

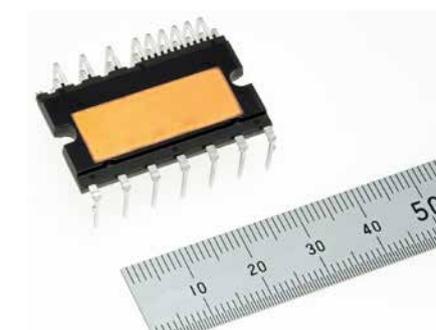
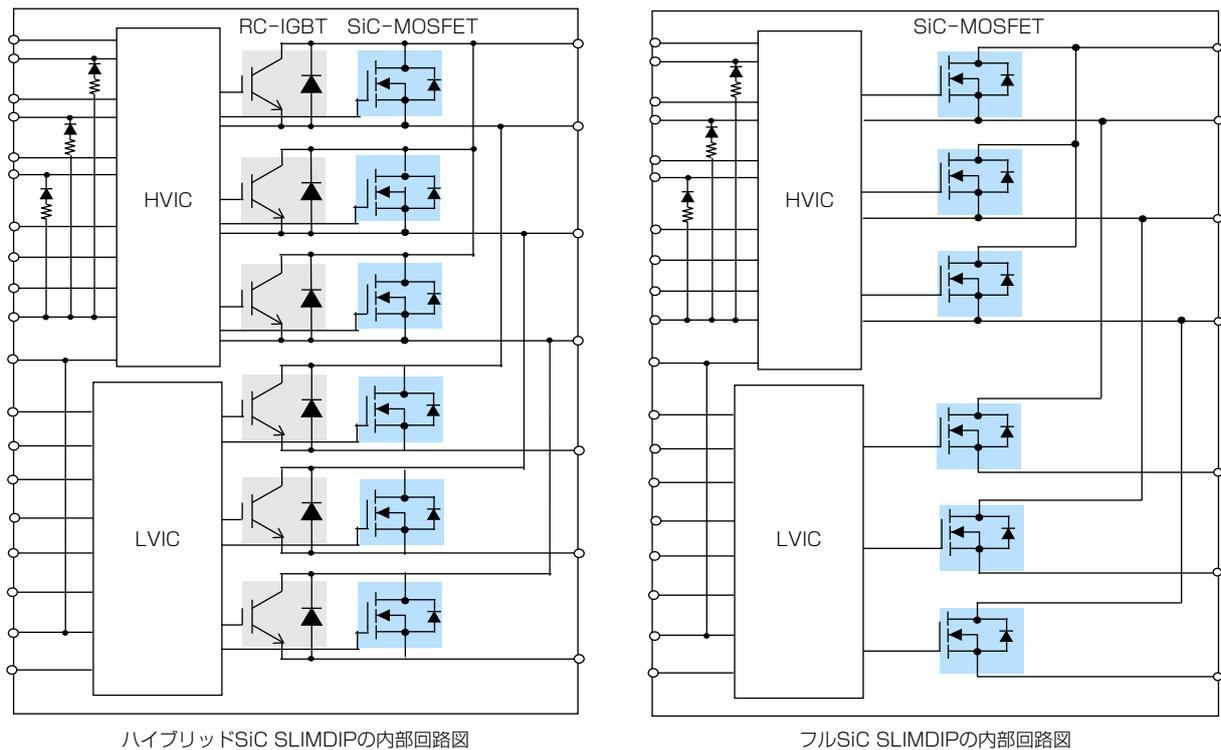
家電や小容量インバーターの高効率化を支援する SiC-MOSFET搭載“SLIMDIPシリーズ”

“SLIMDIP Series” with SiC-MOSFETs to Support High Efficiency in Home Appliances and Small-Capacity Inverters

*パワーデバイス製作所

要旨

三菱電機は、家庭用電化製品向けパワー半導体モジュール“SLIMDIP”シリーズに、初めてSiC(シリコンカーバイド)技術を採用した“フルSiC SLIMDIP”と“ハイブリッドSiC SLIMDIP”を開発した(製品定格はどちらも15A/600V)(図1)。SiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor:金属酸化膜半導体製の電界効果トランジスタ)を搭載したこの製品は、従来のSi(シリコン)RC-IGBT(Reverse Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor:IGBTとダイオードを1チップ化したもの)を搭載した製品と比べて電力損失を大幅に低減し、インバーターの省エネルギー性能を飛躍的に向上させる。また、既存製品と同一基板で置換可能な設計を採用しており、導入障壁を低く抑えつつ短期間で普及を促進する。当社はこの製品の開発を通じて、空調などの電力消費量の削減、ピーク電力の抑制、及び温室効果ガス排出削減に先導的に寄与し、社会全体の脱炭素化と電力インフラ負荷軽減に貢献する⁽¹⁾⁽²⁾。



SLIMDIPシリーズの外観(18.8×32.8×3.6(mm))

HVIC : High Voltage IC
LVIC : Low Voltage IC

図1 - SiC-MOSFET搭載SLIMDIPの外観及び内部回路図

1. ま え が き

地球温暖化対策と脱炭素化の流れを受けて、世界的に家電の省エネルギー規制が強化されてインバーター化が進展している。家電のインバーター基板に搭載されるパワー半導体モジュールは、圧縮機やファンなどのモーターのインバーター動作に不可欠であり、その高効率化はCO₂削減に直結する重要課題である。

当社は1997年にトランスファーモールド型の小容量パワー半導体モジュール“DIPIPM”を製品化し、インバーター家電の普及による省エネルギー化を牽引(けんいん)してきた。2015年には従来よりもコンパクトなSLIMDIPを市場投入し、制御基板の面積低減などのメリットから次世代のデファクトスタンダード(業界標準)のパッケージになった。また、2010年には世界初^(注1)のSiC製ダイオードを搭載したモジュールを家庭用エアコンに搭載し、2016年にはSiC製MOSFETを搭載したモジュールを発売するなど、SiC採用による省エネルギー化も推進してきた。

このたび、当社は、家庭用エアコンや小容量インバーター機器の省エネルギー性能向上を目的に、SiC技術を採用したフルSiC SLIMDIP及びハイブリッドSiC SLIMDIPの2品種を開発した。これらの製品は既存インバーター資産を流用しつつ高効率化を実現できるため、環境負荷低減と経済性を両立する効率的なソリューションと位置付けている。これらの製品をエアコンに搭載する際の構成イメージ^{図2}に、SiCウエハー・インバーター基板の外観を^{図3}に示す。

(注1) 2010年8月24日現在、当社調べ

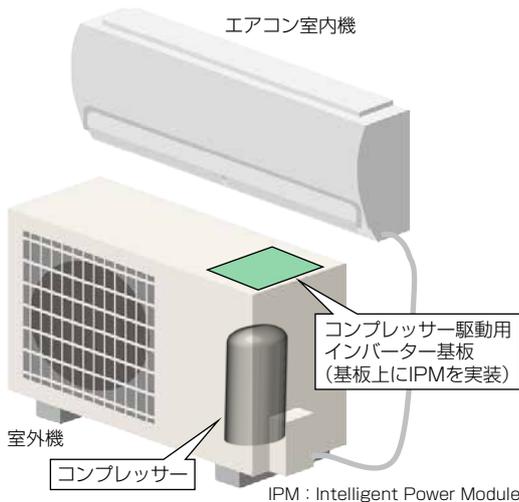


図2-エアコンの室内機/室外機構成イメージ

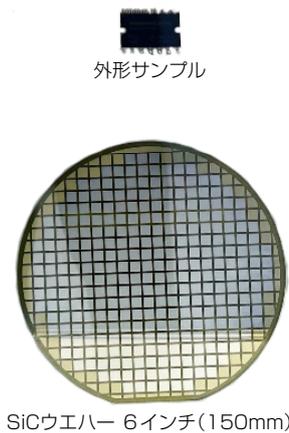


図3-開発製品のSiCウエハー・インバーター基板



家庭用エアコン コンプレッサー駆動用基板

2. SiC SLIMDIP

この章では、フルSiC SLIMDIPとハイブリッドSiC SLIMDIPの概要を述べる。

2.1 フルSiC SLIMDIPの概要

フルSiC SLIMDIPは、小容量インバーター基板用IPMでデファクトスタンダードになっているSLIMDIPパッケージに、初めてSiCパワー半導体デバイス(SiC-MOSFET)を搭載した。SiC-MOSFET搭載によってスイッチング損失及びオン抵抗を大幅に低減する。損失低減による温度上昇の抑制に伴って、従来品と同等サイズで高出力化が可能になり、更に大容量の家電や小型産業機器への適用などが可能になる。なおこの開発製品は、端子配列や駆動電源電圧などが従来品と同一であり、現行品のインバーター基板にそのまま乗せ換えるだけで電力損失を大幅に低減可能になる。

2.2 ハイブリッドSiC SLIMDIPの概要

ハイブリッドSiC SLIMDIPは、家電用途で業界初^(注2)、Si RC-IGBTとSiC-MOSFETを搭載し、2チップを並列駆動する。新規開発した駆動用ICは、駆動信号に対して並列する2チップのスイッチングのタイミングを制御し、SiC-MOSFETへの過渡的な電流集中を抑えることで、SiC-MOSFETの面積を縮小しコストメリットを追求した。

従来の駆動回路を用いて並列接続されたSiC-MOSFETチップとRC-IGBTチップを駆動する場合、SiC-MOSFETチップがRC-IGBTチップよりも先にオンする可能性があるため、ハードスイッチングやSiC-MOSFETへの電流集中が懸念される。そこで、ハイブリッドSiC SLIMDIP向けに、RC-IGBTチップとSiC-MOSFETチップにそれぞれ印加されるゲート駆動パルス間に時間遅延を設けることで、ゲート駆動信号の順次制御を実現する駆動ICを開発した(図4)。この遅延制御によって、SiC-MOSFETチップのターンオン状態及びターンオフ状態でのハードスイッチング動作を回避し、SiC-MOSFETチップのスイッチング損失を防止することでソフトスイッチングを実現する。これによって、SiC-MOSFETチップは直流損失だけを発生させて、必要なサイズまで最小化することが可能になる⁽³⁾。

(注2) 2025年4月15日現在、当社調べ

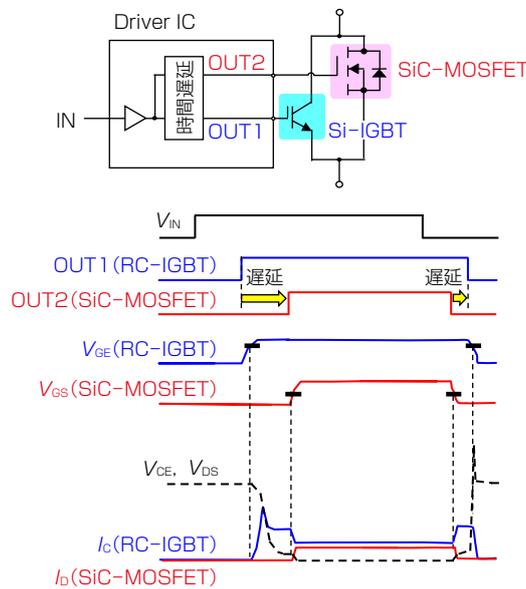


図4-駆動回路とタイミングチャート

3. SiC SLIMDIPシリーズの特長

この章では、SiC SLIMDIPシリーズの特長を述べる。

3.1 IPMの電力損失の低減

Si RC-IGBTを搭載した現行SLIMDIPシリーズ(代表形名: SLIMDIP-L)とハイブリッドSiC SLIMDIP(形名: PSH15SG1G6)及びフルSiC SLIMDIP(形名: PSF15SG1G6)の3品種のIPMの電力損失の比較結果を図5に示す。ハイブリッドSiC SLIMDIPは、SiC-MOSFET搭載によってオン抵抗を低減し、IPMの電力損失を従来品と比べて約47%削減する。なおスイッチング損失は並列搭載するRC-IGBTが担保する。フルSiC SLIMDIPは、SiC-MOSFET搭載によってスイッチング損失及びオン抵抗を低減し、IPMの電力損失を従来品に比べて約79%低減する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3.2 高出力化

ヒートシンク温度 T_f を100℃に固定した場合に、安全動作可能なパワーチップの平均動作接合部温度 T_j 及びチャンネル温度 T_{ch} が125℃以下で出力可能な電流 I_o をキャリア周波数20kHzまでの範囲でプロットする(図6)。損失低減による温度

上昇の抑制に伴って、従来品と同等サイズで高出力化が可能になるため、この製品は更に大容量の家電や小型産業機器への適用などが可能になる。特に全体的な電力損失が低減されたフルSiC SLIMDIPは、同定格のSLIMDIP-L(15A/600V定格)と比較して全キャリア周波数範囲で更に大きな出力電流を可能にするだけでなく、電流定格が更に高いSLIMDIP-X(20A/600V定格)と比較した場合でも、高キャリア周波数域で高い出力電流を実現する。

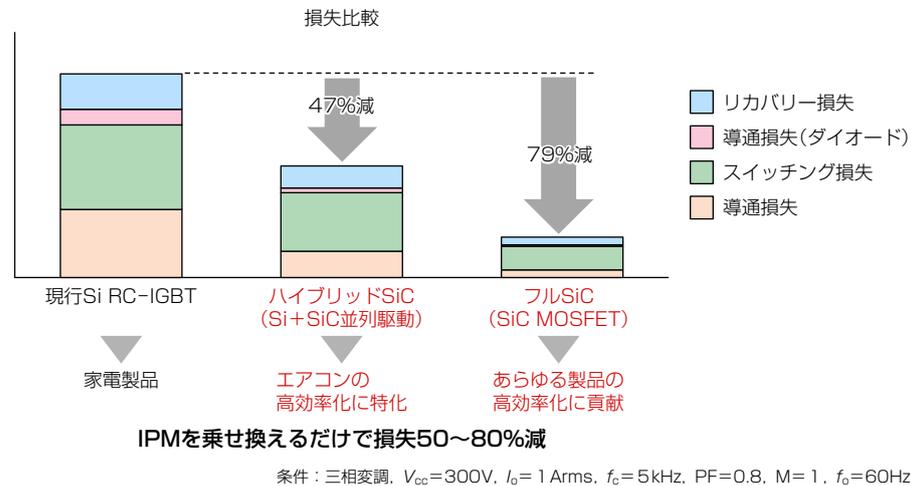


図5-IPMの損失計算

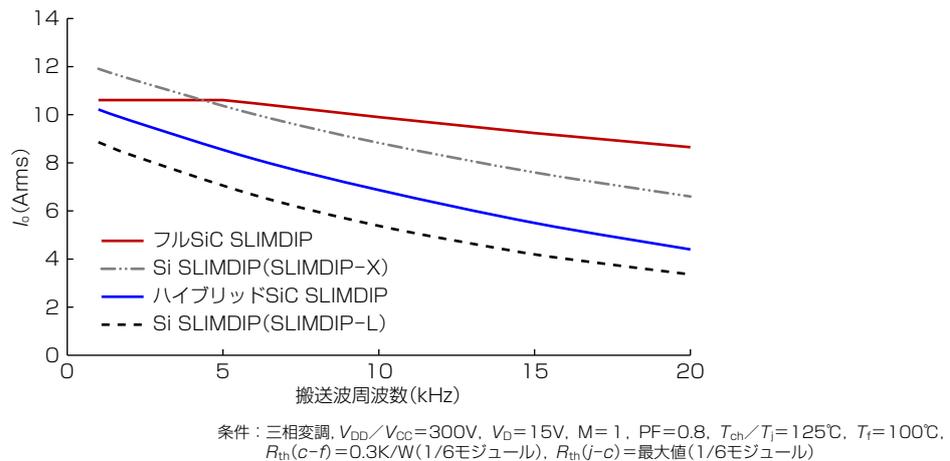


図6-出力許容電流とキャリア周波数特性

3.3 SiC SLIMDIPの電力損失低減効果

この開発製品の主な用途は、家庭用エアコンの室外機コンプレッサー駆動、洗濯機のドラム(洗濯槽)駆動、ファン、小型産業機器など、小容量モーターのインバーター駆動を想定している。SiC SLIMDIPは低負荷から高負荷の全電流範囲で、現行製品に対して電力損失を大幅に低減し、インバーターの高効率化に貢献する。ここでは例として、エアコンの室外機コンプレッサー及び洗濯機のドラム駆動を模擬した損失計算結果を次に示す。

エアコンの室外機コンプレッサー動作で、室内温度が設定温度に達した後の低負荷運転の時間が長く、効率検証の際の重要なファクターになる。低出力電流、かつ低スイッチング周波数での電力損失の比較結果を図7に示す。ハイブリッドSiC SLIMDIPは現行品と比較して最大42%、フルSiC SLIMDIPは最大82%、電力損失を低減する。

洗濯機のドラム駆動では、水と洗濯物が入った洗濯槽を回転させるフルパワー動作が、IPMの寿命計算で重要なファクターになる。高出力電流、かつ高スイッチング周波数での電力損失の比較結果を図8に示す。ハイブリッドSiC SLIMDIPは現行品と比較して最大25%、フルSiC SLIMDIPでは最大65%、電力損失を低減する。

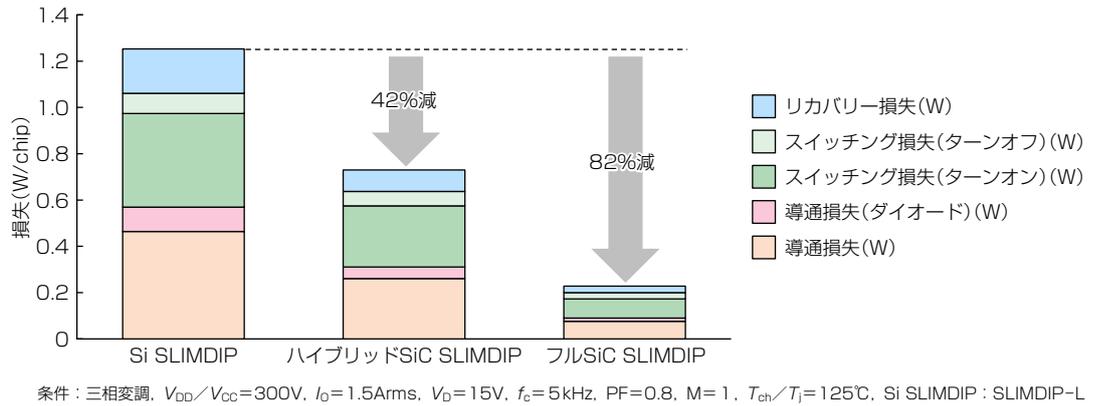


図7-エアコンの損失シミュレーション結果

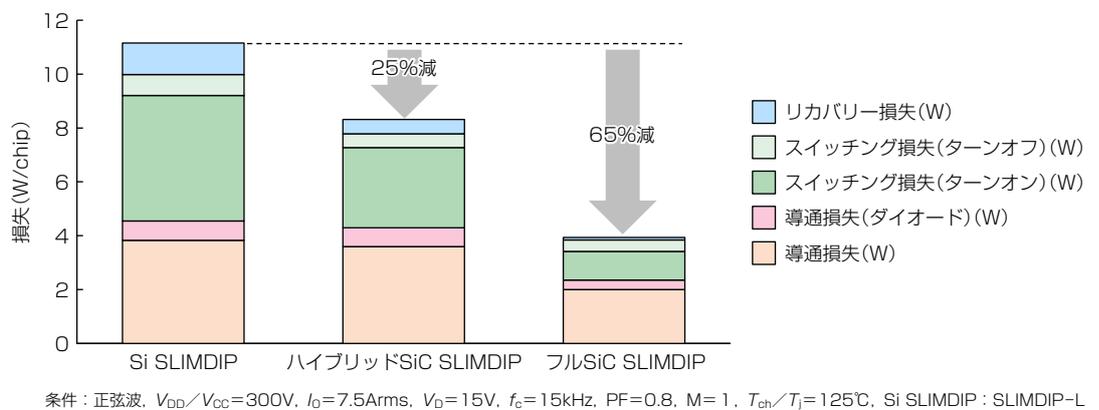


図8-洗濯機の損失シミュレーション結果

4. む す び

地球温暖化対策と脱炭素化の流れを受けて、世界的に家電の省エネルギー規制が強化されてインバーター化が進展する中、日本は家電製品の省エネルギー規制を推進しており、特に空調分野などで省エネルギー技術・性能で世界を牽引(けんいん)している。

当社は2021年からNEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の助成事業“脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム”を通じて、ハイブリッドSiC SLIMDIPに搭載する並列駆動技術、及び組立技術を開発した。また2027年に控える日本の家庭用エアコンの省エネルギー規制の大幅な引上げに備えて、更に高効率なフルSiC SLIMDIPも並行して開発した。この製品は2025年4月からサンプル提供を開始し、主要家電メーカーでの採用開始は2026年以降を見込む。この新製品は日本の産業界の技術水準向上に寄与し国際競争力強化に貢献する。また次世代のSiC-MOSFETチップを搭載した後続品種の開発を通じて、更なる環境負荷低減と経済性を両立する効率的なソリューションを家電や小容量インバーター向けに提供し、今後の世界的な省エネルギー規制強化の流れの中で、世界中の電力消費量の削減、ひいては脱炭素社会の実現に貢献する。

参 考 文 献

- (1) 柴田祥吾, ほか: RC-IGBT搭載パワーモジュール“SLIMDIPシリーズ”, 三菱電機技報, **90**, No.5, 307~310 (2016)
- (2) 高橋徹雄, ほか: 民生用RC-IGBTチップ技術, 三菱電機技報, **92**, No.3, 163~166 (2018)
- (3) Kawamoto, K., et al.: Optimization Techniques for Parallel-Connected Devices in IPMs for Consumer Use, 2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1569~1575 (2025)
- (4) Takakura, K., et al.: Full SiC SLIMDIP for High Efficiency Applications, PCIM Asia Shanghai Conference 2025, 264~269 (2025)
- (5) Takao, T., et al.: Parallel Operating SiC MOSFET and Si RC-IGBT in SLIMDIP for Higher Efficiency Air Conditioners, PCIM Conference 2025, 185~191 (2025)