

# SiCパワー半導体がリードする省エネルギー

佐藤克己\*  
山田順治\*\*

SiC Power Semiconductor Technologies Catering for Energy Saving

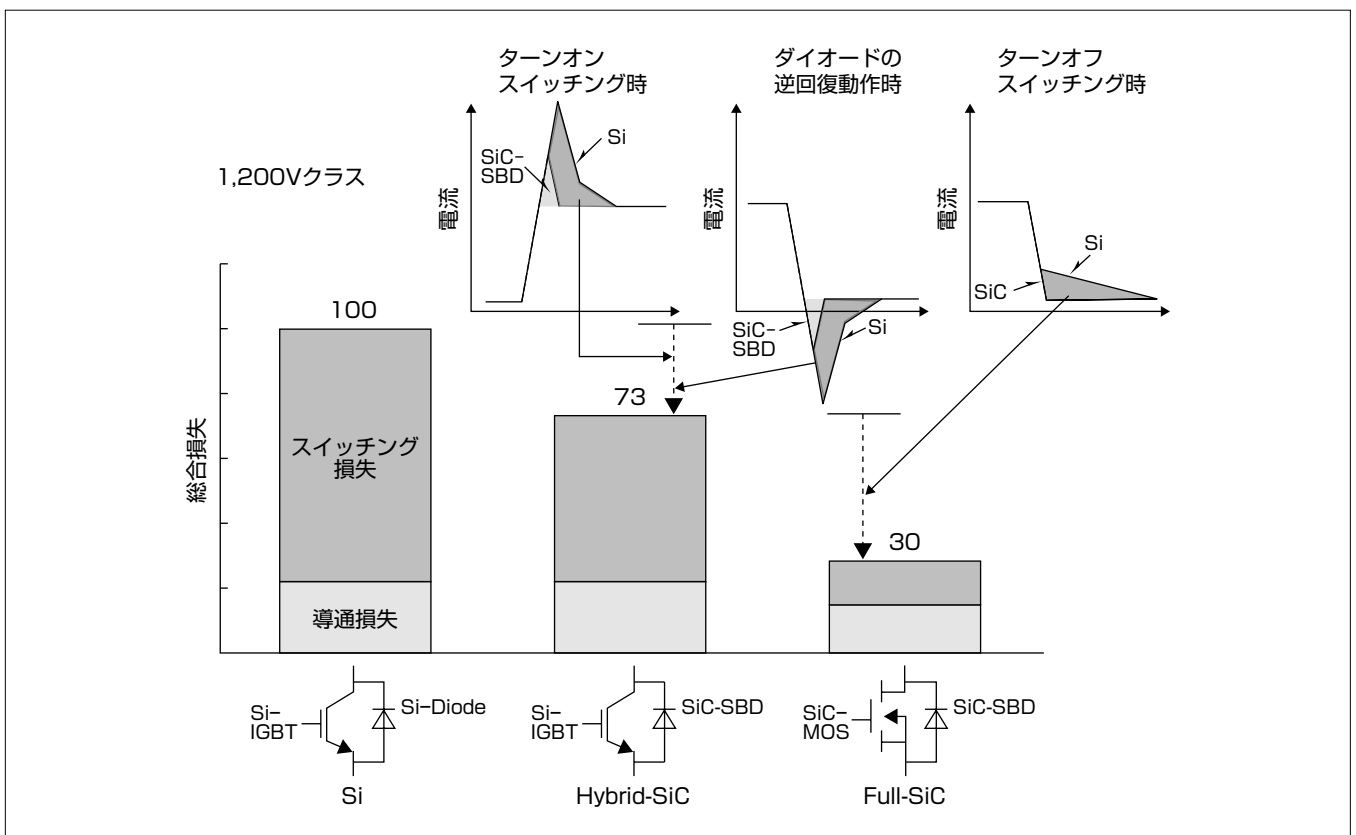
Katsumi Sato, Junji Yamada

## 要旨

資源・エネルギーは人間が生活する上で必要不可欠なものであるが、それらの消費は適切な措置をとらない場合、オゾン層の破壊、地球温暖化や酸性雨など、環境に様々な悪影響を及ぼすことが知られている。

また、新興国を中心にエネルギー消費量は増加傾向を強めており、低炭素社会の実現に向けて、パワーエレクトロニクス(以下“PE”という。)機器の一層の高性能化・高機能化に対する期待がますます高まってきている。特に1次エネルギーの40%が電気エネルギーに変換される日本では、1次エネルギーから電気エネルギーへの変換や、電気エネルギーから使用機器に適合した電気エネルギーへの変換にPEが用いられ、省エネルギー化に、更には環境保護に寄与している。

そのためPE機器のキーパーツであるパワーデバイスでも、低損失化、小型・軽量化が強く要求されており、従来のSi(Silicon)と比較して、低損失化や高周波動作を可能にするSiC(Silicon Carbide)などのWBG(Wide Band Gap)半導体の研究が精力的に進められている。三菱電機もSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)を搭載したHybrid-SiCモジュールを、また、SiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)とSiC-SBDを搭載したFull-SiCモジュールを製品化し、市場に投入している。これらのSiCデバイスの性能改善を継続していくとともに、PE機器サイドと連携して応用領域を拡大することで、一層の環境負荷軽減に努めていく。



## SiCパワーモジュール(Hybrid-SiCモジュール、Full-SiCモジュール)の損失改善効果

SiベースIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とダイオードを組み合わせたIGBTモジュールに対して、ダイオードをSiC-SBD化したHybrid-SiCモジュールでは、ダイオードの逆回復損失とIGBTのターンオン損失が低減され、当社シミュレーションで総合損失が73%に低減した。さらにIGBTをSiC-MOSFET化したFull-SiCモジュールではターンオフ損失及びDC損失が低減され、総合損失はIGBTモジュール比で30%にまで低減できる。

\*パワーデバイス製作所(工博) \*\*同製作所

1. ま え が き

当社のSiCデバイス開発の歴史は古く、1990年代から基礎開発を開始し、2000年代の実証評価を経て、2010年から量産化を目指したサンプル供給を開始した。一部の製品は既に量産化し、PE機器の省エネルギー化、小型化、軽量化に貢献している。

本稿では、当社のSiCモジュールの現状とそれらの応用について述べる。

2. SiCチップ

2.1 SiCチップ開発状況

当社が最初に市場に投入したのは、耐電圧600VのSBDチップである。SiC固有のプロセスと当社既存の半導体ノウハウを融合し、品質要求に応え得るプロセスフローを構築した。これらチップは当社のHybrid-SiCモジュール等に搭載し、実アプリケーションでの検証結果をフィードバックすることで、特性と品質を磨きあげ、現在は耐電圧600Vから3,300V、電流定格は75AまでのSBDを製品化している。

現状のSiC-SBDはSiCウェーハ及びエピタキシャル層に存在する欠陥のため大面積化が難しい。そのため、300Aレベルの電流定格ラインアップがあるSiダイオードに比べて、SiC-SBDは電流定格が小さい。当社はSiダイオード同等の電流定格を目標に、継続的にウェーハ及びエピタキシャル層の品質向上に努めている。

次にSiC-MOSFETは平面ゲート構造で、耐電圧は600V、1,200Vと3,300Vを製品化している。電流定格は100A(1,200V)が現状の最大で、SBDと同様に電流定格の向上を進めている。

図1に代表的な1,200V耐電圧のMSOFETの外観及びオン特性を示す。電流センスと温度センスを内蔵し、有効面積は1cm<sup>2</sup>である。

150℃におけるオン抵抗は8.6mΩが実現できている。図2にターンオフ動作波形を示す。SiC-MOSFETはSi-IGBTがターンオフ動作時に持つテール電流が小さいことが分かる。また、RBSOA(Reverse Bias Safety Operation Area)評価では、2,500A/cm<sup>2</sup>の電流密度が安全に遮断でき、ユニポーラデバイスの特長である強固なロバスト性を持つことを確認できている。

2.2 技術開発動向

1,200VのSBD及びMOSFETに続いて、高耐電圧化のシリーズ展開を進めている。3,300V耐電圧MOSFETでは、1,200V品と比較してエピタキシャル層の厚さ及びエピタキシャル層の比抵抗がほぼ耐圧比となる。高耐電圧デバイスのオン抵抗は、エピタキシャル層の抵抗値が支配的なことから、3,300V MOSFETのオン抵抗率は一般的に

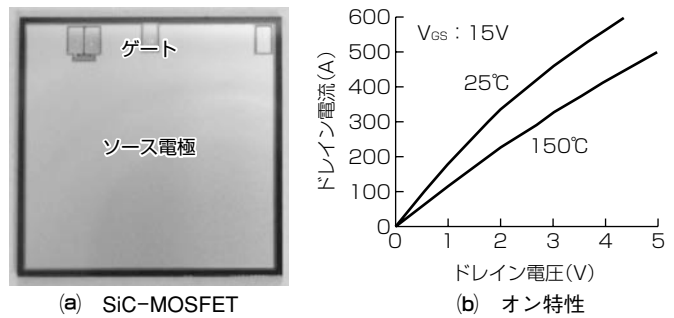


図1. 耐電圧1,200V, 有効面積1cm<sup>2</sup>のSiC-MOSFETの外観とオン特性

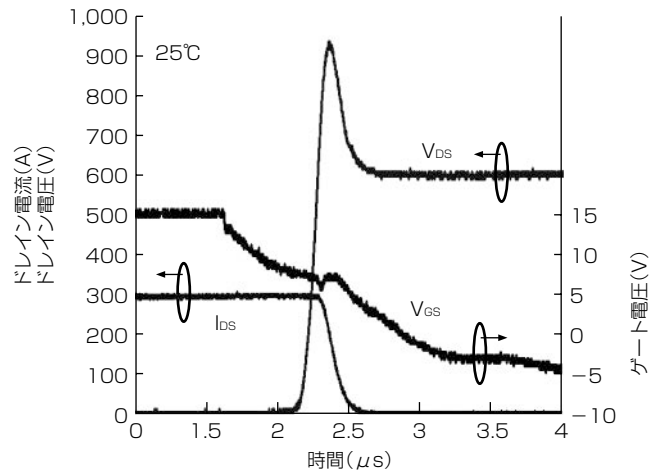
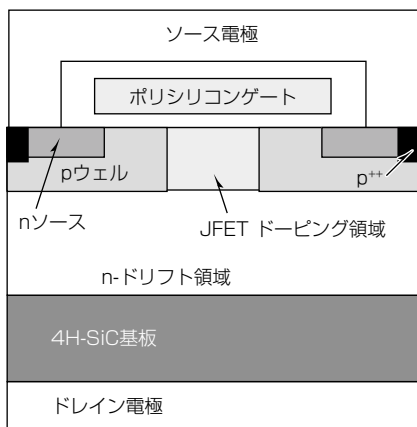


図2. 耐電圧1,200VのSiC-MOSFET(有効面積1cm<sup>2</sup>)のターンオフスイッチング動作波形

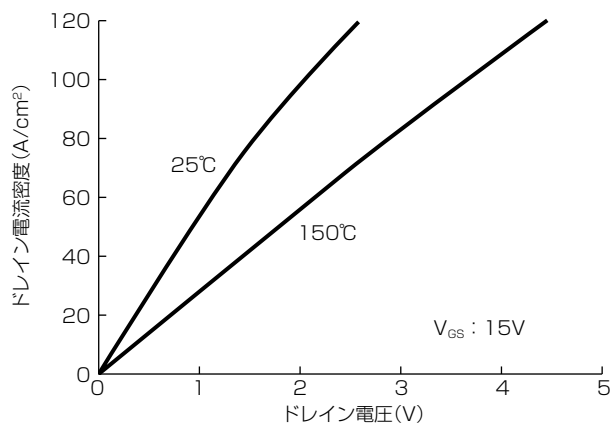
1,200V MOSFETに比較して10倍近く大きくなる。そこで、高耐電圧品はオン抵抗の低減が重要な課題となる。3,300V MOSFETでは、オン抵抗の低減のために、JFET(Junction Field Effect Transistor)部へのn型イオン注入によってJFET抵抗を低減するなどの工夫をしており、150℃におけるオン抵抗として39mΩcm<sup>2</sup>の値が得られた。これは1,200V MOSFETの5倍以下であり、未対策の場合に対して約半分のオン抵抗が達成できた。現在開発中の3,300V MOSFETの構造断面概略とオン特性、オフ特性を図3に示す。

高耐電圧MOSFETの寄生ダイオードは、通電によってオン特性が劣化するため、一般的にFWD(Free Wheeling Diode)として使用することができない。当社の3,300V SiC-MOSFETは、エピタキシャル層の高品質化によって、FWDとして使用可能とするための開発を進めており、モジュールの小型化・軽量化が実現できる見込みである。

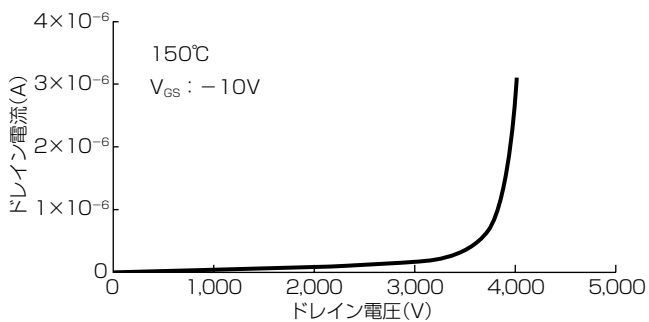
高耐電圧化と並行して、更なる低抵抗化に向けて、トレンチゲート構造のMOSFETの開発も進めている。トレンチゲート構造にすることで平面ゲート構造でのJFET部の抵抗をなくすことができ、オン抵抗に占めるJFET部の抵抗の割合が大きい600Vから1,200Vの低中電圧のMOSFETへの適用を計画している。



(a) 断面構造



(b) オン特性



(c) オフ特性

図3. 耐圧3,300VのSiC-MOSFETの断面構造とオン特性, オフ特性

### 3. SiCモジュール

#### 3.1 SiCモジュールの製品展開状況

当社は、電鉄用途向けの1,700V/1,200A Hybrid-SiCモジュール、昇降機用途向けの1,200V/1,200A Full-SiCモジュール、モータコントロール用途向けの75A/1,200V 6素子Full-SiC-IPM(Intelligent Power Module)、エアコン用途向けのHybrid-DIPIPM(Transfer Mod IPM)等を製品化し、装置の省エネルギー化と小型化・軽量化に貢献してきた。当社のSiCモジュールはSiC-MOSFETやSiC-SBD, Si-IGBT, 高速スイッチングIGBT等を自由に組み合わせることで、用途に合わせたコストパフォーマンスの高いモジュールを製品化できる特長がある。

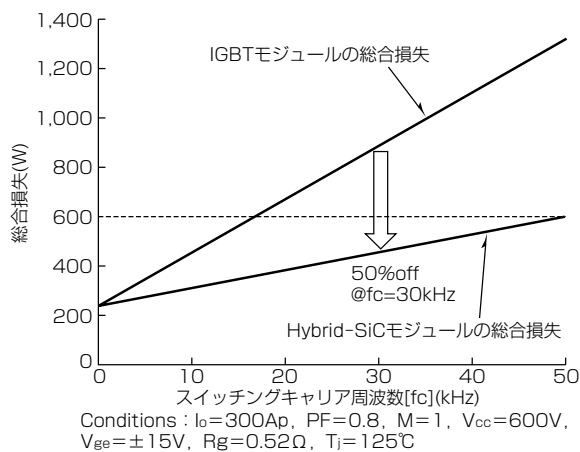


図4. モジュールの総合損失とスイッチング周波数の関係

#### 3.2 Hybrid-SiCモジュール

Hybrid-SiCモジュールは、Si-IGBTとSiC-SBDを組み合わせたモジュールで、従来のIGBTモジュール同様に使用することができる。IGBTモジュールと比較してFWDの逆回復損失とIGBTのターンオンスイッチング損失の低減ができる特長を持つ。

当社の産業用高周波モジュール“NFHシリーズ”は現状のIGBTモジュールと同じ定格電流・電圧、同じパッケージでHybrid-SiCモジュールラインアップを開発中である。そのため現行のNFHシリーズのユーザーはブスバー配線や周辺回路を変更することなくHybrid-SiCモジュールを使用することができる。Hybrid-SiCモジュールを現行のIGBTモジュールと同じ条件で使用した場合は、例えばスイッチング周波数30kHzで使用した場合、現状のIGBTモジュールに対して、Hybrid-SiCモジュールは約50%総合損失を削減することができる(図4)。この損失低減によってユーザーは冷却フィンやファンの削減による筐体(きょうたい)の小型化・軽量化が可能になる。また、別の手法として、IGBTモジュールのスイッチング周波数が17kHzの場合と、Hybrid-SiCモジュールの50kHzの場合とがほぼ同等の総合損失となることから(図4)、放熱系を維持して、高周波化による回路内のコイルなどのインダクターの小型化も可能となる。

#### 3.3 Full-SiCモジュール

Full-SiCモジュールは、SiC-MOSFETとSiC-SBDの組合せ、又はSiC-MOSFET単体を搭載したモジュールである。当社は標準的なFull-SiCモジュールと、駆動回路・保護回路等を内蔵したFull-SiC IPMをラインアップ中である。ユニポーラデバイスであるMOSFETを搭載することで、Hybrid-SiCモジュールに対して、更に損失を半分以下に低減できる。

SiC-MOSFETは多くの場合、ゲート電圧しきい値がSi-IGBTに対して小さいこと、駆動時のゲート電圧値が高いことなどから、特殊なゲート駆動回路が要求される、あるいはノイズ誤動作耐量が小さいなどの問題点があった。

当社のFull-SiCモジュールはIGBTモジュールからの切換えの容易性を考慮し、従来のIGBTモジュールと同じ駆動電圧（15V）のドライバーが継続使用可能である。

#### 4. SiCモジュール製品の応用事例

##### 4.1 Hybrid-SiCモジュールの電鉄への応用事例

当社は電鉄車両用インバータ装置に搭載されるIGBTモジュールで高いシェアを持っているが、SiCモジュールの開発、量産化でも業界をリードしている。世界初<sup>(注1)</sup>の電鉄車両用SiCモジュールは1,700V/1,200A×2素子のHybrid-SiCモジュール(図5)で、2011年10月に当社伊丹製作所で生産した世界初<sup>(注1)</sup>のSiCモジュール鉄道車両用インバータ装置に搭載した。SiC化したことによってインバータ装置は、従来装置に対して30%の損失低減と40%の体積・質量の低減に成功した。次に開発した電鉄車両用SiCモジュールは3,300V/1,500A×2素子のFull-SiCモジュールで、直流1,500V架線対応VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ装置に搭載し、現在実走試験運転を行っている。従来装置と比較して約55%の発生損失を低減、モータを含めた車両システム全体でも約30%の省エネルギーを実現した。さらに従来品比較で体積・質量ともに約65%低減している。

(注1) 2011年10月3日現在、当社調べ

##### 4.2 Full-SiCモジュールのエレベーターへの応用事例

高信頼性産業用途として、エレベーターの制御装置へのSiCモジュールの導入が進んでいる。エレベーターの制御装置は一般的に建物の最上部の機械室にモータとともに設置されることが多い。スペースや強度の関係から機械室の小型化・軽量化が要求されており、さらに省エネルギー化も重要な課題である。これらの課題をクリアするため、世界最大容量<sup>(注2)</sup>である1,200V/1,200A×2素子のFull-SiCモジュール(図6)を業界初として当社高速エレベーター制御装置に採用された。現在量産に向けたエレベーター実証実験を行っている。この用途に対してFull-SiCモジュールはパワー半導体部の電力損失を約65%低減し、さらに高周波スイッチング駆動によって電源リアクトルの小型化も可能にし、制御装置の体積と設置面積を約40%低減した。

(注2) 2013年2月現在、当社調べ

#### 5. SiCモジュールの課題と今後の応用

SiCデバイスは、Siベースのデバイスと比較して、高耐電圧でも電力損失が小さい、高温動作が可能、高速スイッチングが可能、熱抵抗が小さいなどの特性から、今後更に

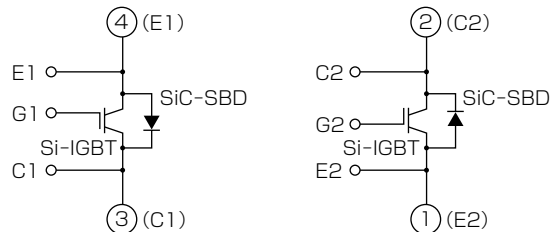


図5. 電鉄車両用Hybrid-SiCモジュール1,700V/1,200A×2素子

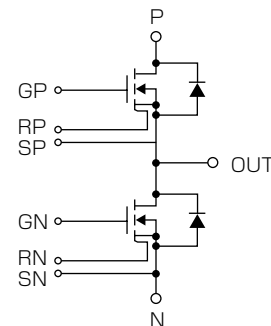
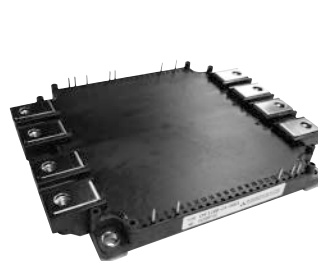


図6. 高信頼性産業用Full-SiCモジュール1,200V/1,200A×2素子

応用範囲の拡大が期待される。高耐電圧、低電力損失の特性を生かした電力送電用途や鉄道用途への応用、高速スイッチング性能を生かした医療用電源装置、太陽光パワーコンバータ装置への応用は既に進んでいる。

さらに、高温動作の特性を生かすには、チップの高温化に合わせたパッケージ技術の進歩が欠かせない。ここでも当社は先行した技術を持ってチップの高温化に対応する計画である。それぞれの要素技術は既に一部では量産化しており、次世代のSiCモジュールへの採用を計画している。

#### 6. む す び

当社は長年培ってきたウェーハ技術とパッケージング技術を融合させ、SiCモジュールの更なる性能改善を行うことでパワーエレクトロニクスの省エネルギー化に貢献し、低炭素社会、持続可能な社会の実現に貢献していく。

本稿の内容は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究成果の一部を活用している。