

ワイドギャップ半導体パワーデバイス導入による高効率かつ小型・軽量の電力変換装置の開発 (省エネに貢献するグリーンエネルギー対応新型電源装置の開発)

電子情報科 研究員 中川 豪
 研究企画課 課長 兵頭 竜二
 長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 科長 阿部 久雄
 長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 主任研究員 山口 典男

近年、電気エネルギーを効率良く利用する省エネ技術の推進、太陽光・風力・水力といった再生可能エネルギーの活用など、省エネルギーと環境に配慮したグリーンイノベーションといわれる技術開発が求められている。こうした動きに応えるため、当センターではパワーエレクトロニクスに関する研究開発に着手した。パワーエレクトロニクス分野は、電力用の半導体デバイス(パワーデバイス)を用いて、電力変換・蓄電・送電・電力機器の制御を行う技術分野である。応用範囲は電気自動車や省エネ家電、IT機器、スマートハウスなどと幅広く、エネルギーを有効に利用(省エネ化)するための重要な技術である。本研究では、超低消費電力(超低損失)、高耐圧、高速・高温動作性など優れた特性を持つSiC^[1,2](シリコンカーバイド)パワーデバイスを県内に先行導入し、エネルギー使用効率が高くコンパクトな電力変換装置の実現を目指している。

本研究開発の初年度である平成25年度は、SiCパワーデバイス導入前の予備検討として、Siパワーデバイスを用いた双方向DC-DCコンバータの設計・試作・評価を行った。また、パワーデバイス部で発生する損失および熱に関するシミュレーション解析を実施し、SiC導入効果について検証した。

1. 緒言

電力変換装置(コンバータ、インバータ)の変換効率を低下させる主な要因は、パワーデバイスで発生する損失である。現在はSi(シリコン)を基板材料としたパワーデバイスが主流だが、低損失化(高効率化)には材料物性的に限界が見え始めている。そこで、SiCやGaN^[3](ガリウムナイトライド)、ダイヤモンド^[4]といったワイドギャップ半導体と呼ばれる次世代の電力用半導体を導入することでこの損失を極限まで低減し、省エネ化を一層推進することが望まれている。

表1に、SiとSiCの代表的な物性値を示す。六方晶の4H-SiCは、Siに比べて禁制帯幅が3倍、絶縁破壊電界が約10倍と大きく、また、電子飽和速度は2倍、熱伝導率は3倍以上の物性値を持っている。そのため、超低損失、高耐圧、高速・高周波動作性、高温動作性など、パワー半導体としてSiよりも優れた性能を有している。SiCパワーデバイスを導入した各種電力変換装置は、大手電機メーカーや半導体メーカー、国主導の大型プロジェクト(大学・公的機関等)で研究・開発され量産化も進んでいる。一方、県内企業では自社製品に対するSiC導入への強いニーズはあるものの、今のところ主にコストと技術的な問題でその導入には至っていない。

そこで本研究では、SiCパワーデバイスを県内に先行導入し、最適動作させるための回路方式および制御技術を開発することで、エネルギー使用効率が高くコンパクトな電力変換装置の実現を目指している。研究事業の1年目となる平成25年度は、①回路方式の検討

として、充放電が可能な双方向DC-DCコンバータの設計・試作・評価、②SiC導入効果の検証として、電源回路シミュレータによるパワーデバイスの損失および熱解析に取り組んだ。

表1. SiとSiCの物性値の比較

	Si	4H-SiC
禁制帯幅(eV)	1.1	3.3
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.3	2.8
電子飽和速度(cm/s)	1.0	2.2
熱伝導率(W/cmK)	1.5	4.9

2. 双方向 DC-DC コンバータ

2.1 回路設計および試作

設計した双方向 DC-DC コンバータの回路図を図1(a)に、試作機の写真を図1(b)に示す。電力容量は30Wで、スイッチング周波数を40kHz、インダクタンスを625μHと設定した。使用したパワーデバイスは、Si-MOSFET(A社製)およびSi-FRD(B社製)である。降圧用のSi-MOSFETと昇圧用のSi-FRD、また、昇圧用のSi-MOSFETと降圧用のSi-FRDをそれぞれ並列に接続しており、入出力を入れ換えることで、24V⇔48V(デューティ比:50%)の昇圧および降圧の双方向な電力変換が可能となるよう設計した。入出力キャパシタンスも同様に、昇圧時と降圧時で入れ換わり、それぞれ680μF、990μFと設定した。

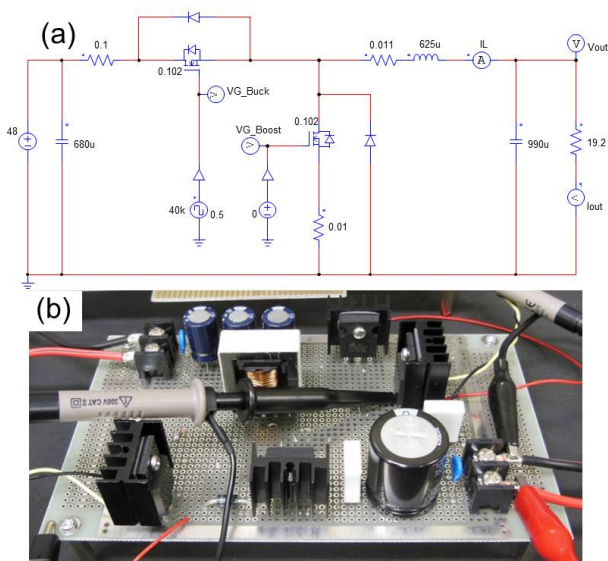


図 1. 双方向 DC-DC コンバータの (a)回路図、および (b)試作機

2.2 特性評価

試作した双方向 DC-DC コンバータにおいて、制御回路を付加せずに開ループで評価を行った。入出力特性の実測値(■ : 昇圧, ● : 降圧)とシミュレーション結果(実線)を図 2 (a)に、また、負荷電流を変化させた場合の変換効率の測定結果を図 2 (b)にそれぞれ示す。測定時には、駆動回路で生成した 15V のパルス電圧を Si-MOSFET のゲート端子に入力している。

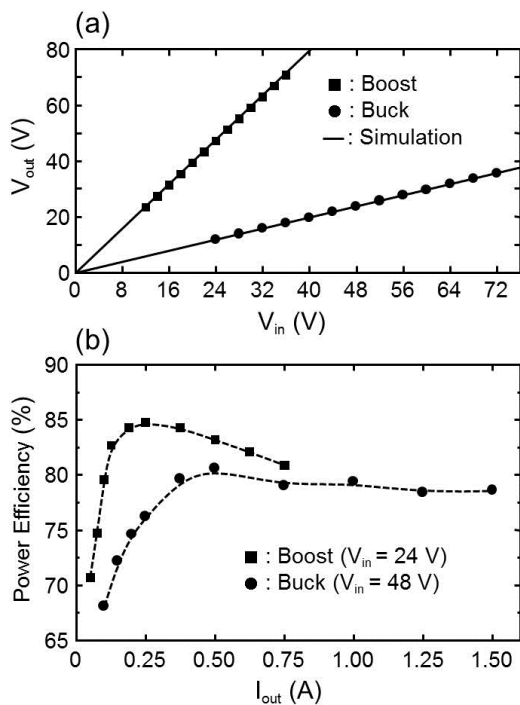


図 2. (a) 入出力特性、(b) 変換効率の負荷特性

図 2 (a) の横軸は入力電圧、縦軸は出力電圧であり、負荷抵抗を昇圧時 : 76.8Ω 、降圧時 : 19.2Ω で固定し、定格入力電圧値の 50%~150% まで変化させた場合の出力電圧を測定している。これより、昇圧動作・降圧動作のいずれにおいてもシミュレーションどおりの結果が得られており、双方向 DC-DC コンバータとして設計どおり機能していることが分かる。

図 2 (b) の横軸は負荷電流、縦軸は変換効率であり、入力電圧を昇圧時 : 24V、降圧時 : 48V で固定し、電子負荷装置を用いて負荷率を 8%~120% まで変化させた場合の入力電流および出力電圧を測定して、変換効率を算出している。昇圧動作・降圧動作ともに負荷率 : 40% で最大効率が得られており、昇圧時は約 85%、降圧時は約 81% となった。Si パワーデバイスを使用した同様の回路方式による双方向 DC-DC コンバータ(電力容量 : 1kW 程度、制御回路ありの閉ループ)では、変換効率が約 80% となる。一方、図 1 (b) の試作機は電力容量が 30W と小さいため最大効率は 90% を上回るものと考えられるが、開ループで動作させていることを考慮すれば妥当な値といえる。

出力電圧波形からリップル電圧を測定した結果、設計値(出力電圧の 1.5%)に対して実測値は 1.7% であったため、試作機において平滑回路の定数を再度見直し、回路設計に反映させる。

3. 損失および熱のシミュレーション解析

SiC パワーデバイスの導入効果を検証するために、パワーデバイス部で発生する電力損失および熱に関するシミュレーション解析を実施した。SiC-SBD (A 社製) と Si-FRD (A 社製および B 社製) のデータシートを基にシミュレーション用のデバイスモデルを構築し、それらを用いて電力容量 : 1.2kW の降圧形 DC-DC コンバータ(図 3)を設計した。解析に使用した電源回路シミュレータでは、パワーデバイスの導通損失とスイッチング損失を個別に解析可能であり、さらにパワーデバイスの温度上昇もシミュレーションすることができる。SiC と Si との比較はパワーダイオードで行い、パワー MOSFET には A 社製の Si-MOSFET を使用した。周囲温度を 25°C に設定し、スイッチング周波数を 40、80、150kHz の 3 条件で変化させた。各周波数に応じて、インダクタンスおよび入出力キャパシタンスの値を最適化している。また、SiC-SBD については、リカバリー電流がほとんど発生しないことを考慮し、スイッチング損失をゼロとしている。

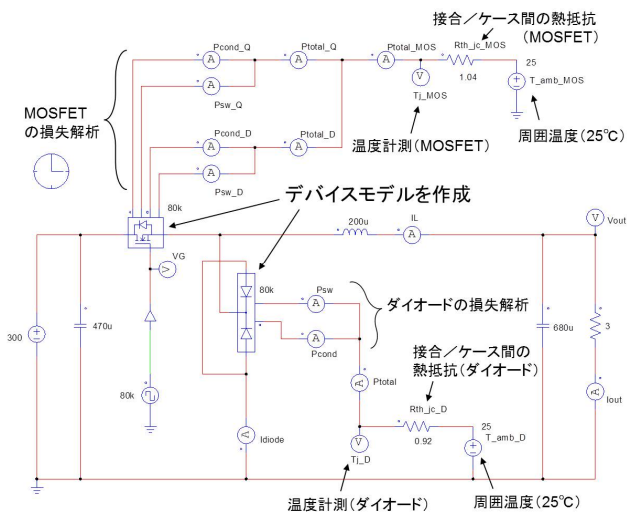


図3. 損失および熱解析用のシミュレーション回路

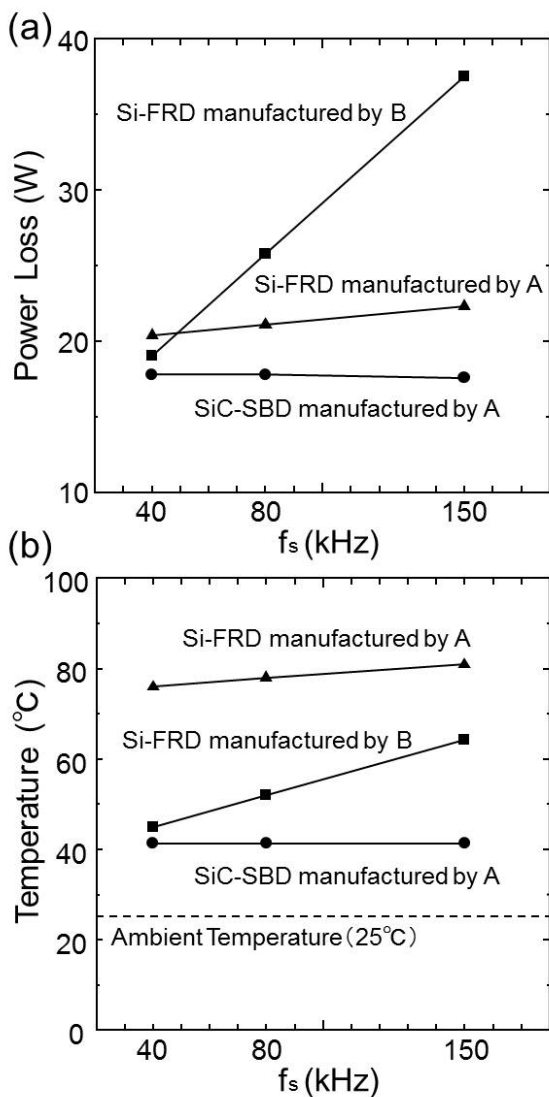


図4. (a) 電力損失および(b) 熱のスイッチング周波数依存性のシミュレーション結果

図3の回路において、パワーデバイス部で発生する損失(導通損失+スイッチング損失)と、パワーデバイスの温度上昇についてシミュレーションを行い、スイッチング周波数依存性としてまとめた結果を図4(a)および(b)にそれぞれ示す。その結果、SiC-SBDを導入した回路では、Si-FRDを用いた場合と比較して、損失の低減および温度上昇の抑制といったSiC導入効果を確認できた。また、これらの効果は高周波領域で顕著となるため、高速スイッチングが可能なSiCパワーデバイスの導入により、電力変換装置の高効率化(低損失化)だけでなく、小型・軽量化(高周波化に伴う受動部品の小型化)にも期待できる結果を得た。

4. 結 言

本研究事業1年目の平成25年度は、回路方式の検討としてSiパワーデバイスを用いた双方向DC-DCコンバータの設計・試作・評価を行い、昇圧動作・降圧動作ともにシミュレーション結果と実測結果との良好な一致を確認した。また、パワーデバイス部で発生する損失および熱に関するシミュレーション解析を実施し、SiC-SBDの導入による電力損失の低減と温度上昇の抑制について、その効果を検証できた。

本事業2年目となる平成26年度は、①SiCパワーデバイスを用いた双方向DC-DCコンバータの設計・試作・評価を実施する。また、②SiCパワーデバイスを最適動作させるために、出力電圧をデジタル信号に変換して演算処理を行い、パワーデバイスの動きを高度に調整して出力を安定化させるデジタル制御方式を確立する予定である。

参考文献

- [1] 松本寿彰、田井裕通、四戸孝：東芝レビュー Vol. 63 No. 11 (2008).
- [2] 荒井和雄：Synthesiology Vol. 3 No. 4 (2010) pp. 259-271.
- [3] 田村聡之：Panasonic Technical Journal Vol. 58 No. 1 (2012).
- [4] 茶谷原昭義、空野由明、坪内信輝、山田英明：Synthesiology Vol. 3 No. 4 (2010) pp. 272-280.