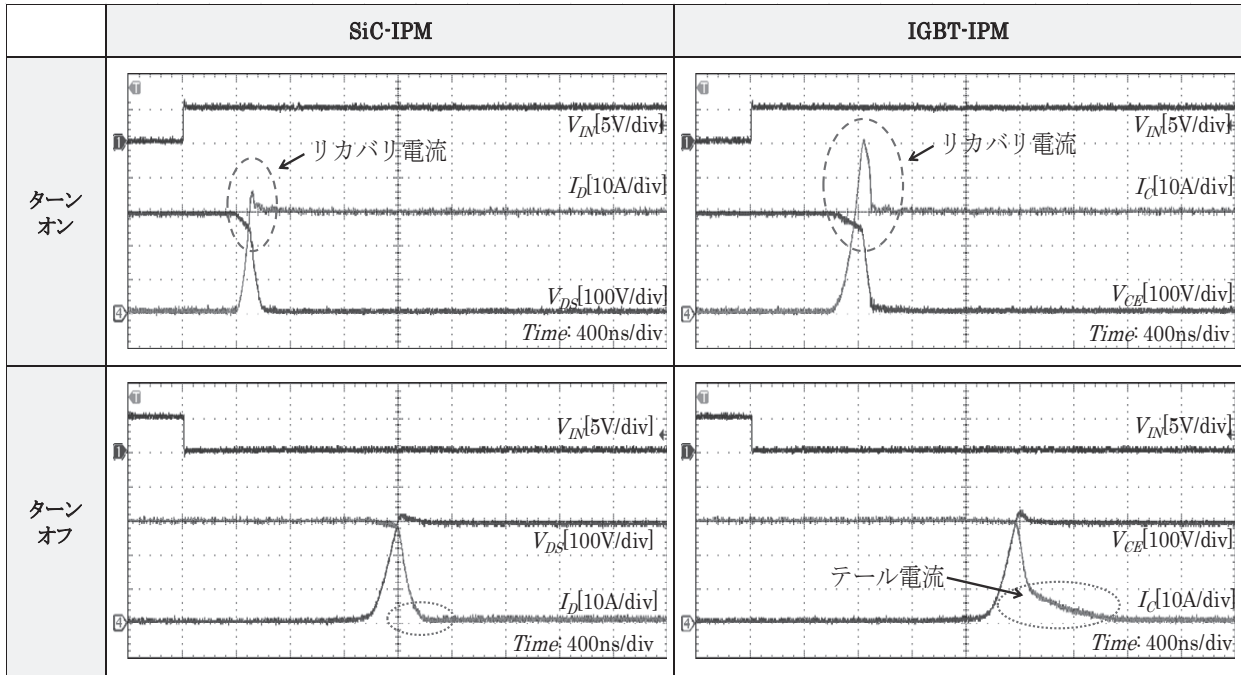


図6 スイッチング損失 (ターンオン)

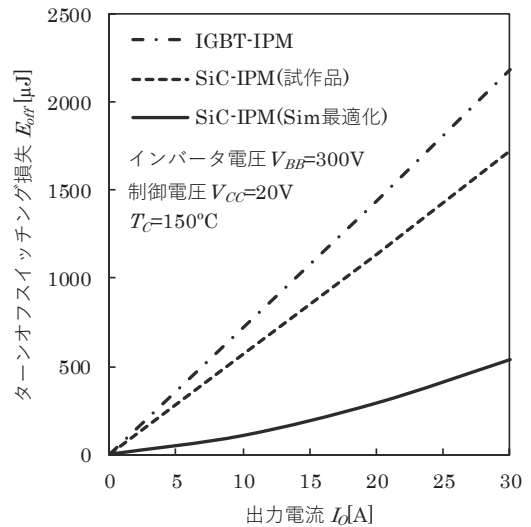


図7 スイッチング損失 (ターンオフ)

ターンオン時の動作では、いずれのIPMもリカバリ電流が流れていることを確認した。確認されたりカバリ電流は、SiC-IPMでは6A、IGBT-IPMでは21Aであった。また、ターンオフ時の動作ではIGBT-IPMではテール電流が発生していることを確認した。上記のスイッチング波形を全出力電流領域において確認した結果、SiC-IPMの損失がIGBT-IPMより小さいことを確認した。低減した最大損失は、 E_{on} : 44%、 E_{off} : 21%である。(図6スイッチング損失(ターンオン)、図7スイッチング損失(ターンオフ)を参照)

またSiC-IPMに搭載したドライバICをSiC-MOSFETに適した回路へ変更することで、最大 E_{on} : 61%、 E_{off} : 81%まで低減することをシミュレーションにて確認した。

C. 高温特性の確認 (出力端子リーク電流)

図8にIPM出力端子のリーク電流温度依存性を示す。IGBT-IPMでは、 $T_c=75^\circ C$ 付近からリーク電流が指数関数的に増加する。SiC-IPMの特性は $T_c=175^\circ C$ でもリーク電流は $1\mu A$ 以下であり、温度による特性変動が非常に少ない良好な結果である。

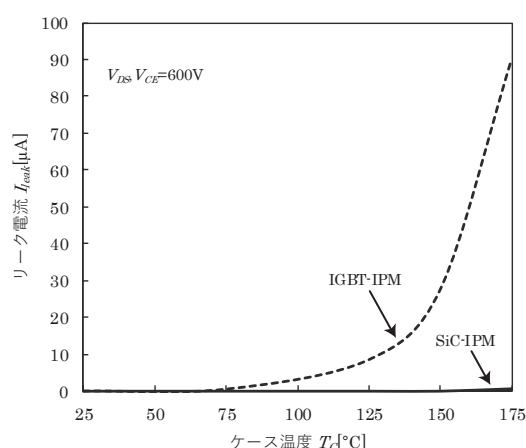


図8 リーク電流温度依存性

D. インバータ動作確認について

SiC-IPM 試作品のアプリケーション動作の一つとして、三相インバータの動作確認をおこなった。図9にインバータ動作代表波形を示す。また動作条件を下記に示す。

条件：インバータ電圧 $V_{BB} = 300V$ ，出力電流 $I_o = 12A_{rms}$
 制御電圧 $V_{cc} = 20V$ ，ケース温度 $T_c = 125^\circ C$
 二相変調正弦波駆動，キャリア周波数 $f_c = 20kHz$

図9よりSiC-IPMは、誤動作なく正常な動作を確認した。また下記動作波形を元に、IPMとしての全損失計算を実施した。図10にIPM総損失比較を示す。SiC-IPMに搭載されるドライバICの最適設計により、SiC-IPMは、IGBT-IPMに対しておよそ65%、損失低減することをシミュレーションにて確認した。

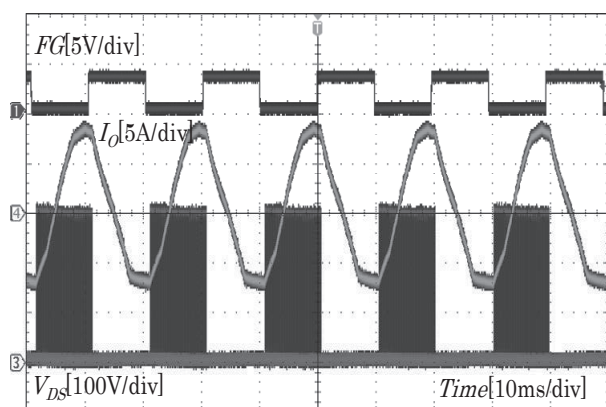


図9 インバータ動作波形

この結果から小型もしくは低損失IPMがSiC-MOSFETを使用することで容易に実現できることを確認した。

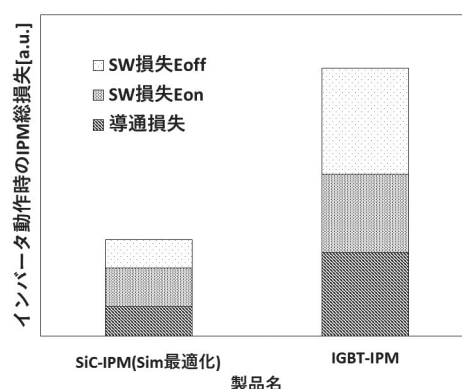


図10 IPM 総損失比較

5. 結果

今後市場より要求されるIPMの特徴を実現するためには、本SiC-MOSFETが適していることが確認された。

- ・三相負荷制御に適したパッケージへの実装

モジュールパッケージに複数のSiC-MOSFETの実装を実施した。パッケージの構造，材料，搭載部品の最適な設計により出力電流20A製品に適した，超小型，高周波，高温駆動可能なSiC-IPMが期待できる。

- ・大電流，高周波での制御 (20A, 40kHz (MAX))

SiC-IPMはIGBT-IPMと比較し，全温度範囲にて，導通損失を低減できることを確認した。またスイッチング損失では最大 E_{on} : 44%， E_{off} : 21%の低減効果を確認した。また，シミュレーション結果ではドライバICを最適設計することで，最大 E_{on} : 61%， E_{off} : 81%の低減が見込まれる。これはSiC-MOSFETチップの小型化だけではなく，今後のシステムに搭載される部品の小型化へ貢献できる。

- ・高温領域での動作 ($T_j > 175^\circ C$ ， $200^\circ C$ (MAX))

SiC-IPMでは，パッケージ温度 $175^\circ C$ 以上でも出力リーク電流が抑えられている。これはIGBT-IPMでは実現困難である $175^\circ C$ 以上の温度対応へ向けた可能性を示唆する。

以上より，今後開発されるIPM製品で必要となる特性を満足するためのパワーデバイスが提案可能となった。

6. むすび

今後はインバータ以外のアプリケーション評価を実施し，SiC-IPMの用途拡大を示したい。またSiC-MOSFETに適したドライバICの提案や高温対応のモジュールパッケージの検討を通じて，SiCデバイスを用いた製品の付加価値をさらに高めていきたい。

参考文献

熊倉：サンケン技報，vol 51，p.29-32，(2019. 11)